

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

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS  
DE MICROCONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO  
CIMENTO POR RESÍDUOS CERÂMICOS.

WALLACE MELO BELCHIOR

MANAUS  
2017

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

WALLACE MELO BELCHIOR

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS  
DE MICROCONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO  
CIMENTO POR RESÍDUOS CERÂMICOS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Materiais

Orientador: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho.

MANAUS  
2017

## Ficha Catalográfica

B427a Belchior, Wallace Melo  
Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas de  
Microconcretos com substituição parcial do Cimento por Resíduo  
Cerâmico. : Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas de  
Microconcretos com substituição parcial do Cimento por Resíduo  
Cerâmico. / Wallace Melo Belchior. 2017  
115 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: João de Almeida Melo Filho  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade  
Federal do Amazonas.

1. Resíduo Cerâmico. 2. Pozolanas. 3. Resistência à  
Compressão. 4. Microconcreto. I. Melo Filho, João de Almeida II.  
Universidade Federal do Amazonas III. Título

WALLACE MELO BELCHIOR

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS  
DE MICROCONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO  
CIMENTO POR RESÍDUOS CERÂMICOS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Aprovado em: 17 de março de 2017.**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. João de Almeida Melo Filho, D.Sc, Orientador  
Universidade Federal do Amazonas

---

Prof. Raimundo Pereira de Vasconcelos, D.Sc, Membro  
Universidade Federal do Amazonas

---

Prof. José Carlos Calado Sales Junior, D.Sc, Membro  
Universidade Federal do Amazonas

*“Busquei ao Senhor, e ele me respondeu, e  
de todos os meus temores me livrou”.*

*Salmo 34.4*

*“Ponha sua vida nas mãos do SENHOR,  
confie nele, e ele o ajudará”.*

*Salmo 37.5*

*“Com a sabedoria se edifica a casa, e com  
entendimento ela se estabelece”.*

*Provérbios 24.3*

*“O sábio é mais poderoso do que o forte; e  
o inteligente do que o que possui a força”.*

*Provérbios 24.5*

## ***AGRADECIMENTOS***

A **DEUS**, pelo dom da vida, pela força e pelos caminhos que me conduziram até aqui.

Ao **Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho**, pela confiança e orientação deste trabalho.

A minha família, em especial à minha **mãe, Eluila Melo Belchior**, por acreditar em mim e incentivar-me nas horas difíceis. Sem a presença constante daquela que é minha fortaleza, com certeza teria caído ao longo destes anos de estudo.

Ao **meu pai (in memoriam), Wilson Vieira Belchior**, não poder contemplar fisicamente este momento, mas lá do alto junto de DEUS, tenho certeza de estar orgulhoso desta vitória conquistada.

Aos meus irmãos, **Wilson Jr, Willyams Melo Belchior, Willene Melo Belchior, Willayne Melo Belchior**, pelo apoio e pela compreensão neste período de estudos.

A todos os meus **professores, doutores** do programa PPGEC/UFAM, que tiveram a paciência de ensinar com sucesso.

Ao meu primo, **Prof. Dr. Milton Melo**, pela força, confiança e incentivo nessa pesquisa.

A minha prima, **Engenheira Railma Moraes**, pelo incentivo no início do estudo de pesquisa.

À Empresa Usemix Concreto e Fundações Ltda, na pessoa do **Engenheiro Américo Reis** e do **Engenheiro Danilo Oliveira**, pelo suporte e pelas informações preliminares na condução dos usos de aditivos na amostra e na produção dos materiais.

À Empresa Indústria Cerâmica Miranda Correa, na pessoa do **Sr. Roberto e do Sr. Gilberto Barros**, pelo fornecimento do resíduo cerâmico e de informações sobre o material.

À Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), na pessoa do **Sr. Néllisson** e dos **técnicos, Engenheira Lorena e Senhor Paulo Melo**, pela ajuda na realização dos ensaios de Granulometria a laser, DRX e Florescência de raios X realizada no Laboratório de Análises Minerais (LAMIN), na cidade de Manaus-AM.

Aos técnicos do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), na pessoa dos **Senhores Jorge e Nilson**, pelo palpite e apoio nos ensaios das amostras.

Aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFAM, na pessoa dos **Senhores Reinaldo e Zeca**, pelo apoio dados nos ensaios das amostras.

Ao técnico do Laboratório físico-química **Senhor Rosinaldo** pelo apoio nos ensaios de TG/DTG dos materiais.

Aos colegas de curso, pela amizade e apoio, em particular, às engenheiras **Daiana Cavalcante, Cintya Marques, Viviane Magalhães, Gêssica Zilá** e o engenheiro **Paulo Gonçalves**.

À **FAPEAM – Fundo de Amparo e Pesquisa do Estado do Amazonas**, pelo apoio financeiro.

A todas as pessoas que conheci no decorrer do curso, como alunos (as), funcionários (as) e todos os que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para que o sucesso fosse alcançado.

**MUITO OBRIGADO!**

## ***RESUMO***

O cimento é o segundo produto mais consumido no mundo, perdendo apenas para a água. Esse motivo tem levado vários pesquisadores a buscarem novos materiais que possam substituir parcialmente o uso do cimento, com menor custo e menor impacto ao meio ambiente. O aproveitamento de resíduos industriais como o resíduo cerâmico (RC) em substituição parcial ao cimento Portland (CP) na produção de pastas, argamassas e concretos, reduz o custo da matéria prima, além de poder contribuir com o meio ambiente, visto que cada tonelada de CP gera uma tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que é liberado na atmosfera. Desta maneira, o RC pode ser aproveitado como matéria prima na construção civil, minimizando o impacto ambiental e de forma sustentável gerando emprego e renda para as comunidades do Polo Cerâmico. Neste contexto, um programa experimental foi implementado para avaliar diferentes teores de RC (0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%) na substituição parcial do cimento Portland na produção de microconcreto. Ensaio físicos (massa específica, granulometria, difração de raio X e termogravimetria TG/DTG) e químico (fluorescência de raios X) foram utilizados na caracterização do RC e do CP e ensaios mecânicos (compressão axial aos 7, 14 e 28 dias) na caracterização dos microconcretos. Os resultados indicaram que o RC apresentou propriedades pozolânicas de acordo com a norma NBR 12653:2014 e que os microconcretos produzidos com o teor de 30% de RC apresentaram a maior redução do teor de hidróxido de cálcio (cerca de 62%) e melhores propriedades mecânicas, com resistências da ordem de 55,63 MPa e 62,00 MPa aos 14 e 28 dias, respectivamente. Tais resultados apontam o potencial do RC como material pozolânico na produção de microconcretos.

**Palavras-chave:** resíduo cerâmico, pozolanas, resistência à compressão, microconcreto.

## ***ABSTRACT***

Cement is the second most consumed product in the world, it lost only to water. This motive has led several researchers to seek new materials that can partially replace the use of cement, with lower cost and less impact on the environment. The use of industrial waste such as ceramic waste (CW) in partial replacement of Portland cement (PC) in the production of pastes, mortars and concretes, reduces the cost of the raw material, besides being able to contribute to the environment, since each ton of PC produces a tonne of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) that is released into the atmosphere. In this way, the CW can be used as raw material in civil building, minimizing the environmental impact and in a sustainable way generating employment and income for the communities of the Ceramic Polo. In this context, an experimental program was implemented to evaluate different levels of CW (0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50%) in the partial replacement of Portland cement. Physical tests (specific mass, particle size, X-ray diffraction and TG / DTG thermogravimetry) and chemical tests (X-ray fluorescence) were used to characterize CW and PC and mechanical tests (axial compression at 7, 14 and 28 days) in microconcrete characterization. The results indicated that the CW had pozzolanic properties according to the norm NBR 12653: 2014 and that the microconcretes produced with the content of 30% CW showed the highest reduction of the calcium hydroxide content (about 62%) and better properties mechanics, with strenght of the order of 55.63 MPa and 62.00 MPa at 14 and 28 days, respectively. These results point out the potential of CW as pozzolanic material in the production of microconcretes.

**Key words:** ceramic residue, pozzolans, compressive strength, microconcrete.

## ***LISTA DE FIGURAS***

Figura 1.1 (a) Resíduo Ceramico; (b) tamanho do RC em sua forma original descartado.....	21
Figura 3.1 Organograma de ensaios realizados no programa experimental .....	49
Figura 3.2 (a) Resíduo cerâmico e (b) resíduo depois de triturado e moído .....	51
Figura 3.3 (a) quebra manual do RC; (b) Moinho de Bolas Mod Quimis. ....	54
Figura 3.4 (a) Esferas para moinho de bolas e (b) Resíduo moído nº 100 (0,150 mm). ....	55
Figura 3.5 Picnômetro a gás (hélio). ....	588
Figura 3.6 Analisador Mastersize, 2000. ....	59
Figura 3.7 Equipamento SDT Q600 TA Instruments. ....	61
Figura 3.8 (a) Amostra RC no dessecador; (b) Dessecador de vidro. ....	62
Figura 3.9 Difratorômetro raios X Mod X'Pert PANalytical. ....	63
Figura 3.10 (a) Máquina de fusão em funcionamento; (b) Máquina de fusão tempo de resfriamento.....	65
Figura 3.11 (a) Espectrômetro WDS Mod Axios Minerals; (b) Análise das amostras.....	66
Figura 3.12 (a) Misturador Industrial; (b) Funil de Marsh; (c) Proveta com 1 litro de mistura. ....	68
Figura 3.13 Batedeira Planetária BP 05 SL Marca Gastromaq.....	70
Figura 3.14 (a) Fluidez pasta RC; (b) Fluidez pasta CPI S; (c) Leitura RC; (d) Leitura CPI S.....	71
Figura 3.15 (a): Massa em ebulição; (b) Balança hidrostática.....	75
Figura 3.16 (a) Equipamento Mod EMIC DL, 200 kN; (b) Corpo de prova. ....	76
Figura 3.17 Tubo cilíndrico de PVC (41 x 82 mm). ....	77

Figura 4.1 Curva granulométrica do CP I S e do RC.....	80
Figura 4.2 Curva granulométrica da areia pelo método de quarteamento. ....	82
Figura 4.3 Curva TG/DTG para as pastas cimentícias.....	864
Figura 4.4 Resultado da difração de raios X.....	906
Figura 4.5 Compatibilidade do aditivo SP Glenium 51. ....	89
Figura 4.6 Gráfico com o ponto de saturação do CPI S pelo Mini Kantro. ....	962
Figura 4.7 Resultados de compressão axial nas idades 7, 14 e 28 dias.....	96
Figura 4.8 Padrão de fissuração dos concretos com: (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, (e) 40% e (f) 50%.....	98

## ***LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS***

ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM.....	American Society for Testing and Materials
ABCP.....	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACI.....	American Concrete Institute
A.....	Absorção
a/c.....	Fator água/cimento
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	Alumina
CaO.....	Óxido de Cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub> .....	Hidróxido de Cálcio
CO <sub>2</sub> .....	Dióxido de Carbono
CO <sub>3</sub> .....	Carbonato
COPPE.....	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CP I.....	Cimento Portland Comum
CAD.....	Concreto de Alto Desempenho
CONAD.....	Concreto de Altíssimo Desempenho
CAR.....	Concreto de Alta Resistência
CPR.....	Concretos de Pós-Reativos
CPRM.....	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CP's.....	Corpos de Provas
C-S-H.....	Silicato de Cálcio Hidratado
C-A-H.....	Aluminato de Cálcio Hidratado

CH.....	Hidróxido de Cálcio
CV.....	Coeficiente de Verificação
EPUSP.....	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EMUSP.....	Empresa Municipal de Urbanização de São Paulo
Fe.....	Ferro
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	Óxido de Ferro
FT/UFAM.....	Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas
Fck.....	Resistência características
GFRC.....	Glass Fiber Reinforced Concrete
g/cm <sup>3</sup> .....	Grama por centímetro cúbico
g.....	Grama
H <sub>2</sub> O.....	Água
ICDD.....	International Center dor Diffraction Data
Iv.....	Índice de vazios
IPT.....	Instituto de Pesquisa e Tecnologia
ITC.....	Instituto de Tecnologia Cerâmica
ISO.....	Internacional Organization for Standardization
kV.....	Voltage
LAMIN.....	Laboratório de Análises Minerais
LCPC.....	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LEM .....	Laboratório de Ensaio de Materiais
MEC.....	Modelo de Empacotamento Compressível
MR.....	Massa de referência
MP.....	Massa de pozolana

mg.....	Miligrama
ml.....	Mililitro
M <sub>s</sub> .....	Massa seca
M <sub>sat</sub> .....	Massa saturada
M <sub>i</sub> .....	Massa da amostra saturada após fervura
MgO.....	Magnésia
MPa.....	Mega Pascal
Na <sub>2</sub> O.....	Álcalis
NaOH.....	Hidróxido de Sódio
NBR.....	Norma Brasileira Regulamentadora
NM.....	Norma Mercosul
PDF.....	Powder Diffraction File
ρ.....	Massa específica
ρ <sub>s</sub> .....	Massa específica da amostra seca
ρ <sub>sat</sub> .....	Massa específica da amostra saturada
ρ <sub>r</sub> .....	Massa específica real
PPGEC.....	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
RC.....	Resíduos Cerâmicos
rpm.....	Rotação por minuto
SiO <sub>2</sub> .....	Sílica
SO <sub>3</sub> .....	Sulfatos
SP.....	Superplastificantes
μm.....	Micrômetro
SD.....	Desvio Padrão

Ton..... Toneladas

UFAM..... Universidade Federal do Amazonas

UFRJ..... Universidade Federal do Rio de Janeiro

X..... Média

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Classe de Concreto Alto Desempenho (CAD).....	41
Tabela 3.1 Característica do aditivo superplastificante.....	52
Tabela 3.2 Ficha padrão de identificação em banco de dados do resíduo cerâmico .....	64
Tabela 3.3 Resumo quantitativo de materiais para a produção da dosagem (Produto: <b>Glenium 51</b> , 3ª geração).....	69
Tabela 3.4 Dosagem de compatibilidade e seus respectivos percentuais de misturas. ....	72
Tabela 3.5 Proporção e consumo dos materiais utilizados no programa experimental.....	73
Tabela 4.1 Teor de Sólido do Aditivo SP. ....	79
Tabela 4.2 Massa específica do cimento CPI S, do (RC) e da Areia. ....	79
Tabela 4.3 Dados da Granulometria a laser do CP I S e do RC.....	81
Tabela 4.4 Granulometria do agregado miúdo (areia). ....	82
Tabela 4.5 Tempo de moagem do RC.....	83
Tabela 4.6 Valores de perda e redução do hidróxido de cálcio para as pastas no ensaio de TG/DTG .....	85
Tabela 4.7 Composição Química do RC e do CP I S (% em massa).....	87
Tabela 4.8 Leitura da pasta do cimento fluida nos tempos 5, 30 e 60 minutos. ...	91
Tabela 4.9 Propriedades físicas dos microconcretos com respectivos Desvio Padrão entre parênteses. ....	93
Tabela 4.10 Valores médios da resistência a compressão com seus respectivos desvios padrão (SD) e coeficientes de variação (CV%). ....	94

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	21
1.2	OBJETIVOS	22
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>24</b>
<b>2.1</b>	<b>PRODUTOS DE CIMENTO PORTLAND</b>	<b>24</b>
2.1.1	MATERIAIS QUE CONSTITUEM OS MICROCONCRETOS	24
2.1.2	PROPRIEDADE DO MICROCONCRETO NO ESTADO FRESCO	26
2.1.3	PROPRIEDADES DO MICROCONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	28
<b>2.2</b>	<b>USO DE POZOLANAS EM MICROCONCRETO DE CIMENTO PORTLAND</b>	<b>29</b>
2.2.1	PROPRIEDADES DE POZOLANAS USADAS EM MICROCONCRETOS	31
2.2.2	INTERAÇÕES ENTRE A POZOLANA E O CIMENTO PORTLAND	32
2.2.3	EFEITO DA POZOLANA NAS PROPRIEDADES DO MICROCONCRETO	35
2.2.4	RESÍDUO CERÂMICO COMO POZOLANAS	36
2.2.5	BENEFÍCIOS DO USO DE POZOLANAS NA DURABILIDADE DO CONCRETO	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
<b>2.3</b>	<b>DOSAGEM DOS CONCRETOS</b>	<b>40</b>
2.3.1	MÉTODO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC)	42
2.3.2	MÉTODO DE REPETTE-MELO (2005)	43
2.3.3	MÉTODO DE TUTIKIAN (2004)	433
2.3.4	MÉTODO DE GOMES, GETTU E AGULLÓ	45
2.3.5	MÉTODO DE DOSAGEM DA ABCP	455
2.3.6	MÉTODO DO IPT/EPUSP	46
2.3.7	MÉTODO DO IBRACON	477

<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>49</b>
<b>3.1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b>	<b>49</b>
<b>3.2</b>	<b>MATERIAIS</b>	<b>50</b>
3.2.1	<i>CIMENTO PORTLAND</i>	50
3.2.2	<i>RESÍDUO CERÂMICO (RC)</i>	50
3.2.3	<i>AREIA</i>	51
3.2.4	<i>ÁGUA</i>	522
3.2.5	<i>ADITIVO</i>	52
<b>3.3</b>	<b>MÉTODOS</b>	<b>53</b>
<b>3.3.1</b>	<b>PROCESSAMENTO DO RESÍDUO CERÂMICO</b>	<b>53</b>
<b>3.3.2</b>	<b>ENSAIOS FÍSICOS</b>	<b>55</b>
3.3.2.1	<i>Ensaio do Teor de Sólido do Aditivo</i>	55
3.3.2.2	<i>Ensaio de Massa Específica</i>	577
3.3.2.3	<i>Ensaio de Granulometria de difração a laser</i>	58
3.3.2.4	<i>Ensaio de Termogravimetria das Pastas Cimentícias</i>	59
3.3.2.5	<i>Difratometria de raios X</i>	62
<b>3.3.3</b>	<b>ENSAIOS QUÍMICOS</b>	<b>64</b>
3.3.3.1	<i>Espectrometria de Fluorescência por raios X</i>	64
<b>3.3.4</b>	<b>ENSAIOS REOLÓGICOS</b>	<b>66</b>
3.3.4.1	<i>Ensaio de Compatibilidade e Ponto de Saturação</i>	67
	• Ensaio do Funil de Marsh	67
	• Ensaio do Miniabatimento de Kantro	69
<b>3.3.5</b>	<b>ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICA DOS MICROCONCRETOS</b>	<b>72</b>
3.3.5.1	<i>Ensaio de Absorção de Água por Imersão do Microconcreto</i>	72
3.3.5.2	<i>Ensaio de Compressão Axial</i>	766
3.3.5.3	<i>Análise do Processo de Fratura dos Microconcretos</i>	788
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>79</b>
<b>4.1</b>	<b>PROPRIEDADES FÍSICAS</b>	<b>79</b>

4.1.1	<i>TEOR DE SÓLIDOS DOS ADITIVOS</i> .....	79
4.1.2	<i>MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO E DO RESÍDUO</i> .....	79
4.1.3	<i>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO CP I S, RC E AREIA</i> .....	80
4.1.4	<i>INFLUÊNCIA DO TEMPO DE MOAGEM DO RC</i> .....	83
4.1.5	<i>ANÁLISE DE TERMOGRAVIMETRIA DA PASTA CIMENTÍCIA – TG/DTG</i> .....	83
4.1.6	<i>DIFRATROMETRIA DE RAIOS X DO RC.</i> .....	86
<b>4.2</b>	<b><i>PROPRIEDADES QUÍMICAS</i></b> .....	<b>87</b>
4.2.1	<i>ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X DO RC E DO CP I S.</i> .....	87
<b>4.3</b>	<b><i>PROPRIEDADES REOLÓGICOS</i></b> .....	<b>89</b>
4.3.1	<i>COMPATIBILIDADE E PONTO DE SATURAÇÃO ENTRE O ADITIVO E O CIMENTO CP I S (FUNIL DE MARSH).</i> .....	89
4.3.2	<i>COMPATIBILIDADE E PONTO DE SATURAÇÃO ENTRE O ADITIVO E O CIMENTO CP I S (MINI KANTRO).</i> .....	911
<b>4.4</b>	<b><i>PROPRIEDADE FISICAS E MECÂNICAS DOS MICROCONCRETOS</i></b> .....	<b>933</b>
4.4.1	<i>ABSORÇÃO TOTAL, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA DOS MICROCONCRETOS.</i> 93	
4.4.2	<i>COMPORTAMENTO MECÂNICO DO MICROCONCRETO.</i> .....	94
4.4.3	<i>ANALISE DO PROCESSO DE FRATURA DOS MICROCONCRETOS</i> .....	977
<b>5</b>	<b><i>CONCLUSÕES</i></b> .....	<b>100</b>
	<b><i>SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</i></b> .....	<b>101</b>
	<b><i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i></b> .....	<b>102</b>

## ***1 INTRODUÇÃO***

O consumismo e aumento da produtividade, aliado ao crescimento populacional, a redução da quantidade de material descartado aleatoriamente causa impacto ambiental, devido a grande oferta de material produzido sem um destino final adequado por falta de políticas públicas.

Com a grande procura de matéria prima para a indústria da construção civil, pesquisadores como Formagini (2005), Cordeiro (2006), Lima (2009), dentre outros, estão cada vez mais buscando alternativas para o uso de novos materiais que causem menos impacto ao meio ambiente. Nesse sentido, as alternativas estão voltadas para o aproveitamento de resíduos, oriundos da própria indústria da construção civil e de outros segmentos da economia. Para tanto, é necessário um estudo minucioso das características físico-químicas e mecânicas dos materiais a serem utilizados.

A alternativa no uso de agregados não convencionais torna-se importante do ponto de vista social e econômico, gerando atividades de aproveitamento de resíduos, empregados na própria construção. Dentre esses, destacam-se os resíduos cerâmicos oriundos tanto do canteiro de obra, quanto do próprio processo produtivo em olarias.

Neste contexto, este estudo consiste em verificar a possibilidade de aproveitar o resíduo cerâmico (RC) para produzir concretos de alta resistência (CAR) a serem utilizadas na construção civil e/ou áreas afins, quando adicionado o resíduo como parte de substituição do aglomerante.

É sobre esta questão pertinente que reside o estudo do aproveitamento de resíduo cerâmico em substituição parcial na produção de argamassas e concretos como redutor no consumo de cimento. Esta pesquisa se justifica pela necessidade de realizar um estudo e mostrar que a adição de resíduo cerâmico é capaz de melhorar as propriedades físicas e mecânicas de microconcretos, com resistência compatível ou superior àquela produzida somente com o cimento.

Sua relevância consiste em contribuir com alternativas sustentáveis nas áreas da Engenharia Civil e do Meio Ambiente, no sentido da redução de elementos poluidores da atmosfera terrestre, assim como na consolidação de uma sociedade sustentável. Soma-se

a isso, a coleta dos resíduos descartados de forma irregular que, poderão ser utilizados de modo inteligente, gerando emprego e renda.

A maior parte destes resíduos tem destino incerto e, na maioria das vezes, ficam expostos ao meio ambiente, poluindo-o, ou acabam sendo encaminhados, quando estes têm capacidade, aos aterros sanitários urbanos. Esta situação é comum em praticamente todo o país e também em quase todo o mundo (MOREIRA, *et al.*, 2005).

A indústria da construção civil tem procurado aproveitar vários resíduos que desenvolvem reações pozolânicas quando adicionados ao cimento. Vários estudos têm sido realizados com resíduos e com argilas calcinadas (GONÇALVES, 2005).

Na literatura Tutikian & Helene (2011), explicam que, atualmente no Brasil, são produzidos cerca de 20 milhões de m<sup>3</sup> de concreto/ano em Centrais de Concreto, denominadas Empresas de Serviços de Concretagem. Os autores informam que, uma economia de 5 kg de cimento por m<sup>3</sup>, proporcionada por uma melhor dosagem, poderia acarretar uma redução da emissão de 100.000ton de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) à atmosfera, assim como uma redução de agregados por aumento de resistência mecânica do concreto pode representar milhares de toneladas de economia de recursos naturais.

Segundo Zampieri (1993), quanto a viabilidade econômica, as vantagens da utilização de pozolana não se limitam apenas pela utilização de um material de menor custo em relação ao clínquer. Outros ganhos estão relacionados a esta prática como o prolongamento da vida útil das jazidas de calcário e o aumento da produtividade nas indústrias cimenteiras.

A construção civil é um setor da atividade tecnológica que consome grande volume de recursos naturais, o que impulsionou a geração de várias pesquisas com o objetivo de verificar a utilização de diversos resíduos, os quais, em geral, são adicionados à composição do concreto em substituição de parte do cimento Portland, visando à melhoria de algumas de suas propriedades (EVANGELISTA, *et al.*, 2006). Os autores explicam ainda que, a reutilização de um resíduo não deve ser feita em torno de idéias preconcebidas, mas em função das características do resíduo. Em geral, tais aplicações são aquelas que melhor aproveitam suas características físico-químicas com menor impacto ambiental dentro de um segmento de mercado específico, no qual o produto reciclado tem boas condições de competição em relação ao produto convencional.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A escolha do resíduo cerâmico como pozolana, deve-se principalmente à disponibilidade desse material na região metropolitana de Manaus, no polo ceramista de Iranduba-AM, oriunda da quebra e do acúmulo de sedimentos na superfície de forma irregular, contaminando o meio ambiente (Fig 1.1 (a) e (b)). Além disso, o presente trabalho consiste em uma proposta para o aproveitamento deste material, que seria descartado na natureza e, de forma sustentável, será reaproveitado e aplicado em um destino que beneficiará a sociedade, gerando emprego e renda.

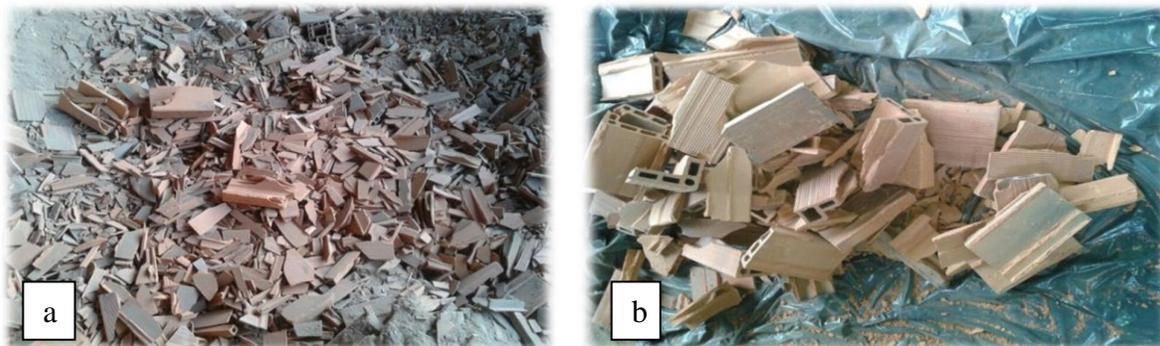


Figura 1.1 (a) Resíduo Cerâmico; (b) Tamanho RC em sua forma original. descartado.

Fonte: Autor

A ideia é mostrar que a adição de resíduo cerâmico (RC) como pozolana em substituição parcial do cimento, é capaz de produzir um novo material (microconcretos) com resistência compatível ou superior a usada comercialmente na cidade de Manaus-AM que, contribua de forma positiva com o meio ambiente, haja vista que o cimento é um dos maiores poluidores da atmosfera terrestre.

## **1.2 OBJETIVOS**

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a utilização de diferentes teores de resíduo cerâmico (0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%) em substituição parcial ao cimento Portland na produção de microconcretos para utilização na construção civil.

Como objetivos específicos têm-se:

- Produzir um material com características pozolânicas a partir de resíduos cerâmicos (RC) de olarias do Polo Cerâmico de Iranduba/AM; da região metropolitana de Manaus/AM;
- Caracterizar física e quimicamente os constituintes do microconcreto a ser produzido;
- Caracterizar o microconcreto produzido através dos ensaios reológicos e mecânicos;
- Avaliar o efeito dos teores de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de resíduo cerâmico em misturas cimentícias com relação às propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido do microconcreto.

## **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

### **. Capítulo 1 – Introdução**

Apresenta a motivação que originou o estudo, a importância da pesquisa e os objetivos da pesquisa.

### **. Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica**

Neste capítulo, será apresentado uma revisão da literatura que é dedicada ao tema em questão. Nessa revisão será apresentado as propriedades do efeito de pozolanas utilizadas em matrizes cimentícias, estudos do uso do resíduo cerâmico como material pozolânico e algumas pesquisas que utilizaram o resíduo cerâmico como pozolanas para

ser utilizada na substituição do cimento, na produção dos materiais cimentícios. Também, foi explorado os ensaios físicos e mecânicos, mostrando seu desempenho quando utilizados os percentuais de substituição do cimento por resíduo cerâmico na produção do microconcreto.

. **Capítulo 3** – Procedimento experimental (Materiais e Métodos);

Neste capítulo, são descritos os parâmetros adotados para amostragem e caracterização das matérias primas e os métodos de produção dos microconcretos, bem como os métodos utilizados na caracterização das matérias primas e das misturas produzidas.

. **Capítulo 4** – Resultados e Discussões;

Apresenta os resultados e discussões dos ensaios experimentais analisados em laboratórios, referente a utilização do resíduo cerâmico como uma pozolana em substituição parcial do cimento na produção do microconcreto.

. **Capítulo 5** – Conclusão e Sugestões;

Apresenta as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 PRODUTOS DE CIMENTO PORTLAND**

#### **2.1.1 MATERIAIS QUE CONSTITUEM OS MICROCONCRETOS**

Concreto é basicamente o resultado da mistura de cimento, água, pedra e areia, sendo que o cimento ao ser hidratado pela água, forma uma pasta resistente e aderente aos fragmentos de agregados (pedra e areia), formando um bloco monolítico (BOCCHILE, C., 2003 e REVISTA TÉCHNE, 2013). Complementam ainda que, o concreto deve ter uma boa distribuição granulométrica a fim de preencher todos os vazios, pois a porosidade por sua vez tem influência na permeabilidade e na resistência das estruturas de concreto.

A proporção entre todos os materiais que fazem parte do concreto é também conhecida por dosagem ou traço, sendo que podemos obter concretos com características especiais, ao acrescentarmos à mistura aditivos, isopor, pigmentos, fibras ou outros tipos de adições. Cada material a ser utilizado na dosagem deve ser analisado previamente em laboratório, a fim de verificar a qualidade e para se obter os dados necessários à elaboração do traço como: massa específica, granulometria, etc. ((BOCCHILE, C., 2003 e REVISTA TÉCHNE, 2013).

Na literatura sobre os concretos de alto desempenho (CAD), observa-se que os agregados reciclados de concreto com 60 MPa de resistência não apresentam perdas de resistência substituindo totalmente o agregado graúdo (ANDREU e MIREM, 2014).

Argamassa é uma mistura composta basicamente por cimento, areia, cal hidratada e água, mas conforme a influência de características regionais, outros materiais têm sido utilizados na sua composição, como o saibro, o barro e o caulim, entre outros. A tecnologia das argamassas tem se desenvolvido bastante, colocando à disposição do mercado o produto ideal para cada aplicação (Site disponível do PORTAL DO CONCRETO, em 11/jan/2013).

Burak (2007) define microconcreto como um material à base de cimento de alto desempenho produzido com microagregados com tamanhos de partículas que variam, de cerca, de 0,5 mm a menos de 1 $\mu$ m.

O microconcreto é um concreto composto por aglomerantes, agregados miúdos devidamente caracterizado, fillers e aditivos que controlam o comportamento do concreto no estado plástico por conta da baixa relação água/cimento (SKOF INDIA, 2013).

Por ser composto somente por materiais finos sua porosidade é reduzida se comparada a outros concretos, se tornando menos permeável e conseqüentemente mais durável. A baixa permeabilidade lhe confere uma maior resistência à penetração de agentes agressivos como íons cloreto (BINA, 2013).

Na literatura Poggiali (2010) define microconcreto como sendo compósitos cimentícios para fins estruturais, os quais possuem em sua composição areia, cimento e água, sem adição de agregados graúdos. Complementa ainda que, na produção de compósitos cimentícios podem ser utilizadas adições de aditivos com o objetivo de conferir ao compósito propriedades especiais, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Neste trabalho o compósito cimentício obtido pela mistura de agregado miúdo, aglomerante e água, com a finalidade de aplicação estrutural será definido como microconcreto.

Taveira (2010), explica que a areia que faz parte dos materiais para produção dos microconcreto, é um bem material amplamente usado na indústria da construção civil sendo composta essencialmente por grãos de quartzo (SiO<sub>2</sub>). Sua demanda se faz em maior escala nas sedes municipais onde é geralmente extraída nos seus arredores, haja vista que seu baixo valor intrínseco não permite que seja transportada a grandes distâncias do local de consumo.

Bocchile, (2003), expressa as mil utilidades do microconcreto, onde destaca-se a produção dos pré-fabricados no Brasil, que iniciou-se a mais de 30 anos. Nas décadas de 70 e 80, houve um grande impulso no setor, reflexo direto do crescimento expressivo da indústria brasileira. O autor afirma ainda que, os novos materiais empregados para a produção de pré-fabricados de ponta: CAD (Concreto de Alto Desempenho); CPR (Concretos de Pós-Reativos), além dos materiais compósitos, como o GFRC (Concreto

Reforçado com Fibra de Vidro) são parte fundamental da evolução que vem ocorrendo há alguns anos nos países desenvolvidos.

De acordo com Araújo *et al.*, (2000), os aglomerantes são materiais ativos ligantes, em geral pulverulento, sendo sua função formar uma pasta que promova o empacotamento entre as partículas dos materiais cimentícios. São classificados, quanto seu princípio ativo em: aéreos e hidráulicos.

Aéreos: são inorgânicos, que após adicionado à água endurecem pela ação do CO<sub>2</sub> na atmosfera (Gesso e cal).

Hidráulicos: são inorgânicos que na presença de água endurecem devido as reações de hidratação, apresentando boa resistência final (cimento Portland).

Os agregados miúdos como a areia e resíduo cerâmico, quando suas granulometrias forem devidamente finas e bem divididas, junto ao cimento e na presença de água, formam um compósito com características cimentícia.

Conforme a norma brasileira NBR NM 52 (2009), agregado miúdo é todo o material passante na peneira com abertura de 9,5 mm e que sua maior parte fica retida na peneira nº 200, podendo ser usado na mistura para produção do microconcreto.

O uso de adições minerais em substituição do cimento pode incrementar a durabilidade dos materiais cimentícios devido ao aumento da resistência ao ataque por sulfatos (GONÇALVES, 2005).

### **2.1.2 PROPRIEDADE DO MICROCONCRETO NO ESTADO FRESCO**

O efeito das adições minerais em materiais cimentícios tendem a melhorar a trabalhabilidade. Isso se deve à granulometria mais fina das adições em comparação a do cimento. A melhoria na trabalhabilidade é avaliada pela redução da segregação e da exsudação (RIBAS, 2014).

A forma das partículas também pode interferir na trabalhabilidade. Partículas angulosas e de textura áspera tendem a diminuir a consistência do concreto (METHA & MONTEIRO, 2008).

Tutikian *et al.*, (2004), também observa que, para o estudo da reologia dos concretos no estado fresco, apesar de iniciados há mais de 60 anos, ainda não convenceu o meio técnico de sua efetiva utilidade. Com auxílio de computadores para processar simulações e com a colaboração científica de outras disciplinas, como, por exemplo, da física e da química, espera-se que a reologia venha demonstrar em breve uma efetiva contribuição ao desenvolvimento dos concretos e da construção civil, deixando de ficar restrita a estudos especulativos de laboratórios.

Segundo Rabelo & Garcia (2013), as propriedades pertinentes a fase de estado fresco do concreto são a trabalhabilidade e a consistência.

Fontes (2003), afirma que a trabalhabilidade está associada a dois fatores: a consistência e a coesão. A consistência descreve a fluidez do concreto enquanto a coesão descreve a resistência à exsudação e à segregação. Afirmou ainda, que a segregação acontece quando os constituintes do concreto fresco são separados de forma que a sua distribuição deixe de ser uniforme.

A consistência é a maior ou menor capacidade que o concreto tem em se deformar sob ação de sua própria massa (HELLENE & ANDRADE, 2012).

Os fatores que influenciam a consistência são: relação entre água e agregados secos, granulometria e forma dos grãos do agregado, aditivos, clima e temperatura (BAUER, 2000).

Para que a mistura se torne consistente é necessário que a dosagem seja aplicada de forma correta, evitando o desperdício de materiais. Para isso, são necessários estudos, buscando o melhor traço para que seja empregado no momento da produção da argamassa e concreto em laboratório e canteiro de obra.

O ensaio mais conhecido, que mede a consistência do concreto, é o denominado ensaio de abatimento do tronco de cone, mais conhecido como *Slump Test*.

Segundo Neville (2016), o ensaio de abatimento de tronco de cone é bastante útil na identificação de variações na uniformidade de uma mistura de determinadas proporções.

Um outro ensaio bastante utilizado por pesquisadores para avaliar a trabalhabilidade é o ensaio de miniabatimento de Kantro. Lima (2006) explica que este

ensaio avalia a eficiência de teores diversos de aditivo, na plastificação de uma pasta de cimento Portland, ou cimento com adição ou adições diversas.

Ainda segundo Lima (2006), o ensaio de mini Kantro possibilita a determinação do ponto de saturação do aditivo, sendo que adições acima deste ponto não melhoram a eficiência do aditivo na mistura. O autor cita ainda que, o ponto de saturação é evidenciado quando um aumento de 50% na dosagem do aditivo resulta em um aumento insignificante na área de espalhamento.

De acordo com Mehta & Monteiro (1994) e Fontes (2003), a exsudação é definida através do surgimento da água na superfície do concreto após o mesmo ter sido lançado e adensado antes de iniciar a pega. Devido a estes dois fenômenos (segregação e exsudação), a incorporação de partículas finamente divididas reduz o tamanho e o volume de vazios, contribuindo para uma melhora da trabalhabilidade.

A trabalhabilidade é definida como aptidão para o manuseio e é influenciada pelos seguintes fatores: tipo de mistura, transporte, lançamento, adensamento e dimensões de peças e afastamento das armaduras. Essa característica está diretamente ligada à consistência (BAUER, 2000).

Segundo a norma ACI 116R (1990) e Neville (2016), a trabalhabilidade é definida como a propriedade do concreto ou da argamassa que determina a facilidade e a homogeneidade com que podem ser misturados, lançados, adensados e acabados.

### **2.1.3 PROPRIEDADES DO MICROCONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO**

Helene & Andrade (2012), explica que a fase do concreto endurecido refere-se ao processo do início da hidratação do cimento e está em constante evolução, prolongando-se por toda a vida útil do concreto.

As adições minerais também são utilizadas para aumentar a propriedade mecânica do concreto pelo seu refinamento de poros. Isso ocorre devido ao consumo de hidróxido cálcio, produzindo C-S-H e outros hidratos de estruturas similar, que além de aumentar o tamanho de poros gel reduzem os poros capilares por se depositarem e obstruírem os poros, reduzindo a sua conectividade (RIBAS, 2014).

A resistência à compressão é determinada de acordo com o tipo de cimento utilizado e com a aplicação do concreto, através do ensaio indicado pela norma brasileira NBR 5739 (2007) - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndrico.

De acordo com Bauer (2000), a durabilidade das estruturas de concreto está diretamente ligada ao grau de exposição a deterioração. Tais processos do concreto dependem de determinados agentes como: **mecânicos** (abrasão, choques, vibração e fadiga, o concreto não resiste a impactos), **físicos** (alteração na temperatura gera o aparecimento de trincas), **químicos** (utilização de água contendo sulfatos e agentes radioativos, causando microfissuração e, dependendo do agente químico, desintegração do concreto).

Segundo Neville (2016), outras características do concreto endurecido é a cura do concreto. Para obter um bom concreto, o lançamento de uma mistura adequada deve ser seguido pela cura em um ambiente apropriado durante os estágios iniciais de endurecimento. O autor cita ainda que, cura é a denominação dada aos procedimentos adotados para promover a hidratação do cimento e consiste no controle da temperatura e da entrada e saída de água do concreto.

Neville (2016) afirma ainda que, a diferença entre as temperaturas do concreto e do ar também influencia a perda de água, dessa forma, o concreto saturado durante o dia perderia água durante a noite, e esse também seria o caso do concreto lançado em tempo frio, mesmo em ar saturado.

Na literatura observada por Neville (2016), consta que o volume de poros no concreto é medido pela absorção e é diferente da facilidade com a qual os fluidos podem penetrar no concreto. Por esse motivo, a absorção não pode ser utilizada como uma medida da qualidade do concreto, mas a maioria dos bons concretos tem absorção bem menor do que 10%, em massa.

## ***2.2 USO DE POZOLANAS EM MICROCONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.***

O uso das argilas calcinadas como mistura pozolânica de cimento é conhecido desde os tempos dos romanos. As principais razões para o uso das argilas calcinadas em

argamassas e concretos estão ligadas à sua disponibilidade e ao aumento da durabilidade por elas provocadas (SABIR *et al.*, 2001).

No Brasil, os primeiros registros de utilização de argilas calcinadas como pozolana segundo Christófolli (2010), foi na época de construção da barragem de Jupia na década de 1960. O aproveitamento de argilas calcinadas como adição pozolânica moderna para argamassas e concretos tem-se popularizado nos últimos anos (SHVARZMAN *et al.*, 2003).

Segundo Vieira (2005), em todo planeta tem se intensificado, através de pesquisa, o uso de argilas calcinadas visando à obtenção e o beneficiamento de pozolana de baixo custo, a partir de subprodutos industriais como substitutos parciais do cimento Portland em argamassas e concretos. Essas substituições implicam em benefícios para o meio ambiente, haja vista que o próprio cimento Portland quando lançado na atmosfera, por si só é gerador de CO<sub>2</sub> na natureza. A metacaulinita, as cinzas da casca de arroz e os resíduos cerâmicos moídos são exemplos de materiais estudados com esse propósito.

Segundo Neville (2016), para uma avaliação da atividade pozolânica com cimento, a ASTM C 311-07 prescreve a determinação do índice de desempenho com cimento Portland. Ele é estabelecido pela determinação da resistência de uma argamassa com um teor especificado de substituição do cimento por pozolana. O resultado do ensaio é influenciado pelo cimento utilizado, especialmente pela finura e pelo teor de álcalis.

Neville (2016) cita ainda que, a pozolanicidade dos cimentos pozolânicos, ou seja, dos cimentos que contém entre 11 e 55% de pozolana e sílica ativa, é verificada conforme recomendações da BS EN 196-5 (2005). O ensaio compara a quantidade de hidróxido de cálcio presente na fase líquida em contato com o cimento pozolânico hidratado com a quantidade de Ca(OH)<sub>2</sub> capaz de saturar um meio de mesma alcalinidade.

Se a primeira concentração for menor que a segunda, considera-se a pozolanicidade do cimento como satisfatória. Complementa ainda que, o método está baseado no princípio de que a atividade pozolânica consiste na fixação do hidróxido de cálcio pela pozolana, de modo que, quanto menor a quantidade de hidróxido de cálcio resultante, maior a pozolanicidade.

A utilização de pozolana nos concretos de cimento Portland têm apresentado inúmeros benefícios às suas propriedades, tanto em relação à reologia no estado fresco

quanto ao comportamento mecânico e de durabilidade no estado endurecido, (NETTO, 2006).

Além disso, a substituição parcial do cimento por pozolana implica na sua viabilidade econômica como na economia de energia e na redução do custo de fabricação do cimento. Com isso, de forma racional preserva-se a jazida do calcário contribuindo com o meio ambiente mantendo sua sustentabilidade.

### **2.2.1 PROPRIEDADES DE POZOLANAS USADAS EM MICROCONCRETOS**

As propriedades pozolânicas são obtidas pela calcinação de argilas submetidas a temperaturas ótimas entre 700 e 900°C (SANTOS, 1992).

Segundo à ABCP (2002), os materiais pozolânicos ao contrário das escórias granuladas de alto-forno, não reagem com a água da forma como são obtidos. Entretanto, quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem a composto com propriedades aglomerantes. Por essa razão, os materiais pozolânicos são utilizados conjuntamente com o clínquer, pois o hidróxido de cálcio é um produto normalmente resultante da hidratação deste.

Santos (2008), afirma que é consenso na comunidade científica que as propriedades físicas e químicas de uma determinada argila estão intimamente ligadas aos argilominerais que as constituem. As cerâmicas vermelhas são constituídas, por argilomonerais como a caulinita, a ilita, quartzo, hematita, feldspato, mica, pirita e outros (KAZMIERCZAK, 2010).

Freire *et al.*, (2013), defini pozolanas como produtos silicosos ou sílico-aluminosos, que, estando predominantemente na forma vítrea, se solubilizam em meio alcalino e reagem em solução com íons  $\text{Ca}^{2+}$ , levando à precipitação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Afirma ainda que, a avaliação da pozolanicidade de um material pode ser feita por métodos químicos e físico-mecânicos e pela sua microestrutura.

Segundo Ribas (2014), as pozolanas muito reativas são recomendadas para inibir a reação álcali-agregado sem redução da resistência inicial, mas com teores inferiores a 10%. A diminuição da permeabilidade e da concentração iônica da solução dos poros diminui a penetração de ions cloretos devido ao efeito das adições minerais. Além disso,

a durabilidade de concretos com adições minerais está diretamente relacionada com o efeito de densificação e refinamento dos poros.

A atividade pozolânica pode ser determinada por métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos monitoram a presença de hidróxido de cálcio e sua variação em função do tempo durante a reação pozolânica, utilizando métodos analíticos como a difração de raios X quantitativa, análise termogravimétrica do material. Os métodos indiretos, medem as variações ocorridas nas propriedades mecânicas, físicas ou químicas do material como, por exemplo, resistência à compressão, condutividade elétrica e teor de água quimicamente combinada, respectivamente (PARROT *et al.*, (1990), DONATELLO; TYRER; CHEESEMAN, 2010)

Sebastiany (2014) explica que existe um método desenvolvido por Chapelle em 1958 chamado de método de Chapelle, onde o objetivo é avaliar a atividade pozolânica de um material, determinando-se a quantidade de hidróxido de cálcio não reagido com o material ensaiado.

A NBR 12653 (2014), também explica que, para um determinado material ser considerado uma argila calcinada, o mesmo tem que ser processado na temperatura entre 500 a 900°C, com atividade pozolânica.

Gonçalves (2005), afirma que a argila calcinada reduz o consumo de energia, reduz a emissão de CO<sub>2</sub> e contribui para a redução do impacto ambiental relacionado a sua destinação. O mesmo autor complementa que, devido sua grande disponibilidade no Brasil, uma alternativa de material pozolânico suplementar é a argila calcinada. A indústria cerâmica gera, por sua vez, uma argila calcinada normalmente oriunda das ilitas, que são usualmente utilizadas na produção de tijolos e telhas.

### **2.2.2 INTERAÇÕES ENTRE A POZOLANA E O CIMENTO PORTLAND.**

Segundo a norma brasileira NBR 12653 (2014), anexo “A” - Influência dos materiais pozolânicos nas propriedades dos compósitos concreto, argamassa e pasta, explica que os mesmos reagem com Ca(OH)<sub>2</sub> proveniente da hidratação do cimento Portland, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Sua adição aos

concretos, argamassas e pastas, em relação a uma referência, sem uso desses materiais e em igualdade de condições, via de regra, concorre para:

- . Aumento da resistência à compressão e à flexão, a idades avançadas, apesar de uma diminuição nas primeiras idades;
- . Redução da porosidade e permeabilidade;
- . Aumento da resistência a sulfatos;
- . Aumento da resistência à difusibilidade de íons cloreto;
- . Mitigação da reação álcali-agregado;
- . Redução da ocorrência de eflorescências;
- . Aumento da resistividade elétrica.

A mesma norma estabelece que as propriedades no estado fresco e endurecido dos materiais já citados, conferido pelos materiais pozolânicos, quando comparadas às propriedades desses produtos sem a sua presença, dependem do tipo e desempenho do material utilizado, do teor adicionado em relação à massa de cimento Portland, do proporcionamento dos materiais (traço), incluindo os aditivos, do tipo de preparo, lançamento, adensamento, condições de cura e outros.

Segundo Ribas (2014), com relação aos finos do resíduo cerâmico, a redução de tamanho de partículas para a faixa micrométrica pode ativar suas fases tornando-os uma pozolana reativa. Por essa razão os ganhos nas propriedades de concretos com o uso de tijolos na fração abaixo de 75 $\mu$ m podem potencializar o reaproveitamento do resíduo cerâmico.

A ativação dos componentes reativos ocorre pela temperatura e pela cominuição. A perda da água combinada devido ao tratamento térmico causa uma destruição da rede cristalina da argila, formando sílica e alumina com estrutura desordenada e instável, caracterizada como estrutura amorfa (NACERI e HAMINA, 2009).

A estrutura amorfa em contato com a água e o hidróxido de cálcio, formado com a hidratação do cimento, se solubiliza, liberando a sílica e alumina para formar hidratos nanoestruturados insolúveis, responsáveis pelo refinamento da estrutura do concreto aumentando a sua durabilidade (HE *et al.*, (1994); BARONIO e BINDA, (1996); O'FARELL *et al.*, (2001)).

Metha & Aictin, *et al.*, (1990), *apud* Vieira (2005), resumem as interações que ocorrem entre a pozolana e o cimento Portland: *“as pequenas partículas da pozolana, menos reativas do que o cimento Portland, quando dispersas na pasta de cimento, geram um grande número de pontos de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação. Além do mais, este mecanismo torna a pasta mais homogênea e densa com respeito à distribuição dos poros devido às reações pozolânicas que ocorrem entre a sílica amorfa da adição mineral e o hidróxido de cálcio pelas reações de hidratação do cimento. Em adição, o efeito físico dos grãos mais finos permite um empacotamento mais denso com o cimento e reduz os problemas na zona de transição entre a pasta e o agregado. Como resultado, esta zona mais fraca é reforçada devido a maior aderência entre essas duas fases, promovendo melhoras na microestrutura e nas propriedades do concreto de um modo geral”*.

De acordo com Montanheiro (2003), a reação pozolânica se desencadeia porque a sílica e a alumina são vulneráveis ao hidróxido de cálcio, devido a fraqueza e instabilidade de suas ligações estruturais no material original, como é o caso do vidro vulcânico ou das argilas calcinadas.

Cyr *et al.*, (2005), complementa ainda que, a reação pozolânica aumenta a resistência à compressão de materiais à base de cimento pela conversão de CH em produtos mais resistentes e pelo refinamento dos poros. O seu efeito é observado depois de alguns dias até vários meses, dependendo principalmente da quantidade e solubilidade de sílica/alumina amorfa no material.

Segundo Catarino (2012), a interação entre os vários materiais que compõem o concreto, causa em grande escala variações na trabalhabilidade, que depende do tipo e da proporção dos materiais utilizados.

Conforme Sebastiani (2014), os benefícios da utilização de pozolanas em matrizes cimentícias, do ponto de vista técnico, podem ser resumidos, basicamente, em três fatores: baixa liberação de calor durante a reação de hidratação, formação de novos compostos hidratados e preenchimento de poros de produtos de reação pozolânica. Informa ainda que, estes fenômenos resultam na diminuição da fissuração e no aumento da compacidade, da resistência mecânica e da durabilidade das pastas cimentícias.

### **2.2.3 EFEITO DA POZOLANA NAS PROPRIEDADES DO MICROCONCRETO.**

De acordo com Metha & Monteiro (1994) *apud* Vieira (2005), com relação à temperatura de cura: enquanto exposições a temperaturas elevadas podem ser prejudiciais ao concreto de cimento Portland, o concreto contendo pozolanas pode ser beneficiado pela ativação térmica através da aceleração da reação pozolânica. A incorporação de partículas quando finamente divididas melhora a trabalhabilidade por reduzir o tamanho e o volume de vazios.

Taylor (1997), explica que os produtos de hidratação formados nas reações pozolânicas são: silicatos de cálcio hidratado, aluminato de cálcio hidratado e sílico-aluminatos de cálcio hidratados.

Segundo Neville (1997), um importante fator que influencia a hidratação do cimento é a temperatura de cura. Altas temperaturas de cura aumentam a resistência de concreto nas primeiras idades, inferiores a 7 dias, mas afetam contrariamente esta propriedade após esta idade, provocando uma redução em seus valores. Isso ocorre porque a rápida hidratação inicial do cimento causada pela alta temperatura, forma mais produtos porosos devido à indisponibilidade de tempo suficiente para a difusão dos produtos de hidratação do cimento, permanecendo uma grande parcela dos poros sem preenchimento.

Segundo Gonçalves (2005), o desempenho de uma dada pozolana no concreto depende de fatores tais como a composição química, índice de atividade pozolânica, teor de substituição, diâmetro médio, forma e massa específica do material pozolânico, além da proporção dos materiais, relação água/cimento, tipo de cimento, tipo de agregado, aditivo químico, idade e grau de hidratação do concreto.

A hidratação do cimento Portland pode ser analisada com a introdução de água e os componentes do cimento começam a se hidratar, formando compostos que, em sua maioria são silicatos de cálcio hidratado (C-S-H).

De acordo com Netto (2006), ao se hidratar uma mistura de cimento Portland com adição de pozolana, ocorre um decréscimo gradual com o tempo do teor de hidróxido de cálcio livre, em função do progresso da reação pozolânica.

#### **2.2.4 RESÍDUO CERÂMICO COMO POZOLANAS**

Segundo Taveira (2010), existem vantagens com a reciclagem de resíduos, onde Jonh (2000) observa como:

- . A preservação de recursos naturais pela substituição por resíduos, prolongando a vida útil das reservas naturais e reduzindo a destruição da paisagem, flora e fauna;
- . A redução do consumo energético para a produção de um determinado bem;
- . O aumento da durabilidade da construção em determinadas situações, como já comprovada por inúmeros estudos na área de adições de escórias de alto forno e pozolanas ao cimento;
- . A redução da poluição emitida para a fabricação de um mesmo produto;
- . A redução dos custos da proteção ambiental, pois a reciclagem permite gerar valor a partir de um produto que antes constituía em despesas;
- . O aumento da geração de empregos e da competitividade da economia;
- . A economia de divisas, na eventualidade da importação de algumas das matérias primas recicladas.

John & Agropyran (2001) enfatiza ainda que, existem vários impedimentos na reciclagem do material. Para geração de um novo produto contendo resíduos, cita a falta de uma normatização adequada que seja capaz de abrir o mercado, não só aos agregados reciclados, mas também os produtos com eles fabricados. Informa ainda que, as centrais de reciclagem precisam estar localizada nas zonas urbanas o mais próximo possível do local de geração de resíduos, porém encontram dificuldades para sua localização, pois enfrentam problemas de licenciamento ambiental, zoneamento urbano e oposição de moradores.

No entanto, mesmo o processo ainda não estar normatizado, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de se verificar os verdadeiros benefícios que esse resíduo pode proporcionar aos materiais a base de cimento.

Fastofski *et al.*, (2014), explica que por suas características minerológicas, os resíduos cerâmicos podem potencialmente ser usados como adições minerais ou em substituição parcial ao cimento Portland, sendo necessário analisar suas propriedades e os demais aspectos envolvidos que determinarão sua viabilidade. Observa-se ainda que, as

pozolanas apresentam menores custos que o cimento Portland que estas substituem, principalmente em se tratando de resíduos.

Modesto *et al.*, (2003), explica que atualmente o maior problema das empresas cerâmicas são os rejeitos gerados após a etapa de queima, denominado de “chamote”. O chamote é o produto cerâmico acabado (revestimento, telhas, tijolos, etc.), que apresentou falhas desqualificantes. O volume de material descartado representa, em média, 3,0% de toda a produção nacional de revestimento cerâmicos.

Estudos de concretos com adição de resíduos cerâmicos demonstraram que partículas com tamanhos abaixo de 90  $\mu\text{m}$  já apresentam redução da trabalhabilidade, sendo maior essa perda com o aumento do teor (KARTINI *et al.*, 2012).

Argamassas com 25% de resíduo de cerâmica de piso esmaltada com área superficial igual a 25,9  $\text{m}^2/\text{g}$ , apresentaram perda na trabalhabilidade, atribuída a forma angular das partículas (BIGNOZZI & SACCANI, 2012). Embora a elevada área superficial deva ser considerada como outro potencial motivo para esse comportamento.

Ribas (2014), explica que os resíduos cerâmicos moídos finamente podem ser utilizados em substituição parcial ao cimento por apresentarem propriedades pozolânicas. Essa reatividade é devido ao processo de queima, que ativa fases amorfas sílico-aluminosas reativas. Afirma ainda que, a qualidade dos produtos cerâmicos é avaliada pelas variações volumétricas, mudanças de fases e fenômenos de cristalização e essas reações são observadas por análises térmicas. A temperatura de queima ideal é obtida quando essas reações ocorrem em faixas de temperatura específicas. Essas faixas de temperatura são determinadas pelas análises térmicas nas argilas que serão utilizadas na produção dos materiais cerâmicos calcinados.

Conforme a ABNT, a principal matéria prima utilizada para a produção dos revestimentos cerâmicos é a argila, que é composta por partículas coloidais de diâmetro inferior a 0,005 mm, com alta plasticidade quando úmida, e que, quando seca, forma torrões dificilmente desagregáveis pela pressão dos dedos.

A composição química do resíduo cerâmico (RC) mostra que a mesma possui um teor de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  de 92,56%, atendendo à norma brasileira NBR 12653 (2014), para uso como aditivo mineral na mistura com o cimento Portland.

O resíduo cerâmico também atende a outra exigência química da referida norma, com teor de  $\text{Na}_2\text{O} < 1,5\%$ , porém atende ao requisito do teor de  $\text{SO}_3$ , que foi inferior a 4%. Esta mesma norma também define um limite mínimo de finura para as pozolanas artificiais, como características físicas para a classificação como pozolanas.

### ***2.2.5 BENEFÍCIOS DO USO DE POZOLANAS NA DURABILIDADE DO CONCRETO***

Conforme consta na literatura da ABCP (2002), a adição de materiais pozolânicos modifica a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, a difusibilidade iônica e a porosidade capilar, aumentando a estabilidade e a durabilidade do concreto.

Poggiali (2010), explica que o efeito da utilização de adições e aditivos em materiais cimentícios melhora a trabalhabilidade, o aumento da plasticidade sem aumentar o consumo de água, a modificação do tempo de pega, reduz a exsudação e segregação, o aumento da resistência fina. A melhoria destas propriedades reflete diretamente no aumento da durabilidade do material.

Segundo Metha & Monteiro (2008) e Macedo (2009), as adições no microconcreto são materiais bastante finos, elas atuam como efeito filer, diminuindo o volume de vazios, conseqüentemente diminuindo a porosidade, reduz a permeabilidade melhorando a resistência mecânica e a durabilidade.

Os autores explicam que, a temperatura de queima das argilas calcinadas influencia o comportamento pozolânico das argilas, este procedimento influencia as propriedades mecânicas das cerâmicas, afetando a microestrutura e porosidade nas partes internas das cerâmicas.

A norma brasileira NBR 12653 (2014), classifica os materiais pozolânicos em 3 classes (N, C, E) e define a idade de 7 dias para as reações de endurecimento e a resistência à compressão mínima de 6,0 MPa, para que um material possa ser considerado uma pozolana.

Diversas pesquisas mostram que a adição de pozolanas em materiais de matriz cimentícia provoca um maior empacotamento da mistura, deixando-a mais densa, gerando uma redução natural da porosidade, seja pelo efeito filer – fenômeno físico;

como pela geração de C-H-S (silicato de cálcio hidratado) – fenômeno químico (CARNEIRO, 2005; MOTA *et al.*, 2010).

De acordo com Metha & Monteiro (1994), uma longa vida útil é considerada sinônimo de durabilidade. O comitê 201 do ACI (1991) define durabilidade do concreto de cimento Portland como sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, ou seja, o concreto durável deve conservar sua forma original, qualidade e capacidade de uso quando exposto ao seu meio ambiente.

No entanto, apesar de o concreto ser o material de construção mais utilizado no mundo e apresentar muitas vantagens como material estrutural, inúmeros problemas têm sido detectados com relação à sua durabilidade. Nos últimos anos, diversos estudos vêm sendo realizados sobre patologias de concretos e deterioração prematura das edificações, citando-se como exemplo os levantamentos realizados no Brasil por ARANHA (1994), NINCE (1996) e ANDRADE (1997), dentre outros.

O caminho para a deterioração das estruturas em concretos está relacionado à ocorrência de seus poros e à sua permeabilidade. Quando os poros estão conectados, os agentes agressivos atingem toda a extensão dos elementos de concreto. Poros desconectados influenciam a resistência mecânica de concreto, mas não são igualmente danosos à sua durabilidade (LIMA, 2006).

Normalmente, os processos de deterioração de concretos estão relacionados à água. Mesmo sendo agente primário na criação do concreto, é ela a maior causadora da degradação do material concreto, quer seja por processos físicos ou químicos, neste último caso atuando como transportes de agentes agressivos, tais como cloretos e sulfetos. Entretanto, a água será tanto mais danosa quanto mais porosa e permeável for a matriz de cimento e os agregados constituintes do concreto.

O uso de adições e cimentos compostos propicia um maior refinamento dos poros do concreto, proporcionando uma maior proteção contra a penetração de agentes agressivos. Os materiais pozolânicos possibilitam a produção de cimento especial com menor consumo de energia e, portanto, menor custo de fabricação. Além disso, à medida que uma parcela do clínquer Portland possa ser substituída por materiais pozolânicos, há, conseqüentemente, o aumento da vida útil do jazimento calcário, bem como dos

equipamentos de produção e, sobretudo, os incomensuráveis ganhos ambientais. Nesse sentido, Yamamoto *et. al.*, (1997), apresentou os benefícios ambientais decorrentes da substituição de parte do clínquer Portland por materiais pozolânicos.

Gonçalves *et. al.*, (2009), obtiveram redução na carga de ions cloretos de 32% com 20% de substituição, para um traço de argamassa considerado equivalente à de um concreto de alto desempenho. Resultados de parâmetros de durabilidade para concreto de alto desempenho com até 60% de substituição por tijolo moído apresentam-se satisfatoriamente comparáveis a concretos de mesmo traço com metacaulinita (VEJMELKOVA *et. al.*, 2012).

### **2.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS**

No Brasil ainda não há um contexto consensual de como deve ser um estudo de dosagem. A inexistência de um consenso nacional cristalizado numa norma brasileira sobre os procedimentos e parâmetros de dosagem tem levado vários pesquisadores a proporem seus próprios métodos de dosagem, muitas vezes confundidos com uma recomendação da instituição para a qual trabalham, ou através da qual foram publicados (TUTIKIAN & HELENE, 2011).

Farias Filho *et al.*, (2000), estudou a resistência à compressão de argamassas contendo resíduo de tijolo queimado moído e metacaulinita como substitutos parciais do cimento Portland, observando o seu aumento para todas as porcentagens de substituição utilizadas. O acréscimo de resistência variou de 27% a 39% para o caso em que se utilizou o primeiro e de 21% a 72% para o segundo. Nas duas situações, a resistência máxima foi obtida com um índice de substituição de 18%.

Toledo Filho *et al.*, (2002), concluiu que as resistências à compressão de concretos confeccionados com resíduos cerâmicos em substituição parcial ao cimento foram superiores às dos concretos de referência para níveis de substituição de até 40%.

Buscando encontrar parâmetros que façam a diferença em descobrir um traço de dosagem com mais eficiência, maior resistência e consistência dos materiais na mistura, diversas empresas vêm se aprimorando e/ou aperfeiçoando, através de estudos e pesquisas a encontrar vários métodos de dosagem alternativos, para isso, foram adotados diversos estudos visando suprir essa demanda na construção civil.

A grande exigência de concretos na construção civil está cada vez mais atuante o que levou pesquisadores e empresas privadas a buscarem novas metodologias de dosagens, saindo dos procedimentos convencionais, que são limitados a poucos materiais. Constam nas literaturas que concretos já alcançaram altas resistências em décadas passadas, como demonstradas a seguir:

No início da década de 70, concretos já atingiram resistência variando entre 30 a 85 MPa considerado de alto desempenho, CAD, (CORDEIRO, 2001 e SILVA, 2004).

Já pode ser encontrado concreto com 90 MPa, 100 MPa e até 120 MPa que entraram no campo da construção de edifícios altos (CORDEIRO 2001). Devido ao seu alto custo, ainda são poucos os engenheiros que usam um concreto com resistência superior a 120 MPa.

Aos 28 dias por meio do método do IBRACON (2002), foi encontrado concreto de alto desempenho (CAD) com 125 MPa, tornando a vida útil do concreto por 350 anos.

Formagini (2005), encontrou concreto com valores de resistência na ordem de 162,1 MPa aos 28 dias considerado de altíssimo desempenho (CONAD, 2005).

Observou-se ainda, que estão sendo estudados vários métodos que abordam a utilização de agregados reciclados, apesar de que, nos dias atuais, as Universidades já estão buscando, através de pesquisadores, materiais provenientes da própria região em substituição parcial do cimento para matriz cimentícia e, de forma sustentável, contribuindo com o meio ambiente, que é o caso proposto neste estudo.

Aitcin (1998), explica que o concreto tem que estar condicionado entre as classes I e II para ser considerado uma argamassa de alta resistência.

De acordo com Aitcin, (1998), a classificação para concreto de alto desempenho, a resistência à compressão (MPa) é definida conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Classe de Concreto de Alto Desempenho (CAD)

CLASSE	I	II	III	IV	V
(Mpa)	50	75	100	125	150

Fonte: AITCIN, Pierre, 1998.

Alguns exemplos de métodos de dosagens mais utilizados e citados na literatura nas últimas décadas serão descritos a seguir:

### **2.3.1 MÉTODO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC)**

Em um primeiro momento, nesta pesquisa, se propôs o Método de Empacotamento Compressível (MEC), que é a base para produção do método de dosagem científica proposta por De Larrard (1999) e sua equipe, adaptado por Formagini (2005) na COPPE/UFRJ, cuja metodologia apresenta uma abordagem diferenciada dos métodos tradicionais, onde sua eficiência já foi comprovada através de vários experimentos em concretos com resistências normais, de alto desempenho, auto adensáveis, entre outros.

Com base em mais de uma década de estudo, De Larrard (1999) e sua equipe conseguiram formular uma teoria que soluciona a questão de empacotamento de misturas secas em todos os componentes utilizados na dosagem de concreto. Esses estudos levaram ao desenvolvimento do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), que é uma versão aprimorada dos diversos modelos de empacotamento desenvolvido pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC França) e pode ser utilizado para dosar os mais variados tipos de argamassas e concretos.

Conforme De Larrard (1999), o MEC surge como uma ferramenta de dosagem que possibilita a seleção e a formulação dos constituintes do concreto, o que aumenta a compacidade da mistura granular e diminui o risco de segregação, com o objetivo de proporcionar o mais alto desempenho ao produto final que, aliado à baixa relação  $a/c$ , torna o concreto coeso e com baixa porosidade. O MEC é um método científico em que todos os materiais são caracterizados experimentalmente. A mistura granular seca é formulada em razão do menor índice de vazios, obedecendo às características do processo de lançamento, adensamento, bem como às propriedades requeridas para o concreto no estado fresco e endurecido.

No método tradicional de dosagem o concreto convencional apresenta baixa compacidade, maior risco de segregação possui um moderado desempenho e a dosagem realizada pelo MEC apresentou um aumento na compacidade, diminuição do risco de

segregação, pois trata-se de um material coeso, pouco heterogêneo e de alto desempenho (FORMAGINI, 2005).

### **2.3.2 MÉTODO DE REPETTE-MELO (2005)**

O método baseia-se na racionalização da dosagem do Concreto Autoadensável (CAA) a partir do estabelecimento de proporção água/aglomerante, seguindo exigências de durabilidade ou de resistência à compressão requerida, a exemplo do que ocorre com os concretos convencionais.

O método se distingue da maioria dos métodos correntes por não exigir, em nenhuma de suas etapas, o julgamento subjetivo da qualidade da mistura por parte do usuário. Todos os componentes do concreto são ajustados com base em ensaios rápidos e de custo acessível e em resultados quantitativos e objetivos, eliminando do processo as decisões que dependam da experiência de quem utiliza o método (REPETTE, 2005).

### **2.3.3 MÉTODO DE TUTIKIAN (2004)**

O método de dosagem proposto por Tutikian (2004) é composto de seis passos, sendo o CAA obtido a partir de um concreto convencional dosado seguindo o procedimento IPT/EPUSP, desenvolvido por Helene e Terzian. O teor de argamassas obtido para um concreto convencional é mantido constante e seus componentes são alterados para que se torne autoadensável com a incorporação de aditivo superplastificante e finos. A dosagem é iniciada a partir dos quatro componentes básicos: cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água e, posteriormente, adicionados os aditivos e os finos (TUTIKIAN, 2004).

Tutikian (2004), ilustra passo a passo da execução do método, que é prático, simples e experimental:

O primeiro passo é reservado à escolha dos materiais constituintes do CAA. O cimento deve estar de acordo com as características que se deseja obter, como resistência e durabilidade. Os finos usados podem ser pozolânicos ou não pozolânicos desde que tenham área superficial maior que o componente que vão substituir. No caso dos finos

pozolânicos, a substituição será feita sobre a massa do cimento e, se os finos forem não pozolânicos, substituirão o agregado miúdo, também em massa. É utilizado o aditivo superplastificante e, quando necessário, aditivo modificador de viscosidade.

O segundo passo, é feita a determinação experimental do teor de argamassa ( $\alpha$ ) da mistura. O procedimento nessa etapa é exatamente o mesmo para a determinação do teor de argamassa ideal para concretos convencionais, descrito no método do IPT/EPUSP. Quando os finos utilizados são pozolânicos, basta utilizar a Equação 1. O teor de argamassa ideal determinado nesse passo deve ser mantido constante até o final da dosagem do CAA.

$$\alpha = (1 + a) / (1 + m) \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

$\alpha$  – teor de argamassa;

$a$  – relação agregado miúdo seco/aglomerantes em massa, em kg/kg;

$m$  – relação agregados secos/aglomerantes em massa, em kg/kg.

Até o terceiro passo, o concreto obtido é convencional, sem aditivos e finos.

No quarto passo, o concreto começa a ser transformado em autoadensável pela incorporação do aditivo superplastificante e, simultaneamente, no quinto passo, com adição dos materiais finos. O aditivo é adicionado em relação da massa de cimento, aconselhando-se que se comece com a utilização de pequenas quantidades em torno de 0,30%, e que se vá aumentando aos poucos até o ponto ideal. De acordo com Turtikian (2004), o ponto ideal é obtido visualmente e ocorre quando o concreto está bastante fluido, sem levar em consideração a separação dos agregados graúdos da argamassa.

O quinto passo é a etapa em que é corrigida a segregação do concreto, através da adição de materiais finos. O concreto torna-se coeso com a colocação do material fino, e este substituirá, em massa, parte do cimento ou do agregado miúdo.

No sexto passo Turtikian (2004) afirma ainda que, a medida que o aditivo é colocado e são feitas a substituição dos componentes da mistura por materiais finos, o concreto vai tornando-se mais coeso e menos fluído.

### **2.3.4 MÉTODO DE GOMES, GETTU E AGULLÓ**

O método de dosagem proposto por Gomes *et al.*, (2003), apresenta um procedimento de caráter experimental para obtenção da dosagem do concreto autoadensável de alta resistência.

A metodologia proposta por Gomes *et. al.* (2009) para a dosagem de CAA assume que o concreto pode ser obtido otimizando-se a composição da pasta e o esqueleto granular separadamente. A composição final do concreto é obtida buscando-se o conteúdo de pasta necessário para que o concreto apresente as características de um CAA.

Conforme o autor, o método é executado em três fases: obtenção da composição da pasta, determinação da proporção de mistura dos agregados e seleção do conteúdo de pasta. Afirma ainda que, uma das principais vantagens desse processo é a habilidade de separar as fases, que permite a determinação independente dos diferentes parâmetros de misturas variáveis, incluindo os seguintes critérios para obtenção das proporções dos componentes da mistura:

- . Determinação da dosagem do superplastificante em relação à massa de cimento;
- . Obtenção da proporção dos agregados pela densidade seca da mistura;
- . Determinação do volume de pasta que proporciona ao concreto os requisitos de autoadensabilidade, avaliados em termos das propriedades.

Todavia, com o avanço no conhecimento de seu comportamento reológico, dos materiais constituintes, do surgimento de novos aditivos e das pesquisas desenvolvidas que visam à viabilidade da utilização de novas adições, a eliminação dos defeitos causados pela vibração ineficiente do concreto passou a ser apenas mais uma vantagem do concreto autoadensável (GOMES, 2009).

### **2.3.5 MÉTODO DE DOSAGEM DA ABCP**

O método de dosagem da ABCP foi adaptado do método americano proposto pela ACI 211-1-81 (1985), onde considera tabelas e gráficos elaborados a partir de

informações experimentais, que se enquadrem nos limites propostos pela norma brasileira NBR 7211 (2009).

O método permite a obtenção de misturas com uma determinada consistência aliada ao menor volume de vazios, inter-grãos possíveis. Assim, determina-se um teor ótimo do agregado graúdo na mistura por meio de proporcionamento adequado de relação agregado graúdo/agregado miúdo, partindo-se do princípio de colocar na mistura o máximo volume de agregado compactado seco por metro cúbico de concreto (CLUBE DO CONCRETO, 2015).

### **2.3.6 MÉTODO DO IPT/EPUSP**

Segundo o professor Marcelo Cândido (2005), o método é baseado na Lei de Abrams, Lei de Inge Lyse como destacado a seguir:

. Lei Abrams – Para um certo conjunto particular de materiais, a resistência do concreto é em função da relação água/cimento.

. Lei de Inge Lyse – Para um certo conjunto particular de materiais e uma mesma consistência dos concretos, a quantidade de água necessária para qualquer traço é a mesma. Como consequência, para um certo conjunto particular de materiais, é mantida a consistência do concreto medida pelo ensaio do abatimento do tronco de cone, o traço é diretamente proporcional à relação água/cimento segundo a equação 2.

$$m = k_3 + k_4 \cdot a/c \quad \text{Equação 2}$$

onde,

$m$  = traço;

$k_3$  e  $k_4$  = materiais;

$a/c$  = fator água/cimento.

Existe um teor ideal de argamassa seca que é independente do traço ou resistência requerida.

Conforme a literatura, o método apresenta as suas vantagens e desvantagens:

#### Vantagem do Método do IPT/EPUSP:

- . Não são necessários ensaios preliminares de composição granulométricas dos agregados e da massa específica dos materiais;
- . O teor de argamassa ideal é determinado experimentalmente, evitando-se dosar um concreto com deficiência ou excesso de argamassa.
- . É obtido um diagrama de dosagem que serve para qualquer resistência desejada ao nível dos concretos normais.
- . É rápido e prático de fazer, desde que o tecnologista tenha experiência com dosagens.

#### Desvantagens do Método do IPT/UPUSP:

- . A determinação experimental do teor ideal de argamassa, por não basear-se em ensaio padronizado, pode, devido à sua subjetividade, levar o tecnologista inexperiente a compor concretos com excesso ou deficiência em argamassa.
- . A composição granulométrica das britas é um pouco trabalhosa, principalmente para o  $D_{max}$  maiores e mais de duas britas.
- . Apresenta também em concreto, relação a/c muito baixa.

### **2.3.7 MÉTODO DO IBRACON**

Segundo Tutikian e Helene (2011), o método do IBRACON entende que a melhor proporção entre os agregados disponíveis é aquela que consome a menor quantidade de água para obter um dado abatimento requerido e faz isso considerando a interferência do aglomerante (cimento + adições) na proporção total de materiais. Portanto, não se trata de obter a máxima compacidade do esqueleto granular, mas sim de obter o mínimo consumo de água para uma requerida consistência, o que vai resultar na máxima resistência à compressão daquele concreto. Poder-se-ia associar a uma mistura dos “métodos” baseados nas granulometrias contínuas (máxima trabalhabilidade) com métodos que se fundamentam na granulometria descontínua (máxima compacidade).

Os limites de aplicação conhecidos do método IBRACON são:

- . Resistência à compressão:  $5\text{MPa} \leq f_c \leq 150\text{MPa}$ ;
- . Relação a/c:  $0,15 \leq a/c \leq 1,50$ ;

- . Dimensão máxima do agregado:  $4,8\text{mm} \leq D_{\text{max}} \leq 100\text{mm}$ ;
- . Teor de argamassa seca:  $30\% < \alpha < 90\%$ ;
- . Fator água / materiais secos:  $5\% < H < 12\%$ ;
- . Módulo de finura do agregado: qualquer;
- . Distribuição granulométrica dos agregados: qualquer;
- . Massa específica do concreto:  $> 1500\text{kg/m}^3$ .

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Inicialmente, foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais utilizados: aditivos, cimento, água, areia e resíduo cerâmico. Em seguida, realizaram-se os ensaios para a determinação das propriedades físicas, químicas, reológicas e mecânicas das misturas.

O organograma experimental da Figura 3.1 esquematiza os ensaios utilizados na caracterização dos materiais para serem utilizadas na produção do microconcreto.

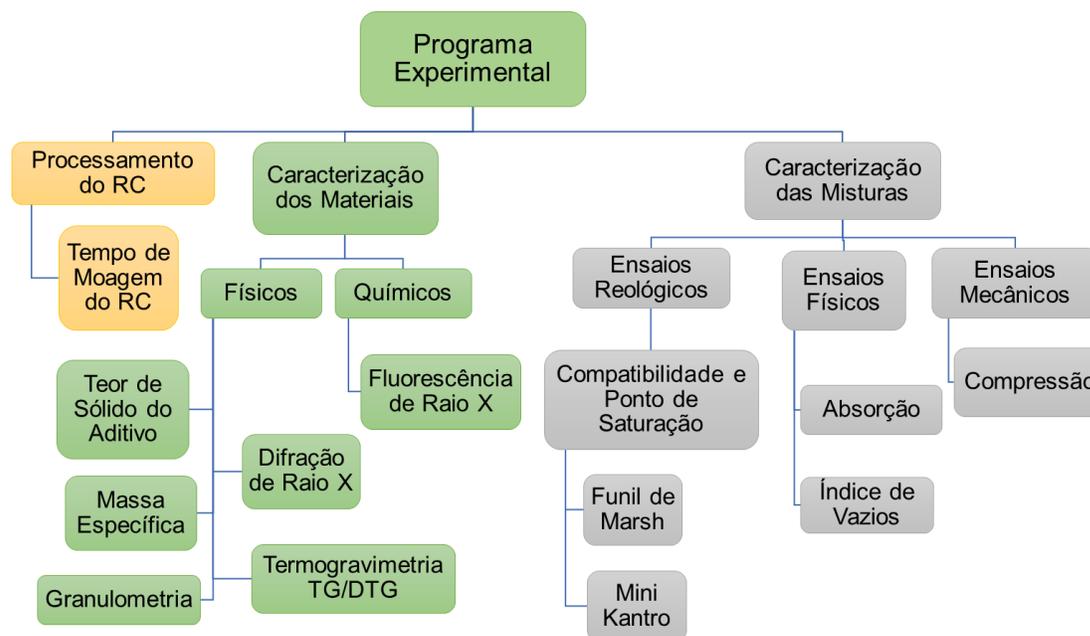


Figura 3.1 Organograma de ensaios realizados no programa experimental

## **3.2 MATERIAIS**

A dosagem utilizada no presente trabalho foi a mesma utilizada por Melo Filho (2012), com o intuito de se produzir uma matriz com baixos teores de hidróxido de cálcio (CH) e que apresentasse um adequado comportamento reológico e mecânico. A dosagem utilizada foi o traço 1:2 (material cimentante, areia) e fator a/c igual a 0,4. A diferença que houve entre este trabalho e o de Melo Filho (2012), está no tipo de pozolana. Este trabalho estudou diferentes teores: 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de resíduo cerâmico produzido no polo ceramista da região metropolitana de Manaus em substituição ao cimento Portland, considerando o teor de 0% como sendo de referência.

Tendo em vista os objetivos da pesquisa, a seguir são apresentados os componentes utilizados na produção do microconcreto: cimento, agregado miúdo, água, superplastificantes e RC.

### **3.2.1 CIMENTO PORTLAND**

O cimento utilizado neste trabalho foi o CP I S - 40, disponível comercialmente no mercado local de Manaus - AM. No Laboratório de Ensaios de Materiais da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (LEM/FT/UFAM), o mesmo foi acondicionado em sacos plásticos devidamente fechados, visando à manutenção das suas propriedades até o momento de sua utilização.

O CP I S é um tipo de cimento Portland com as mesmas características do CP I, porém com adição de no máximo 5% de material pozolânico em massa que garante uma menor permeabilidade a esse tipo de cimento.

A justificativa para a escolha desse cimento deu-se devido este ser um aglomerante comum com baixo teor de adição, contendo apenas 3% de gesso que é para retardar a pega, empregado bastante em pequenas obras civis na cidade de Manaus-AM.

### **3.2.2 RESÍDUO CERÂMICO (RC)**

O resíduo cerâmico (RC) utilizado no presente estudo foi proveniente da Empresa Miranda Corrêa, localizada no Município de Iranduba-AM, a uma distância de 25 km da

cidade de Manaus-AM. O material consistiu de fragmentos de blocos cerâmicos estruturais e tijolos vazados, com dimensões variadas, conforme pode ser observado na Figura 3.2. Assim, para sua caracterização e possível utilização como material pozolânico, foi necessário que o mesmo sofresse um processo de cominuição por meio de moagem na forma manual e, posterior, mecânico.



Figura 3.2 (a) Resíduo cerâmico e (b) resíduo depois de triturado e moído.

Fonte: Autor

### 3.2.3 AREIA

Foi utilizada uma areia quartzosa de rio, adquirida em comércio local, proveniente da BR 174, km 10, estrada Manaus-AM / Boa Vista-RR. A amostragem foi feita diretamente do lote em uma quantidade de aproximadamente 30,00 kg de areia fina, uma vez que seriam realizados vários ensaios com a amostra, bem como parte seria utilizada para produção do microconcreto.

A massa específica foi obtida pelo ensaio do Frasco de Chapman, conforme a norma brasileira NBR 9776 (1987) e posterior a NBR NM 248 (2003). Utilizou-se duas séries de peneiras, sendo a série normal e a série intermediária.

Os ensaios, procedimentos e os equipamentos foram realizados conforme descrito na norma NBR 248 (2003) - Determinação da Composição Granulométrica de Agregados Miúdos e Graúdos para Concreto.

### 3.2.4 ÁGUA

A água utilizada para a produção dos corpos de prova dos microconcretos para o ensaio foi proveniente do sistema de abastecimento da Universidade Federal do Amazonas/UFAM, que atendeu às características recomendadas pela norma brasileira NBR 6118 (2007).

### 3.2.5 ADITIVO

No presente trabalho, foi analisado o aditivo superplastificante da marca Glenium 51 (3ª Geração), a fim de verificar sua melhor compatibilidade e eficiência no processo para produção dos materiais cimentícios.

A Tabela 3.1 apresenta a característica do superplastificante cedido pelo fabricante.

Tabela 3.1 Característica do aditivo superplastificante.

ADITIVOS	Tipo	Densidade g/cm <sup>3</sup>	pH	% Dosagem (s.p.c)
Glenium 51	SP	1,067 - 1,107	5 - 7	0,2 a 1,0

Fonte: Fabricante

SP – Superplastificante;

% sólidos s.p.c – sobre o peso do cimento;

O aditivo químico foi doado pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), para que fosse utilizado na produção da pasta para fabricação do microconcreto.

. **Glenium 51** é um superplastificante de terceira geração. Em seu estado líquido possui a cor branca turva, com composição química à base de éter policarboxílico, devendo ser utilizado nas proporções de dosagens entre 0,2% a 1,0% s.p.c, conforme o fabricante. A dosagem ótima do Glenium 51 para uma boa redução de água (> 20%) pode

variar de acordo com a temperatura ambiente. Atende requisitos das normas brasileiras NBR 11768 (2011) tipo P e SP e ASTM C494 (2016), tipo A e F. É um superplastificante que é compatível com todos os tipos de cimento Portland.

O método utilizado para avaliar a compatibilidade e o ponto de saturação dos aditivos sobre as partículas finas foi o ensaio de fluidez de pastas através do uso do funil de Marsh, de acordo com Formagini (2005) com adaptações e também pelo método de ensaio do miniabatimento de Kantro, adaptado da literatura de Souza Filho (2012).

### **3.3 MÉTODOS**

Com intuito de obter o microconcreto de alta resistência proposto na pesquisa, foram empregados os métodos descritos a seguir:

#### **3.3.1 PROCESSAMENTO DO RESÍDUO CERÂMICO**

De acordo com a indústria cerâmica que forneceu o resíduo utilizado neste estudo, o RC se constituía de fragmentos de blocos cerâmicos queimados a uma temperatura de cerca de 800°C, decorrentes de quebras ocorridas desde a fabricação até sua disposição final.

No laboratório, o RC passou por um processo de moagem para diminuir seus grãos a fim de obter material passante pela peneira de nº 100 com aberturas de 150 µm, resultando em uma finura semelhante à do cimento utilizado neste estudo.

A argila empregada na produção de blocos cerâmicos pela indústria foi obtida partir do solo de várzea retirado no próprio Município (Iranduba-AM). Esse material é armazenado em lugar coberto e secado em temperatura ambiente para que seja retirada a umidade, permanecendo entre 18 a 25°C para que possam ser produzidos os blocos. Segundo a empresa fornecedora do material, em temperatura abaixo de 18°C ou acima de 25°C não é permitido a fabricação dos blocos devido ocasionar perda de resistência.

O bloco era aquecido a uma temperatura de 110°C e depois queimado a temperatura de 800°C, atingindo a calcinação da argila, e após alcançar essa temperatura,

passa por um processo de resfriamento até atingir 120°C, onde o material é retirado do forno e deixado a temperatura ambiente para o resfriamento final dos blocos.

Após a coleta do resíduo cerâmico (RC), houve um processo de cominuição do mesmo. Para isso, utilizou-se uma quebra manual Figura 3.3 (a), até atingir pequenas partículas e, somente após esse processo, levou-se a amostra ao laboratório (LEM/FT/UFAM), para o processo mecânico em um moinho de bolas. O moinho utilizado foi da marca Quimis, modelo MA 048 (Figura 3.3 (b)).



(a)



(b)

Figura 3.3 (a) quebra manual do RC; (b) Moinho de Bolas Mod Quimis.

Fonte: Autor

Conforme Bistrot (1996), o carregamento inicial do moinho é composto por três diâmetros diferentes de bolas (esferas). O volume aparente ocupado pelas esferas deverá ser de 55% do volume útil do moinho, devendo-se levar em conta que apenas 60% deste volume, aproximadamente, estará ocupado por esferas sendo o restante caracterizado pelos espaços vazios existentes entre elas.

Para o referido processo, foram utilizadas 16 esferas de diâmetro 43,49 mm, 21 esferas de diâmetro 30,53 mm e 81 esferas de diâmetro 19,61 mm, perfazendo um total de 3,29 kg. De acordo com o fabricante do equipamento, o moinho funcionou a uma velocidade de 150 rpm (Figura 3.4 (a)).

Inicialmente, 3 tempos diferentes foram testados: 60, 120 e 180 minutos para uma massa de 5,0 Kg. Após o processo da moagem, observou-se que os pesos do material moído nos tempos de 60 e 120 minutos foram insuficientes e adotou-se uma massa de 2,0 kg de resíduo, em intervalo de 180 minutos para obter a menor granulometria do material. Após a moagem, o resíduo cerâmico moído foi passado na peneira nº 100, abertura de 0,150 mm (Figura 3.4 (b)).



Figura 3.4 (a) Esferas para moinho de bolas e (b) Resíduo moído nº 100 (0,150 mm).

Fonte: Autor

### **3.3.2 ENSAIOS FÍSICOS**

#### **3.3.2.1 ENSAIO DO TEOR DE SÓLIDO DO ADITIVO**

O ensaio do teor de sólido para o aditivo SP tornou-se necessário para a confirmação dos dados informado pelo fabricante. Este ensaio foi realizado no laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/FT/UFAM). Três amostras do aditivo foram utilizadas no ensaio.

Metodologia do ensaio:

- Separou-se e pesou-se o material (Glenium 51, 3<sup>a</sup> Geração);
- O material foi pesado em sua forma natural, tirado a tara do recipiente.

• Levou-se ao equipamento, estufa modelo 315 SE FANEM, a uma temperatura no intervalo de  $100 \pm 5^\circ\text{C}$ , sendo retirado após 24h, deixando em repouso para resfriamento e posterior pesagem do material no estado seco. Após esses procedimentos, calculou-se o peso médio do aditivo para verificar o percentual do teor de sólido do material. Usando a equação 3, pode-se calcular o percentual do aditivo (g), que foi utilizado nos ensaios de compatibilidade, e a equação 4 calcula a massa da água (g).

$$C_{adt} = \frac{T_{adt}(\%) \cdot M_{cim}}{T_{sol}(\%)} \quad \text{Equação 3}$$

e

$$C_{mH_2O} = \frac{(M_{cim} \cdot MH_2O) - (M_{cim} \cdot T_{adt}(\%))}{T_{sol}(\%) - T_{adt} \cdot M_{cim}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$C_{adt}$ : cálculo aditivo;

$T_{adt}$ : teor aditivo (%);

$M_{cim}$ : massa cimentante;

$T_{sol}$ : teor dos sólidos (%);

$C_{mH_2O}$ : cálculo da massa de água;

$MH_2O$ : massa da água.

### 3.3.2.2 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA

A massa específica do resíduo cerâmico (RC) e o do cimento Portland foram determinadas de acordo com a norma NBR NM 23 (2001), realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LABEST) da COPPE/UFRJ. Este ensaio é importante para a produção da pasta, uma vez que existe diferença entre a massa específica do resíduo e do cimento, e sendo esta diferença considerada, realizou-se o cálculo de compensação em massa. O ensaio foi realizado em um picnômetro a gás hélio, modelo AccuPyc 1340 da Micromeritics (Figura 3.5).

Metodologia de ensaio:

Três amostras dos materiais foram ensaiadas, o peso das amostras para ensaio foi de aproximadamente 5,0 g a uma temperatura média de 24°C. O equipamento era ligado 30 minutos antes da realização do ensaio e em seguida tarado. O passo seguinte foi a colocação da amostra e o fechamento do equipamento. O equipamento faz as leituras automáticas por um tempo de aproximadamente 30 minutos e, apresenta os valores da massa específica e desvio padrão para cada amostra.

A densidade da areia foi obtida pelo método do frasco de Chapmann, conforme estabelece a norma brasileira NBR NM 248 (2003). A norma brasileira NBR 7211 (2009) define agregado miúdo como o material cujos grãos passam na peneira com abertura de malha de 4,75mm.

Os procedimentos de ensaio da densidade da areia:

Adicionou-se no frasco de Chapman até a marca de 200 cm<sup>3</sup>, 500,0 g do material. Em seguida, o frasco foi agitado e girado para retirada de bolhas de ar. Executada a leitura final (Lf), calculou-se a massa específica pela equação (5). Sendo observado que a máxima variação permitida entre os resultados de duas determinações é de 0,0055 g/cm<sup>3</sup>.

$$Mes = \frac{500}{Lf - 200}, (g/cm^3)$$

Equação 5



Figura 3.5 Picnômetro a gás (hélio).

Fonte: Autor

### **3.3.2.3 ENSAIO DE GRANULOMETRIA DE DIFRAÇÃO A LASER**

Para o ensaio de granulometria dos pós, optou-se pelo ensaio de granulometria de difração a laser para classificar a distribuição granulométrica das partículas do resíduo e do cimento Portland e verificar as dimensões média. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Análise Mineral (LAMIN), da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), localizado na cidade de Manaus-AM. O equipamento utilizado neste ensaio foi o analisador de distribuição de tamanho de partículas, modelo Mastersizer 2000, fabricante Malvern, tecnologia de difração a laser, dispersor de amostras hydro 2000MV, faixa de tamanho para a leitura dos materiais: 0,01 $\mu$ m a 2000 $\mu$ m (Figura 3.6).

Metodologia de ensaio:

Fez-se o preparo das amostras individualmente, adicionou-se 300 ml de água e 50 ml de Hidróxido de Sódio (NaOH) nas misturas (5,0 g). Em seguida, colocou-se 800 ml de água em um Becker, com o equipamento em pleno funcionamento e, usou-se um bastão normal para agitar manualmente a amostra no sentido de ajudar a dispersar o material retido no fundo do recipiente e, em seguida, um bastão com a ponta magnética para fazer uma varredura para certificar-se de que todas as partículas estejam dispersas. Na sequência, adicionou-se parcialmente o material até atingir a faixa de obscuração de 5

a 20, informada pelo fabricante. Para as análises, foram realizadas três leituras de cada material automaticamente onde gerou à média.



Figura 3.6 Analisador Mastersize, 2000.

Fonte: Autor

Para o ensaio de granulometria da areia, optou-se pelo ensaio convencional conforme a norma brasileira NBR NM 26 (2009). A massa mínima por amostra de ensaio após a secagem foi 3,0 kg e a dimensão máxima nominal do agregado foi  $< 4,75$  mm de acordo com que estabelece a norma brasileira NBR 248 (2003).

Preparou-se a amostra conforme a norma NBR NM 27 (2001), aplicando-se o método de quarteamento da areia. Para um total de 400 kg, retirou-se uma amostra de 80 kg desse lote para a realização do ensaio em laboratório. Este procedimento repetiu-se por três vezes até se obter a massa para o ensaio de granulometria, conforme a norma NBR 248, (2003).

#### **3.3.2.4 ENSAIO DE TERMOGRAVIMETRIA DAS PASTAS CIMENTÍCIAS**

A influência da utilização do resíduo da indústria cerâmica na quantidade de produtos hidratados em pasta de cimento Portland foi avaliada através de análises de TG e DTG, baseado na literatura de (GONÇALVES *et al.*, 2006).

De acordo com Tironi *et al.*, (2014), a análise de TG/DTG, baseia-se na determinação do tipo e da quantidade de fases hidratadas em diferentes idades. A medida

em que a concentração de CH diminui, aumentam as quantidades de fases de C-S-H e C-A-H e, portanto, evidencia-se a presença de reação pozolânica na matriz estudada.

Fastofski *et al.*, (2014) explica que a análise termogravimétrica é um processo que envolve a medida da variação da massa de uma amostra em função da temperatura por meio de um termobalança.

Silva (2011), também explica que, através desta análise é possível determinar a quantidade de água quimicamente combinada na forma de hidroxilas em função do aumento gradativo da temperatura. Os gráficos resultantes dão indícios sobre a estabilidade térmica, composição inicial e outros compostos que venham a se formar no decorrer do ensaio.

As pesquisas realizadas por Dweck *et al.*, (2002), mostram que, através de análises térmicas, é possível determinar o teor de água quimicamente combinada de todos os hidratos formados em pastas de cimento Portland, avaliando-se a parte de massa no intervalo de temperatura entre 50°C e a temperatura final de decomposição do hidróxido de cálcio. Esse método foi adaptado, tomando como base de cálculo das curvas TG/DTG a massa calcinada da pasta de cimento e não mais a massa inicial da amostra (DWECK *et al.*, 2009).

O ensaio foi realizado no Laboratório Físico Química da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (FT/UFAM). As análises termogravimétricas foram realizadas através de um equipamento de termogravimetria modelo SDT Q600 TGA/DTA/DSC simultâneo da TA Instruments (Figura 3.7).

As amostras foram ensaiadas em ambiente inerte (gás nitrogênio), submetido a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, com temperatura ambiente até aproximadamente 1000°C para as misturas, em atmosfera de nitrogênio e fluxo do registrador de 50 ml/min. O ensaio foi feito com o uso de cadinhos de Platina.



Figura 3.7 Equipamento SDT Q600 TA Instruments.

Fonte: Autor

Foram produzidas quatro pastas com relação entre água e aglomerante de 0,35, sendo uma apenas com cimento considerada a matriz de referência 0% e, as demais com MP30%, MP40% e MP50%, com teores de substituição de 30%, 40% e 50% de cimento por resíduo cerâmico, respectivamente, e passado na peneira nº 100 com abertura de 0,150 mm.

As amostras foram preparadas da seguinte forma: os materiais secos foram misturados em um Becker por um período de 30 segundos. Em seguida, durante 1,5 minutos, a parte líquida foi adicionada aos materiais secos e misturados, de forma manual, por um período de 8 minutos. Na sequência, as pastas foram preparadas e conservadas em sacos plásticos selados e acondicionadas em dessecador (Figura 3.8), até a idade de 28 dias. Estes procedimentos foram adaptados da literatura de Cordeiro (2005), Gonçalves et al., (2006) e Lima (2009), para todas as amostras.

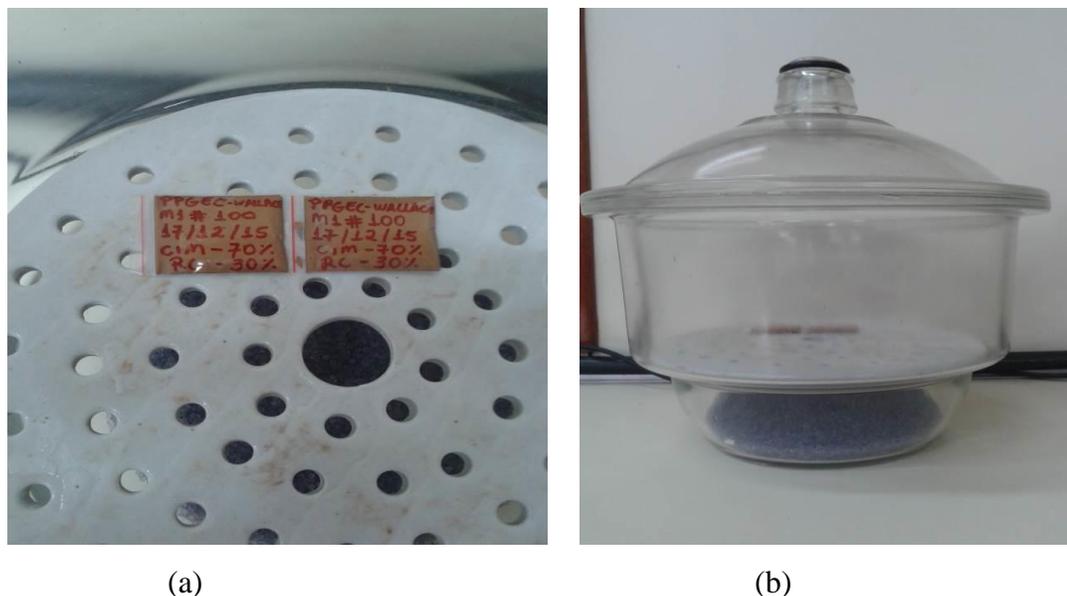


Figura: 3.8 (a) Amostra RC no dessecador; (b) Dessecador de vidro.

Fonte: Autor

### 3.3.2.5 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

A caracterização mineral por difratometria de raios X (DRX) foi realizada com o objetivo de identificar a composição mineralógica do resíduo cerâmico (RC) e do cimento, bem como o de caracterizar as fases existentes no material. A técnica de realização de difração de raios X do resíduo cerâmico permitiu a caracterização mineralógica da amostra, e a visualização de um halo amorfo.

Os equipamentos utilizados no estudo de argilas por meio de raios X serão apresentados a seguir:

As amostras foram submetidas à análise química de difração de raios X (DRX) no laboratório do LAMIN/CPRM, na Cidade de Manaus-AM. As análises foram realizadas em difratômetro de raios X modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical (Figura 3.9), com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de raios X cerâmico de anodo de Cu ( $k\alpha_1$  1,5406 Å), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200 W, 60kv. O detector utilizado é do tipo RTMS, Pixel/1D. Os picos cristalinos foram identificados

utilizando o Software X'Pert versão 2.1a, com base nos resultados obtidos pelas fluorescências de raios X.



Figura 3.9 Difratorômetro raios X Mod X'Pert PANalytical.

Fonte: Autor

#### Metodologia de ensaio:

O ensaio iniciou-se com a colocação de aproximadamente 10,0 g do material no porta amostra do equipamento individualmente por um período de 8,0 a 9,0 minutos, sendo este o tempo necessário da leitura e análise dos minerais existentes em cada amostra.

A identificação dos minerais é feita através da comparação do difratograma obtido com padrões (fichas) do banco de dados da ICDD-PDF (International Center dor Diffraction Data – Power Diffraction File). As fichas são específicas para cada mineral (por ex., quartzo, 46.1045), podendo haver diferentes fichas para o mesmo mineral, principalmente, quando há variações na composição química, soluções-sólidas, etc. Na Tabela 3.2 estão apresentadas as fichas padrão de identificação que estão armazenadas no banco de dados do laboratório LAMIN/CPRM.

O tratamento térmico é feito em mufla durante duas horas e a lâmina é resfriada em dessecador para evitar reidratação e examinada por difração, até 600°C, são usadas lâminas de vidro, até 800°C, laminas de vicor (sílica vítrea) podem ser usadas, acima de 800°C, utiliza-se a lâmina porosa amorfa de material cerâmico (SANTOS, 1975).

Tabela 3.2 Ficha padrão de identificação em banco de dados do resíduo cerâmico

<b>Código de referência</b>	<b>Mineral</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Nome do Composto</b>
00-046-1045	Quartzo	Si O <sub>2</sub>	Óxido de silício
00-033-0664	Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro
00-041-1480	Albita	(Na, Ca) Al (Si, Al) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Silicato de alumínio de sódio e cálcio
00.026-0911	Ilita	(K, H <sub>3</sub> O) Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> Al O <sub>10</sub> (O H) <sub>2</sub>	Hidróxido de silicato de potássio e alumínio
00-010-0357	Sanidina, potássio	(Na, K) (Si <sub>3</sub> Al) O <sub>8</sub>	Potássio Sódio e Silicato de alumínio

### 3.3.3 ENSAIOS QUÍMICOS

#### 3.3.3.1 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA POR RAIOS X

A fluorescência de raios X é uma técnica analítica utilizada para se realizar uma análise qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presentes na amostra sob a forma de óxidos (FASTOFSKI *et. al.*, 2014).

Nos tempos atuais, procura-se conseguir a análise química completa unicamente por métodos instrumentais que evitem a etapa longa e trabalhosa da fusão e insolubilização da sílica, seguida por separação dos elementos; utiliza-se a espectrografia ou fluorescência dos raios X.

Este ensaio foi realizado no laboratório do LAMIN/CPRM, localizado na cidade de Manaus-AM.

#### Metodologia de ensaio:

O material fundente de 0,5 g da amostra foi pesado em balança digital (variação de 0,01 g) em um cadinho de plástico e adicionou-se 7,5 g do Fluxo de Tetraborato de Lítio e homogeneizou-se manualmente, levando-o à máquina para o processo de fundir.

As amostras foram levadas à máquina de fusão, Mod: M4 Gasfusion Claisse (Figura 3.10(a) e (b)), à temperatura +/- 900°C, o material foi fundido pelo período de 16 minutos quando o tempo de fusão atinge a temperatura ideal e, automaticamente, a máquina é desligada para resfriar por cerca de 5 minutos. Após esse procedimento, o material foi levado ao equipamento de fluorescência, onde todos os processos de leitura das amostras foram realizados automaticamente. O tempo estimado para cada amostra foi de  $\pm 20$  min. O tratamento é feito para fazer análise experimental, quando são retiradas todas as interferências que possam conter às amostras.



(a)



(b)

Figura 3.10 (a) Máquina de fusão em funcionamento; (b) Máquina de fusão tempo de resfriamento.

Fonte: Autor

A determinação da composição química do material cimentante foi realizada em um equipamento de Espectrometria de Fluorescência de raios X, utilizando Espectrômetro WDS Sequencial, modelo Axios Minerals da marca PANalytical (Figura: 3.11 (a) e (b)), com tubo de raios X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de

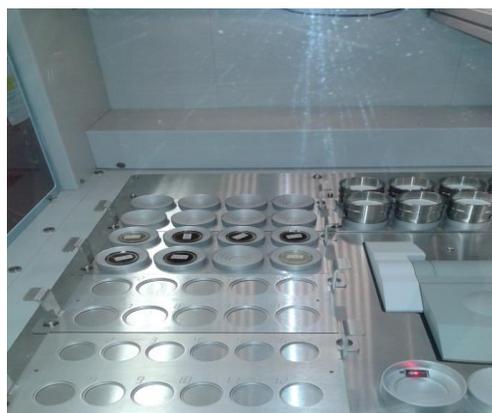
potência 3,0 kW. A aquisição e o tratamento dos dados foram realizados através do software SuperQ Manager da PANalytical.

Na análise quantitativa Standardles, o resultado será sempre normalizado para 100%, pois o mecanismo de quantificação está baseado na comparação relativa das intensidades dos raios X característicos, emitidos pelos elementos químicos constituintes da amostra.

A sensibilidade instrumental é calibrada com 20 padrões diversificados em termos de natureza do material (natural, sintético, pó prensado, disco fundido, etc.) e de elementos químicos constituintes (pacote IQ + da Panalytical), garantindo a abrangência de materiais que podem ser analisados.



(a)



(b)

Figura: 3.11 (a) Espectrômetro WDS Mod Axios Minerals; (b) Análise das amostras.

Fonte: Autor

### 3.3.4 *ENSAIOS REOLÓGICOS*

O ensaio reológico foi realizado para verificar a compatibilidade do cimento utilizado na pesquisa com o aditivo superplastificante, com fins de encontrar o teor de aditivo para ser utilizado na dosagem das misturas cimentícias. A reologia explica este tipo de procedimento exercida pela influência de tensões externas.

Como já comentado anteriormente, o superplastificante utilizado na pesquisa foi o Glenium 51 da 3ª Geração. Optou-se por esse aditivo porque, nas últimas décadas,

conforme literatura técnica, vários pesquisadores como (Silva (2004), Formagini (2005); Cordeiro (2006); Lima (2009), Rohden (2015), dentre outros, obtiveram os melhores resultados utilizando este aditivo em detrimento de outro.

#### **3.3.4.1 ENSAIO DE COMPATIBILIDADE E PONTO DE SATURAÇÃO**

Para obter-se o microconcreto foram realizados ensaios de compatibilidade do CPI S através do funil de Marsh e do miniabatimento de Kantro, respectivamente, em pastas cimentícias contendo aditivo superplastificante.

A relação água/cimento, empregada no ensaio pelo funil de Marsh e pelo miniabatimento de Kantro, foi de 0,35. Os ensaios foram realizados com vários teores de superplastificante diferentes até que fosse encontrado o ponto de saturação.

Os teores de superplastificante foram definidos através de análise visual, na qual se constatou o limite de segregação dos materiais cimentícios.

A seguir, serão descritos os métodos de ensaios:

- **Ensaio do Funil de Marsh**

Este ensaio foi realizado no laboratório LEM/FT/UFAM, onde os procedimentos adotados foram adaptados da literatura de Formagini (2005), em relação o ponto de saturação do aditivo SP com o cimento.

Segundo Formagini (2005), o método consiste em medir o tempo que 1 litro do fluido (cimento + água + aditivo), depois de misturado, leva para escoar através do funil.

Os materiais utilizados nesse ensaio foram:

- . Um misturador de bancada (Figura 3.6 (a));
- . Funil de Marsh (Figura 3.6 (b));
- . Uma proveta graduada, tendo volume mínimo de 1 litro para receber a pasta de cimento escoada (Figura 3.6 (c));
- . Um cronômetro para leitura do tempo de escoamento da pasta do cimento;
- . Uma espátula para raspar a pasta interna do misturador;
- . Um Becker com capacidade mínima de 1 litro para a pasta ficar em repouso.

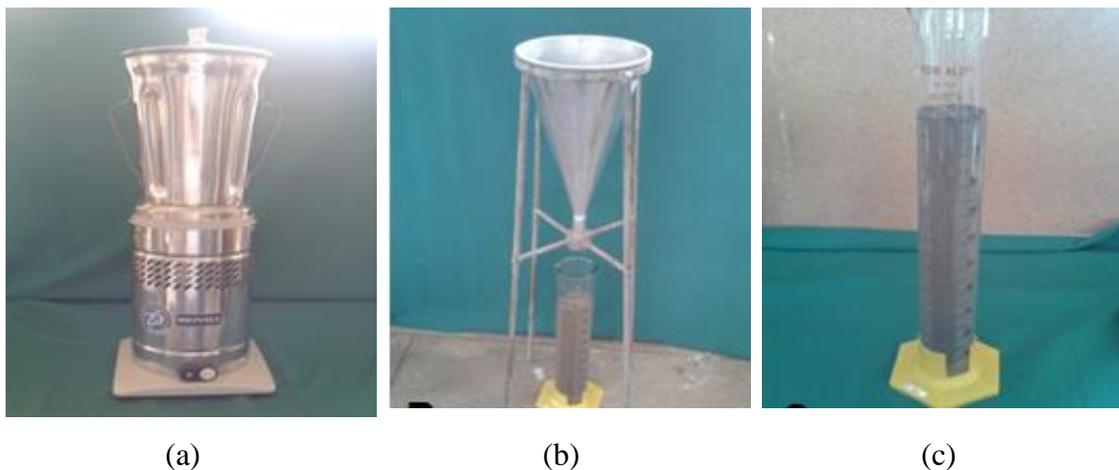


Figura 3.12 (a) Misturador Industrial; (b) Funil de Marsh; (c) Proveta com 1 litro de mistura.

Fonte: Autor

A metodologia para a realização do ensaio de compatibilidade entre o aditivo e o material cimentício consistiu nas seguintes etapas:

- Pesagem de cada componente: cimento, água e aditivo superplastificante;
- Agitou-se manualmente o aditivo para desagregar possíveis resíduos no fundo do recipiente antes de sua pesagem;
- O processo da mistura iniciou-se com a adição de toda a água mais metade do aditivo ao misturador, em seguida, a mistura foi homogeneizada por 15 segundos;
- Na sequência, o misturador foi desligado e o material sólido foi adicionado gradativamente;
- Processou-se a mistura até quando a pasta se tornou densa a ponto de impedir a agitação do misturador, observado visualmente, quando foi adicionado o restante do aditivo. Em seguida, o misturador foi ligado por um período de 30 segundos e desligado. A mistura final foi colocada em um Becker para repouso nos tempos (5, 30 e 60 minutos). Após os tempos em repouso, o material voltou ao misturador para ser agitado por 15 segundos e ensaiados no funil de March.

Esse procedimento foi realizado para o aditivo em percentuais variados de acordo com as

Tabela 3.3, baseando-se sempre na dosagem feita pelo fabricante do produto.

Tabela 3.3 Resumo quantitativo de materiais para a produção da dosagem (Produto: **Glenium 51**, 3ª geração).

<b>Teor Disp (%)</b>	<b>Aditivo (g)</b>	<b>Água (g)</b>			
0,3	17,44	621,37	<b>Tempo 5 min</b>	<b>Tempo 30 min</b>	<b>Tempo 60 min</b>
0,4	23,25	617,37			
0,5	29,06	613,36			
0,6	34,88	609,36			
0,7	40,69	605,36			

- **Ensaio do Miniabatimento de Kantro.**

O ensaio foi realizado no Laboratório Físico Química da Universidade Federal do Amazonas - UFAM. Os percentuais foram calculados seguindo a dosagem do fabricante do Glenium 51.

O procedimento foi adaptado das literaturas de Souza Filho (2012) e Monte (2003). Segundo Monte (2003), o método de miniabatimento foi desenvolvido por Kantro (1980) e adotado em algumas pesquisas nacionais e internacionais para a determinação da consistência de pastas cimentícias com diferentes tipos de aditivos.

Metodologia de ensaio:

. Pesou-se 252,76 g de cimento (CPI S) para todos os percentuais do teor de aditivos;

. Os materiais (cimento, resíduo cerâmico, aditivo e água) foram pesados e, em seguida, adicionou-se o cimento na batedeira planetária BP 05 SL da marca Gastromaq, com capacidade de 5 litros e possui 6 variações de velocidades projetadas de forma a atender a produção de uma gama ampla de diferentes tipos de misturas, conforme a (Figura 3.13 Batedeira Planetária BP 05 SL Marca Gastromaq).



Figura 3.13 Batedeira Planetária BP 05 SL Marca Gastromag.

Fonte: Autor

Inicialmente, o aditivo superplastificante (SP) foi adicionado a água e misturado em um recipiente por 30 segundos. Em seguida, o cimento foi colocado no misturador que foi ligado na velocidade 1 (115 rpm) e a mistura de água com SP foi adicionada ao cimento. Após a mistura completa, a velocidade foi aumentada de 1 (115 rpm) para 2 (145 rpm) e processada por um período de 8 minutos. Em seguida, a mistura era deixada em repouso por cerca de 60 minutos para, então, se proceder ao ensaio do Mini Kantro.

Esse ensaio é composto por um molde tronco-cônico e uma placa de acrílico. O ensaio inicia-se com o posicionamento do molde sobre a placa de acrílico. Em seguida, a mistura cimentícia é vertida dentro do tronco até seu preenchimento completo. Na sequência, o molde é levantado verticalmente em velocidade constante e a pasta se espalha horizontalmente.

Neste procedimento, seguiu-se à orientação de Souza Filho (2012), que mediu somente o tempo de 60 minutos de descanso e, a partir daí, de forma visual, consegue-se definir o ponto de saturação.

As Figura 3.14 (a) e (b) apresentam a fluidez das misturas do RC e do CPI S, respectivamente e as (c) e (d), apresentam a leitura dos materiais (RC e CPI S), respectivamente, feita com um paquímetro onde mede-se em dois diâmetros perpendiculares e calcula-se a média, que é denominada diâmetro final de espalhamento.

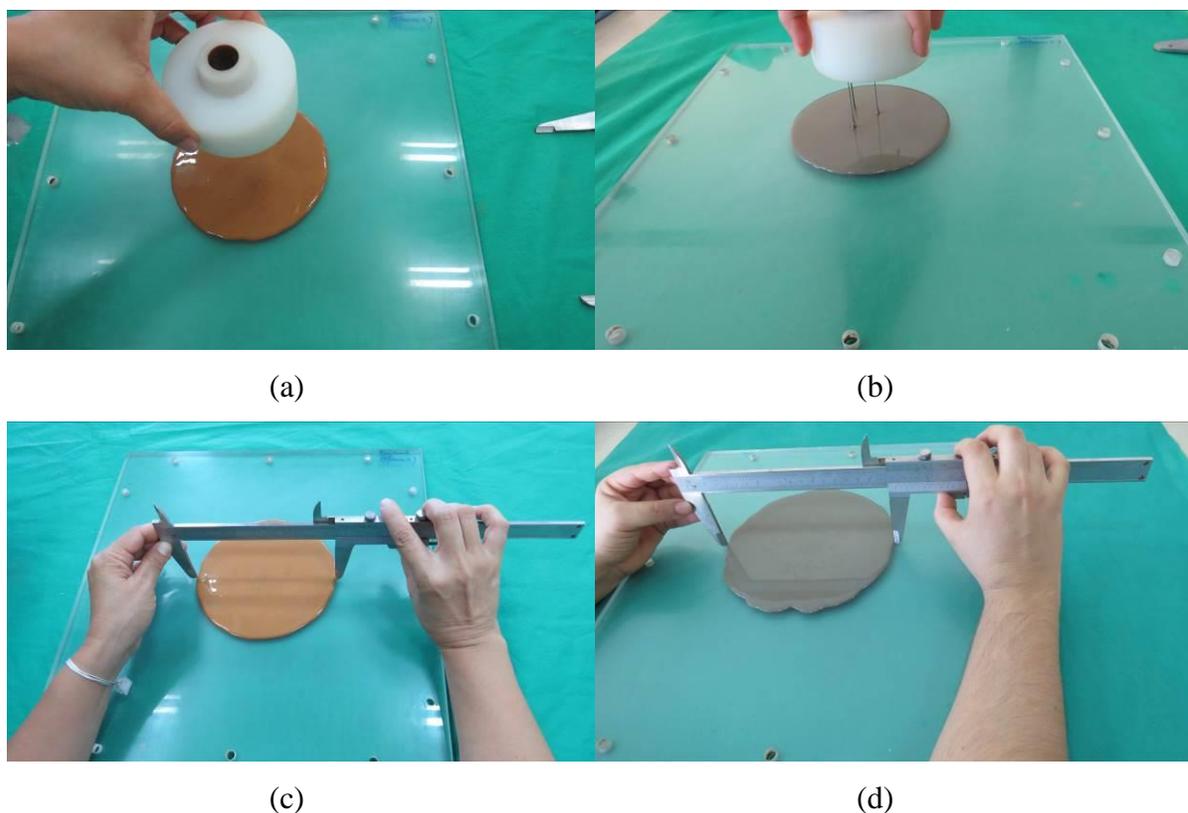


Figura 3.14 (a) Fluidiez pasta RC; (b) Fluidiez pasta CPI S; (c) Leitura RC; (d) Leitura CPI S.

Fonte: Autor

As dosagens utilizadas no ensaio de compatibilidade pelo miniabatimento de Kantro estão apresentadas na Tabela 3.4. No presente estudo adotou-se um espalhamento de  $120 \pm 3$  mm e uma relação água/cimento de 0,35.

A consistência das pastas em seu estado fresco é determinada pela norma ABNT NBR NM 67 onde classifica a consistência como sendo S100 com espalhamento entre  $100 \leq A < 160$  mm, para elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto, avaliadas pelo método de Kantro, foi ajustada com o uso de teores específicos de aditivo superplastificante.

Tabela 3.4 Dosagem de compatibilidade e seus respectivos percentuais de misturas.

<b>% Subst.CPI S</b>	<b>M.cim (g)</b>	<b>M.rc (g)</b>	<b>Areia (g)</b>	<b>Teor Adit. (%)</b>	<b>Adit. (g)</b>	<b>Água (g)</b>
<b>MC0 Ref.</b>	803,52	0	1607,04	0,40	10,43	314,19
<b>MC 10</b>	723,17	80,35	1607,04	0,40	10,43	314,19
<b>MC 20</b>	642,82	160,70	1607,04	0,40	10,43	314,19
<b>MC 30</b>	562,46	241,06	1607,04	0,35	9,12	315,10
<b>MC 40</b>	482,11	321,41	1607,04	0,30	7,82	316,00
<b>MC 50</b>	401,76	401,76	1607,04	0,25	6,52	316,90

### **3.3.5 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICA DOS MICROCONCRETOS**

#### **3.3.5.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DO MICROCONCRETO**

O ensaio de absorção é o processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso, ABNT NBR 9778, (2006) versão corrigida (2014).

Este ensaio foi realizado no laboratório LEM/FT/UFAM seguindo os procedimentos indicados na norma brasileira NBR 9778 (2014). As amostras utilizadas foram corpos de prova cilíndricos com diâmetro 41 mm e altura 82 mm.

Foram moldados 3 corpos de prova para cada amostra de percentual, preparadas e moldadas de acordo com a norma NBR 7215 (1996). Os ensaios se processaram aos 28 dias de idade.

Estes ensaios foram executados em amostras de microconcreto, cujas composições variaram de acordo com o apresentado na Tabela 3.5 onde é apresentado o consumo dos materiais e sua proporção unitária em massa usado em cada mistura. Para as misturas de argamassa, utilizou-se 0% como sendo de referência (MC 0), e 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de substituição de cimento Portland por resíduo cerâmico moído (MC 10, MC 20, MC 30, MC 40 e MC 50, respectivamente). O fator água/cimento adotado foi

de 0,4 para todas as misturas, baseada na literatura de Melo Filho (2012) que adotou em seus estudos para o traço de 1:2 e alcançou bons resultados.

Tabela 3.5 Proporção e consumo dos materiais utilizados no programa experimental.

Misturas	Proporção Unitária (em massa)			Consumo (g)		
	Cimento	RC	Areia	Cimento	RC	Areia
<b>MC0 Ref.</b>	1	0	2	803,52	0	1607,04
<b>MC 10</b>	0,9	0,1	2	723,17	80,35	1607,04
<b>MC 20</b>	0,8	0,2	2	642,82	160,70	1607,04
<b>MC 30</b>	0,7	0,3	2	562,46	241,06	1607,04
<b>MC 40</b>	0,6	0,4	2	482,11	321,41	1607,04
<b>MC 50</b>	0,5	0,5	2	401,76	401,76	1607,04

Após o ensaio de absorção por imersão, foi possível calcular o índice de vazios ( $I_v$ ), a absorção por imersão ( $m_{abs}$ ), a massa específica da amostra seca ( $m_{seca}$ ), a massa específica da amostra saturada ( $m_{saturada}$ ) e a massa específica real ( $m_{real}$ ), através das equações 6, 7, 8, 9 e 10, respectivamente, com seus respectivos desvios padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV) para análise.

A seguir são apresentadas as equações conforme a norma NBR 9778 (2014):

a) **Absorção**

Cálculo da absorção (A), em porcentagem é demonstrado para todos os percentuais:

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$M_{sat}$  é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

$M_s$  é a massa da amostra seca em estufa.

b) **Índice de vazios:**

Calcular o índice de vazios ( $I_v$ ), em porcentagem.

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$M_i$  é a massa da amostra saturada imersa em água após a fervura.

c) **Massa específica da amostra seca:**

Calcular a massa específica seca ( $P_s$ ).

$$P_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad \text{Equação 8}$$

d) **Massa específica da amostra saturada:**

Calcular a massa específica da amostra saturada após fervura ( $P_{sat}$ ).

$$P_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \quad \text{Equação 9}$$

e) **Massa específica real**

Calcular a massa específica real ( $P_r$ ).

$$P_r = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad \text{Equação 10}$$

A metodologia de ensaio consiste das seguintes etapas demonstradas nos subitens a seguir:

- **Secagem da amostra e determinação de sua massa na condição seca:**

. Pesou-se as amostras e secou-se em estufa a uma temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  por um período de 72 horas. Em seguida, determinou-se e registrou-se a massa da amostra ( $m_s$ );

- **Saturação da amostra e determinação de sua massa na condição saturada e imersa em água:**

As amostras foram imersas em água à temperatura de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  e mantida durante 72 horas.

Após completada a etapa de saturação em água à temperatura de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ , colocou-se a amostra em um recipiente cheio de água, que foi levada à ebulição de forma progressiva, a qual começou depois de 15 minutos e antes de 30 minutos. A ebulição foi mantida por um período de 5 horas, com o volume de água mantido aproximadamente constante (Figura 3.15 (a)); em seguida, deixou-se a água esfriar naturalmente em temperatura ambiente, onde determinou-se e registrou-se a massa com auxílio de balança hidrostática ( $m_1$ ), para tanto as amostras foram pesadas dentro da água como mostra a Figura 3.15 (b)).



(a)



(b)

Figura 3.15 (a) Massa em ebulição; (b) Balança hidrostática.

Fonte: Autor

Na sequência, retirou-se a amostra da água e a superfície foi seca com pano úmido e sua massa saturada ( $m_{\text{sat}}$ ) foi pesada.

### 3.3.5.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Esse ensaio foi realizado no laboratório LEM/FT/UFAM, conforme a norma ABNT NBR 5739 (2007), em uma máquina de ensaio universal, célula de carga modelo EMIC DL-20000 kgf, capacidade máxima de 200 kN, a uma velocidade de deslocamento de 0,2 mm/min (Figura 3.16).

As amostras foram moldadas em tubo cilíndrico de PVC, de dimensões 41 mm x 82 mm (diâmetro x altura), conforme mostrado na Figura 3.17. As moldagens dos corpos de prova foram produzidas em sala climatizada com temperatura  $25 \pm 5^\circ\text{C}$  considerada temperatura ambiente, seguindo as determinações da norma brasileira NBR 7215 (1996) e complementada com a norma NBR 5739 (2007). A parte superior dos moldes foram vedadas a fim de impedir a perda de umidade da mistura para o ambiente.

A resistência à compressão dos microconcretos foram avaliadas através da ruptura de 3 corpos de prova para cada percentual de mistura nas idades de 7, 14 e 28 dias. Estes procedimentos foram realizados de acordo com as normas NBR 5751 (2012) e NBR 5752 (2012).



(a)



(b)

Figura 3.16 (a) Equipamento Mod EMIC DL, 200 kN; (b) Corpo de prova.

Fonte: Autor

As misturas foram produzidas em uma bateadeira planetária já mencionada anteriormente. Na sequência, as misturas foram vertidas em moldes de PVC (Figura 3.17) que eram apoiados em uma placa de acrílico com dimensões de 50 mm x 50 mm. Em seguida, envelopou-se com fita crepe e, deixou-se por 24 horas em temperatura ambiente.

Após 24 horas, os corpos de prova foram removidos dos moldes e mantidos sob cura em água limpa, na temperatura  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ , considerada ambiente.

Para obter-se melhor perfeição e rendimento no processo de cura e ruptura na realização do ensaio de resistência à compressão, fez-se um ensaio de tempo de cura para rompimento dos CP's: colocou-se 1 corpo de prova submerso em água pelo período de 60 minutos, em seguida, pesou-se o mesmo CP em intervalos de tempo, 10 em 10 minutos, perfazendo um total de 24 horas, quando observou-se a redução da água do material em temperatura ambiente. Com isso, adotou-se um período de 24 horas de antecedência à retirada dos CP's da água para que fossem rompidos nas idades já estabelecidas neste estudo.

Antes da execução dos ensaios de compressão, os corpos de prova passaram por um processo de regularização de suas extremidades em torno mecânico modelo SAGAZ NZ-400.



Figura 3.17 Tubo cilíndrico de PVC (41 x 82 mm).

Fonte: Autor

### **3.3.5.3 ANÁLISE DO PROCESSO DE FRATURA DOS MICROCONCRETOS**

A avaliação do padrão das fissuras foi realizada através de imagens fotograficas obtidas após o rompimento dos corpos de prova com a utilização de uma câmara CANON Mod. Power Shot SX50 HS.

Durante o ensaio de resistência à compressão, as amostras foram rompidas a uma velocidade de 0,2 mm/min até que o corpo de prova atingisse o colapso.

Segundo Correia (2009), as rupturas dos corpos de prova podem apresentar fissuras total e/ou possuir parcial fragmentação ocorridas talvez em função do agente modificador introduzido na matriz cimentícia. A reologia explica esse tipo de comportamento que ocorre nas misturas dos CP's.

## 4 RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na caracterização dos materiais e concretos produzidos.

### 4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

#### 4.1.1 TEOR DE SÓLIDOS DOS ADITIVOS

O teor de sólido para o aditivo estudado está apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Teor de Sólido do Aditivo SP.

Aditivo	Teor de sólidos (%)			Média do Teor de Sólidos (%)	SD
	A1	A2	A3		
<b>Glenium 51</b>	30,92	30,78	30,77	30,83	0,22

Esse resultado indica que o aditivo apresentou o mesmo teor de sólido apresentado na ficha técnica do fabricante do produto. Esse valor foi utilizado no cálculo de dosagem das misturas na produção do microconcreto.

#### 4.1.2 MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO E DO RESÍDUO

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores médios e o desvio padrão da massa específica do cimento CPI S, do resíduo cerâmico (RC) e da areia.

Na Tabela 4.2 Massa Específica do CP I S, RC e Areia.

Nº Amostra	Cimento CPI S			Resíduo Cerâmico			Areia
	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	X (g/cm <sup>3</sup> )	SD (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	X (g/cm <sup>3</sup> )	SD (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	3,24	3,24	0,004	2,81	2,81	0,009	2,63
2	3,24			2,81			
3	3,23			2,81			

Analisando-se os resultados na Tabela 4.2, constata-se que o valor médio da massa específica do resíduo cerâmico (RC) de  $2,81 \text{ g/cm}^3$  é inferior ao valor médio do cimento (CP I S) usado, que é de  $3,24 \text{ g/cm}^3$ , ou seja, para se fazer uma substituição do cimento é necessário realizar uma compensação em massa e não em volume. Esse resíduo pode permitir a produção de microconcretos com massa específica menor em relação aos convencionais. O resultado da densidade da areia de  $2,63 \text{ g/cm}^3$  está dentro dos limites que recomendam a norma para serem utilizadas na fabricação de argamassas e concretos.

#### 4.1.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO CP I S, RC E AREIA

As análises granulométricas para o CP I S e o RC são apresentadas na Figura 4.1, em escala logarítmica.

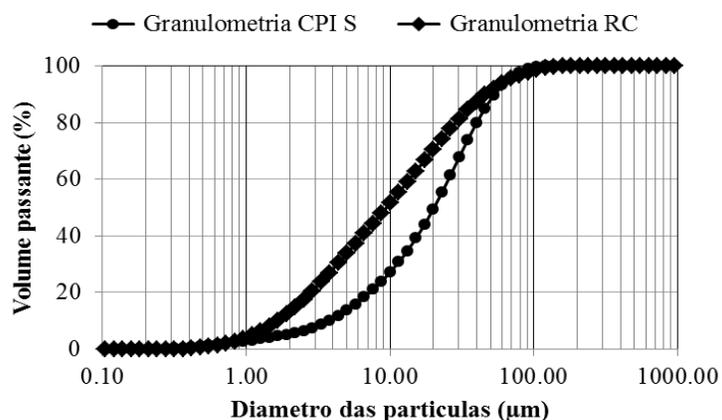


Figura 4.1 Curva granulométrica do CP I S e do RC.

Observa-se no gráfico da Figura 4.1, que a granulometria do RC apresenta o diâmetro médio das partículas menor do que aquele apresentado para o cimento CP I S, sendo o primeiro com o valor de 18,18% e o segundo na ordem de 25,06%. Esse comportamento pode contribuir para um melhor empacotamento entre os dois materiais, já que um tenderá a preencher os vazios do outro, em uma ação física, como filler.

A partir dos dados de granulometria foram extraídas as características dos materiais que estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Dados da Granulometria a laser do CPI S e do RC.

<b>Amostras</b>	<b>Volume M.</b>	<b>D<sub>10</sub></b>	<b>D<sub>50</sub></b>	<b>D<sub>90</sub></b>
<b>CPI S</b>	25,06%	3,76 $\mu$ m	20,22 $\mu$ m	53,19 $\mu$ m
<b>RC</b>	18,18%	1,65 $\mu$ m	9,43 $\mu$ m	46,07 $\mu$ m

Onde, M: Médio e D: Diâmetro

Na Tabela 4.3, estão apresentados os parâmetros característicos, os diâmetros com as dimensões menores que 90% das partículas que constituem a massa dos materiais D<sub>90</sub> tanto para o CPI S quanto para o RC. No presente estudo além do diâmetro D<sub>90</sub>, foram avaliadas também os diâmetros das partículas para os valores de D<sub>50</sub> e D<sub>10</sub>, respectivamente, que se refere as dimensões abaixo da qual se encontram 50% e 10% das partículas da massa do material. Para as curvas granulométricas dos dois materiais CPI S e RC os valores dos diâmetros de D<sub>90</sub>, D<sub>50</sub> e D<sub>10</sub> apresentam valores na ordem de 77,17 $\mu$ m e 57,15 $\mu$ m, respectivamente.

Estes resultados conferem com a literatura, visto que FORMAGINI (2005), CORREIA (2009) e MARANGON (2011) obtiveram resultados semelhantes em seus estudos, com a produção de concretos com as características físicas e mecânicas que se desejava obter na presente pesquisa.

Na Tabela 4.4 estão apresentados os percentuais passante e retido da areia em suas respectivas peneiras e na Figura 4.2, a curva granulométrica da areia é obtida no ensaio de quarteamento em escala logarítmica, o que atende aos padrões estabelecidos pela norma NBR NM 248 (2003) – Determinação da composição granulométrica, que explica que para a amostra de ensaio foi calculada a porcentagem retida, em massa, em cada peneira, com aproximação de 0,1%. A amostra apresentou a mesma dimensão máxima características e, nas demais peneiras, os valores de porcentagem retida individualmente não diferiram mais que 4% entre si.

O módulo de finura encontrado foi de 1,79, que está dentro dos parâmetros para dosagem dos materiais cimentícios para a produção dos microconcretos, onde a areia fina está na faixa da zona utilizável inferior que é de 1,55 a 2,20 conforme ITAMBÉ, (2011) e PETRUCCI (1998).

Tabela 4.4 Granulometria do agregado miúdo (areia).

Nº Peneiras	Aberturas (mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida (g)	Porcentagem passante acumulada	Porcentagem retida acumulada
4	4,76	0,14	0,00	100	0
8	2,36	11,55	1,0	99	1
16	1,18	42,81	4,0	95	5
30	0,590	151,33	16,0	79	21
50	0,297	313,45	32,0	47	53
100	0,150	449,60	46,0	1	99
TOTAL =		968,00	100	TOTAL = 179	
Módulo de finura = 1,79					

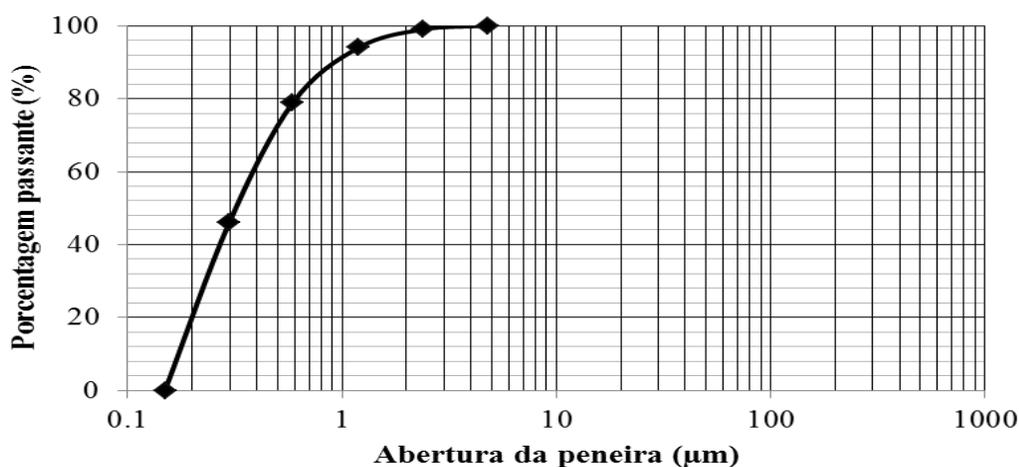


Figura 4.2 Curva granulométrica da areia pelo método de quarteamento.

A partir do módulo de finura, verifica-se que a areia apresenta graduação mais fina. O resultado mostra que o material pode ser utilizado para produção do microconcreto, e que está de acordo com o que determina a norma para este ensaio.

Estes resultados estão de acordo com a literatura, visto que Gonçalves (2005) encontrou resultado similares em seu estudo.

#### **4.1.4 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE MOAGEM DO RC**

Na Tabela 4.5 estão apresentados os valores de massa retida e passantes em função do tempo utilizado no processo de moagem do RC.

Tabela 4.5 Tempo de moagem do RC

<b>Tempo de moagem (min)</b>	<b>Retido (%)</b>	<b>Passante (%)</b>	<b>Total (%)</b>
60	65	35	100
120	52	48	100
180	48	52	100

A moagem durante o tempo de 60 minutos não foi eficiente para que o material (RC) adquirisse uma granulometria fina, visto que, apenas 35% do material passou na peneira nº 100. Para o tempo de 120 minutos, observou-se que o teor passante foi de 48%, o que ainda não apresentou um valor satisfatório. Já para o tempo de 180 minutos, observou-se que o teor passante foi de 52% do material, sendo esse tempo utilizado no processo de moagem do resíduo cerâmico durante todo o trabalho.

Para este tempo de moagem, pode-se afirmar que a granulometria do RC atendeu às exigências físicas da norma brasileira NBR 12653 (2014) – Materiais pozolânicos-Requisitos, que atende a exemplo do metacaulim, o resíduo cerâmico, por serem materiais proveniente de calcinação, enquadram-se na referida norma, como sendo pozolanas artificiais e, por extensão, de Classe N.

#### **4.1.5 ANÁLISE DE TERMOGRAVIMETRIA DA PASTA CIMENTÍCIA – TG/DTG**

Na Figura 4. são apresentadas as curvas de TG e DTG das pastas cimentícias com os teores de 0%, 30%, 40% e 50% de substituição do cimento por RC, (MR0, MP30, MP40 e MP50, respectivamente).

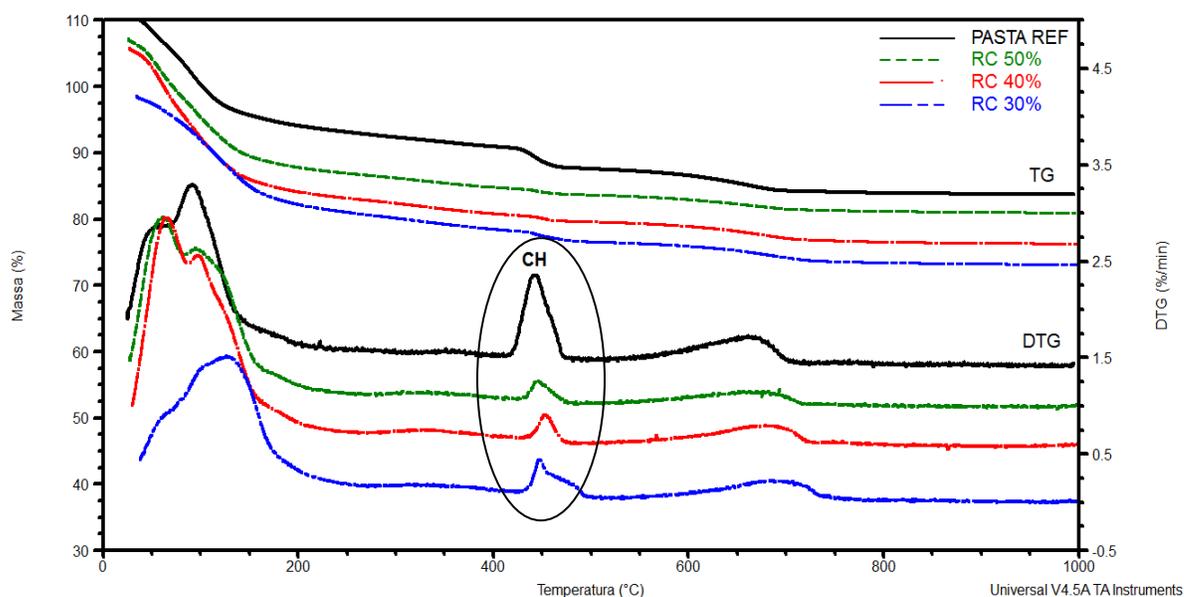


Figura 4.3 Curva TG/DTG para as pastas cimentícias.

A partir das curvas, pode-se verificar quatro picos bem característicos com o aumento da temperatura. Os picos ocorridos nas faixas de temperaturas de 35°C a 350°C, são atribuídos à desidratação do gesso, etringita, silicatos e aluminatos (TAYLOR, 1997). Entre 400 e 500°C, ocorre a perda de massa referente à desidroxilação do hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$ . O último pico entre 500°C e 750°C foi ocasionado pela descarbonatação do carbonato de cálcio  $\text{CaCO}_3$ .

Como o interesse maior nessa pesquisa era verificar a ação da atividade pozolânica do RC, foi dado ênfase apenas ao pico referente ao teor de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Com isso, analisando as pastas de referência e as pastas com as adições, pode-se verificar que à medida que aumenta a quantidade do resíduo cerâmico, ocorre a diminuição da água quimicamente combinada no  $\text{Ca(OH)}_2$ . Esse comportamento é comprovado através da interação entre o teor de água quimicamente combinada no hidróxido de cálcio e a perda de massa entre 400 e 500°C. Estes resultados assemelham-se aos encontrados por SEBASTIANY (2014) e DWECK *et al.*, (2013) em seus estudos.

Na Tabela 4.6 está apresentado os valores de redução do hidróxido de cálcio em função do teor de substituição.

Tabela 4.6 Valores de perda e redução do hidróxido de cálcio para as pastas no ensaio TG/DTG.

Pastas	Temperatura (°C)	Perda de massa do Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	Redução Ca(OH) <sub>2</sub> (%)
MR0	440,75 – 423,58	2,41	-
MP30	440,43 – 430,48	0,91	62,24
MP40	449,38 – 436,92	0,47	80,49
MP50	443,11 – 434,25	0,48	80,08

Onde:

MR: Material de referência;

MP: Material pozolânico.

Fazendo um comparativo entre as pastas MP30, MP40, MP50 e a pasta de referência MR0, pode se observar que a perda de massa da mistura MP30 entre as temperaturas 440 e 430°C decorrente da desidroxilação do CH, foi de 0,91% do material, totalizando uma redução de 62,24% em relação a de referência. Com relação aos teores de 40% e 50% apresentaram praticamente as mesmas reduções, cerca de 80,49% em relação ao referencial. Percebe-se que houve uma expressiva redução do teor de hidróxido quando se substituiu parte do cimento por 40% e 50% de RC, no entanto, essa redução não foi constante com o aumento do RC. Verifica-se que a medida que aumenta o teor de substituição do cimento adotado, ocorre a diminuição do hidróxido de cálcio devido a reação pozolânica do RC.

Com esses resultados, pode-se concluir que o RC proporcionou reação pozolânica a mistura visto que todas as porcentagens utilizadas proporcionaram redução do teor de CH das misturas cimentícias.

#### 4.1.6 DIFRATROMETRIA DE RAIOS X DO RC.

O difratograma de raios X do RC é apresentado na Figura 4.4.

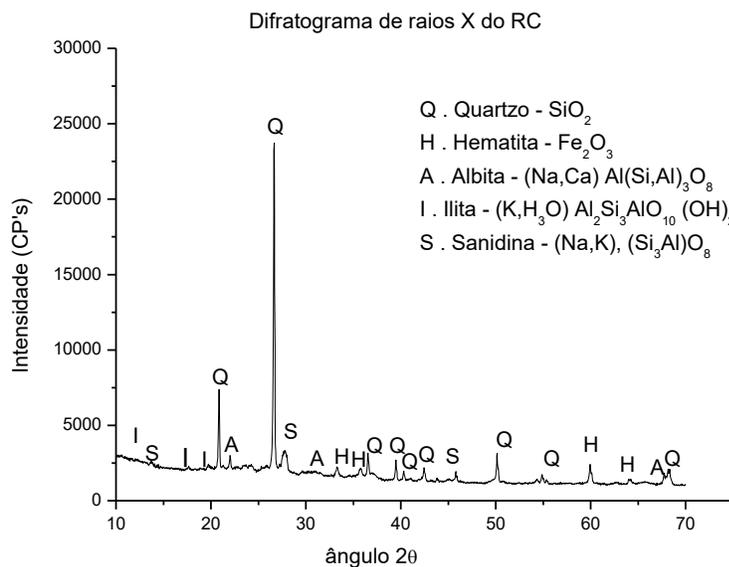


Figura 4.4 Resultados da difração de raios X

Através da difração de raios X percebe-se a predominância de picos cristalinos de quartzo em quase toda a argila calcinada analisada. Além do mineral quartzo (00-046-1045) foram identificados na amostra os minerais, hematita (00.033-0664), albita (00-041-1480), illita (00-026-0911) e sanidina (00-010-0357). O mineral quartzo é formado por  $\text{SiO}_2$ , o mineral hematita contém  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o mineral albita é composto por  $(\text{Na, Ca}) \text{Al}(\text{Si, Al})_3$ , já o mineral illita é composto por  $(\text{K, H}_3\text{O}) \text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$  e o mineral sanidina é constituído na sua estrutura por  $(\text{Na, K}) (\text{Si}_3\text{Al}) \text{O}_8$ .

Nas análises foram observados diferentes misturas no mesmo mineral, onde aparece vários graus de regularidade em suas estruturas cristalinas. Desta forma algumas propriedades mais importantes do mineral argiloso como a plasticidade e o poder de suspensão, se manifestam quando se misturam com a água, formando um só conjunto. Na sua maioria, os minerais argilosos são de natureza coloidal, ou seja, quando se dispersam

em um líquido permanecem suspensas e não sedimentam, tais resultados são similares aos estudos realizados por BARBA *et al.*, (2002).

Os picos mais intensos correspondem ao mineral quartzo pois este apresenta elevada cristalinidade o que facilita sua identificação por DRX.

Os resultados de difração de raio x foi semelhante ao encontrado por Gonçalves *et al.*, (2006), indicando que a matéria prima utilizada na produção de tijolos foi um solo argiloso com presença de sílica cristalina (quartzo) e argila illita.

## 4.2 PROPRIEDADES QUÍMICAS

### 4.2.1 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X DO RC E DO CPI S.

A composição química foi determinada por meio de Fluorescência de raios X na forma quantitativa, indentificando-se os elementos do resíduo cerâmico (RC) e do cimento (CPI S), conforme apresentada na Tabela 4.7. Neste estudo está sendo apresentado uma análise semi-quantitativa de elementos químicos presentes, apesar do resultado ser dado em termos de óxidos.

Tabela 4.7 Composição Química do RC e do CPI S (% em massa).

ÓXIDOS	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
RC (%)	66,77	7,16	18,63	1,22	1,38	1,24	1,94	1,04	0,11
CPI S (%)	15,48	4,01	3,88	70,59	-	-	0,93	0,29	0,04

ÓXIDOS	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZrO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	SrO	NiO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO
RC (%)	0,21	0,08	0,03	ND	0,01	0,02	0,11	ND	0,83
CPI S (%)	-	0,02	4,68	-	-	0,07	-	-	-

Lim. Quantificação: 0,1%; ND: Não detectado.

A Tabela 4.7 mostra a composição química do RC e do CPI S investigado. A composição química é caracterizada basicamente por alta quantidade de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ , respectivamente. A quantidade de  $\text{CaO}$  está relacionada a carbonato de hidróxido de cálcio, enquanto que a  $\text{SiO}_2$  está associada com a fase cristalina de Quartzo (silício).

A composição química do resíduo cerâmico indica que o mesmo atende aos limites da norma ABNT NBR 12653 (2014) para uso como material pozolânico em misturas com o cimento Portland, uma vez que a soma dos compostos  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$  foi de 93,78%, conseqüentemente, superior ao mínimo que estabelece a norma, que é de 70%.

A composição química do RC é caracterizada basicamente pela alta quantidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com 85,4% e apresenta uma pequena quantidade de 9,1% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{K}_2\text{O}$ . A quantidade elevada de  $\text{SiO}_2$  está relacionada ao carbonato e hidróxido de cálcio presente no mineral quartzo, enquanto a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  está associada com a fase cristalina do mineral albita. O teor de 3,18% de  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ , indica que o RC pode agir como um fundente e pode contribuir para melhorar as propriedades de queima através da redução da porosidade pela formação de fase líquida em reação com  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . O  $\text{MgO}$  com 1,38% também pode atuar como fundente durante a etapa de queima.

A composição química do cimento Portland (CPI S) é caracterizada pela alta quantidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{CaO}$  com 86,07%, percebe-se também na sua composição uma pequena quantidade de 7,89% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

De acordo com os resultados obtidos, o resíduo cerâmico finamente moído atende às especificações de uma pozolana, podendo-se considerar uma argila calcinada, pois atingiu uma temperatura entre 500 e 900°C. Portanto, atende o que determina a norma brasileira NBR 12653 (2014) e o material pode ser utilizado nas dosagens da matriz cimentícia.

Observa-se que a Fluorescência de raios X é uma técnica analítica utilizada para se realizar uma análise qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presentes na amostra sobre forma de óxidos cujo o elemento predominante é o mineral Quartzo (silício), cerca de 67%, uma vez que este é o que se encontra em maior quantidade na argila, matéria prima da cerâmica. Nas argilas residual, a sílica livre é devida principalmente a quartzo macroscópico, que é um constituinte comum das rochas ígneas;

nas argilas sedimentares, além do quartzo microscópico, podem-se encontrar as formas amorfas e cristalinas de sílica.

O segundo elemento com maior teor encontrado no RC foi o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . O alumínio existente numa argila está em sua maior parte combinado formando os argilominerais, geralmente caulinitas. Algumas argilas apresentam teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  superior ao da caulinita teórica que é de 39,8%, proveniente também de bocmita, gibsita, diásporo ou cliaquita (hidróxido de alumínio amorfo), sendo, portanto, altamente aluminosas e de interesse na fabricação de matérias refratárias (SANTOS, 1992).

O teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de um material refratário sílico aluminoso, quando é superior a 46%, o classifica segundo a norma da ABNT como aluminoso ou altamente aluminoso, se for inferior a 46% é chamado de sílico aluminoso.

### ***4.3 PROPRIEDADES REOLÓGICAS***

#### ***4.3.1 COMPATIBILIDADE E PONTO DE SATURAÇÃO ENTRE O ADITIVO E O CIMENTO CP I S (FUNIL DE MARSH).***

Na Figura 4.5 estão apresentadas as curvas referentes a compatibilidade e ponto de saturação do cimento CP I S e do aditivo superplastificante Glenium 51.

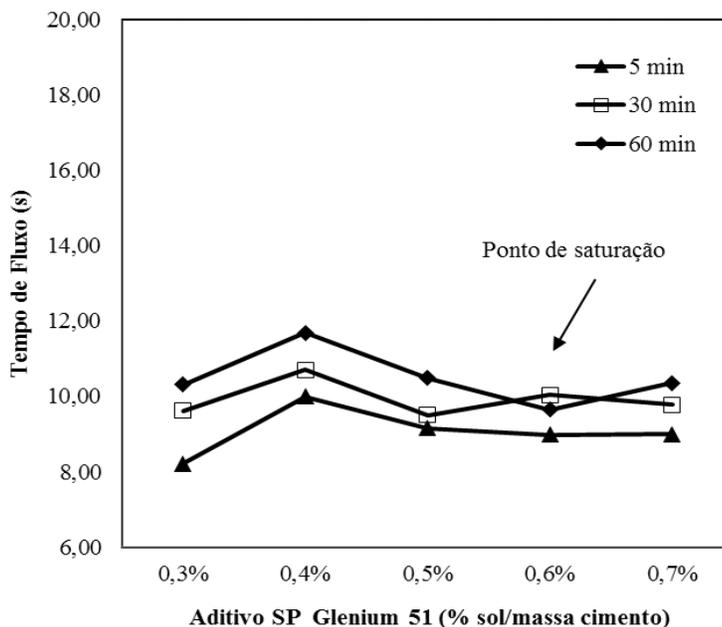


Figura 4.5 Compatibilidade do aditivo SP Glenium 51.

A compatibilidade do cimento com o aditivo superplastificante ocorre quando o tempo de escoamento aos 5, 30 e 60 minutos após as misturas permanecerem próximos.

O ponto de saturação entre o cimento e o SP é encontrado quando as partículas do cimento não conseguem mais absorver as moléculas dos dispersantes que se encontram livres na fase líquida após as misturas na superfície, e a partir desse momento qualquer aumento no SP não irá influenciar em sua estrutura. No referido estudo encontrou-se o valor de 0,6% para ser utilizado no cálculo da dosagem dos microconcretos.

Formagini (2005), explica que o consumo do aditivo utilizado na dosagem está no intervalo de  $0 \leq 1$ , a partir desse momento, qualquer aumento na dosagem do SP não influenciará no seu rendimento, com isso, de forma sustentável, será economizado o consumo de aditivo, evitando desperdício de material e, conseqüentemente, evitando gastos desnecessário na aquisição dos produtos tanto líquido quanto sólidos.

É possível observar que o tempo de fluxo da pasta produzida permanece dentro do intervalo de tempo mencionado, apresentando a compatibilidade entre os dois materiais. Formagini (2005), explica ainda, se o tempo de escoamento do fluido entre a primeira e a

última leitura forem diferente, significa dizer que o aditivo usado apresenta baixa eficiência no processo de dispersão das partículas de cimento.

Os resultados da compatibilidade estão de acordo com aqueles obtidos por De Larrard (1999), Silva (2004), Formagini (2005), Cordeiro (2006) e Morangon (2011) dentre outros, que também encontraram resultados similares em seus estudos. Portanto, o resultado encontrado foi satisfatório para o que está sendo pesquisado, o ponto de saturação encontrado foi de 0,6% em relação ao cimento utilizado.

Na literatura, Marangon (2011), observou que a compacidade aumenta quando se adiciona o aditivo superplastificante aos materiais.

Portanto, a compatibilidade do SP em relação ao cimento CP I S, significa dizer que, o material pode ser utilizado na pesquisa, caso tenha alguma demanda favorável do produto na cidade de Manaus-AM.

#### **4.3.2 COMPATIBILIDADE E PONTO DE SATURAÇÃO ENTRE O ADITIVO E O CIMENTO CP I S (MINI KANTRO).**

Os resultados de compatibilidade pelo mini Kantro estão apresentados na Tabela 4.8 e no gráfico da Figura 4.6.

Tabela 4.8 Leitura da pasta do cimento fluída nos tempos 5, 30 e 60 minutos.

Tempo: 5 minutos de descanso.

<b>Teores Aditivos (%)</b>	<b>Aditivo (g)</b>	<b>Água (g)</b>	<b>Diâmetro 1 (mm)</b>	<b>Diâmetro 2 (mm)</b>	<b>Diâmetro médio (mm)</b>	<b>SD (mm)</b>
0,3	2,52	88,74	189,80	181,90	185,85	3,80
0,4	3,35	88,16	184,00	168,00	176,00	8,00
0,5	4,19	87,58	178,00	164,50	171,25	6,75
0,6	5,03	86,99	187,00	187,50	187,25	0,25
0,7	5,87	86,41	190,10	187,10	188,60	1,50

Tempo: 30 minutos de descanso.

Teores Aditivos (%)	Aditivo (g)	Água (g)	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro médio (mm)	SD (mm)
0,3	2,52	88,74	169,20	150,80	160,00	9,20
0,4	3,35	88,16	173,50	167,60	170,55	2,95
0,5	4,19	87,58	170,20	166,80	168,50	1,70
0,6	5,03	86,99	180,10	177,70	178,90	1,20
0,7	5,87	86,41	181,70	182,80	182,25	0,55

Tempo: 60 minutos de descanso.

Teores Aditivos (%)	Aditivo (g)	Água (g)	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro médio (mm)	SD (mm)
0,3	2,52	88,74	159,20	160,10	159,65	0,45
0,4	3,35	88,16	164,00	166,00	165,00	1,00
0,5	4,19	87,58	167,40	165,60	166,50	0,90
0,6	5,03	86,99	179,50	186,90	183,20	3,70
0,7	5,87	86,41	184,00	185,00	184,50	0,05

Na Figura 4.6 apresenta o gráfico analisado após a leitura do espalhamento por paquímetro.

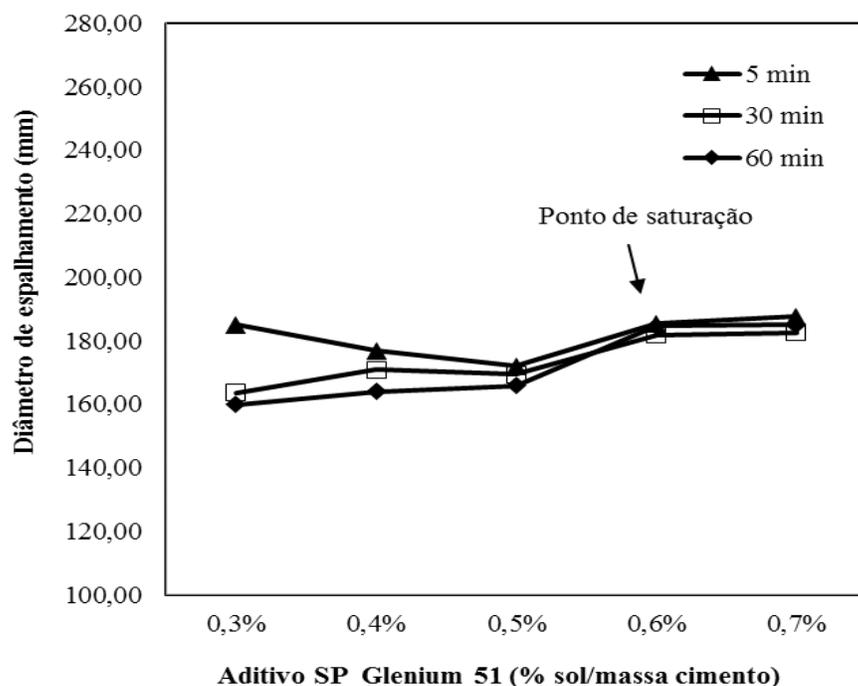


Figura 4.6 Gráfico com o ponto de saturação do CPI S pelo Mini Kantro.

Os resultados indicam que o tempo de 5 minutos apresentou maior espalhamento do que os períodos de 30 e 60 minutos. Talvez este comportamento indique que o tempo de 30 e 60 minutos foram o suficiente para que o SP fosse adsorvido à superfície da partícula do cimento. Observa-se também que há um aumento no espalhamento a medida que o teor de SP aumenta, até o teor de 0,6 % mostrado na Figura 4.6 e comprovado pelo desvio padrão na Tabela 4.10. Desta forma, o ponto de saturação do SP utilizado com o CP I S 40 foi de 0,6%.

Os resultados são similares aos encontrados por FONTES (2003), SILVA (2004), FORMAGINI (2005), GONÇALVES (2005), CORREIA (2009) e MARANGON (2011).

#### ***4.4 PROPRIEDADE FÍSICAS E MECÂNICAS DOS MICROCONCRETOS.***

##### ***4.4.1 ABSORÇÃO TOTAL, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA DOS MICROCONCRETOS.***

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados da absorção por imersão ( $A$ ), índice de vazios ( $I_v$ ), massa específica seca ( $\rho_s$ ), massa específica da amostra saturada ( $\rho_{sat}$ ) e massa específica real ( $\rho_r$ ) aos 28 dias. Foram utilizados 3 corpos de prova para cada mistura.

Tabela 4.9 Propriedades físicas dos microconcretos com respectivos Desvio Padrão entre parênteses.

Propriedades	M0	M10	M20	M30	M40	M50
A (%)	7,54(0,15)	7,71(0,43)	7,43(0,36)	7,36(0,06)	7,19(0,13)	7,10(0,15)
I <sub>v</sub> (%)	16,43(0,24)	16,67(0,79)	16,08(0,66)	15,72(0,10)	15,13(0,23)	14,59(0,30)
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,18(0,01)	2,16 (0,02)	2,16 (0,02)	2,13(0,02)	2,10(0,01)	2,06(0,01)
$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,34(0,01)	2,33(0,01)	2,32(0,01)	2,29(0,01)	2,26(0,01)	2,20(0,01)
$\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,61(0,01)	2,60(0,00)	2,58(0,01)	2,55(0,01)	2,48(0,01)	2,41(0,01)

Observa-se na Tabela 4.7 que os valores médios de “A” apresentaram diferença significativa somente para os teores de 40% e 50% de substituição. Para a amostra M50 com 50% desta pozolana, ocorreu uma redução no “I<sub>v</sub>” na ordem de 11,2% em relação ao referencial M0, enquanto que para a absorção o decréscimo foi de 5,84 %.

Em relação a massa específica dos compósitos, percebe-se uma relação inversamente proporcional com o aumento do percentual de substituição, com diminuição de 7,66% na massa específica real ( $\rho_r$ ) da amostra M50 em relação a mistura M0. Esse comportamento é decorrente da troca de um material de menor massa específica, no caso do RC com 2,81g/cm<sup>3</sup>, por um outro, no caso o cimento Portland com 3,24 g/cm<sup>3</sup>.

#### **4.4.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO MICROCONCRETO.**

Na Tabela 4.10, são apresentados os resultados da resistência a compressão dos CP's nas idades de 7, 14 e 28 dias.

Tabela 4.10 Valores médios da resistência a compressão com seus respectivos desvios padrão (SD) e coeficientes de variação (CV%).

% subst. CPI S p/RC	Resistência à compressão (MPa)								
	7 dias			14 dias			28 dias		
	Média	SD	CV (%)	Média	SD	CV (%)	Média	SD	CV (%)
<b>M0</b>	50,67	2,15	4,25	53,57	3,93	7,34	56,50	2,79	4,93
<b>M10</b>	40,57	1,78	4,38	50,20	2,31	4,59	52,33	4,51	8,62
<b>M20</b>	42,67	2,52	5,90	51,67	1,53	2,96	53,90	1,91	3,53
<b>M30</b>	46,50	1,61	3,46	55,63	3,18	5,71	62,00	2,00	3,23
<b>M40</b>	39,37	3,18	8,07	48,33	1,53	3,16	50,93	1,79	3,52
<b>M50</b>	34,00	0,90	2,65	41,00	1,00	2,44	46,70	1,35	2,90

Percebe-se que os resultados de compressão aos 7 dias de idade indicaram o maior valor a mistura M0. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que as demais misturas continham pozolanas que proporcionam a disponibilidade do hidróxido de cálcio, pois a medida que as reações de hidratação do cimento acontecem, este produto passa a ter maior disponibilidade, formando mais estruturas secundárias que irão atuar no aumento da resistência do compósito em idades superiores. Portanto, nas idades menores a resistência se dará única e exclusivamente pelas estruturas formadas pela hidratação do cimento influenciando, de forma negativa, a propriedade de resistência. As demais misturas apresentaram valores crescentes até o teor de 30%, que mais se aproximou aos valores encontrados para a mistura M0. Nos teores de 40 e 50%, verificou-se uma diminuição acentuada, 15% e 27%, respectivamente. Essa diminuição indicou que, teores acima de 30% de RC prejudica a interação entre as partículas das misturas, devido à redução do volume de cimento e, conseqüentemente, devido à redução do hidróxido de cálcio disponível para reação pozolânica, associada com a baixa reatividade do RC.

Para os resultados de 14 dias, verificou-se um comportamento diferente quando o teor de RC foi adicionado. Para as misturas com teor de 10% e 20% de RC, houve uma leve diminuição da resistência, 6,3% e 3,6%, respectivamente. Essa diminuição foi menor do que a observada para os ensaios realizados com 7 dias, indicando que somente após 14 dias começa a interagir com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de forma mais efetiva. Para as misturas com o teor de 30% de RC, o valor de resistência encontrado foi superior aos resultados de referência, cerca de 4%. Com o aumento dos teores, 40% e 50%, houve uma diminuição dos resultados da ordem de 13% e 26%, respectivamente. Observa-se que houve a

redução da disponibilidade do CH para reação e com isso pode haver partículas da pozolana que não entrem em contato com CH, ocorrendo a saturação da mistura com partículas de RC, passando parte desta a atuar como partículas inerte, o que reduz a quantidade de produtos hidratados na mistura, com isso, redução da propriedade mecânica.

Observa-se que na idade de 28 dias ocorreu um comportamento similar aos 14 dias, onde verificou-se um aumento de 9% da resistência nos resultados das misturas M30 em relação aos resultados de referência. Constatou-se que nessa idade houve um aumento significativo na resistência do microconcreto, esse comportamento deve-se, provavelmente, ao fato da pozolana interagir com o cimento de forma mais compacta, ou seja, houve um melhor empacotamento entre os materiais em relação a matriz de referência.

Na Figura 4.7, é apresentado um gráfico de resistência em função do tempo de cura nas idades de 7, 14 e 28 dias.

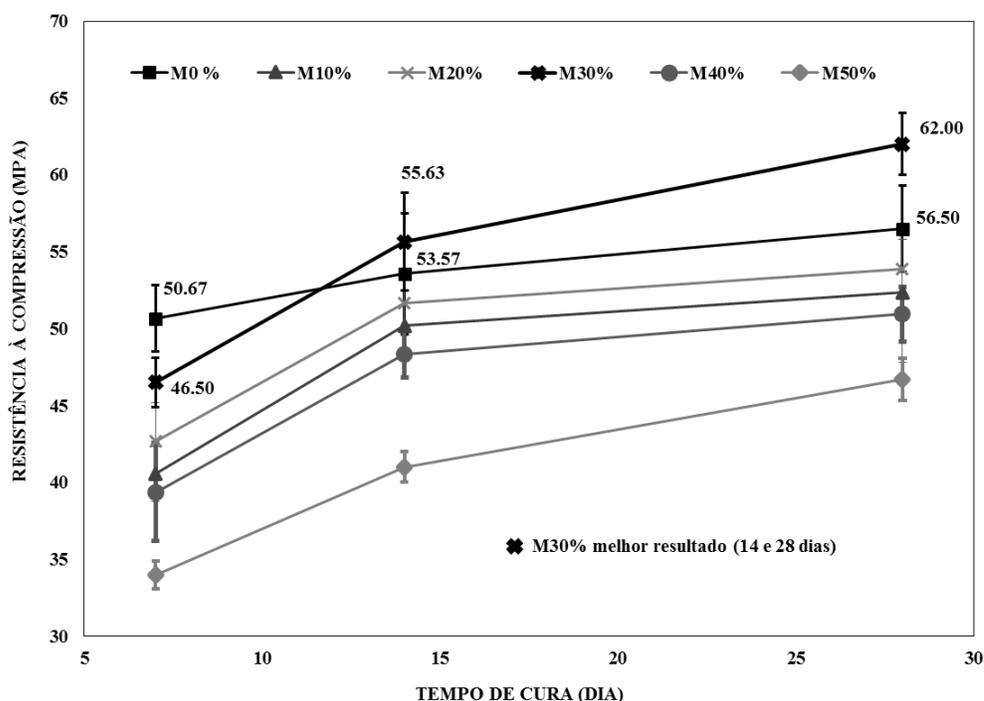


Figura 4.7 Resultados de compressão axial nas idades 7, 14 e 28 dias

De forma geral, pode se observar que o teor de 30% apresentou misturas com o melhor comportamento mecânico, aos 14 e 28 dias. É importante deixar registrado que os resultados em questão foram obtidos a partir de duas moldagens. Em cada moldagem foram produzidos 4 CP's para cada mistura. Na primeira moldagem foi verificado que o teor de 10% apresentou valores médios de resistência abaixo do teor de 30%. Após a análise dos resultados e a constatação dessa diferença, resolveu-se que uma nova moldagem deveria ser realizada, para que os resultados obtidos fossem confirmados. Após a análise dos resultados da segunda concretagem, observou-se que os resultados se mantiveram, onde as misturas com o teor de 30% continuaram a apresentar o melhor resultado.

Esse fenômeno pode ser explicado, provavelmente, pela alta fluidez da mistura. Durante o processo de dosagem, optou-se por uma mistura com boa fluidez, já que a adição do alto teor de RC absorvia grande quantidade de água e necessitava de uma mistura inicial fluida. Quando o teor de 10% de RC foi adicionado na mistura de alta fluidez, o RC tendeu a subir, por apresentar menor densidade. Com isso, após o endurecimento a mistura ficou heterogênea e o RC ficou localizado na parte superior do CP. Mesmo comportamento ocorreu com o teor de 20% de RC, no entanto, em menor escala, já que a resistência teve valor médio maior que o teor de 10%. Quando os teores acima de 30% foram adicionados, as misturas adquiriram uma melhor interação entre as partículas e a fluidez foi controlada, a ponto de não haver mais a heterogeneidade da mistura. Para as misturas com adição acima de 40% de substituição, ocorreu a diminuição da resistência, fato ocasionado pelo excesso de resíduo cerâmico, já que o mesmo impede a reação total das partículas de cimento, fato já comprovado na literatura.

#### **4.4.3 ANÁLISE DO PROCESSO DE FRATURA DOS MICROCONCRETOS.**

A Figura 4.8 apresenta o padrão de fissuras ocorridas durante o ensaio de resistência à compressão para todos os concretos rompidos na idade de 28 dias. Nessa análise optou-se por analisar apenas os resultados dos ensaios com 28 dias de idade.

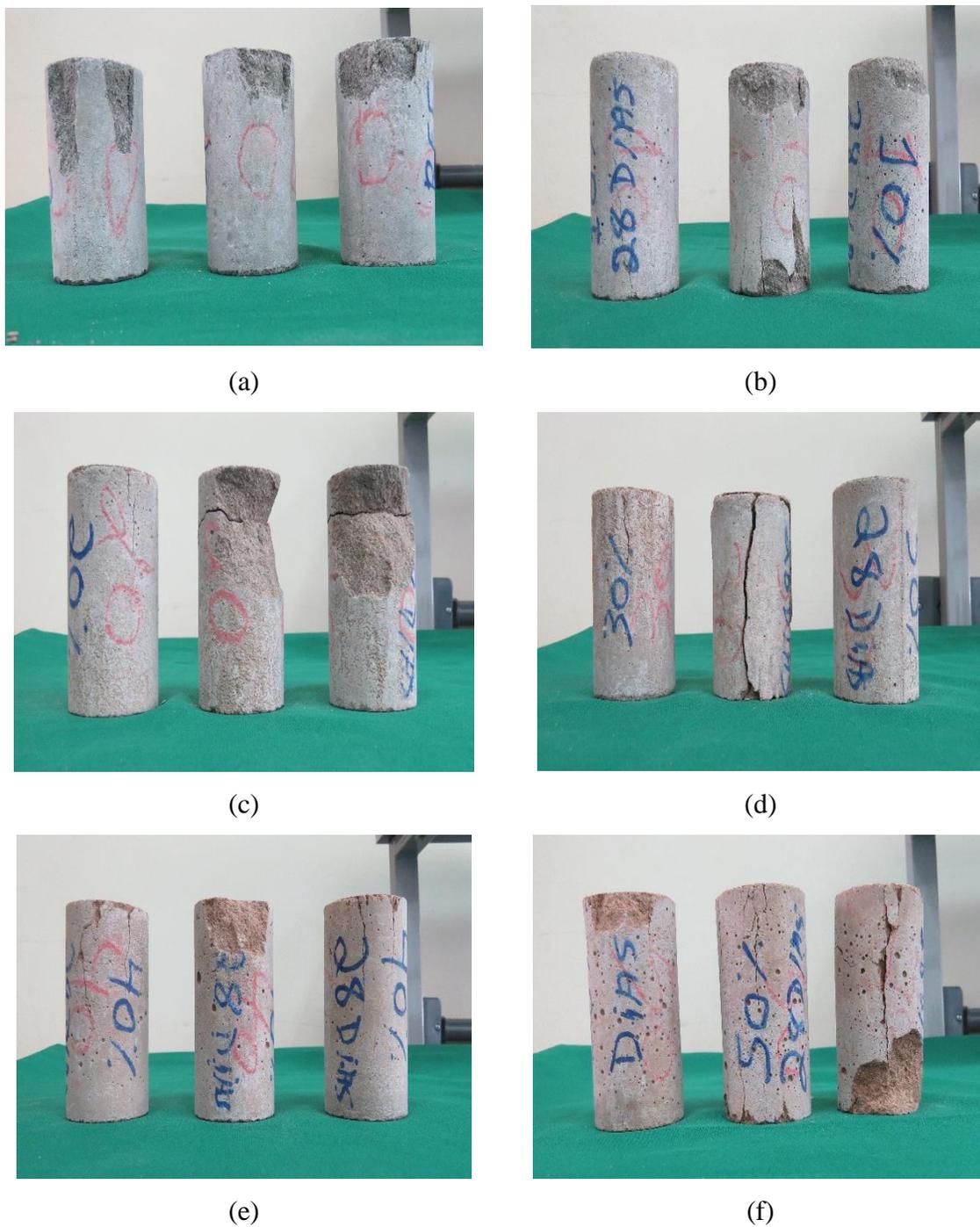


Figura 4.8 Padrão de fissuração dos concretos com: (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30%, (e) 40% e (f) 50%.

Para as misturas de referência M0, Figura 4.8 (a), observou-se que os mesmos sofreram um processo de ruptura na parte superior, decorrente, provavelmente, da menor

resistência dessa parte, visto que esses CP's apresentaram indícios de segregação por estarem muito fluídos e, conseqüentemente, ter ocorrido separação entre a pasta e o agregado.

Na Figura 4.8 (b), observa-se que a mistura M10, com 10% de substituição do cimento pelo resíduo cerâmico, apresentou um mapa de fissuração similar as misturas de referência.

Na Figura 4.8 (c), encontra-se o padrão de fissuras para as misturas M20, nota-se que houve a ruptura próximo a face superior no sentido transversal. Ainda decorrente, provavelmente, da segregação e heterogeneidade da matriz referenciada. Nessa figura também pode-se perceber uma ruptura perpendicular da parte superior do CP, provavelmente, decorrente da separação do RC dos demais materiais da mistura.

Na Figura 4.8 (d), para a mistura M30 com 30% de substituição, a ruptura dos CP's foram no sentido ao eixo longitudinal ocorrido talvez pela melhor distribuição de tensões internas devido a homogeneidade da mistura.

Na Figura 4.8 (e) e (f) com substituição de 40% e 50%, respectivamente, os microconcretos apresentaram resultados semelhantes ao que ocorreu aos microconcretos com 30% de substituição.

## 5 CONCLUSÕES.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

1. O processamento do resíduo cerâmico, com a moagem de 180 min foi suficiente para a obtenção de um material que atendesse às especificações da norma NBR 12653 (2014) como sendo um material pozolânico;
2. Os teores de 30%, 40% e 50% de substituição parcial do cimento por RC produziu pastas com baixa concentração de hidróxido de cálcio, indicando um material com grande potencial para aplicação em misturas cimentícias duráveis, como concretos e argamassas, e ao mesmo tempo, uma destinação sustentável de um resíduo da construção civil.
3. A composição química e mineralógica do RC, obtido no Polo Cerâmico da região metropolitana de Manaus e estudada neste trabalho, indicam que este material atende as normas vigentes para pozolanas artificiais de argilas calcinadas;
4. A substituição parcial do cimento por diferentes teores de RC proporcionou misturas com menor índice de absorção devido à formação de uma estrutura porosa refinada, dificultando a penetração da água e conseqüentemente, uma mistura mais durável, tanto para argamassas quanto para concretos. Para o teor de 30%, considerado o melhor teor, houve uma diminuição dos valores referentes ao índice de vazios, porosidade total e absorvidade;
5. Com relação às propriedades mecânicas, foi verificado que as misturas com baixo teor de RC, 10 e 20%, apresentaram um comportamento inferior a referência, fato explicado pela alta fluidez da mistura, o que proporcionou uma separação de componentes e, conseqüentemente, fragilidade da mistura. Para o teor de 30%, as misturas apresentaram os maiores valores de resistência a compressão, da ordem de 62,0 MPa aos 28 dias de idade, o qual pode ser classificado como um microconcreto de alta resistência. Para os teores de 40% e 50%, verificou-se uma redução da resistência a compressão.

Fato esse ocasionado pelo excesso de resíduo cerâmico, já que o mesmo impede a reação total das partículas de cimento;

6. Por ultimo, observou-se que o traço utilizado na pesquisa, 1:2 e o fator água/cimento de 0,40 nas dosagens dos aglomerantes utilizados foram suficientes para a obtenção de uma mistura cimentícia com alta resistência e com viabilidade para diversos fins na construção civil.

- ***SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS***

Para tentar melhorar ainda mais o desempenho dos microconcretos alguns estudos serão necessários como:

- Analisar outros traços de dosagem, buscando melhor desempenho e baixo custo;
- Fazer um comparativo em relação ao traço usado com outros materiais cimentícios, para alcançar um melhor resultado na resistência do microconcreto;
- Fazer um estudo detalhado sobre o programa MECFOR e/ou Bentolab, onde a compacidade dos materiais são essenciais para que seja gerado um traço de dosagem automaticamente com todas as misturas analisadas.
- Fazer um estudo da durabilidade do microconcreto de alto desempenho em relação a vida útil do concreto, além de sua viabilidade econômica.

## ***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Boletim Técnico.** Guia Básico de Utilização do Cimento Portland, São Paulo, (dez/2002)

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 27: Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR NM 26: Agregados – Amostragem, Rio de Janeiro, 2009.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro 2001.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR 12653: Material pozolânico – Requisitos, 2014.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR 5732: Cimento Portland Comum – 1991.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR 6508 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica, 1984.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR 11578: Cimento Portland Composto. Especificação. Rio de Janeiro, 1991.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR 11768: Aditivos para Concreto de Cimento Portland. Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR 5738: Concreto: Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova. Rio de Janeiro, 2003.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR 5739: Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR 6118: Projeto de estrutura de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR 7211: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2009.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR 7215: Resistência à compressão do cimento Portland. Rio de Janeiro, 1996.**

\_\_\_\_\_ ; **NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.**

\_\_\_\_\_ ; NBR 5752: **Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_ ; NBR 5752: **Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_ ; NBR 8952: **Coleta e preparação de amostras de materiais pozolânicos – Procedimentos,** 1992.

\_\_\_\_\_ ; NBR 8953: **Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência,** 2015.

\_\_\_\_\_ ; NBR 9776: **Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_ ; NBR NM 248: **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_ ; NBR NM 52: **Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_ ; NBR NM 67: **Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone.** Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_ ; NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Segunda edição 29.07.2005, válida a partir de 29.08.2005. Versão corrigida em 31.05.2006. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ ; NBR10837 (2000), substituída pela NBR 15961-2, 2011.

\_\_\_\_\_ ; NBR 15961-2. **Alvenaria Estrutural – Bloco de Concreto,** 2011.

\_\_\_\_\_ ; NBR 11173 – **Projeto e execução de argamassa armada** – Rio de Janeiro, 1990.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – Comitê 201 do ACI, 1991.

ACI 211-1-81 (**Standart Practice for Selecting Proportion for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete** – 1985).

ACI 116R-90, Cement and concrete terminology, ACI Manual of Concrete Practice, Part I: **Materials and General Properties of Concrete, 68 pp.** Detroit, Michigan, 1994.

ASTM – **Search Manual – Hanwalt Method for Inorganic Compounds.** Joint Committee on Powder Diffraction Data, 1601 Park Lane. Swarthmor. Pa. 19081, EUA, 1973.

ASTM C494 – **Especificação padrão para adjuvantes químicos para Betão**, 2016.

ASTM C1017 – **Especificação padrão para adjuvantes químicos para uso na produção de concreto Flowing**, 2013.

ASTM C 311-07 – **Índice de desempenho com cimento Portland**.

ANDREU, G., MIREN, E., Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. V.52, pp. 227 – 235, 2014.

ARAUJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. das G. A. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: EDUR, 2000.203 p.

ANDRADE, J.J. O. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado: Análises das Manifestações Patológicas nas Estruturas no Estado de Pernambuco**. Porto Alegre, UFRGS, 1997.

ARANHA, P.M.S. **Contribuição ao Estudo das Manifestações Patológicas nas Estruturas de Concreto Armado na Região Amazônica**, UFRGS, 1994.

AITCIN, Pierre-Claude. **High-performance concrete**. London, New York, E. & F. N. Spon, 1998.

**ASSESSORIA TÉCNICA ITAMBÉ – CIMENTO ITAMBÉ**. Apostila de ensaios de concretos e agregados – 3ª Edição, Curitiba-PR, 2011.

BS EN 196-5: 2005 – **Methods of testing cement. Pozzolanicity test for pozzolanic cements**.

BINA, P., Concretos de pós reativos: **Uma revolução no conceito do concreto**; Revista Técnica. São Paulo: PINI, n.38, p.50-51, Jan-Fev, 2013.

BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção V1**. 5 ed. Rio de Janeiro; LTC, 2000.

BAIA, L.L.; SABBATINI, F.H. **Projeto e Execução de Revestimento de Argamassa**. Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras 1. Ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000. 82p.

**BEHAVIOR OF CONCRETE BY THE ADDITION OF ARTIFICIAL POZZOLAN** – Nathalia Maria Assi Rabelo; Christianne Rodrigues Garcia. (UFMG 2013).

BARATA, M.S. **Concreto de alto desempenho no Estado do Pará: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concretos de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e**

**metacaulim**.1998 – Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1998.

BRISTOT MENEGON, VILMAR. **Máquinas e Equipamentos para Cerâmica**. 1ª Edição – 1996 – Editora e Livraria Luana Ltda. Criciúma-SC.

BOCCHILE, C. **As mil utilidades do microconcreto**. São Paulo, 2003 – Revista Técnica//www.piniweb.com.br/construção/acesso em 11 Jan 2013.

BURAK FELEKOGLU. **Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete**. Departamento of Civil Engineering. Dokus Eylul University, 35160 Izmir – Turkey. 17 Jan 2007.

BARONIO, G., BINDA, L., —**Study of the pozzolanicity of some bricks and clays**||, *Construction and Building Materials* v. 11, n. 1, pp. 41-46, 1997.

BIGNOZZI, M. C., SACCANI, A. **Ceramic waste as aggregate and supplementary cementing material: A combined action to contrast álcali silica reaction (ASR)**, *Cement & Concrete Composites* v. 34, pp. 1141-1148, 2012.

BARBA, A., BELTRÁN, V., FELIU, C., GARCIA, J., GINÉS, F., SÁNCHEZ, E., SANS, V., ITC – INSTITUTO DE TECNOLGIA CERÂMICA – **Matérias Primas para la Fabricación de Soportes de Baldosas Cerâmicas**, 2002).

CAMPOS, Paulo Eduardo Fonseca de. **Da argamassa armada ao microconcreto de alto desempenho**: perspectivas de desenvolvimento para a pré-fabricação leve. São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, FAUUSP,2002. 208p.

CHINDAPRASIRTA, P.; HOMWUTTIWONG, S.; SIRIVIVATNANON, V. “**Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar**”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, pp. 1087–1092, 2004.

CYR, M., LAWRENCE, P., RINGOT, E. **Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration**. *Cement and Concrete Research*, v.35, n.4, 2005.

CAMACHO, J.S. – **Contribuição ao estudo de modelos físicos reduzidos de alvenaria estrutural cerâmica**. Escola Politécnica da USP – São Paulo, 1995.

CORREIA, Rosana de Freitas – **Avaliação mecânica e estrutural de pastas cimentícias para poços de petróleo submetidos à injeção de vapor**. UFRJ/COPPE – Rio de Janeiro, 2009.

CORDEIRO, G.C. **Concreto de alto desempenho com metacaulinita**. /Guilherme Chagas Cordeiro. Campos dos Goytacazes, RJ, 2001. Xiii, 123 f., enc.: 30 cm.

\_\_\_\_\_; **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** Tese de Doutorado – UFRJ, COPPE, 2006.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arros sobre a atividade pozolânica.** 2009 - (UFRGS), Porto Alegre, 2009.

CATARINO, Joana Filipa., **Avaliação na Influência do Cimento na interação Cimento-Superplastificante,** ISEL, nov/2012.

CHRISTÓFOLLI, J. L. **Estudo de argilas calcinadas para produção de cimento Portland pozolânico na região de Curitiba, Paraná – Brasil.** 2010. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2010.

CARNEIRO, A.M.P. Notas de Aula da Disciplina: **Tecnologia das Argamassas** – Mestrado de estrutura Universidade Feaderal de Pernambuco. Recife 2005.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural.** Em: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** Ed. Isaia, G. C. 1ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2005, v.1.p. 345-379.

DOSAGEM DOS CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND- Cap 12: **Concreto: Ciência e Tecnologia.** Bernardo F. Tutikian – UNISINOS; Paulo Helene – PhD Engenharia e Conslutoria – IBRACON 2011.

**Dicionario Ecivil, Microconcreto software 2000 – 2016.**

DWECK, J.; FERREIRA DA SILVA, P. F., CUCHLER, P. M.; CARTLEDGE, F. K. Study by thermogravimetry of the evolution of ettringite phase during type II Portland cement hydration. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 69, p. 179-186, jul 2002.

\_\_\_\_\_; CUNHA, A. L. C.; PINTO, C. A.; GONÇALVES, J. P. Thermogravimetry on calcined mass basis – hydrated cement phases and pozzolanic activity quantitative analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 97, p. 85-89, jul. 2009.

\_\_\_\_\_; MELCHERT, M. B. M.; VIANA, M. M.; CARTLEDGE, F. K.; BUCHLEER, P. M. Importance of quantitative thermogravimetry on initial cement mass basis to evaluate the hydration of cement pastes and mortars. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 113, p. 1481-1490, set 2013.

DE LARRARD, F.. **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach.** Modern Concrete Technology Series, V. 9 E&FN Spon, LONDON, 1999 421 pp.

DONATELLO, S.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C. R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 121-127,2010.

EVANGELISTA, A. C. J.; ALMEIDA, de V.C.; CORDEIRO, A.C.; ALVES, L. da S.; RODRIGUES, R. do A.; **Aplicação de Resíduo Cerâmico como Adição Mineral na Produção de Argamassas e Concretos. Gerenciamento de Resíduos.** Revista Brasileira de Ciências Ambientais, numero 3, (Abril 2006).

FORMAGINI, Sidiclei. Tese: **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concreto de Altíssimo Desempenho.** COOPE/UFRJ 2005;

FERRARIS, C. F., 2001, “**The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete**”, *Cement and Concrete. Research*, vol. 31, n.º 2, pp. 245-255.

FONTES, Cintia Maria Ariani – **Potencialidades da Cinza de Lodo das Estações de tratamento de Esgotos como Material Suplementar para produção de Concretos com Cimento Portland.** COOPE/UFRJ, 2003.

FREIRE, Wesley Jorge – **Técnicas e Materiais Alternativos de Construção / Antonio Ludovico Beraldo (coord.) – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2ª reimpressão, 2013.**

FARIAS FILHO, J.de ROLIM, J.S., TOLEDO FILHO, R.D. **Potencialidades da metacaulinita e de tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland.** V4, n.3, p 437-444, UFPB, 2000.

FASTOFSKI, Daniela Chiarello; SCHAFER, Mauricio; TELES, Roseane Dornelles; KULAKOWSKI, Marlova Piva; GONZALES, Marco Aurélio Stumpf; KAZMIERCZAK, Cláudio de Souza. 5º Forum Internacional de Resíduos Sólidos, UNISINOS– **Metodologia de Caracterização de Resíduo de Cerâmica Vermelha para Emprego como Material Pozolânico em Pasta de Cimento – São Leopoldo-RS, 04 e 05 Junho, 2014.**

GOMES, A. de O; NEVES, C.M.M. – **Proposta de Método de Dosagem Racional de Argamassas Contendo Argilominerais.** ANTAC, Escola da Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Camaçari, BA, 2001.

GOMES, P.C.C.; **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete.** 2002. 139 p. Tese – Escola Técnica Superior D’Enginyers de Camins, Universitat Politecnica de Catalunya, Espanha, 2002.

\_\_\_\_\_ ; GETTU, R.; AGULLÓ, L. **Uma nova metodologia para obtenção de concreto autoadensável de alta resistência com aditivos minerais.** In: V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2003, São Paulo – Brasil.

\_\_\_\_\_ ; TENORIO, J.J.L. **Concreto auto-adensável um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto.** In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto, CD-Rom, Vitória,2003.

\_\_\_\_\_; Barros, A. R. **Método de Dosagem de Concreto Autoadensável**. Editora PINI, 1ª Edição, 2009.

GONÇALVES, J.P. **Desenvolvimento e caracterização de concreto de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. Rio de Janeiro: COOPE/UFRJ, 2005.

\_\_\_\_\_; **Utilização do resíduo da indústria cerâmica para a produção de concretos**. REM: R. Esc. Minas v.60, n.4, pp. 639 – 644, 2007.

\_\_\_\_\_; TOLEDO FILHO R.D., FAIRBAIRN E.M.R. **Study of the hydration of Portland cement pastes containing ceramic waste by thermal analysis**, v.6 n.4, 2006

\_\_\_\_\_; TAVARES, L. M., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R., —**Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin**], Construction and Building Materials v. 23, pp. 1971-1979, 2009.

HELLENE, Paulo; ANDRADE, Tiberio. **Concreto de Cimento Portland**. In: HELLENE, Paulo, *et. al.* **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed. São Paulo-SP. Editor Geraldo C. Isaia, 2012. Capítulo 29, 945-984 p.

HE, C., MAKOVICKY, E., OSBÆCK, B., **Thermal Stability and Pozzolanic Activity of Calcined Kaolin Applied Clay Science** v.9, n.3, pp. 165-187, 1994.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2 v. 2007. V.M.

JOHN, V.M. **Reciclagem de Resíduo na Construção Civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000, 102 p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

\_\_\_\_\_; AGOPYAN, V. **Reciclagem de Resíduo da Construção**. In: **Seminário nacional sobre resíduos sólidos domiciliares**. São Paulo. Anais, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, CETESB, 2001.

KUNTHER, W.; LOTHENBACH, B.; SKIBSTED, J.. **“Influence of the Ca/Si ratio of the C–S–H phase on the interaction with sulfate ions and its impact on the ettringite crystallization pressure”**, *Cement and Concrete Research*, v. 69, pp. 37–49, 2015.

KANTRO, D.L. (1980) **Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – A miniature Slump Test**. *Cement, Concrete and Aggregates*, v.2, n.2 pp 95-102.

KOEHLER, E.P.; FOWLER, D.W.; FERRARIS, C.F. **Summary off Concrete Workability Test Methods. ICAR Report 105.1**. In: ICAR 105: **Measuring the Workability of High Fines Concrete**. Aggregates Fundation for Technology, Research

and Education International Center for Aggregates Research, University of Texas, Austin, 2003.

KAZMIERCZAK, C. S. Produtos de cerâmica vermelha. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo. IBRACON, 2010. V. 1 cap. 18, p. 565-588.

KARTINI, K., ROHAIDAH, M.N., ZURAINI, Z.A. —**Performance os ground clay bricks as partial cement replacement in grade 30 concrete** World Academy of Science, Engineering and Technology v.68, pp. 362 – 365, 2012.

LIMA, S. M. DE. **Concreto de Alto Desempenho em Ambientes com Baixas Temperaturas**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, 2006.

LIMA, F.M. **Avaliação do Comportamento Reológico de Pastas de Cimento para Poços de Petróleo com Adição de Plastificante**, 2006.

LIMA, Samantha Pinheiro Buás de. **Estudo da Produção e Aplicação em Pastas Cimentícias de sílica gel provenientes das cinzas da casca de arroz**. Manaus, UFAM, 2009.

MICRO CONCRETE: **High Strength Free Flowing Cementitious Repair Concrete**. SKOF INDIA. Acedido a 24 maio 2013. [//bhp://skofindia.com/pdf/micro%20concrete.pdf](http://bhp://skofindia.com/pdf/micro%20concrete.pdf).

MICROCONCRETO. Portal do Concreto. Disponível em: <http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/micro.html>. Acesso em: 11 Jan, 2013.

MONTANHEIRO, T. J., YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y. **Proposta de Pré-Qualificação Pozolânica de Materiais Geológicos: Difratomia de Raios X como Método Alternativo**. Revista do Instituto Geológico. São Paulo: 24(1/2), MAZZUCO, M.1-9, 2003.

MODESTO, C.; BRISTOT, V.; MENEGALL, G., BRIDA, de M.; MAZON, A.; BORBA,G.; VIRTUOSO, J.; GASTALDON, M.; DE OLIVEIRA, A.P.N.; **Obtenção e Caracterização de Materiais Cerâmicos a partir de Resíduos Sólidos Industriais**. Eliane Revestimento Cerâmicos, Jul/Ago, 2003.

METHA, P. K, MONTEIRO, P.J.M., **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 3ª. Ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 580 p.

\_\_\_\_\_; **Concreto, estrutura, Propriedades e Materiais**. 1ª ed., São Paulo: Editora Pini, 1994.

\_\_\_\_\_ ; **Concreto, Estrutura, Propriedades e Materiais**. IBRACON, São Paulo, 2008.

\_\_\_\_\_ ; AITCIN, P.C. – **Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high – Strength concrete**. In: High – Strength Concrete. Second International Symposium. ACI, 1990.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana de açúcar**. Dissertação, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Ilha Solteira-ESP, Ilha Solteira-SP, 2009.

MOREIRA, J.M.S., MANHÃES, J.P.V.T., HOLANDA, J.N.F. – **Reaproveitamento de Residuo de Rocha Ornamental proveniente do Noroeste Fluminense em Cerâmica Vermelha**, Cerâmica, v.51, n 319, 2005.

MINDESS, S., YOUNG, J. F., DARWIN, D., 2003, *Concrete*. 2 nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 644 p.

MONTE, R. - **Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland**, USP – São Paulo, 2003.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**, 2005, 183 p. Dissertação – UFSC, 2005.

MELO FILHO, João de Almeida – **Desenvolvimento e Caracterização de Laminados Cimentícios Reforçados com Fibras Longas de Sisal**. Dissertação (Mestrado)Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ ; **Durabilidade Química e Térmica e Comportamento Mecânico de Compósitos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Sisal – Tese (Doutorado)** - Rio de Janeiro UFRJ/COPPE, 2012.

MELO, Fellipe Cesar Andrade Costa de, - **Análise de Argamassas com substituição parcial do cimento Portland por Cinza Residual de Lenha de Algaroba**. UFRN, Natal, 2012.

MARANGON, Ederli – **Caracterização Material e Estrutural de Concretos Autoadensáveis Reforçados com Fibras de Aço**. Rio de Janeiro COOPE/UFRJ, 2011.

MOTA, J.M.de F; DOURADO, K.C.; BARBOSA, F.R.; COSTA e SILVA, A.J.da.; SILVA, E.J. da – UFPE, 2010. Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC 2011 – 53CBC1 – **Concreto Adicionado com Metacaulim Agente de Mitigação da RAA**. UFPE, 2011.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

\_\_\_\_\_ ; **Propriedades do Concreto**. 5. Ed. Bookman, Porto Alegre, 2016.

NINCE, A.A. **Levantamento de Dados sobre a Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste**. Dissertação, UnB, Brasília, 1996.

NETTO, Rafael Mantuano – **Materiais Pozolânicos**, UFMG, 2006.

NACERI, A., HAMINA, C. H., —Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar| **Waste Management** v.29, pp. 2378 – 2384, 2009.

O’FARRELL, M.; SABIR, B. B.; WILD S. **Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to diferente treatments. Cement & concrete composites**, v. 28, p. 790-799,2006.

\_\_\_\_\_ ; WILD, S, SABIR, B.B., —Pore size distribution and compressive strength of waste clay brick mortar| **Cement & Concrete Composites** v.23, pp. 81 – 91, 2001.

PARSEKIAN, Guilherme Aris (Org.). **Parâmetros de projeto de alvenaria estrutural com blocos de concreto**. São Paulo: EDUFSCAR, 2012.

PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998.

POGGIALI, Flávia Spitale Jacques. **Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland com adições de cinza de bagaço de cana de açúcar**. UFMG, escola de Engenharia, 2010.

PAIVA, Otávio Augusto. **Durabilidade de concreto contendo cinza do bagaço da cana-de-açúcar** – Rio de Janeiro: UFRJ/COOPE, 2016.

PARROT, L. J.; GEIKER, M.; GUTTERIDGE, W. A.; KILLOH, D. Monitoring Portland cement hydration: comparison of methods. **Cement and concrete research**, v. 20, p.919 – 926, 1990.

ROZIÈRE, E.; LOUKILI, A.; EL HACHEM, R.; GRONDIN, .. “Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks”, **Cement and Concrete Research**, v. 39, pp. 1188–1198, 2009.

RABELO, N.M.A; GARCIA, C.R. – **Behavior of Concrete by the Addition of Artificial Pozzolan**, Belo Horizonte-MG, 2013.

RIBEIRO, A. P. **Avaliação do uso de resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos**. 2010. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP), São Paulo, 2010.

RAMALHO M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural**. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2008.

REPETTE, W. L. Concretos de última geração: presente e futuro. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org). **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v.2, p. 1509-1500, 2005.

ROHDEN, Abrahão Bernardo – **Contribuição aos Métodos de Dosagem de Concreto de Alta Resistência a partir do entendimento da Influência dos Agregados na mistura**, UFRS/Porto Alegre, 2015.

**REVISTA DO INSTITUTO GEOLÓGICO**, São Paulo, 23(2), 1 – 17 2002.

ROCHA, C.A.A.; CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D. – **Influence of stone cutting waste and ground waste clay brick on the hydration and packing density of cement pastes**. - Revista Ibracon de Estruturas e Materiais – Volume 6, 2013.

RIBAS, Luciane Farias – **Influência da Cominuição da Fração Cerâmica dos Resíduos de Construção e Demolição na sua Atividade Pozolânica e nas Propriedades Físicas, Mecânicas e Durabilidade de Argamassa de Cimento**. / Luciane Farias Ribas. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

REVISTA IBRACON – **Livro Material de Construção Civil** – Helena Carasek - Cap. 26 pag. 1 a 37- Jul/2015.

SEBASTIANY, Lucas Deivid – **Avaliação de métodos de determinação do potencial pozolânico de resíduos da indústria de cerâmica vermelha**, 141, f.: il.; 30 cm – 2014.

SOUSA FILHO, Luciano Moreira de. **Concreto autoadensável e de alto desempenho produzido com fibras de polipropileno e materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus**, UFAM, 2012.

SILVA, Alex Sandro Malaquias da. Tese: **Dosagem de Concreto pelos Métodos de Empacotamento Compressível e Actin-Faury Modificado**. COOPE/UFRJ, 2004;

SILVA, A. A. **Contribuição ao Estudo das Bentonitas do Município de Boa Vista Estado da Paraíba**. 2011 – Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP), São Paulo, 2011.

SABIR, B.B.; WILD, S.E.; BAI, J. **Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review**. **Cement & Concrete Composites**, London UK v.23, p.441-454, 2001.

SANTOS, P.S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**, 2. Ed. Revisada e ampliada, São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

SANTOS, R. A. **Avaliação do Emprego de Agregado Artificial de Argila Calcinada em Pavimentação**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 2008.

SHVARZMAN, A.; KOVLER, K.; GRADER, G.S.; SHTER, G.E. **The effect of a dhydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite**. *Cement and Concrete Research*, London UK, v.33, p.405-416, Capítulo 11 e 12, Vol 1 – Fundamentos, 2003.

SATO, Neide Matiko Nakata – **Análise da Porosidade e de Propriedades de Transportes de Massa em Concreto**. S.d.

SANTHANAN, M.; COHEN, M. D.; OLEK, J.. “**Sulfate attack research – whither now?**”, *Cement and Concrete Research*, v. 31, pp. 845–851, 2001.

TUTIKIAN, B. F., **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do SUL, 2004.

\_\_\_\_\_; HELENE, P., **REVISTA IBRACON (Concreto: Ciência e Tecnologia) Cap 12 – Dosagem dos Concretos de cimento Portland**, 2011.

TOLEDO FILHO, R.D. et al. **Desenvolvimento de Concretos de Baixo Impacto Ambiental Utilizando Materiais Cimentícios de Baixo Consumo de Energia e Emissão de CO<sub>2</sub>**. In: IBRACON – 2002, 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais...Belo Horizonte p- Mg, 2002.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry 2<sup>nd</sup> ed**. London Thomas Telford, 1997.

TIRONI, A.; TREZZA, M. A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. **Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinite clays**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 117, p. 547-556. 2014.

TAVEIRA, Alberto Fábio da Silva – **Avaliação da Utilização do Agregado de Concreto Reciclado (ACR) em Substituição ao Agregado Miúdo na Fabricação de Argamassas e Peças de Concreto para Pavimentação**. Manaus: UFAM/2010, 105 f.; il.color.

**TECNICA DE CARACTERIZAÇÃO DE POLÍMEROS**. Sebastião V. Canevarolo Jr, Coordenação editorial, São Paulo: Artliber Editora, 2003.

VIEIRA, Andressa de Araujo Costa. **Estudo do Aproveitamento de Resíduos de Cerâmica Vermelha como Substituição Pozolânica em Argamassa e Concretos**. V658a, João Pessoa-PB, 2005.

VEJMELKOVÁ, E., KEPPERT, M., ROVNANÍKOVÁ, P., ONDRÁČEK, M., KERŠNER, Z., ČERNÝ, R. **Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material.** Cement & Concrete Composites v.34, pp. 55 – 61, 2012.

YAMAMOTO, R; ONUKI A.; TANIGUCHI, T. – Journal de Physique 11 7 (2), 295-304 – **Phase separation in polymer solutions induced by shear** (1997).

ZAMPIERE, V. A. **Cimento Portland Aditivado com Pozolanas de Argilas Calcinadas: Fabricação, Hidratação e Desempenho Mecânico.** 1993. 233f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1993.