



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

KÁTIA ALRELHIA DO ROSÁRIO

**CONCRETO COM UTILIZAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO
SINTÉTICO PRODUZIDO A PARTIR DA LAMA
VERMELHA: ESTUDOS DE DOSAGEM, PROPRIEDADES E
MICROESTRUTURA.**

Belém
2013

KÁTIA ALRELHIA DO ROSÁRIO

**CONCRETO COM UTILIZAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO
SINTÉTICO PRODUZIDO A PARTIR DA LAMA
VERMELHA: ESTUDOS DE DOSAGEM, PROPRIEDADES E
MICROESTRUTURA.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Pará como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo.

Belém
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) –

Rosário, Kátia Alrelhia do

Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura/ Kátia Alrelhia do ; orientador , Alcebíades Negrão Macêdo. — 2013.

113 f.: il.; 31 cm

Inclui Bibliografias

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC, Belém, 2013.

1. Concreto leve. 2. Lama vermelha. 3. Agregados (Materiais de construção). 4. Resíduos industriais – aproveitamento. I. Macêdo, Alcebíades Negrão, orientador. II. Título.

CDD - 22. ed. 620.136

KÁTIA ALRELHIA DO ROSÁRIO

**CONCRETO COM UTILIZAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO
SINTÉTICO PRODUZIDO A PARTIR DA LAMA
VERMELHA: ESTUDOS DE DOSAGEM, PROPRIEDADES E
MICROESTRUTURA.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Pará como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil

Orientador. Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo.

Aprovada em: ___/___/___

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo
Orientador – UFPA

Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza
Co-orientador - UFPA

Prof^a. Dr^a. Isaura Nazaré Lobato Paes
Examinador interno – UFPA

Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo
Examinador externo - UFPA

Belém
2013

A Deus

Que é meu pai, meu amigo, meu conselheiro,
ser a quem devo minha vida.

A minha mãe

Maria Leci do Rosário, que fez o impossível
tornar-se possível, pois além de carinho, me
deu educação, e me ensinou, que quando se
quer algo, por mais que a vida insista em nos
impor dificuldades, o importante é ser
persistente, ter fé e jamais desistir.

AGRADECIMENTOS

A Deus, ser maravilhoso, e indispensável em minha vida, que esteve comigo em todos os momentos, me dando força e coragem para seguir em frente e jamais desistir.

Aos professores Alcebíades Negrão Macedo e José Antônio da Silva Souza pela orientação e pela disposição em ajudar sempre que precisei.

A professora Isaura Nazaré Lobato Paes, pelo apoio e inestimável contribuição para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao técnico do laboratório de Engenharia Civil, “Maneca”, pelo apoio indispensável durante toda a etapa de realização dos ensaios laboratoriais.

A minha Mãe, Maria Leci do Rosário por todo o carinho, dedicação e por está sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

A minha Avó Maria Catarina do Rosário, por todo o carinho e dedicação e por compreender minha ausência em alguns momentos.

Ao meu marido Nilton de Almeida Costa, pela compreensão e companheirismo, sem o qual provavelmente a caminhada teria sido mais longa e difícil.

Aos meus sobrinhos Matheus e Endrya, anjos que Deus colocou em minha vida, para tornar meus dias mais alegres, e que mesmo sem compreenderem o porquê de muitas vezes ter que me ausentar, aceitaram minha ausência.

A minha irmã Marcela do Rosário, por aturar meu stress.

Aos meus queridos e inesquecíveis amigos, Gyselle Almeida, João Alex e Taiza Ferreira, por estarem sempre dispostos a me ajudar, a colaborar, seja em trabalhos práticos, como na realização dos ensaios, seja com palavras de incentivo, sempre oportunas e nos momentos certos. Não poderia esquecer os amigos Carlos Fonseca, Eliana Maroja, Marcos Anderson e Peterson, que também contribuíram bastante para que esse objetivo fosse alcançado.

Aos meus amigos da Secretaria de Educação (SEDUC/PA) e da Secretaria de Planejamento (SEPOF/PA), que tiveram participação importantíssima nessa etapa da minha vida, pois sempre me incentivaram, por meio de palavras de apoio e conselhos. Em especial ao Geraldo Vaz, Manoel Argolo, Lucival Furtado, Sandro Barros, Eduardo Kimura, Wanderson e José Carlos.

A todos, que direta ou indiretamente, de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Atualmente questões relacionadas à sustentabilidade tem ganhado destaque no cenário mundial nos mais variados setores da sociedade. Diversos pesquisadores (LIMA, 2006; HILDEBRANDO, 1998; SOUZA, J., 2010; ROSSI, 2009, etc.) têm tentado propor uma interação entre a indústria da construção civil e aquelas que desenvolvem atividades de beneficiamento e produção mineral, como por exemplo, as de beneficiamento de bauxita. Neste contexto, encontrar uma viabilidade para o aproveitamento de um resíduo gerado em grandes quantidades e sem nenhuma utilidade seria contribuir com a preservação do meio ambiente, na medida em que se reduziria o consumo de recursos provenientes de fontes naturais e aumentaria a oferta de insumos no mercado da construção. Neste trabalho será abordada a viabilidade de produção de um concreto, que apresente características que o torne próprio ao uso como insumo na indústria da construção civil, por meio da utilização de um agregado sintético obtido a partir da lama vermelha (resíduo do beneficiamento da bauxita). De acordo com o programa experimental executado, os agregados, bem como, os concretos produzidos tiveram suas propriedades analisadas, objetivando estudar o processo de produção e dosagem respectivamente. Nos agregados foram realizadas análises de: porosidade aparente, absorção de água, massa específica aparente e abrasão Los Angeles e nos concretos, trabalhabilidade, massa específica no estado fresco e no endurecido, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, tração na flexão, absorção de água e módulo de elasticidade. Ressalta-se que foi dada significativa importância à zona de transição pasta/agregado, por meio de análise da microestrutura dos concretos produzidos. Análise esta realizada por meio dos ensaios de: Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados das análises dos agregados sintéticos e dos concretos produzidos apresentaram resultados satisfatórios, demonstrando que estes apresentam potencial para uso na indústria da construção civil.

Palavras Chave: Lama vermelha. Agregado sintético. Microestrutura.

ABSTRACT

Currently sustainability issues have gained prominence on the world stage in various sectors of society. Several researchers (LIMA, 2006; Hildebrand, 1998; SOUZA, J., 2010, ROSSI, 2009, etc..) Have tried to propose an interaction between the construction industry and those who engage in mineral production and processing, such as the beneficiation of bauxite. In this context, finding viability for the recovery of waste generated in large quantities and no use would contribute to the preservation of the environment, insofar as it would reduce consumption of resources from natural sources and increase the supply of inputs in construction market. This work is discussed the feasibility of producing a concrete, it has characteristics which renders itself to use as raw material in the construction industry, by using an synthetic aggregate obtained from the red mud (bauxite waste improvement) . According to the experimental program to be executed, the aggregates and the concrete produced will have their properties analyzed in order to study the production process and measurement respectively. Aggregates are analyzes of: porosity, water absorption, bulk density and Los Angeles abrasion and concrete, workability, density in fresh and hardened, compressive strength, tensile strength by diametrical compression, tensile bending, water absorption and elastic modulus. It is noteworthy that significant importance is given to the transition zone paste / aggregate, by analysis of the microstructure of concrete produced. Analysis is performed by means of tests: Mercury intrusion porosimetry (MIP) and Scanning Electron Microscopy (SEM). The results of the analyzes of the synthetic aggregates and concrete produced satisfactory results, showing that they have potential for use in the construction industry.

Keywords: Red Mud. Synthetic Aggregate. Microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-	Indústria do alumínio no mundo no ano de 2008.....	16
Figura 2.1-	Localização dos produtores de bauxita.....	23
Figura 2.2-	Processo Bayer (site da ALUNORTE).....	27
Figura 2.3-	Equipamento utilizado no processo de moagem de bauxita....	28
Figura 2.4-	Local onde ocorre a digestão.....	29
Figura 2.5-	Local onde ocorre a etapa de precipitação (ALUNORTE).....	30
Figura 2.6-	Depósito de Rejeitos Sólidos da ALUNORTE (ALUNORTE)...	32
Figura 2.7-	Esquema do lago de deposição de resíduos.....	34
Figura 2.8-	Membrana que reveste um dos lagos de deposição da ALUNORTE, Barcarena/PA.....	34
Figura 2.9-	Lagoa de deposição, ALBRÁS, Barcarena/PA.....	35
Figura 2.10-	Deposição de LV.....	36
Figura 2.11-	Forma e textura típica de areia de jazida tipo leito de rio.....	42
Figura 2.12-	Espetro dos agregados leves.....	46
Figura 2.13-	MEV, ilustrando o acúmulo de bolha de ar ao redor do agregado leve	50
Figura 2.14-	Casa construída com resíduo do processo Bayer	51
Figura 2.15-	Agregado após a queima. Esquerda: produzido pela extrusora; direita: produzido pelo tambor rotativo.....	52
Figura 2.16-	Aparência dos agregados após a queima.....	53
Figura 2.17-	Sinterização dos agregados de LV.....	54
Figura 3.1-	Fluxograma do programa experimental.....	57
Figura 3.2-	Agregados imersos em água.....	59
Figura 3.3-	Aparato em madeira e haste metálica, acoplados à balança.	60
Figura 3.4-	DRX da LV “in natura”	64
Figura 3.5-	Lama vermelha, areia, argila e carvão vegetal.....	65
Figura 3.6-	a. LV destorroada; b. Lv no moinho de bolas.....	65
Figura 3.7-	Forno utilizado no processo de sinterização dos agregados.....	67
Figura 3.8-	Agregados de LV secos em estufa e agregados após sinterização.....	67
Figura 3.9-	Fluxograma de produção do agregado.....	68

Figura 3.10-	Fluxograma das etapas de execução do método ABCP.....	73
Figura 3.11-	Curva de Abrans do cimento (ABCP).....	74
Figura 4.1-	Máquina “Los Angeles” e o agregado após o desgaste.....	80
Figura 4.2-	Visão interna do forno.....	84
Figura 4.3-	Massa específica no estado fresco para os concretos CSR, CLV50 e CLV100.....	86
Figura 4.4-	Resistência à compressão aos 07 e 28 dias.....	87
Figura 4.5-	Variação da resistência à compressão da idade de 07 para 28 dias.....	88
Figura 4.6-	Ruptura ocorrida no agregado.....	89
Figura 4.7-	Massa específica dos concretos no estado seco.....	90
Figura 4.8-	CP's após ensaio de tração por compressão diametral (CSR, CLV50 e CLV100).....	92
Figura 4.9-	Resistência à tração por compressão diametral aos 07 e 28 dias.....	92
Figura 4.10-	Variação da resistência à tração por comp. diametral da idade de 07 para 28 dias.....	93
Figura 4.11-	Resistência à tração na flexão aos 07 e 28 dias.....	94
Figura 4.12-	CP's após ensaio de tração na flexão.....	94
Figura 4.13-	Módulo de deformação aos 07 e 28 dias.....	95
Figura 4.14-	Volume incremental (ml/g) <i>versus</i> diâmetros (μm).....	100
Figura 4.15-	Volume acumulado (ml/g) <i>versus</i> diâmetros (μm).....	101
Figura 4.16-	Micrografia (MEV) do concreto CRS.....	102
Figura 4.17-	Espectro do ponto 1 e 2 da Figura 4.16(b) do concreto CRS.....	102
Figura 4.18-	Micrografia (MEV) do concreto CLV50.....	103
Figura 4.19-	Espectro do ponto 1 e 2 da Figura 4.18(b) do concreto CLV50..	103
Figura 4.20-	(a) Micrografia (MEV) do concreto CLV50; (b) Espectro do ponto 1.....	103
Figura 4.21-	Micrografia (MEV) do concreto CLV100.....	104
Figura 4.22-	Espectro do ponto 2 e 3 da Figura 4.21(b) do concreto CLV100.....	104

.LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-	Reserva e Produção mundial de bauxita.....	22
Tabela 2.2-	Parâmetros de consumo da Alumina.....	24
Tabela 2.3-	Distribuição da produção de alumina em 2008.....	25
Tabela 2.4-	Principais estatísticas Unidade.....	25
Tabela 2.5-	Composição da lama vermelha para diversos tipos de bauxita.....	31
Tabela 2.6-	Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo....	40
Tabela 2.7-	Limites da composição granulométrica do agregado graúdo..	40
Tabela 2.8-	Proporções dos componentes em cada mistura.....	54
Tabela 3.1-	Procedimentos experimentais para análise dos agregados leves.....	58
Tabela 3.2-	Procedimentos experimentais.....	60
Tabela 3.3-	Fluorescência de Raios-X da LV “in natura”.....	64
Tabela 3.4-	Análise química da argila utilizada.....	66
Tabela 3.5-	Grupos de concretos produzidos.....	68
Tabela 3.6-	Características da areia obtidas em laboratório.....	69
Tabela 3.7-	Características do seixo obtidas em laboratório.....	70
Tabela 3.8-	Características do agregado de LV obtidas em laboratório...	70
Tabela 3.9-	Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II Z 32.....	71
Tabela 3.10-	Tabela para determinar o consumo de água por m ³ (ABCP)..	74
Tabela 3.11-	Tabela para determinar o volume de seixo por m ³ (ABCP)....	75
Tabela 3.12-	Consumo de materiais e traços.....	76
Tabela 3.13-	Número de corpos de prova a serem moldados.....	78
Tabela 4.1-	Resultado do ensaio de Abrasão “Los Angeles”.....	79
Tabela 4.2-	Amostra 01 e 02: porosidade aparente, absorção de água e massa específica.....	81
Tabela 4.3-	Amostra 03 e 04: porosidade aparente, absorção de água e massa específica.....	82
Tabela 4.4-	Amostra 05 e 06: porosidade aparente, absorção de água e massa específica.....	83

Tabela 4.5-	Propriedades dos concretos no estado fresco.....	85
Tabela 4.6-	Resistência à compressão e massa específica.....	86
Tabela 4.7-	Resistência à tração por compressão diametral.....	91
Tabela 4.8-	Resistência à tração na flexão.....	93
Tabela 4.9-	Valores de módulo de deformação tangente inicial nas idades de 07 e 28 dias.....	95
	Valores de módulo de deformação obtidos em laboratório e calculados.....	96
Tabela 4.10-		
Tabela 4.11-	Equações para cálculo do módulo de deformação.....	97
Tabela 4.12-	Absorção de água e índice de vazios aos 28 dias.....	98
Tabela 4.13-	Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos produzidos.....	99

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AA	Absorção de Água
ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ALUMAR	Consórcio de Alumínio do Maranhão
ALUNORTE	Alumina do Norte do Brasil S.A.
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CEB	Companhia Energética de Brasília
CINASA	Construção Industrializada Nacional
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRS	Depósito de Rejeitos Sólidos
EDS	Espectrografia por Dispersão de Energia.
FIP	Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas
LV	Lama Vermelha
MEA	Massa Específica Aparente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MRN	Mineração Rio do Norte
PA	Porosidade Aparente
PIM	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
UFPA	Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	BAUXITA.....	20
2.2	ALUMINA.....	24
2.3	PROCESSO BAYER.....	26
2.4	LAMA VERMELHA.....	30
2.4.1	Deposição e estocagem	32
2.5	AGREGADOS PARA CONCRETO.....	36
2.5.1	Classificação dos agregados quanto à origem	37
2.5.1.1	Agregados naturais.....	37
2.5.1.2	Agregados britados.....	37
2.5.1.3	Agregados artificiais.....	37
2.5.1.4	Agregados reciclados.....	37
2.5.2	Classificação quanto à dimensão dos grãos	38
2.5.3	Caracterização dos agregados	38
2.5.3.1	Composição granulométrica.....	38
2.5.3.2	Forma e textura superficial.....	41
2.5.3.3	Resistência mecânica.....	42
2.5.3.4	Porosidade, permeabilidade e absorção.....	42
2.5.3.5	Substâncias nocivas presentes nos agregados.....	43
2.5.4	Agregado sintético	44
2.5.5	Agregado leve	45
2.5.5.1	Classificação.....	46
2.5.5.2	Processo de fabricação.....	47
2.5.5.3	Forma e textura superficial.....	48
2.5.5.4	Estrutura interna, resistência mecânica e módulo de deformação...	49
2.5.5.5	Porosidade e absorção de água.....	49
2.6	TRABALHOS REALIZADOS COM A UTILIZAÇÃO DA LAMA VERMELHA.....	50

2.6.1	Souza (2010)	52
2.6.2	Albuquerque (2007)	53
2.6.3	Rossi (2009)	54
2.6.4	Hildebrando et al. (1999)	55
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	57
3.1	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS LEVES.....	58
3.1.1	Procedimentos experimentais para a determinação das propriedades cerâmicas	58
3.1.1.1	Porosidade Aparente.....	58
3.1.1.2	Absorção de água.....	58
3.1.1.3	Massa específica aparente.....	59
3.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS.....	60
3.2.1	Procedimentos experimentais para a análise microestrutural...	61
3.2.1.1	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).....	61
3.2.1.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	62
3.3	PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS AGREGADOS SINTÉTICOS..	63
3.4	PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS CONCRETOS UTILIZANDO O AGREGADO DE LAMA VERMELHA.....	68
3.4.1	Caracterização dos materiais	69
3.4.1.1	Agregado miúdo.....	69
3.4.1.2	Agregado graúdo.....	69
3.4.1.3	Cimento Portland.....	70
3.4.1.4	Aditivo.....	71
3.4.1.5	Água.....	72
3.4.2	Dosagem dos concretos	72
3.4.3	Planejamento dos ensaios	77
3.4.4	Moldagem e cura dos corpos de prova	78
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	79
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS PRODUZIDOS COM LAMA VERMELHA.....	79
4.1.1	Abrasão “Los Angeles”	79

4.1.2	Porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente.....	80
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS..	84
4.2.1	Propriedades no estado fresco.....	84
4.2.1.1	Índice de consistência.....	85
4.2.1.2	Massa específica.....	85
4.2.2	Propriedades no estado endurecido.....	86
4.2.2.1	Resistência à compressão e massa específica.....	86
4.2.2.2	Resistência à tração.....	90
4.2.2.3	Módulo de deformação.....	95
4.2.2.4	Absorção de água por imersão e índice de vazios.....	97
4.3	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	99
4.3.1	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).....	99
4.3.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	101
5	CONCLUSÕES.....	105
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO DE LAMA VERMELHA.....	105
5.2	ESTUDOS MICROESTRUTURAIS.....	106
5.3	PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	106
	REFERÊNCIAS.....	108

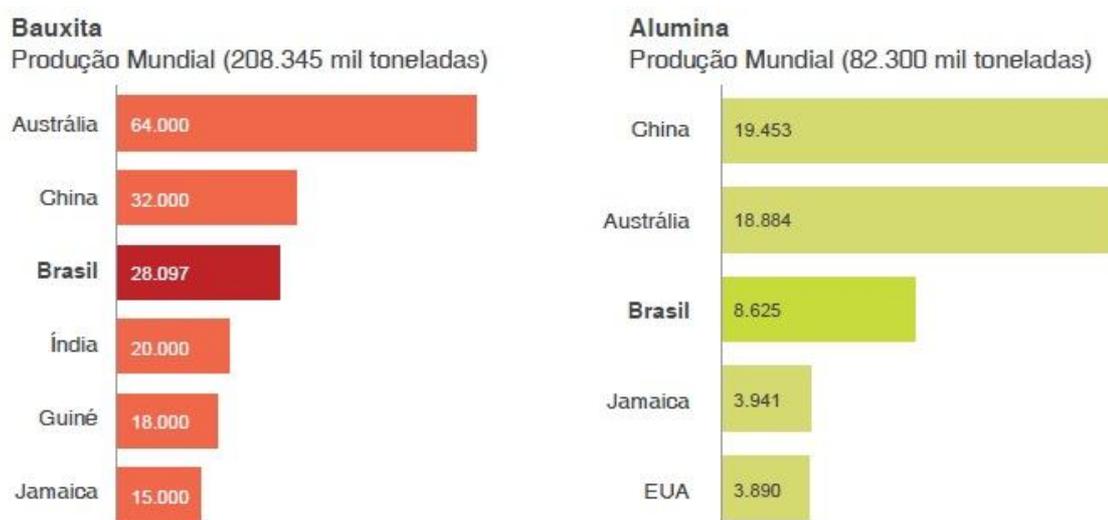
1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.

O estado do Pará destaca-se quando o assunto é mineração, pois uma das suas principais atividades econômicas é a produção mineral, fato este que levou o Banco Mundial a classificar sua economia como essencialmente mineira. Dentre as diversas indústrias instaladas neste estado, citam-se as de beneficiamento e produção mineral, que devido ao grande porte e volume de produção, geram uma série de resíduos, como por exemplo, o resíduo do processo Bayer conhecido como lama vermelha (LV), que se gerenciados de maneira inadequada, podem acarretar uma série de problemas ambientais para a população que vive próximo às áreas produtoras de alumina, devido às possibilidades de acidentes, o que pode causar principalmente a poluição das águas superficiais e subterrâneas, prejudicando a fauna e a flora.

Em nível mundial, o Brasil tem posição de destaque na cadeia do alumínio: 3ª maior reserva de bauxita; 3º maior produtor de alumina; e 6º maior produtor de alumínio primário (ABAL 2010), conforme apresentado.

Figura 1.1- Indústria do alumínio no mundo no ano de 2008



Fonte: ABAL (2010).

De acordo com o (BRASIL, 2007) O Brasil possui 11% das reservas mundiais de bauxita, equivalente a 3,5 bilhões de toneladas, destas 97% estão localizadas em

solo Paraense. Em 2007 foram produzidas no Brasil 22 milhões de toneladas de bauxita, enquanto que a produção no estado do Pará atingiu 19,9 milhões de toneladas, equivalente ao valor de R\$ 1,1 bilhão, sendo a Mineração Rio do Norte (MRN) no Pará, o maior produtor nacional.

Neste sentido, tem-se a LV que é o resíduo insolúvel gerado durante o processo de beneficiamento da bauxita por meio do processo Bayer, a qual é disposta em lagoas projetadas especialmente para tal finalidade. De acordo com Smith et. al. (2006), a lama vermelha representa o principal problema da indústria de beneficiamento da bauxita, devido à sua natureza cáustica.

A empresa Alumina do Norte do Brasil S.A. (ALUNORTE), em 2010 produziu 5,8 milhões de toneladas de alumina calcinada, teve uma produção de 4,25 milhões de toneladas de bauxita calcinada, *versus* 5,9 milhões de toneladas em 2009. De acordo com Liu et al. (2008), para cada tonelada de alumina produzida, gera-se de 1 a 1,5 tonelada de LV. A partir desses dados estatísticos, é possível ter percepção do grande volume de resíduo gerado.

Um dos maiores problemas enfrentados pela indústria de beneficiamento de bauxita é em relação às grandes áreas necessárias para deposição final do resíduo gerado no processo, bem como o fato do tratamento dessas áreas (lagoas de deposição) requererem custos elevados. Segundo informações da ALUNORTE, para a construção de uma bacia de estocagem investe-se algo em torno de US\$ 8,3 milhões.

A lama vermelha tem despertado interesse e preocupação de pesquisadores no mundo inteiro. Este resíduo apresenta diversas possibilidades de uso, principalmente na indústria da construção civil. Uma opção de sua utilização seria na confecção de agregados para a produção de concretos, o que implicaria diretamente na redução do volume de matérias primas extraídas de fonte natural, como o seixo, por exemplo. Menciona-se ainda, o fato de que a produção de um novo agregado significaria mais uma alternativa de material a ser utilizado na construção civil, além do que se estaria dando uma destinação correta a um resíduo gerado em grandes quantidades e que oferece riscos ao meio ambiente.

Neste sentido, diversas pesquisas foram desenvolvidas visando encontrar aplicações sustentáveis para o aproveitamento do resíduo de beneficiamento da bauxita, com o objetivo de suprir a falta ou escassez de matérias primas retiradas de fontes naturais.

Dentre os vários estudos existentes sobre este resíduo, cita-se a produção de agregados sintéticos para a indústria da construção civil (SOUZA, 2010), a produção de agregado graúdo a ser usado em concreto para reparo sob abrasão hidráulica (ROSSI, 2009), o uso como matéria prima na indústria cerâmica (HILDEBRANDO, 1998) e a obtenção de agregados leves para concretos (ALBUQUERQUE et al., 2007), entre outros. Estes trabalhos serão detalhados no item 2.8.

No entanto, surgem algumas dificuldades para a reciclagem da lama vermelha devido, principalmente, às suas características químicas e mineralógicas, em razão dos diversos minerais presentes na sua composição. Segundo Ambroise e Péra (2000), a composição química da lama vermelha varia de acordo com a qualidade da bauxita e do processo de produção da alumina. Este resíduo é composto por uma série de minerais, dentre os quais, aqueles que não são dissolvidos no processo Bayer, a exemplo dos óxidos e hidróxidos de alumínio (gibsite, boemita e diásporo), dos óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goethita), rutilo, anatásio, calcita, dolomita, caulinita, além dos neo-formados como a sodalita e a cancrenita, bem como os elementos-traço como V, Ga, P, Mn, Zn, Th, Cr e Nb.

Souza (2010) e Rossi (2009), afirmam que a lama vermelha apresenta potencial para utilização na produção de agregado sintético, na medida em que substituiria os agregados convencionais usados para a produção de concretos, como por exemplo, o seixo natural e pedra britada. Além da questão econômica e ambiental, o concreto produzido por esses dois autores, com o uso deste agregado, apresentou resistências à tração e à compressão superiores àqueles produzidos com agregados convencionais. Também apresentou menor desgaste na análise da abrasão hidráulica, fatos estes justificados pela resistência mecânica dos agregados produzidos com tal resíduo.

1.2 OBJETIVOS.

Este trabalho tem por objetivo principal a produção e análise de concretos utilizando agregado produzido a partir do resíduo de beneficiamento de bauxita, conhecido como lama vermelha.

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterização química e mineralógica da lama vermelha;

- b) Produção e análise das propriedades do agregado produzido (porosidade aparente, absorção de água, massa específica aparente e abrasão Los Angeles);
- c) Dosagem dos concretos;
- d) Avaliação das propriedades dos concretos produzidos, tanto no estado fresco (massa específica e trabalhabilidade) quanto no endurecido (massa específica, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, tração na flexão, absorção de água e módulo de elasticidade);
- e) Análise microestrutural dos concretos produzidos, por meio das análises de Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

Neste capítulo foram feitas referências ao processo de beneficiamento da bauxita (processo Bayer), ao resíduo gerado em tal processo (lama vermelha), à matéria prima base para a produção da alumina (bauxita), à alumina propriamente dita, ao agregado de LV e ao concreto produzido. Também serão apresentados alguns trabalhos realizados, nos quais se utilizou a LV.

2.1 BAUXITA

O termo bauxita deriva-se do nome da aldeia Les Baux de Provence na França meridional, onde foi descoberta em 1821 pelo geólogo Pierre Berthier. No Brasil, as primeiras referências sobre a bauxita datam do ano de 1920.

De acordo com Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2009) 98% da produção de bauxita no Brasil é destinada às refinarias de alumina, enquanto que o restante destina-se à indústria de produtos refratários e químicos.

A bauxita é o minério mais importante para produção de alumínio e é formada por um complexo de óxidos metálicos, predominantemente óxido de alumínio (Al_2O_3) com teores da ordem de 40% a 45% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO, 2007). É composta por um ou mais hidróxidos de alumínio, encontrados em proporções variadas (gibbsite e os polimorfos boemita e diásporo), diversas misturas de sílica, óxido de ferro, dióxido de titânio, silicato de alumínio e outras impurezas presentes em menores quantidades.

A gibbsite, $\alpha-Al(OH)_3$ e os polimorfos boemita, $\alpha-AlO(OH)$ e diásporo, $\alpha-AlO(OH)$ são encontrados na natureza em proporções que variam de acordo com a localização geográfica da jazida de minério. As bauxitas encontradas em depósitos europeus (França e Grécia) são mais ricas em boemita, enquanto que aquelas encontradas na China, Hungria e Romênia são ricas em diásporo. Aquelas geologicamente mais novas possuem alto conteúdo de gibbsite e ocorrem em grandes depósitos localizados em áreas de clima tropical como Jamaica, Brasil, Austrália, Guiné, Guiana, Suriname e Índia, e são as que apresentam maior interesse comercial (CONSTANTINO et al., 2002).

As bauxitas formam-se em maior quantidade nas seguintes situações: quando ocorre elevada porosidade na rocha, cobertura vegetal com adequada atividade

bacteriológica, topografia plana ou pouco acidentada que permita o mínimo de erosão, além de longo período de estabilidade e intensa alteração das condições climáticas, principalmente as estações seca e úmida.

De acordo com a Associação Brasileira de Alumínio (2009), as reservas brasileiras de bauxita são do tipo trihidratadas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), o que significa menores custos no processo de produção da alumina, devido ao fato de requererem pressões e temperaturas mais baixas, do que as do tipo monohidratadas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) encontradas, por exemplo, na França, Grécia e Hungria.

A distinção dos hidratos tem importância para definir a qualidade comercial de uma bauxita, diferenciando o seu comportamento ao dissolver-se em soda cáustica, que é o procedimento base para a extração industrial da alumina. O trihidrato é muito solúvel desde uma temperatura próxima de 100°C . O monohidrato bohemita, por sua vez, precisa de 180°C ou mais para obter uma solubilidade suficiente, enquanto o do tipo diásporo, acima de 250°C (VILLAR, 2002).

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), grande parte das reservas mundiais de bauxita se encontra localizada em regiões tropicais e subtropicais, ocorrendo em três principais tipos de climas, sendo que 57% (tropical), 33% (mediterrâneo) e 10% (subtropical).

De acordo com o (BRASIL, 2011), as reservas mundiais de bauxita referente ao ano de 2010, somaram 27,4 bilhões de toneladas. E o Brasil possui, desse total 9,5%, sendo 96% do tipo metalúrgica e somente 4% refratária. As maiores reservas desse minério, o equivalente a 95%, localiza-se no estado do Pará, as quais têm como principais concessionárias as empresas MRN, Vale, ALCOA e CBA. A Tabela 2.1 mostra os valores de reserva e produção mundial de bauxita.

Tabela 2.1 – Reserva e Produção mundial de bauxita

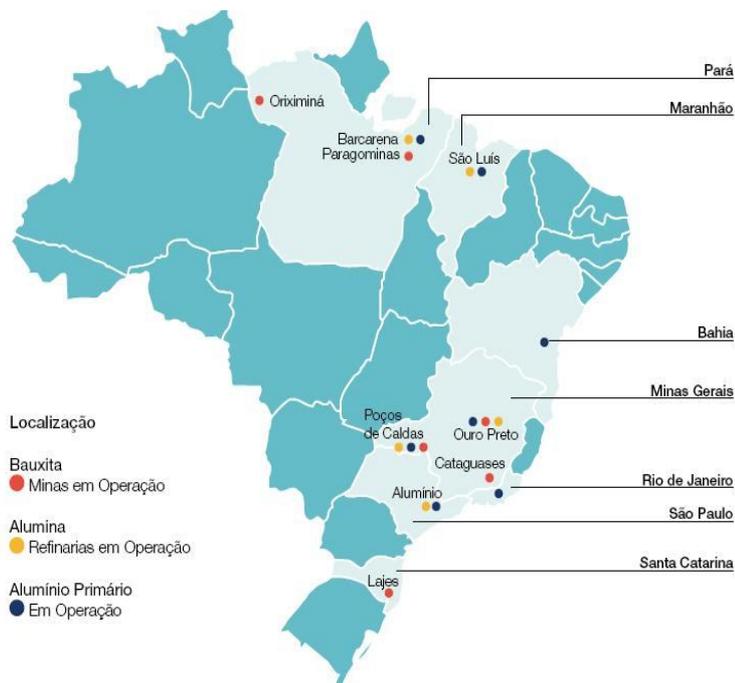
Discriminação Países	Reservas (10 ⁹ t)*	Produção (10 ³ t)*		
	2010 ^(p)	2009 ^(r)	2010 ^(p)	%
Brasil ⁽¹⁾	2.600	28.060	29.000	14,0
Austrália	5.400	65.200	70.000	33,7
China	750	40.000	40.000	19,3
Índia	900	16.000	18.000	8,7
Guiné	7.400	15.600	17.400	8,4
Jamaica	2.000	7.820	9.200	4,4
Kazaquistão	360	5.130	5.300	2,5
Venezuela	320	2.500	2.500	1,2
Suriname	580	4.000	3.100	1,5
Rússia	200	5.780	4.700	2,3
Grécia	600	2.100	2.000	1,0
Guiana	850	1.760	1.800	0,9
Vietnam	2.100	30	30	-
Outros Países	3.300	10.310	4.440	2,1
TOTAL	27.360	201.000	207.470	100,0

Fonte: DNPM/DIPLAM; USGS- *Mineral Commodity Summaries*–2010; *International Aluminium Institute* (IAI); Associação Brasileira do Alumínio (ABAL);

Empresas produtoras de bauxita. Notas: (p) dados preliminares, exceto Brasil; (r) revisado. * Reservas Lavráveis.

De acordo com a (BRASIL, 2011), as principais empresas de mineração de bauxita que atuam no Brasil são: MRN, que responde por um percentual de produção de 58%, Vale com 20%, a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), com 10%, a Alcoa com 10% e por último a Novelis com uma produção equivalente a 2%. A Mineração Curimbaba que é a principal produtora de bauxita utilizada na indústria de refratários representou 4,8% do total. A Figura 2.1 mostra a localização dos produtores de bauxita, alumina e alumínio primário no Brasil.

Figura 2.1- Localização dos produtores de bauxita



Fonte: Relatório de sustentabilidade da indústria do alumínio (2006/2007).

As operações para a produção de bauxita consistem na extração do minério, beneficiamento, transporte, secagem e embarque para as refinarias de alumina que posteriormente seguem para as fundições gerando o lingote de alumínio e, na sequência, seus produtos transformados (BRASIL, 2009).

No ano de 1993, aproximadamente 68% da produção brasileira de bauxita tinha como destino o mercado externo. Em 1995 as exportações somavam 49% e o abastecimento ao mercado doméstico passou a crescer objetivando suprir as refinarias de alumina da ALUNORTE e ALUMAR que passaram a expandir suas capacidades instaladas para atender a expansão dos smelters (unidades produtivas de alumínio primário) de alumínio destas empresas.

O Brasil com reservas de qualidade internacional disponíveis, da ordem de 34 bilhões de toneladas e uma produção mundial de 205 milhões de toneladas em 2008, possui condições de expansão expressiva da indústria de bauxita (BRASIL, 2009).

Em 2009 no município de Juruti/PA, a Alcoa iniciou a primeira fase do projeto Minas de Juruti, que consiste na produção de bauxita e inclusive existe possibilidade da realização de beneficiamento da matéria prima para a produção de alumínio. Juruti pode ser considerada um dos maiores depósitos de bauxita do planeta,

possuindo uma reserva de cerca de 700 milhões de toneladas métricas. Estima-se que a produção de bauxita nesta mina, seja cerca de 4 milhões de toneladas/ano, 2 milhões de toneladas/ano de alumina e 1 milhão de toneladas/ano de alumínio primário. A previsão é que as operações desta primeira fase alcance sua capacidade total de produção em 2010.

Em 2008, a MRN bateu seu recorde de vendas atingindo 18,25 milhões de toneladas, 2,1% acima das 17,88 milhões de toneladas vendidas em 2007, representando também o maior movimento de navios da história do terminal portuário, com 393 navios embarcados, 4% mais que os 378 navios embarcados em 2007 (MINERAÇÃO RIO DO NORTE, 2008).

De acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMINIO (2010) ocorreu um crescimento de 22,8% da produção de bauxita, chegando a atingir um volume de 32.028 mil toneladas.

2.2 ALUMINA

Em 2007 a ALUNORTE produziu 4,25 milhões de toneladas de alumina calcinada, no ano de 2008 essa produção subiu para 5,3 milhões de toneladas. O custo de conversão de bauxita em alumina manteve a referência de ser um dos mais baixos do mundo, com média de US\$ 142,14/tonelada no ano (ALUNORTE, 2008).

Para a produção da alumina utiliza-se além da bauxita e combustíveis energéticos, outros insumos, cuja quantidade consumida depende da qualidade da bauxita utilizada. Na Tabela 2.2 são mencionados os parâmetros de consumo da alumina:

Tabela 2.2 – Parâmetros de consumo da Alumina

Insumos	Quant.
Bauxita	1,85 a 3,4 t/t
Cal	10 a 50 kg/t
Soda Cáustica	40 a 140 kg/t
Vapor	1,5 a 4,0 t/t
Óleo combustível (calcinação)	80 a 130 kg/t
Floculante sintético	100 a 1000 g/t
Energia elétrica	150 a 400 kw/t
Produtividade (Homem hora/t)	0,5 a 3,0 Hh/t
Água	0,5 a 2,0 m ³ /t

Fonte: ABAL (2007).

De acordo com a Economia Mineral do Brasil (2009) - DNPM, em 2008 a produção mundial de alumina foi de 60 milhões de toneladas, e destas 92% são utilizadas para a produção de alumínio e 8% em outros setores, na forma de hidratos ou de aluminas especiais. A produção brasileira foi de 7,1 milhões de toneladas, o que equivale a 12% da produção mundial, sendo o Brasil atualmente o terceiro maior produtor mundial. A Tabela 2.3 mostra a distribuição da produção nacional.

Tabela 2.3 – Distribuição da produção de alumina em 2008.

Unidade: 1000 t

Empresa/UF	Produção	(%)
Alcan Alumínio do Brasil S/A – MA	145	2,0
Alcoa Alumínio S/A	1.165	16,4
MG	375	5,3
MA	790	11,1
ALUNORTE–Alumina do Norte do Brasil S/A-PA	4.285	60,1
BHP Billiton Metais S/A-MA	528	7,4
CBA – Cia. Brasileira de Alumínio-SP	882	12,4
Novelis Brasil Ltda – MG	120	1,7
T O T A L	7.125	100,0

Fonte: ABAL (2009).

Dados da Economia Mineral do Brasil (BRASIL, 2009). Mostram que houve um crescimento das exportações brasileiras de alumina a uma taxa de 23,5% a.a no período de 1995 a 2008. No ano de 1995, as exportações atingiram 12%, para uma produção de 2,1 milhões de toneladas. Em 2000 obteve-se uma produção de 3,7 milhões de toneladas, da qual 32,4% destinados à exportação. Em 2008 houve uma estabilidade das exportações em relação a 2007. A Tabela 2.4 demonstra as principais estatísticas de produção, importação, exportação e consumo aparente de alumina.

Tabela 2.4 – Principais estatísticas

Unidade: 1000 t

DISCRIMINAÇÃO	2006	2007	2008
Produção	6.735	7.078	7.822
Importação	66	51	78
Exportação	3.380	3.840	4.560
Consumo Aparente	3.479	3.101	3.340

Fonte: DNPM (2009).

O Consórcio de Alumínio do Maranhão (ALUMAR), em 2009 passou por uma ampliação em sua refinaria de alumina, a qual foi concluída em dezembro do mesmo ano, e com esse megaprojeto, sua capacidade de produção passou de 1,5 milhão de

tonelada de alumina no ano de 2007 para 3,5 milhões de toneladas de alumina por ano em 2009 (Site da ALCOA).

A ALUNORTE, em 2008 passou pelo projeto de expansão nº 3 e no quarto trimestre desse mesmo ano, duas linhas desse projeto (6 e 7) entraram em funcionamento, tendo sua capacidade de produção consideravelmente ampliada para 6,3 milhões de toneladas/ano. (ALUNORTE, 2008).

Constata-se a partir das informações contidas nos dois parágrafos anteriores, o crescimento da indústria de alumínio no Brasil, principalmente devido aos investimentos feitos visando melhorias na sua infraestrutura. A produção mundial de bauxita em 2010 voltou a crescer (3,2%) em relação a 2009, após a crise mundial que afetou o comércio global.

2.3 PROCESSO BAYER

O processo utilizado no refino da bauxita, conhecido mundialmente como processo Bayer, foi desenvolvido e patenteado pelo Austríaco Karl Josef Bayer em 1888. A primeira fábrica de alumina a utilizar em grande escala o processo patenteado por Bayer começou a operar no sul da França em fevereiro de 1894.

De acordo com Habashi (2005) apud. SILVA FILHO et al. (2007), o processo Bayer foi considerado um marco na história da metalurgia, tão grande foi a importância que chegou a ser comparado ao processo de cianetação para tratamento de ouro e prata, considerado o marco do nascimento da hidrometalurgia moderna. Antes da descoberta do processo Bayer, a bauxita era beneficiada através do processo Le chatelier, desenvolvido pelo químico Francês Louis Le Chatelier.

O processo Bayer substituiu o processo Le Chatelier, principalmente devido ao fato deste primeiro ter proporcionado uma redução considerável no custo de produção do óxido de alumínio (Al_2O_3). O processo Bayer continua sendo utilizado nas plantas de beneficiamento de bauxita, praticamente sem grandes alterações do processo original, uma das poucas mudanças foi a substituição do Na_2CO_3 pelo NaOH, bem como o uso de pressão durante a digestão (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1999).

O desenvolvimento do processo Bayer teve como principal objetivo atender a demanda da indústria têxtil, a qual usa em seu processo de tingimento do algodão o Al_2O_3 . No entanto este processo só ganhou importância na metalurgia, mediante sua

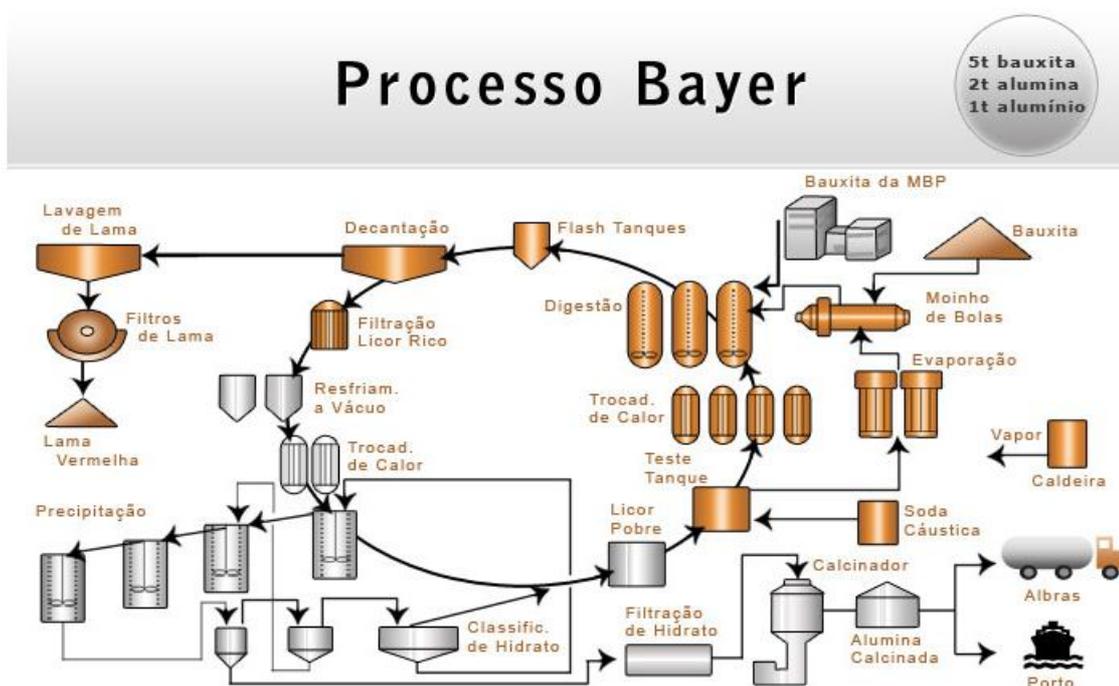
associação com o processo eletrolítico de obtenção do alumínio metálico (processo Hall-Heroult).

O processo Bayer inicia-se com a preparação das matérias-primas, e posteriormente prossegue com as etapas de digestão, clarificação/filtração e precipitação do hidrato, calcinação e conversão em alumina (ALCOA, 2010).

Segundo Villar (2002), o processo Bayer é baseado no fato de que os hidratos de alumínio são muito solúveis em soda cáustica, o que não ocorre com os demais óxidos constituintes da bauxita não sendo estes aproveitáveis.

Os trabalhos existentes apresentam divergências quanto aos estágios que fazem parte do processo Bayer. De modo geral, desconsiderando as diferenças existentes nas diversas plantas de produção de alumina, o beneficiamento de bauxita pode ser mostrado na figura 2.2.

Figura 2.2 – Processo Bayer



Fonte: ALUNORTE, (2009).

Inicialmente o minério passa por um processo de homogeneização, para que a matéria prima proveniente de jazidas diferentes torne-se o mais homogêneo possível. Posteriormente é feita a moagem (primeira etapa do processo Bayer), por meio de dois tipos de moinhos, um de martelo e um de barras. Posteriormente ocorre a estocagem da pasta moída, a qual possui granulometria ideal para início da

digestão, que é a segunda etapa deste processo, em tanques específicos e lá permanecerão em homogeneização devido à ação de bombas recirculantes e pás rotativas. A Figura 2.3 mostra Equipamento utilizado no processo de moagem de bauxita.

Figura 2.3- Equipamento utilizado no processo de moagem de bauxita



Fonte: ALUNORTE (2011).

A digestão é responsável por dissolver o hidróxido de alumínio na bauxita, bem como reduzir o teor de sílica. Para tanto, provoca-se uma reação com NaOH concentrado a uma temperatura de aproximadamente 150°C. A Figura 2.4 mostra Local onde ocorre a digestão.

Figura 2.4- Local onde ocorre a digestão.



Fonte: ALUNORTE (2011).

De acordo com Constantino (2001) apud. Lima (2006), a adição de CaO, na etapa de digestão, é feita com o intuito de promover a diminuição, por precipitação, de íons carbonato e fosfato dissolvidos no meio. A etapa posterior, denominada clarificação (terceira etapa), consiste na separação do resíduo sólido rico em óxido de ferro (LV) da solução de aluminato de sódio, $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$. O filtrado passa por um processo de resfriamento e o $\text{Al}(\text{OH})_3$ é precipitado pela adição de partículas (germes de cristalização) de hidróxido de alumínio. Após a remoção do $\text{Al}(\text{OH})_3$, o filtrado alcalino é concentrado por evaporação e retornado à etapa de digestão. A maior parte do hidróxido de alumínio é calcinada para produzir óxido de alumínio (Al_2O_3), ou seja, a alumina.

A precipitação é a penúltima etapa do processo Bayer, onde ocorre o resfriamento do licor verde, e é adicionada uma pequena quantidade de cristais de alumina (semeadura), buscando estimular a precipitação, em uma operação reversa à digestão, observar Eq. (1).

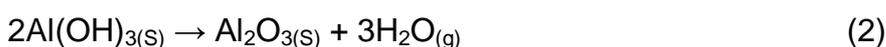


Figura 2.5- Local onde ocorre a etapa de precipitação (ALUNORTE).



Fonte: ALUNORTE (2011).

A calcinação é última etapa do processo, em que a alumina é lavada para remover qualquer resíduo do licor e posteriormente seca. Em seguida a alumina é calcinada a aproximadamente 1000 °C para desidratar os cristais, formando cristais de alumina puros, de aspecto arenoso e branco, Eq. (2) (HIND et al., 1999; IOM3, 2005; ABAL, 2005; WAO, 2005 apud SILVA FILHO, 2007)



2.4 LAMA VERMELHA.

Lama vermelha é o resíduo proveniente do processo de beneficiamento da bauxita para a produção de alumina, por meio do processo Bayer. Sua composição química varia de acordo com a natureza da bauxita e depende também da técnica usada no processo utilizado em cada planta de beneficiamento.

Este resíduo, normalmente retém todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, bem como o alumínio que não foi extraído durante o processo, combinado com sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica. Porém existem outros elementos que constituem a lama vermelha, no entanto apresentam-se como elementos traço, que são os óxidos de V, Ga, P, Mn,

Mg, Zn, Th, Cr, Nb. As fases minerais mais comuns são a hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), a goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$), a magnetita (Fe_3O_4), a boemita ($\alpha\text{-AlO(OH)}$), o quartzo (SiO_2), a sodalita ($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$) e a gipsita (CaSO_4), com menor presença de calcita (CaCO_3) e gibisita ($\alpha\text{-Al(OH)}_3$). A lama vermelha é constituída por partículas muito finas (cerca de 95 % < 44 μm , i.e. 325 mesh), apresenta uma área superficial de 13-22 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ e tem como principal característica uma elevada alcalinidade (pH 10-13) (PRADHAN et al., 1996; HIND ; BHARGAVA; GROCOTT, 1999 apud. SILVA FILHO et al., (2007). A Tabela 2.5 apresenta a composição de lama vermelha para diversos tipos de bauxita.

Tabela 2.5 – Composição da lama vermelha para diversos tipos de bauxita.

5Composto	ALUNORTE	ALCOA	CBA	ALCAN Canadá	ALCOA Austrália	ALCAN África
Al_2O_3	35,5	35,67	36,7	37,6	25,45	26,60
Fe_2O_3	37,16	33,78	29,89	32,45	34,50	48,40
SiO_2	2,34	3,45	6,78	3,67	17,06	5,50
TiO_2	6,18	4,56	5,67	4,12	4,90	2,80
Na_2O	8,49	9,67	7,89	6,78	2,74	2,40
CaO	1,23	2,34	1,20	3,45	3,69	-
MgO	-	-	-	-	-	-
P.F. (perda ao fogo)	11,19	11,24	12,35	9,80	12,90	14,60

Fonte: Silva Filho et al.(2007) apud. Souza, J., (2010).

A LV faz parte de um grupo de rejeitos conhecidos como “tailings”, os quais resultam do beneficiamento de minérios pela indústria extrativista mineral. Estes rejeitos são solos que continham o mineral de interesse ou resultam da moagem de rochas. Dependendo do processo de extração, podem ser adicionadas substâncias químicas como, por exemplo, a soda cáustica empregada no refino da alumina. Os “tailings” caracterizam-se por serem lamas formadas por partículas muito finas (FAHEY; NEWSON; FUJIYASU, 2002; VICK, 1983).

Segundo Bertochi et al. (2006) , devido à natureza altamente cáustica da lama vermelha, a mesma é classificada como resíduo perigoso e, como tal, é necessária sua neutralização antes do seu transporte.

Os trabalhos existentes apresentam controvérsia quanto à toxicidade deste resíduo. Nunn (1998) apud Silva Filho; Alves; Motta, (2007). Afirma que a lama vermelha não é particularmente tóxica, de modo que a Environmental Protecyc Agency (EPA) não a classifica como um rejeito perigoso. Outros autores como Hind; Bhargava, Grocott, (1999), consideram-na tóxica, na medida em que podem

constituir um perigo para as populações que residem próximo às indústrias de beneficiamento da bauxita, devido à presença de elevados teores de cálcio e hidróxido de sódio.

Ribeiro e Morelli (2008), embasados nos procedimentos descritos pela NBR 10004 (2004), classificaram a lama vermelha brasileira como um resíduo perigoso - classe I, devido ao fato desta apresentar corrosividade não compatível com os limites aceitos pela normalização brasileira.

Existem no mundo 85 plantas de produção de alumina, e estas geram um grande volume de resíduo, algo em torno de 1,2 t de lama/t de alumina produzida (TSAKIRIDIS; AGATZINI-LEONARDOU; OUSTADAKIS, 2004). Estima-se que anualmente sejam geradas cerca de 66 milhões de toneladas de lama vermelha no mundo inteiro. A Figura 2.6 mostra o Depósito de Rejeitos Sólidos (DRS) da ALUNORTE.

Figura 2.6– Depósito de Rejeitos Sólidos da ALUNORTE



Fonte: ALUNORTE (2011)

2.4.1 Deposição e estocagem

A deposição do resíduo oriundo do processo Bayer (lama vermelha), consiste em um dos maiores problemas para as empresas de beneficiamento da bauxita, principalmente devido ao grande volume de resíduo gerado, aos altos custos

associados ao seu manejo e deposição, além dos riscos de acidentes ambientais. Segundo Kumar S.; Kumar R. & Bandopadhyay (2006), os custos com o processo de deposição deste resíduo podem chegar a 5% do custo total da produção da alumina.

No século passado alguns países como França, Grã Bretanha, Jamaica, Japão, Itália e Estados Unidos, despejavam a LV diretamente no mar. Já o resíduo produzido em plantas não costeiras, eram depositadas em represamentos confinados, os quais ocupavam grandes áreas (YANG; XIAO, 2007). Atualmente a maioria das plantas de beneficiamento de bauxita utilizam processos de deposição de resíduos modernos com tecnologias avançadas e que oferecem menos riscos ao meio ambiente.

Os métodos mais utilizados para a deposição de lama vermelha são: os métodos convencionais ou úmidos e os métodos conhecidos como secos ou semi-secos.

Os métodos convencionais ou úmidos receberam esta denominação devido à grande quantidade de água utilizada no processo, que segue juntamente com o material sólido para os locais de deposição. Estes consistem em grandes diques onde a LV é disposta com baixo teor de materiais sólidos. O material sólido sedimenta e surge um sobrenadante alcalino. Os custos associados são altos, devido à necessidade de impermeabilização da área antes da deposição, feita normalmente com o uso de membranas plásticas ou da aplicação de camada de material impermeável, devido aos riscos de contaminação do solo e do lençol freático, entre outros componentes (KIRKPATRICK; NGUYEN; BOGER; JAMAICAN BAUXITE CASE apud. SILVA FILHO et al., 2007). As Figuras 2.7 e 2.8 mostram o esquema de uma lagoa de deposição e a membrana utilizada para revestir, respectivamente.

Figura 2.7 – Esquema do lago de deposição de resíduos



Fonte: ABAL (2009)

Figura 2.8– Membrana que reveste um dos lagos de deposição da ALUNORTE, Barcarena/PA



Fonte: Lima (2006).

Atualmente os métodos mais aplicados nas plantas de beneficiamento de bauxita são os métodos secos ou semi-secos. Estes apresentam algumas vantagens em relação aos demais, como por exemplo, possuem uma maior facilidade no manuseio, oferecem maior segurança, geram um menor volume de resíduo, ocupam uma área menor, além do processo de reabilitação da área ser executado com maior facilidade. Dentre os métodos de disposição a seco, o mais utilizado para a lama vermelha é o “Dry-Stacking”.

A lama vermelha gerada pela ALUNORTE é estocada em DRS, a qual utiliza a tecnologia Dry-Stacking desenvolvida pela empresa alemã Giulini Chemie GmbH, que consiste no armazenamento da lama vermelha, após a lavagem e filtragem, em depósitos selados, a fim de reduzir o teor cáustico. A LV gerada por esta empresa

possui alta concentração de sólidos (aproximadamente 65% em peso base) e baixa concentração de soda cáustica (em torno de 7 g/L) (ALUNORTE, 2009). A Figura 2.9 mostra uma lagoa de deposição.

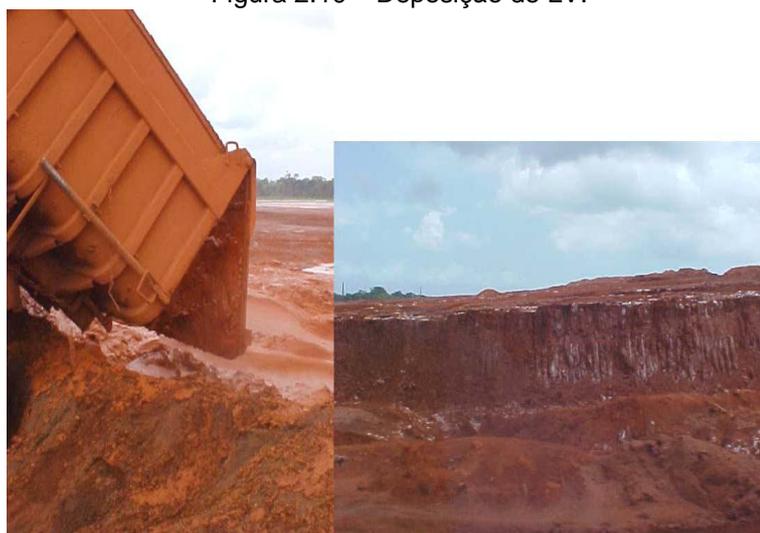
Figura 2.9 – Lagoa de deposição, ALBRÁS, Barcarena/PA



Fonte: Lima (2006).

Hildebrando (1998) fala em seu trabalho sobre as dificuldades técnicas, riscos e o alto custo para a deposição da lama vermelha, o que acaba influenciando negativamente na lucratividade das empresas de beneficiamento de bauxita. Existe ainda toda uma preocupação em preservar o ecossistema exposto aos impactos causados por este resíduo, tornando-se então indispensável o acompanhamento regular da qualidade de águas subterrâneas como indicador mais competente da confiabilidade do lago de deposição. A Figura 2.10 mostra a deposição do resíduo.

Figura 2.10 – Deposição de LV.



Fonte: Lima (2006)

2.5 AGREGADOS PARA CONCRETOS.

Agregados para Construção Civil são materiais granulares, sem forma ou volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas às obras de engenharia, sendo comumente utilizados na produção de concretos e argamassas de cimento Portland.

São exemplos de agregados, a pedra britada, o cascalho e as areias naturais ou obtidas por moagem de rocha, além das argilas e dos substitutivos como resíduos inertes reciclados, escórias de aciaria, produtos industriais, entre outros.

A indústria de agregados minerais proporciona insumos para a infraestrutura urbana, industrial e malha viária nacional, de maneira a atender a crescente demanda por espaços urbanizados e localidades com acessibilidade para redes de transporte de bens, informações, energia e água.

A princípio devido principalmente ao fato de se conseguir agregados em abundância e baratos, acreditava-se que estes desempenhavam um papel secundário na fabricação de concretos. Mas com a utilização do concreto em larga escala, logo foi possível perceber o seu verdadeiro papel. A partir de então deu-se real importância técnica, econômica e social a este insumo.

No sentido de evitar o esgotamento de jazidas naturais, tem-se buscado diversas alternativas, principalmente aquelas ambientalmente corretas visando atender a crescente demanda de insumos para a indústria da construção civil. Vale ressaltar que a escolha por um determinado tipo de agregado depende da

disponibilidade local. Na região norte do Brasil, por exemplo, o agregado graúdo mais utilizado é o seixo.

2.5.1 classificação dos agregados quanto a origem.

Quanto à origem os agregados classificam-se como:

2.5.1.1 Agregados naturais.

São aqueles que se encontram de forma particulada na natureza, nas condições de uso imediato sem necessidade de beneficiamento, como por exemplo, areia e seixo obtidos nos leitos dos rios.

2.5.1.2 Agregados britados.

São aqueles que são submetidos a processo de cominuição (diminuição do diâmetro das partículas), de modo geral feito por meio do processo de britagem, de modo que seja possível sua utilização como agregado na produção de concreto, como pedra britada, como pedrisco, como pedregulho britado, etc.

2.5.1.3 Agregados artificiais.

São aqueles obtidos por meio de processos industriais, ou seja, são aqueles em que ocorrem alterações da maneira como se encontram depositados. São exemplos de agregados artificiais, a argila expandida e peletizada, o folhelho expandido por tratamento térmico, a vermiculita expandida, entre outros.

2.5.1.4 Agregados reciclados.

Podem ser resíduos industriais granulares, que possuem propriedades que os tornem adequados ao uso como agregado. Este tipo de agregado também pode ser proveniente do beneficiamento de resíduos de construção e demolição, os chamados RCD's, os quais são devidamente selecionados para que possam ser utilizados para esta finalidade. Vale ressaltar que são descartados na seleção

metais, madeira, restos orgânicos e outros materiais que possam apresentar comportamento prejudicial se incorporados ao concreto. São exemplos de agregados reciclados a escória de alto forno, entulhos de construção/demolição, resíduos cerâmicos provenientes de olarias, etc.

2.5.2 classificação quanto à dimensão dos grãos.

Em relação às dimensões das partículas, os agregados classificam-se de acordo com NBR 7211 (2009) como graúdos e miúdos.

- a) Agregados graúdos - são aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

- b) Agregados miúdos - são aqueles cujos grãos passam pela peneira que possui abertura de malha de 4,75 mm.

2.5.3 Caracterização dos agregados.

Os agregados possuem diversas características importantes a serem cuidadosamente avaliadas de modo a qualificá-los para uso na produção dos concretos, as quais são apresentadas a seguir.

2.5.3.1 Composição granulométrica.

Por meio da composição granulométrica é permitido averiguar a distribuição dos grãos que constitui os agregados. Essa propriedade, de modo geral, é expressa em termos de porcentagens individuais ou acumuladas retidas em cada uma das peneiras da chamada série normal ou intermediária que são estabelecidas na NBR 7211 (2009).

Também se utiliza como referência para avaliar a composição granulométrica de um agregado a dimensão máxima característica e o módulo de finura.

De acordo com a NBR 7211 (2009) dimensão máxima característica é a grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou

intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa; já o módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas, em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

Segundo Neville apud. Souza (2010), não existe uma granulometria ideal para um determinado agregado, o que se busca de modo geral, é a compatibilização entre os requisitos físicos e econômicos. Areias muito grossas, por exemplo, produzem misturas de concreto ásperas e com baixa trabalhabilidade, já as muito finas farão com que ocorra um aumento no consumo de água (consequentemente, o consumo de cimento para uma dada relação água/cimento) e são antieconômicas.

Segundo PASSUELO, Alexandra et al. (2011), o equilíbrio na distribuição granulométrica fará com que se produzam misturas de concretos mais trabalháveis e econômicas, além de proporcionar uma mistura mais fechada da massa de concreto, fazendo com que haja uma diminuição no volume de vazios e, por consequência a diminuição dos espaços por onde possivelmente penetrariam os agentes agressivos ao concreto.

As propriedades como forma e textura das partículas, a dimensão máxima do agregado e o teor de água da mistura, são responsáveis pela trabalhabilidade do concreto. Quanto mais fino for o agregado, maior será a quantidade de água requerida para se atingir uma dada trabalhabilidade.

Conforme mencionado anteriormente, não existe uma granulometria ideal, no entanto a NBR 7211 (2009) estabelece limites da distribuição granulométrica para os agregados graúdos e miúdos, os quais são apresentados nas tabelas 2.6 e 2.7.

Tabela 2.6 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTA 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
 NOTA 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
 NOTA 3 2 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (2009).

Tabela 2.7 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica				
	d/D ^a				
	4,75/12,50	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 - 5
63 mm	-	-	-	-	5 - 30
50 mm	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5 mm	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5 mm	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25 mm	-	0 - 5	4 - 25	87 - 100	-
19 mm	-	2 - 15 ^b	65 ^b - 95	95 - 100	-
12,5 mm	0 - 5	40 ^b - 65 ^b	92 - 100	-	-
9,5 mm	2 - 15 ^b	80 ^b - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 ^b - 65 ^b	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 ^b - 100	95 - 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

^a Zona granulométrica correspondente à menor (*d*) e a maior (*D*) dimensões do agregado graúdo.
^b Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Esta variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: NBR 7211 (2009).

2.5.3.2 Forma e textura superficial.

A textura superficial e a forma das partículas do agregado exercem maior influência sobre as propriedades do concreto no estado fresco do que as no estado endurecido.

A forma faz referência às características geométricas, tais como arredondada, angulosa, alongada ou achatada.

Para Souza (2010), a compactidade é um dos aspectos determinantes da resistência do concreto, a qual faz referência ao volume de vazios decorrentes da acomodação dos agregados. Partículas que possuem formato mais arredondado, de modo geral geram menor espaço intersticial, e conseqüentemente, misturas mais compacta e com maior potencial de produzir concretos com maiores valores de resistência.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a classificação da textura superficial, definida pelo grau com que a superfície do agregado é lisa ou áspera, é baseada em uma avaliação puramente visual. A textura superficial do agregado depende da dureza, tamanho do grão, porosidade da rocha matriz e sua subsequente exposição a forças de atrito.

Ao compararem-se partículas lisas e arredondadas, com partículas de textura áspera, angulosas e alongadas, observar-se-á que estas segundas necessitariam de mais pasta de cimento para se produzir misturas de concreto trabalháveis, o que acarretaria aumento no custo de produção.

A textura superficial dos grãos exerce influencia sobre a aderência do agregado à pasta de cimento. Agregados com textura mais áspera resultam em maior aderência entre as partículas e a matriz de cimento, o que conduz a uma maior resistência mecânica, principalmente à flexão (NEVILLE apud. SOUZA, 2010). Na Figura 2.11 são apresentadas a forma e a textura superficial característica das jazidas do tipo leito de rios.

Figura 2.11- Forma e textura típica de areia de jazida tipo leito de rio.



Fonte: PASSUELO, Alexandra et al. (2011)

2.5.3.3 Resistência mecânica.

A resistência à compressão, a resistência à abrasão e o módulo de elasticidade do agregado são propriedades influenciadas pela porosidade, além de serem inter-relacionadas entre si.

Os agregados que são utilizados com mais frequência na produção de concreto possuem resistência mecânica muito superior à do concreto.

2.5.3.4 Porosidade, permeabilidade e absorção.

Segundo Souza (2010), essas três propriedades dos agregados exercem influência direta sobre o desempenho de um concreto, na medida em que são responsáveis por algumas propriedades como: aderência entre o agregado e a pasta de cimento, resistência à abrasão e estabilidade química.

Vale ressaltar que os poros existentes na superfície da partícula exercem influência sobre a aderência entre o agregado e a pasta de cimento, e consequentemente sobre a resistência mecânica do concreto.

A permeabilidade refere-se a continuidade dos poros no interior do concreto. Um concreto altamente poroso é de modo geral mais permeável e, por conseguinte apresenta-se mais vulnerável ao ataque de agentes agressivos.

De acordo com PASSUELO, Alexandra et al. (2011), capacidade de absorção de um agregado é definida como a quantidade total de água requerida para levar o agregado da condição seca em estufa para a condição saturado com superfície seca (SSS), enquanto que a absorção efetiva é definida como a quantidade de água requerida para levar o agregado da condição de seco ao ar para a condição SSS.

2.5.3.5 Substâncias nocivas presentes nos agregados.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), substâncias deletérias são aquelas que estão presentes como componentes minoritários tanto no agregado graúdo quanto no agregado miúdo, e que podem exercer influência negativa em relação à trabalhabilidade, pega, endurecimento, além das características de durabilidade do concreto.

Existem diversos tipos de substâncias nocivas, as quais serão descritas a seguir:

- a) Impurezas de origem orgânica na forma de húmus ou fragmentos vegetais carbonizados ou não, como por exemplo, ramos, folhas e outros tecidos vegetais. Este tipo de substância pode interferir nas reações de hidratação do cimento, serem prejudiciais devido à presença de fragmentos de baixa resistência mecânica, ou ainda provocar manchas superficiais no concreto.
- b) Torrões de argila e materiais friáveis são determinados segundo prescrições existentes na NBR 7218 (2010). De acordo com a NBR 7211 (2009), o teor máximo permitido considerando agregado miúdo é de 3%, em massa, já para o agregado graúdo, o limite é de 1% em concreto aparente, 2% em concreto sujeito a desgaste superficial e 3% para os demais concretos.
- c) Material pulverulento é constituído por partículas com dimensão inferior a 75µm inclusive por materiais solúveis em água. A presença deste tipo de substância em grandes quantidades pode influenciar negativamente na trabalhabilidade no estado fresco, além do que pode provocar fissuração no concreto, fazendo com que haja um aumento do consumo de água por metro cúbico.

- d) Minerais álcali-reativos são minerais que fazem parte da reação química deletéria conhecida como reação alcali-agregado. São conhecidos três tipos: reação álcali-sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato.
- e) Impurezas salinas como cloretos, sulfatos, nitratos e sulfeto presentes no agregado, especialmente no agregado miúdo, podem ser responsáveis por provocar alterações na etapa de hidratação do cimento, fazendo com que ocorra o surgimento de eflorescências, expansões e principalmente acelere o processo de corrosão de armaduras no caso de ataque por cloretos.
- f) Resíduos industriais presentes na forma de contaminantes orgânicos (óleos, graxas, solventes, etc.) podem ocasionar a formação de uma película em torno dos grãos, podendo prejudicar a aderência com a pasta de cimento. De acordo com PASSUELO, Alexandra et al. (2011), esse tipo de material pode contaminar o lençol freático ou cursos d'água, provocando a disseminação destes resíduos ou mesmo ácidos inorgânicos em jazidas produtoras de areia, podendo ser prejudicial ao processo de hidratação do cimento, alterando o tempo de pega e o desenvolvimento da resistência mecânica da pasta.

2.5.4 Agregado sintético.

A utilização de material calcinado como agregado sintético vem sendo alvo de diversos estudos, pois além de ser mais uma alternativa para a indústria da construção civil, tem um papel fundamental no que diz respeito à diminuição dos impactos ambientais na medida em que se reduz a utilização de matéria prima obtido de fontes naturais como, por exemplo, o seixo rolado.

As características dos agregados sintético artificiais como resistência satisfatória e o fato destes serem inertes, são normalmente obtidas por meio da queima destes materiais em altas temperaturas. Vale ressaltar ainda que a qualidade do produto acabado depende fundamentalmente de três fatores: matéria prima utilizada, temperatura de queima e do processo de conformação da massa cerâmica.

De acordo com Souza (2010), a produção dos agregados sintéticos é feita por meio do aquecimento da matéria prima, triturada ou moída, e na maioria das vezes pelotizada, fazendo-se o uso geralmente de um forno rotativo. Desse modo, o material bem umedecido é transportado em uma esteira, sob queimadores, de modo que o calor atinge gradualmente toda a espessura da camada.

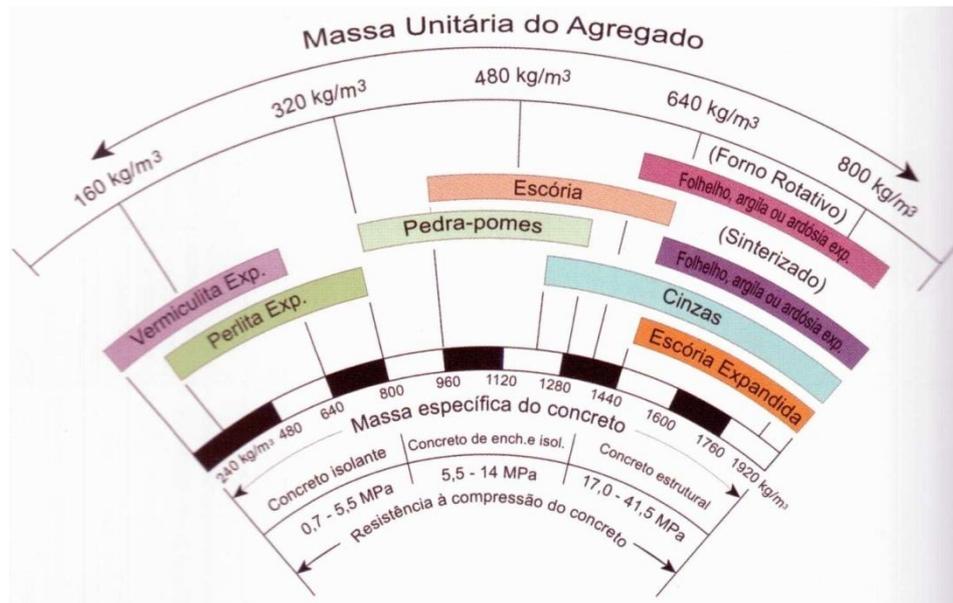
Agregados sintéticos obtidos por meio da queima de argila a partir de 800°C apresentam características que os tornam bastante interessantes para o uso em obras rodoviárias, na medida em que os ensaios realizados mostram que a argila queimada nesta temperatura se desidroxila, podendo fornecer agregados estáveis e aptos para serem usados em condições mais econômicas que o agregado sintético de argila expandida. Por meio destas experiências, foi possível observar que praticamente qualquer argila que, depois de molhada e moldada em forma de pelotas, venha a formar grãos duros e secos ao ar, pode servir para a fabricação de agregados de “argila queimada” (CABRAL et al. apud SOUZA, 2010).

2.5.5 Agregado leve.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), agregados leves são aqueles que geralmente possuem massa unitária inferior a 1120 kg/m³, e seu peso leve é devido à sua microestrutura celular ou altamente porosa.

O que existe na realidade é um amplo espectro de agregados leves, que possuem valores de massa unitária entre 80 e 900 kg/m³. Agregados muito porosos, na extremidade do espectro, geralmente são mais frágeis, sendo mais indicados para a produção de concretos isolantes sem função estrutural. Na outra extremidade do espectro, estão os agregados relativamente menos porosos e, portanto adequados para a produção de concretos estruturais. A Figura 2.12 apresenta um espectro dos agregados leves.

Figura 2.12 – Espectro dos agregados leves.



Fonte: Mehta; Monterio (2008).

Diversas propriedades dos concretos são influenciadas pela substituição de agregados tradicionais por agregados leves, dentre as quais massa específica, trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, propriedades térmicas, retração, fluência e a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

O conhecimento das propriedades dos agregados leves é de suma importância para a produção e dosagem adequada dos concretos leves, pois tais propriedades podem variar em função da matéria prima utilizada e do processo de fabricação.

2.5.5.1 Classificação.

Os agregados leves classificam-se em naturais ou artificiais. Os naturais são aqueles obtidos a partir do processo de extração diretamente de jazidas e que para utilização passam por classificação granulométrica. Os agregados leves naturais encontram pouca aplicabilidade em concretos estruturais devido a grande variabilidade de suas propriedades e da localização de jazidas. Como exemplo, pedra pomes, tufo vulcânico, tufo calcário e lava porosa.

Já os agregados leves artificiais são obtidos por meio de processos industriais, geralmente pelo tratamento térmico de vários materiais, como por exemplo, argilas, folhelho, ardósia, diatomita, perlita, vermiculita, escória de alto forno e cinza volante.

2.5.5.2 Processo de fabricação.

Os processos de fabricação de agregados mais utilizados são forno rotativo e sinterização. No processo de sinterização é feita uma mistura da matéria prima com uma quantidade definida de combustível, podendo ser carvão finamente moído ou coque. Posteriormente esse material é exposto a temperaturas elevadas, que tem como consequência a expansão devido à formação de gases (GOMES NETO, 1998).

De acordo com Santos et al. (1986), o agregado produzido por meio de sinterização apresenta elevada capacidade de absorção de água, poros abertos, além de não possuir recobrimento. De modo geral apresentam valores de massa específica que variam entre 650 e 900 kg/m³. Vale ressaltar que o cobrimento externo das partículas dos agregados e a distribuição interna de vazios, influenciam consideravelmente as propriedades do agregado.

O processo de forno rotativo aproveita a capacidade que alguns materiais, como por exemplo, algumas argilas possuem de se expandirem quando submetidos a altas temperaturas (entre 1000 e 1350°C), próximos do ponto de fusão insipiente, devido à formação de gases que ficam aprisionados por uma espécie de “capa” externa vítrea da partícula (SANTOS et al., 1986).

O agregado produzido por meio de forno rotativo apresenta granulometria variada, formato regular e âmago formado por uma massa esponjosa, envolvida por uma “casca cerâmica” vitrificada, que apresenta boa resistência e baixa permeabilidade, que confere ao agregado uma porosidade fechada. O agregado produzido por este processo recebe a denominação de “encapado”, devido possuir uma camada externa vítrea, que é responsável pela redução significativa da absorção de água (ROSSIGNOLO, 2003).

2.5.5.3 Forma e textura superficial.

Algumas propriedades importantes dos concretos, tais como resistência mecânica, são influenciadas pela forma e textura superficial dos agregados leves.

A forma das partículas varia com o tipo do agregado, podendo ser arredondada, cúbica ou angular, regular ou irregular.

Em relação à textura, os agregados possuem superfícies que variam de lisas com poros miúdos a irregulares, com exposição de poros graúdos.

Segundo o CEB; FIP apud. Evangelista, (1996), a textura e a forma da superfície do agregado são fatores que influenciam indiretamente na resistência do concreto, na medida em que afetam a quantidade de água necessária para produzir um concreto com trabalhabilidade adequada.

Vale ressaltar que o processo de fabricação dos agregados leves artificiais, influencia significativamente na forma e textura das partículas dos mesmos. O processo de sinterização, por exemplo, produz agregados que possuem alta rugosidade, formas angulares e superfície porosa. São caracterizados por apresentarem boa aderência à pasta de cimento, devido à rugosidade de sua superfície; no entanto, em decorrência da alta porosidade externa apresentam altos valores de absorção de água. A forma angular desses agregados faz com que haja um aumento da quantidade de água necessária para obter-se a trabalhabilidade desejada (ZHANG; GJΦRV; CEB; FIP apud. ROSSIGNOLO, 2009).

Os agregados leves produzidos por meio do processo de sinterização apresentam outra desvantagem, que é o aumento do consumo de cimento devido à penetração da pasta de cimento nos poros externos e o aumento da massa específica do concreto.

Já os agregados produzidos por meio do processo de forno rotativo, apresentam normalmente forma esférica e uma fina camada externa com baixa porosidade, o que proporciona melhoria na trabalhabilidade com baixas relações água/cimento. Entretanto, devido ao formato esférico, esse tipo de agregado pode apresentar maior facilidade de segregação quando comparado àquele produzido por sinterização (ROSSIGNOLO, 2003).

2.5.5.4 Estrutura interna, resistência mecânica e módulo de deformação.

A estrutura interna influencia significativamente na resistência mecânica, bem como o módulo de deformação dos agregados leves. Os agregados que possuem estrutura bastante porosa, apresentam valores de resistência inferiores àqueles com estrutura pouco porosa, levando-se em conta a mesma matéria prima e processo de produção. A resistência mecânica dos agregados leves também é influenciada pelo tamanho e distribuição dos poros (HOLM; BREMNER, 1994 apud. ROSSIGNOLO, 2003).

De acordo com Rossignolo (2003), o valor do módulo de deformação dos agregados leves pode ser estimado utilizando a Eq. (3) (FIP, 1983), que relaciona módulo de deformação E_c (MPa) e massa específica γ (kg/m^3). Os valores do módulo de deformação em agregados leves para uso em concretos estruturais variam entre 10 e 18 GPa.

$$E_c = 0,008 \cdot \gamma^2 \text{ (MPa)} \quad (3)$$

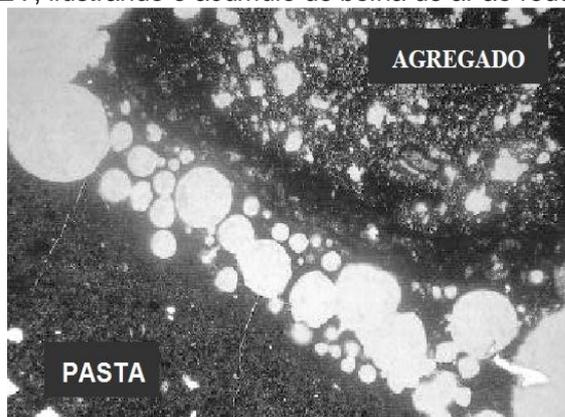
Os agregados leves que possuem baixa resistência mecânica têm pouca participação na transmissão das tensões internas no concreto. Desse modo, quanto maior a diferença entre os valores de módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento, maior será a diferença entre a resistência à compressão da matriz do cimento e do concreto. Quanto maior o módulo de deformação do agregado leve, maiores serão os valores de resistência à compressão e do módulo do concreto.

2.5.5.5 Porosidade e absorção de água.

As propriedades do concreto no estado fresco, bem como o processo de hidratação do cimento, são afetadas significativamente pela porosidade e absorção de água dos agregados leves. A quantidade de água absorvida pelos agregados leves, e a velocidade com que essa absorção ocorre, depende de alguns fatores, tais como: porosidade total; conectividade entre os poros; características da superfície do agregado e umidade do agregado antes da mistura (NEVILLE, 1997a; EUROLIGHTCON, 1998, apud. ROSSIGNOLO, 2003).

Para os agregados leves que apresentam altos índices de absorção de água, recomenda-se a pré-saturação, evitando desse modo, prejuízo na trabalhabilidade do concreto no estado fresco e evita a formação de bolhas de ar ao redor do agregado, como apresentado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – MEV, ilustrando o acúmulo de bolha de ar ao redor do agregado leve.



Fonte: Helland; Maage, (1995) Apud. Rossignolo (2009).

De acordo com Rossignolo (2003), a alta quantidade de água absorvida pelo agregado leve pode ter efeitos desfavoráveis a algumas propriedades do concreto no estado endurecido, como por exemplo, retração por secagem, aumento da massa específica e a redução da resistência ao fogo. No entanto vale ressaltar alguns benefícios adquiridos em decorrência da absorção de água dos agregados leves, tais como melhoria das propriedades da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, com redução do efeito parede. Além disso, a água absorvida pelo agregado leve beneficia a “cura interna” do concreto (HOLM; BREMNER, 1994; ZHANG ; GJØRV, 1991 apud. ROSSIGNOLO, 2003).

2.6 TRABALHOS REALIZADOS COM A UTILIZAÇÃO DA LAMA VERMELHA.

Atualmente, pesquisas sobre aproveitamento dos mais variados tipos de resíduos estão sendo intensificadas no mundo inteiro. Em alguns países como estados unidos, a reciclagem é vista pela iniciativa privada como um mercado altamente rentável. Diversos setores têm investido em pesquisas e tecnologias, visando melhorias na qualidade do produto reciclado, além de propiciar maior eficiência do sistema produtivo.

A lama vermelha pode ser considerada uma matéria prima bastante interessante para diversas aplicações. Existem grandes pesquisas que focam o uso desse resíduo na indústria cerâmica, possivelmente devido ao fato desta ser quimicamente inerte ($\text{Ph} > 12$), havendo necessidade de transformação química visando estabilizar os compostos, principalmente de sódio, que se apresentam na forma de hidróxido.

O alto teor de ferro encontrado na lama vermelha, a torna um material com propriedades bastante interessantes para a reciclagem na produção de clínquer, favorecendo as reações no estado sólido, obtendo vidro a temperaturas inferiores e acelerando as reações de cliquerização, como a formação de aluminatos e silicatos de ferros e cálcio, melhorando a qualidade do cimento e produzindo uma significativa economia no processo (TSAKIRIDIS; LEONARDOU; OUSTADAKIS, 2004).

De acordo com o Relatório Anual, 2009 - ALUNORTE, a REVISTA ANEFAC, nº 137, de outubro de 2009, publicou que esta empresa iniciou, em caráter experimental, a pavimentação de ruas da fábrica com blocos cerâmicos produzidos a partir da lama vermelha. A Figura 2.14 mostra uma casa construída com blocos cerâmicos produzidos com a mistura de lama vermelha e argila.

Figura 2.14 – Casa construída com resíduo do processo Bayer



Fonte: Souza, J, (2010).

Pesquisadores tem buscado encontrar uma destinação adequada a uma série de resíduos que são gerados em grandes quantidades, entre eles, a LV, obtendo-se resultados bastante promissores. Como já mencionado anteriormente, encontrar

uma destinação ambientalmente correta, técnica e economicamente viável, para estes subprodutos, consistiria em diminuição do uso de matérias primas obtidas a partir de fontes naturais, diminuição destes materiais nos pátios de estocagem, diminuição dos possíveis impactos ambientais, bem como aumentaria a oferta de material de construção no mercado.

2.6.1 Souza (2010)

Souza (2010), em sua tese de doutorado estuda e avalia o uso do resíduo do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil.

Neste trabalho foram produzidos agregados graúdos a partir da lama vermelha e analisados por meio dos ensaios de porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente. Os quais foram posteriormente utilizados na produção de concretos. A Figura 2.15 mostra os agregados após a queima.

Figura 2.15 - Agregado após a queima. Esquerda: produzido pela extrusora; direita: produzido pelo tambor rotativo



Fonte: SOUZA, J. (2010).

Souza J. (2010) concluiu que a lama vermelha usada em misturas com sílica e argila possui grande potencial para uso na produção de agregados sintéticos. As análises realizadas nos concretos produzidos com o agregado de lama vermelha apresentaram resultados bastante satisfatórios, principalmente no que diz respeito à resistência, demonstrados por meio dos ensaios resistência à compressão axial

simples, módulo de elasticidade, tração por compressão diametral e ensaio à abrasão.

Este autor afirma também que com uma temperatura superior a 1200°C e adequado teor de sílica, há possibilidade de obtenção de um agregado leve com massa específica inferior a 1,5g/cm³, ou seja, controlando o teor de sílica e a temperatura de queima é possível estabelecer parâmetros para definir a densidade do produto final.

2.6.2 Albuquerque (2007)

Albuquerque (2007), em seu trabalho de conclusão de curso elaborou um estudo das propriedades mecânicas de concretos dosados com agregados produzidos a partir de LV, o qual foi desenvolvido seguindo as seguintes etapas: coleta de LV, confecção e caracterização dos agregados, dosagem e produção dos concretos, moldagem dos corpos-de-prova.

Para a fabricação dos agregados utilizou-se lama vermelha, sílica ativa, metacaulim, areia fina e areia grossa. Foi adicionado às misturas 10% em peso de óleo e aproximadamente 25% a 30% em peso de água.

O processo de moldagem dos agregados foi executado utilizando-se formas metálicas. A Figura 2.16 mostra a aparência dos agregados após a queima.

Figura 2.16 – Aparência dos agregados após a queima



Fonte: Albuquerque (2007).

Albuquerque (2007) concluiu que há viabilidade de aplicação desses agregados para a produção de concretos convencionais, pois além de oferecer uma alternativa quanto ao emprego do resíduo, também apresentou propriedades mecânicas satisfatórias.

2.6.3 Rossi (2009)

Rossi (2009), em seu trabalho de conclusão de curso, produziu concretos para reparo com agregados de lama vermelha sob abrasão hidráulica. Este trabalho seguiu as seguintes etapas: coleta de LV, produção e caracterização dos agregados, produção dos concretos e moldagem dos corpos-de-prova. A Tabela 2.8 mostra as proporções dos componentes usados na produção dos agregados.

Tabela 2.8– Proporções dos componentes em cada mistura

MISTURA	LVSA	LVMC	LVAF	LVAG
70%	Lama Vermelha			
30%	Sílica Ativa	Metacaulim	Areia Fina	Areia Grossa

Fonte: Albuquerque et al. (2007).

Para a fabricação dos agregados foram utilizadas formas cúbicas metálicas, e após esta etapa, com os agregados ainda maleáveis, iniciou-se o processo de arredondamento feito com as mãos, para adquirirem formas semelhantes a seixo rolado. Após a moldagem os agregados foram colocados em forno por 3 horas em uma temperatura de 1200°C. A Figura 2.17 mostra a etapa de sinterização dos agregados.

Figura 2.17 – Sinterização dos agregados de LV.



Fonte: Rossi (2009).

Após a etapa de fabricação dos agregados iniciou-se a produção dos concretos com posterior execução dos ensaios de densidade, módulo de elasticidade, resistência à compressão simples, tração por compressão diametral e análise da abrasão hidráulica.

Rossi (2009) concluiu que os concretos produzidos apresentaram valores de resistência bastante elevados. Verificou ainda, que nos ensaios de compressão axial e diametral, as rupturas do concreto produzido com seixo rolado, ocorreram no próprio agregado, enquanto que naqueles produzidos com o agregado de LV, a ruptura ocorreu na pasta de cimento, comprovando assim que o agregado produzido possui elevada resistência.

Rossi (2009) também concluiu que o agregado produzido com lama vermelha (LVAF), possui potencial para utilização em situações de abrasão, na medida em que apresenta elevada resistência mecânica e baixo desgaste.

2.6.4 Hildebrando et al. (1999)

Hildebrando et al. (1999), analisou a aplicação do rejeito do processo Bayer (lama vermelha) como matéria prima na indústria de cerâmica estrutural.

Para a confecção dos corpos-de-prova, as matérias primas utilizadas foram lama vermelha e argila. Para a moldagem utilizou-se moldes de aço com formato prismático medindo 10,0 x 5,0 x 1,0 cm. Os corpos-de-prova foram denominados do seguinte modo: APL-5 (50% de LV e 50% de argila), APL-7 (70% de LV e 30% de argila) e APCA (100% de argila).

Após a moldagem o material foi seco em estufa a uma temperatura de 110°C por um período de 24 horas. Em seguida passaram pelo processo de queima em um forno elétrico a 1190°C por 45 minutos.

Os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de perda ao fogo (PF), absorção de água (AA), retração linear (RL), porosidade aparente (PA), massa específica aparente (MEA) e tensão de ruptura à flexão.

Hildebrando et al. (1999) concluiu que o uso do rejeito em misturas com argilas, seria uma alternativa bastante viável na fabricação de produtos da indústria cerâmica, à medida que consiste em uma matéria prima de baixo custo, gerada em grandes quantidades.

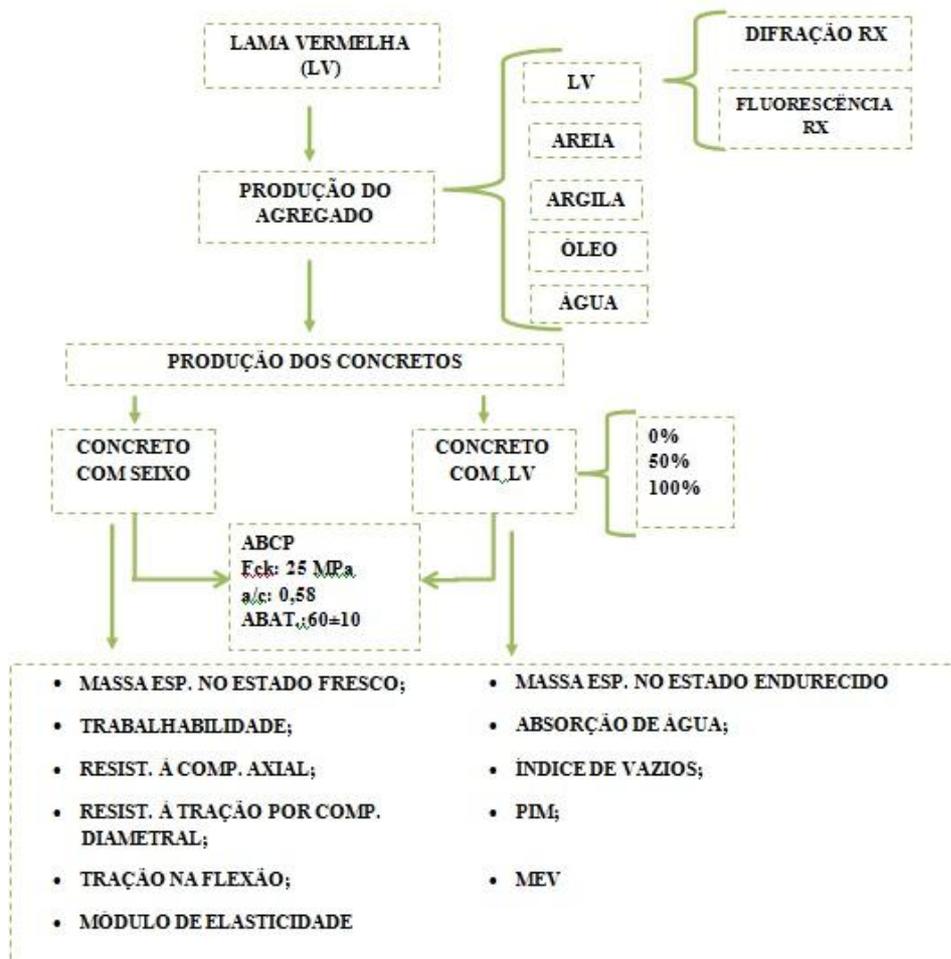
Para Hildebrando et al. (1999), as amostras contendo 50% e 70% do rejeito, em peso, possuem todas as possibilidades de uso na produção de tijolos maciços, telhas e ladrilho de piso, visto que apresentam excelentes qualidades, principalmente no que se refere a resistência mecânica e absorção de água.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.

De acordo com os objetivos deste trabalho, neste capítulo será feito o detalhamento do programa experimental para o estudo e análise dos agregados de lama vermelha (agregados de LV) e concretos produzidos a partir do resíduo de beneficiamento da bauxita. Esta pesquisa foi dividida em duas etapas.

Na primeira etapa foram produzidos os agregados com LV e em seguida foram realizadas as análises das diversas propriedades destes. Na segunda etapa realizou-se a produção dos concretos utilizando o agregado de LV e posteriormente elaborou-se um estudo detalhado de suas propriedades no estado fresco e endurecido, além de análises microestruturais. A Figura 3.1 mostra o fluxograma com as respectivas variáveis deste estudo.

Figura 3.1- Fluxograma do programa experimental.



Fonte: Autoria Própria (2011).

3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS.

Os procedimentos executados para a análise das propriedades dos agregados, de acordo os as normas vigentes, estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Procedimentos experimentais para análise dos agregados leves.

Item	Norma
Composição granulométrica	NBR NM 248:2003. Agregados - Determinação da composição granulométrica
Abrasão Los Angeles	NBR NM 51:2001. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”

Autoria própria (2011).

3.1.1 Procedimentos experimentais para a determinação das propriedades cerâmicas.

Após o processo de queima dos agregados foram realizados ensaios visando determinar suas propriedades cerâmicas (porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente).

A metodologia utilizada para a análise de tais propriedades foi citada por Santos (1989) e Souza (2010).

3.1.1.1 Porosidade Aparente

Para a determinação da porosidade aparente utilizou-se a Eq. (4).

$$PA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (4)$$

Onde: M_u = Massa úmida (g)

M_s = Massa seca (g)

M_i = Massa imersa (g)

3.1.1.2 Absorção de água

Para a determinação dos valores de absorção de água utilizou-se a Eq. (5).

$$AA (\%) = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde: M_u = Massa úmida (g)

M_s = Massa seca (g)

3.1.1.3 Massa específica aparente

A massa específica aparente foi determinada por meio da Eq. (6).

$$MEA \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{M_s \times \rho_L}{(M_u - M_i)} \quad (6)$$

Onde: M_u = Massa úmida (g)

M_s = Massa seca (g)

M_i = Massa imersa (g)

ρ_L = Massa específica da água em g/cm^3

Os ensaios mencionados nos itens 3.1.1.1 a 3.1.1.3 foram realizados da seguinte forma:

- Primeiramente escolheu-se aleatoriamente uma amostra com 15 agregados, e com o uso de uma balança de precisão realizou-se a pesagem dos mesmos (um por um) visando determinar sua massa seca;
- Posteriormente esses agregados foram deixados imersos em água por um período de 24 horas, de acordo com a Figura 3.2.

Figura 3.2- Agregados imersos em água.



Fonte: Autoria própria (2011).

- Após esse período realizou-se uma nova pesagem, objetivando determinar a massa úmida do agregado. Vale ressaltar que, para efetuar tal procedimento, fez-se necessário a retirada da água em excesso do material;

- d) A terceira pesagem, visando obter a massa do agregado imerso em água, foi realizada por meio do uso de um aparato em madeira e uma haste metálica, ambos acoplados à balança de precisão de acordo com a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Aparato em madeira e haste metálica, acoplados à balança.



Fonte: Autoria própria (2011).

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS.

Os procedimentos executados para a análise das propriedades dos concretos, de acordo os as normas vigentes, estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Procedimentos experimentais.

Item	Norma
Massa específica no estado fresco	NBR 9833:2008. Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.
Trabalhabilidade	NBR NM 67:1998. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.
Resistência à compressão	NBR 5739: 2007. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.
Resistência à tração	NBR 7222:2011. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.
Resistência à tração na flexão	NBR 12142:2010. Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.
Módulo de elasticidade	NBR 8522:2008. Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.
Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão	NBR 9778:2005. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

Fonte: Autoria própria (2011).

3.2.1 Procedimentos experimentais para a análise microestrutural.

As técnicas utilizadas para a realização do estudo microestrutural dos concretos foram PIM e MEV.

3.2.1.1 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).

Utilizou-se o método de Porosimetria por intrusão de mercúrio, visando determinar o volume e a variação dimensional dos poros nas pastas de cimento. Este método baseia-se no fato de um líquido que não “molha” um sólido poroso, só penetrará em seus poros sob a ação de pressão externa, sem a ação da capilaridade. O líquido utilizado neste método é o mercúrio.

Por meio de uma relação direta com a pressão aplicada é possível obter o volume de mercúrio que penetra nos poros. A pressão exercida no equipamento é responsável por forçar a entrada do mercúrio nos poros.

O tamanho equivalente dos poros preenchidos por mercúrio, considerando-se que os poros possuem formato cilíndrico, pode ser associado à pressão aplicada pela Eq. (7).

$$d = - 4 \gamma (\cos \theta) / p \quad (7)$$

Onde: d = diâmetro do poro;

γ = energia superficial do líquido;

θ = ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro;

p = pressão aplicada

A distribuição dos tamanhos dos poros é determinada pelo volume de mercúrio introduzido em cada incremento de pressão e a porosidade total é determinada pelo volume total introduzido (ABELL, WILLIS e LANGE apud. DUART, 2008).

A análise da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio foi realizada para os 03 concretos produzidos, com 100 dias de idade. As análises foram realizadas pelo

Grupo de Crescimento de Cristais e Materiais Cerâmicos do Instituto de Física de São Carlos (EESC/USP).

3.2.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O princípio de funcionamento do MEV consiste em realizar o varrimento da superfície de uma amostra com um feixe eletrônico finamente focado em sincronismo com um varrimento de um monitor de visualização, modulando o brilho em cada ponto, pela intensidade de um sinal emitido pela amostra. Obtém-se, deste modo, uma correspondência ponto a ponto, entre a imagem e a região observada da amostra, que depende do detector utilizado, da natureza da informação e do tipo de sinal registrado.

Acredita-se que a porosimetria por intrusão de mercúrio seja a técnica mais utilizada para caracterização da estrutura de poros no concreto, visto que ela permite a obtenção, de outros parâmetros, como por exemplo, a distribuição do tamanho dos poros e a qualificação do diâmetro crítico dos mesmos.

Para a análise dos concretos produzidos utilizou-se a MEV, associado à espectrografia por dispersão de energia (EDS).

De acordo com Rossignolo (2003), a espectrografia de Raios- X por dispersão de energia (EDS), associada a sistemas de análises de Raios-X permite realizar a análise química elementar em um ponto ou uma área da amostra em termos qualitativos, semiquantitativos e quantitativos.

Os métodos de análise quantitativa e semiquantitativa se encontram, de modo geral, disponíveis nos sistemas EDS e são usualmente utilizados, pelo fato de permitirem, de forma rápida, a identificação e a determinação da composição dos elementos presentes na amostra.

A técnica de MEV foi realizada para os 03 concretos produzidos, com 100 dias de idade. As análises foram realizadas pelo laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA).

3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS AGREGADOS SINTÉTICOS.

A lama vermelha utilizada na produção do agregado foi fornecida pela ALUNORTE, enviada e armazenada em recipientes de PVC que comportam cerca de 1500 kg deste resíduo, a qual foi estocada no laboratório de Engenharia Química da UFPA, no estado “in natura”.

Visando um conhecimento mais aprofundado das características deste resíduo realizou-se análise mineralógica por meio da difratometria de Raios-X (DRX) e análise química por meio de Fluorescência de Raios-X (FRX), ambos realizados no Laboratório de Difração de Raios-X do Centro de Geociências da UFPA.

Para a análise de DRX utilizou-se o difratômetro da marca *Philips*, modelo PW 3710, equipado com goniômetro de varredura vertical e tubo de cobre de 1,5 KW de potência com monocromador de grafite e gerador de tensão e corrente ajustados para 45KV e 35mA, respectivamente. Este equipamento é automatizado, com registro digital dos resultados, sendo o gerenciamento do equipamento realizado por intermédio do software APD (“*Automated Powder Diffraction*”), também da Philips. Os registros foram realizados no intervalo de exposição de 5° a 65° θ .

As amostras de lama vermelha também foram analisadas no programa IQ+ Semiquant, por fluorescência de raios-X em disco de vidro para elementos maiores e menores, utilizando o espectrômetro sequencial *Axios Minerals*, tubo de raios-x cerâmico anodo de Rh de 2,4kW, PANalytical. A aquisição de dados foi feita com o software *SuperQ Manager*, e o tratamento dos dados com o software IQ+, também da PANalytical, sendo o resultado normalizado para 100%.

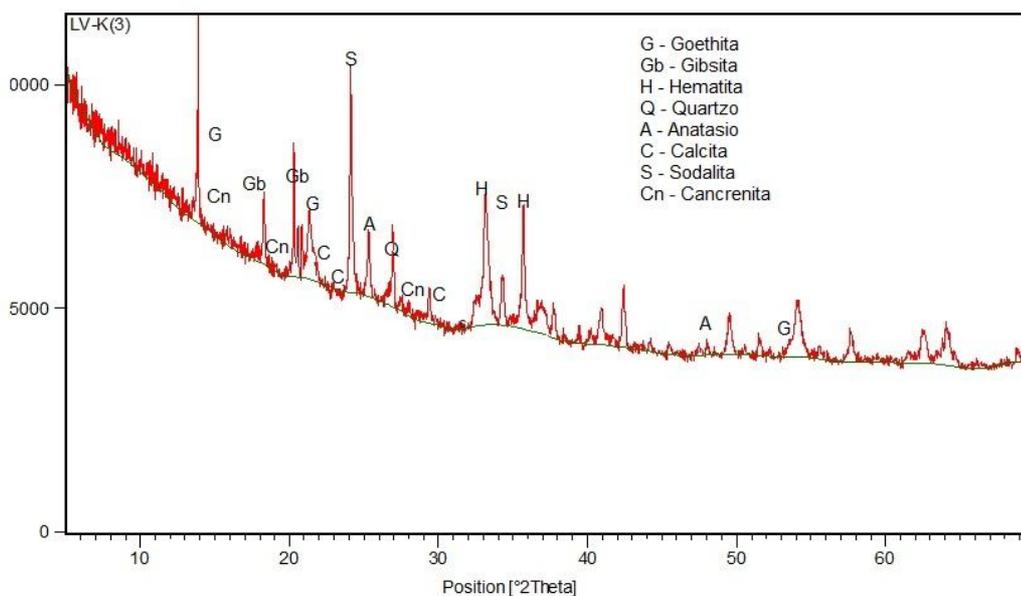
A composição química da LV “in natura” apresenta-se na Tabela 3.3, e o respectivo difratograma de Raios-X, no qual o resíduo apresentou-se cristalino é mostrado na Figura 3.4.

Tabela 3.3 – Fluorescência de Raios-X da LV “in natura”.

Nome do Composto	Concentração (%)
Al ₂ O ₃	22,84
CaO	1,27
Fe ₂ O ₃	30,55
Na ₂ O	11,50
P ₂ O ₅	0,08
SO ₃	0,05
SiO ₂	18,13
TiO ₂	3,88
ZrO ₂	0,30
PF	11,42

Fonte: Autoria própria (2011).

Figura 3.4- DRX da LV “in natura”.



Fonte: Autoria própria (2011).

Para a produção do agregado sintético, foram utilizadas as seguintes matérias primas:

- Lama Vermelha, obtida por meio do processo de beneficiamento da bauxita, gerada pela Alumina do Norte do Brasil S.A (ALUNORTE), localizada no município de Barcarena/PA;
- A argila, retirada das margens do Rio Guamá;

- c) A areia, extraída de fonte localizada na cidade de Ourém/PA;
- d) Biomassa (carvão vegetal);
- e) Água.

A Figura 3.5 mostra as matérias primas utilizadas no processo de produção do agregado.

Figura 3.5- lama vermelha, areia, argila e carvão vegetal.



Fonte: A autoria própria (2011).

A produção dos agregados atendeu as etapas demonstradas a seguir.

- a) A lama vermelha, primeiramente foi destorroada e seca em estufa à 100°C por um período de 24 h e, posteriormente, moída em um moinho de bolas, por aproximadamente 2 horas para ficar com granulometria adequada para uso. A Figura 3.6 mostra à esquerda a lama vermelha destorroada e à direita, moída em moinho de bolas.

Figura 3.6- a. LV destorroada; b. Lv no moinho de bolas.



Fonte: A autoria própria (2011).

- b) A areia utilizada passou por um processo de secagem em estufa a 100°C, por um período de 24 h e peneiramento, utilizando-se apenas o material passante em uma peneira com abertura de 150 µm. Segundo Souza (2010), a areia nesta granulometria, possui morfologia esférica e alta área superficial, estando assim adequada para a conformação dos agregados a serem produzidos. Além do que, esta areia propicia melhor desempenho durante o processo de sinterização, minimizando os efeitos da granulometria da sílica nas reações de estado sólido subsequente. Para Rossi (2009), o uso da areia na produção do agregado é devido às suas várias formas de sílica. O uso amplo da sílica na cerâmica é devido à sua dureza, relativa infusibilidade, baixo custo e capacidade de formar vidros.
- c) A argila foi submetida a um processo de secagem em estufa a 100°C por 24h e posteriormente moída em um moinho de bolas, por aproximadamente 2 horas até sua total pulverização. A argila é utilizada na mistura por aumentar a plasticidade. A Tabela 3.4 apresenta a análise química da argila.

Tabela 3.4 – Análise química da argila utilizada.

Constituintes da argila	(% em peso)
SiO ₂	54,26
Al ₂ O ₃	14,15
Fe ₂ O ₃	6,01
TiO ₂	0,52
P.F. (perda ao fogo)	11,34

Fonte: SOUZA, J. (2010).

- d) A biomassa (carvão vegetal) passou por um processo de moagem em um moinho de bolas, por aproximadamente 2 horas visando pulverizá-lo.
- e) Após o processo de moagem, secagem e peneiramento, todos os materiais foram pesados com os seguintes percentuais: lama vermelha (60%), areia (20%), argila (10%) e biomassa (10%).
- f) A mistura (lama vermelha+areia+argila+biomassa) foi depositada em uma betoneira de eixo inclinado, e posteriormente foi-se adicionando água paulatinamente na faixa de 25% a 30% em peso. A betoneira utilizada neste processo funciona como pelletizador, responsável pela formação de um

agregado com formato arredondado e com granulometria bastante heterogênea.

- g) Os agregados foram retirados da betoneira e colocados em uma estufa, e lá permaneceram por 24 horas a uma temperatura de 100°C para a secagem dos mesmos.
- h) Após o processo de secagem, os agregados foram sinterizados em um forno elétrico à temperatura de 1300°C por um período de 180 min. Após este tempo o material foi resfriado lentamente. A Figura 3.7 mostra o forno utilizado no processo (visão externa e interna). E a Figura 3.8 mostra os agregados secos em estufa a 100°C e após a queima a 1300°C

Figura 3.7- Forno utilizado no processo de sinterização dos agregados.



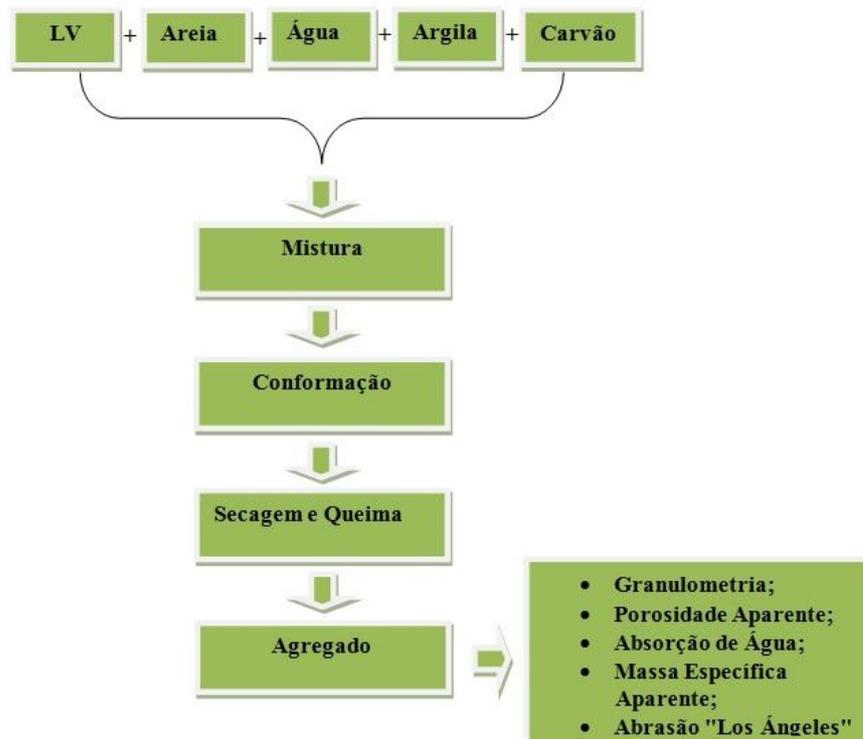
Fonte: Autoria própria (2011).

Figura 3.8- Agregados de LV secos em estufa e agregados após sinterização.



Fonte: Autoria própria (2011).

Figura 3.9- Fluxograma da produção do agregado.



Fonte: Autoria própria (2011).

3.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS CONCRETOS UTILIZANDO O AGREGADO DE LAMA VERMELHA.

A produção dos concretos foi realizada no Laboratório de Materiais de construção civil da Universidade Federal do Pará, utilizando uma betoneira de eixo inclinado. Após a produção, realizou-se imediatamente, os ensaios de consistência (abatimento do tronco de cone) e moldagem dos CP's para a posterior realização dos ensaios no estado endurecido.

Foram produzidos concretos com percentuais de substituição do seixo por agregados fabricados a partir da lama vermelha (0%, 50% e 100%). A Tabela 3.5 mostra o grupo de concretos produzidos com suas respectivas siglas.

Tabela 3.5 – Grupos de concretos produzidos.

Grupo de concretos	Siglas
0% (concreto de referência produzido com 100% seixo rolado)	CSR
50% (concreto produzido com 50% de agregado de LV e 50% de seixo rolado)	CLV50
100% (concreto produzido com 100% de agregado de LV)	CLV100

Fonte: Autoria própria (2011).

Com base no programa experimental, os concretos foram submetidos aos ensaios mencionados no item 3.2, visando analisar suas propriedades no estado fresco e endurecido.

3.4.1 Caracterização dos materiais.

3.4.1.1 Agregado miúdo

Utilizou-se como agregado miúdo a areia proveniente de jazidas situadas próximas à Belém, a qual passou por ensaios para averiguar sua composição granulométrica de acordo com a NBR NM 248 (2003), massa específica NBR NM 52 (2009) e massa unitária NBR NM 45 (2006). A Tabela 3.6 apresenta os valores obtidos com a realização dos ensaios mencionados anteriormente.

Tabela 3.6 – Características da areia obtidas em laboratório.

Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	Método de ensaio
4,8	0	0	0	NBR NM 248:2003
2,4	9	0,90	1	
1,2	19	1,90	3	
0,6	68	6,8	10	
0,3	574	57,40	67	
0,15	300	30,00	97	
< 0,15	30	3,00	100	
TOTAL	1000	100	100	
Massa Específica		2,63 kg/dm ³		NBR NM 52:2009
Massa Unitária		1,50 kg/dm ³		NBR NM 45:2006
Módulo de Finura		1,78		NBR NM 248:2003
Dimensão Máxima		1,2mm		NBR NM 248:2003

Fonte: Autoria própria (2011).

3.4.1.2 Agregado graúdo

a) Agregado natural (seixo).

Utilizou-se como agregado graúdo natural o seixo, o qual foi extraído de fonte localizada na cidade de Ourém/PA. Foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária desse material de acordo com os procedimentos prescritos na NBR NM 248 (2003), NBR NM 52 (2009) e NBR NM 45 (2006), respectivamente. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Características do seixo obtidas em laboratório.

Peneiras (mm)	Massa retida (kg)	% retida	% retida acumulada	Método de ensaio
25	0	0	0	NBR NM 248:2003
19	0,11	1,10	1	
12,5	2,5	25,00	26	
9,5	2,24	22,40	48	
4,8	2,98	29,80	78	
2,4	1,57	15,70	94	
1,2	0,60	6,00	100	
0,6	-	-	100	
0,3	-	-	100	
0,15	-	-	100	
< 0,15	-	-	100	
TOTAL	10	100	100	
Massa Específica		2,62 kg/dm ³		NBR NM 53:2003
Massa Unitária		1,66 kg/dm ³		NBR NM 45:2006
Módulo de Finura		6,21		NBR NM 248:2003
Dimensão Máxima		19mm		NBR NM 248:2003

Fonte: Autoria própria (2011).

b) Agregado sintético (agregado de LV).

Utilizou-se o agregado produzido a partir do resíduo de beneficiamento da bauxita, conhecido como lama vermelha. Os agregados foram produzidos no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará. A Tabela 3.8 mostra os valores dos ensaios obtidos em laboratório.

Tabela 3.8 – Características do agregado de LV obtidas em laboratório.

Peneiras (mm)	Massa retida (kg)	% retida	% retida acumulada	Método de ensaio
25	0	0	0	NBR NM 248:2003
19	0,328	3,28	3	
12,5	2,980	29,80	33	
9,5	4,866	48,66	82	
4,8	1,799	17,99	100	
< 4,8	0,027	0,27	100	
TOTAL	10	100	-	
Massa Unitária		1,18 kg/dm ³		NBR NM 45:2006
Módulo de Finura		3,18		NBR NM 248:2003
Dimensão Máxima		19 mm		NBR NM 248:2003

Fonte: Autoria própria (2011).

3.4.1.3 Cimento Portland.

Utilizou-se o cimento Portland CP II-Z-32 (Cimento Portland composto com pozolana Classe 32), de acordo com a NBR 11578 (1991). Optou-se pelo uso deste

cimento, pelo fato de já existirem trabalhos semelhantes utilizando esse material. A Tabela 3.9 apresenta as características químicas, físicas e mecânicas do cimento, de acordo com o fabricante.

Tabela 3.9 – Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II Z 32.

Características	Determinações	Valores obtidos	Método de ensaio
Químicas	Perda ao fogo	5,64%	NBR NM 18:2004
	Resíduo insolúvel	10,41%	NBR NM 15:2004
	Óxido de Silício (SiO ₂)	20,32%	NBR NM 11-2:2009
	Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	6,43%	NBR NM 11-2:2009
	Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	3,13%	NBR NM 11-2:2009
	Óxido de Cálcio total (CaO)	53,02%	NBR NM 11-2:2009
	Óxido de Magnésio (MgO)	5,05%	NBR NM 11-2:2009
	Óxido de Enxofre (SO ₃)	3,01%	NBR NM 16:2009
	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,92%	NBR NM 17:2004
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,11%	NBR NM 17:2004
	Óxido de cálcio livre (CaO)	1,36%	NBR NM 13:2004
	Composição Potencial		ASTM C150
	C ₃ S	68,34	-
	C ₂ S	5,03	-
	C ₃ A	9,01	-
	C ₄ AF	9,06	-
Físicas	Massa específica	2,86 kg/dm ³	NBR NM 23:2001
	Finura peneira de n° 200	1,50%	NBR 11579:1991
	Tempo de pega inicial	3h 05min	NBR NM 65:2003
	Tempo de pega final	3h 45min	NBR NM 65:2003
Mecânicas	Resistência à compressão		NBR 7215:1996
	1 dia	11,42 MPa	-
	3 dias	22,17 MPa	-
	7 dias	29,22 MPa	-
	28 dias	38,13 MPa	-

Fonte: Autoria própria (2011).

3.4.1.4 Aditivo

Utilizou-se o aditivo plastificante SIKAMENT PF 175, à base de sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso, densidade $1,19 \pm 0,02$ kg/litro, PH $5,5 \pm 1,0$ e com dosagem recomendada pelo fabricante $0,5 - 1,0\%$ sobre a massa de cimento (de 500 a 1.000g para cada 100 kg de cimento Portland).

3.4.1.5 Água

A água utilizada foi fornecida pela rede de abastecimento local (Companhia de Saneamento do Pará – COSANPA).

3.4.2 Dosagem dos concretos.

Nesta pesquisa utilizou-se o método de dosagem da ABCP, o qual é baseado no texto da Norma ACI 211.1-81, sendo este uma adaptação prática do método americano às condições brasileiras. Esse método faz uso de tabelas e gráficos elaborados a partir de valores médios de resultados experimentais, sendo assim, uma ferramenta de dosagem de concretos convencionais, adequada aos materiais mais utilizados em diversas regiões brasileiras.

O método da ABCP apresenta-se em uma sequência de etapas bem definidas, da qual fazem parte um conjunto de tabelas, que tornam mais fáceis a determinação dos parâmetros necessários para a obtenção de um traço de partida.

A escolha pela utilização deste método de dosagem foi devido ao fato de que parte dos agregados graúdos utilizados neste trabalho foram produzidos em laboratório, produção esta que apresentou diversas limitações. Dentre as quais são mencionadas duas, consideradas de grande relevância para a escolha deste método. A primeira foi a dificuldade em encontrar forno que atingisse a temperatura ideal (1300°C) à sinterização dos agregados produzidos. A segunda limitação consiste no fato de que o único forno disponível para a realização do processo de queima do material possui capacidade interna bastante reduzida. Desse modo, a produção máxima diária de agregados de LV era aproximadamente de 600 gramas, isso já levando em consideração a adaptação interna feita no forno para aumentar a produção, por meio da colocação de placas refratárias. Na Figura 3.7 é possível averiguar a adaptação feita no forno elétrico.

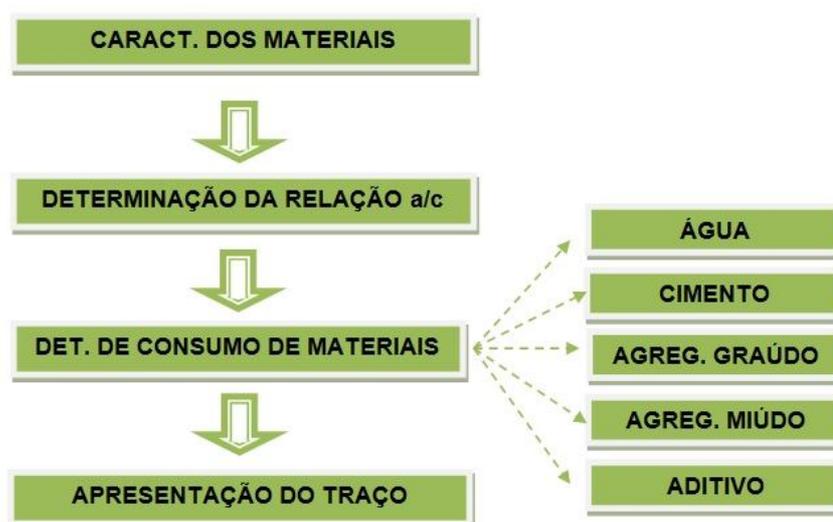
A utilização de outros métodos de dosagem requereria grandes quantidades de materiais, no entanto, com o ABCP foi possível alcançar uma redução bastante significativa na quantidade de corpos de prova a serem moldados, além do que é considerado um método de fácil execução. Para se utilizar este método, fez-se necessário a definição de alguns parâmetros, elencados a seguir:

a) Previsão de resistência de 25 MPa.

b) Abatimento 70 ± 10 mm.

Os procedimentos para se chegar à definição dos traços encontram-se apresentados na Figura 3.10.

Figura 3.10- Fluxograma das etapas de execução do método ABCP.



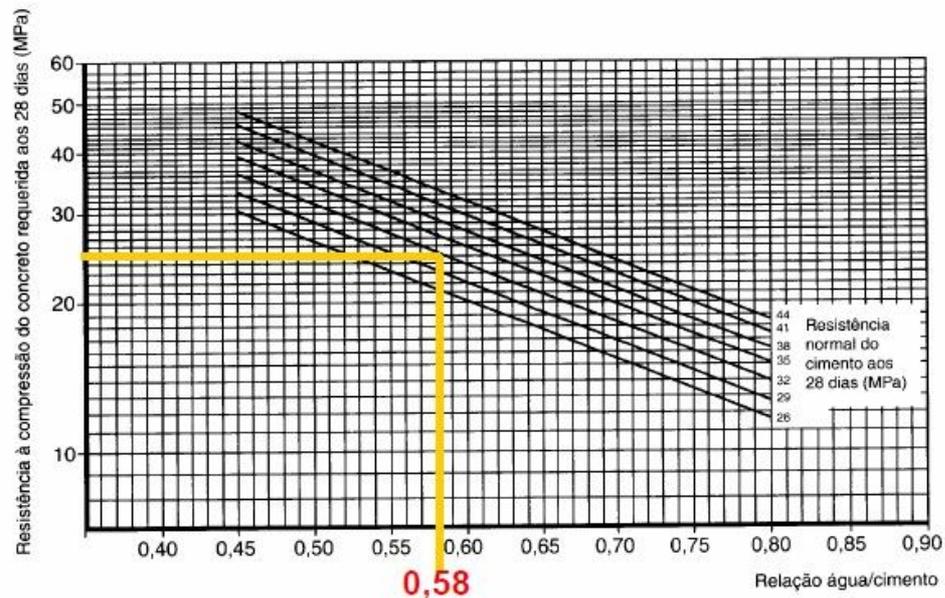
Fonte: Autoria própria (2011).

Após definidas as características (massa específica, massa unitária, módulo de finura e diâmetro máximo) dos materiais utilizados na produção dos concretos, seguiu-se a execução das próximas etapas, visando a obtenção dos traços. As etapas descritas a seguir foram realizadas para os três grupos de concretos (CSR, CLV50 e CLV100).

a) Determinação da relação a/c.

A primeira etapa consistiu na determinação da relação água/cimento, que foi feita por meio do uso da curva de Abrans do cimento (ver Figura 3.11), utilizando os valores existentes de resistência do cimento e do concreto.

Figura 3.11- Curva de Abrans do cimento (ABCP).



Fonte: ABCP

b) Determinação do consumo de materiais.

Na segunda etapa determinou-se o consumo de materiais (água, cimento, seixo, agregado de lama vermelha e areia).

Para a obtenção da quantidade aproximada de água, mediante o conhecimento dos valores de abatimento e do diâmetro máximo do agregado graúdo, utilizou-se a Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Tabela para determinar o consumo de água por m³ (ABCP).

Consumo de água aproximado (l/m ³)					
Abatimento mm	D máx. agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: ABCP.

Já o consumo de cimento foi calculado por meio da Eq. (8).

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad (8)$$

Onde: C_c = Consumo de cimento

C_a = Consumo de água

a/c = Relação água/cimento

Para a determinação do consumo de seixo, encontrou-se primeiramente o volume do seixo por m^3 de concreto, por meio da Tabela 3.11, utilizando os valores do módulo de finura e do diâmetro máximo do material. Após a determinação do volume do agregado graúdo, utilizou-se a Eq.(9) para determinar o consumo de agregado graúdo.

$$C_b = V_b \times M_u \quad (9)$$

Onde: C_b = Consumo de agregado graúdo (seixo).

V_b = Vol. de agregado graúdo seco por m^3 de concreto.

M_u = Massa unitária compactada do agregado graúdo.

Tabela 3.11 – Tabela para determinar o volume de seixo por m^3 (ABCP).

MF	Dimensão máxima (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: ABCP.

Para definir-se o consumo de areia, encontrou-se primeiramente o volume deste material, por meio da Eq. (10). De posse do volume, utilizou-se a Eq.(11) para determinar o consumo de agregado miúdo.

$$V_m = 1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_s}{\gamma_s} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right) \quad (10)$$

Onde: V_m = Volume de areia.

C_c = Consumo de cimento.

C_s = Consumo de seixo.

C_a = Consumo de água.

γ_c = Massa específica do cimento.

γ_s = Massa específica do seixo.

γ_a = Massa específica da água.

$$C_m = \gamma_m \times V_m \quad (11)$$

Onde: C_m = Consumo de areia.

γ_m = Massa específica da areia.

V_m = Volume de areia.

c) Apresentação do traço.

Os traços definidos foram apresentados por meio da Eq.(12) e os materiais apresentados na seguinte ordem, cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: a/c.

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} : \frac{C_s}{C_c} : \frac{C_{LV}}{C_c} : \frac{C_{\text{água}}}{C_c} \quad (12)$$

A Tabela 3.12 apresenta o consumo dos materiais para os três grupos de concreto produzidos e seus respectivos traços.

Tabela 3.12 – Consumo de materiais e traços.

Grupo de concreto	Consumo de materiais (kg/m ³)		a/c	Fck (MPa)	Traço
CSR	Cimento	345	0,58	25	1 : 1,533 : 3,704 : 0,579
	Areia	529			
	Seixo	1278			
	Água (l/m ³)	200			
CLV50	Cimento	345	0,58	25	1 : 1,623 : 1,852 : 1,316 : 0,579
	Areia	560			
	Seixo	639			
	Agregado de LV	454			
	Água (l/m ³)	200			
CLV100	Cimento	345	0,58	25	1 : 1,716 : 2,635 : 0,579
	Areia	592			
	Agregado de LV	909			
	Água (l/m ³)	200			

Fonte: Autoria própria (2011).

3.4.3 Planejamento dos ensaios.

Foram realizadas análises das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, bem como da microestrutura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Para que o objetivo deste trabalho seja alcançado fez-se necessário a realização de diversos ensaios seguidos de suas respectivas análises, o que implica na necessidade de se definir as variáveis, sejam as controláveis ou variáveis de controle e as de resposta.

As variáveis controláveis a serem analisadas neste estudo são:

- a) Teores de substituição: Os teores de substituição do seixo por agregado de LV variam de 0%, 50% e 100%;
- b) Idade de análise: Os corpos de prova foram ensaiados nas idades de 07 e 28 dias.

Enquanto que as variáveis de resposta, ou seja, as propriedades a serem analisadas neste estudo são:

- a) Massa específica no estado fresco;
- b) Resistência à tração por compressão diametral;
- c) Resistência à compressão;
- e) Resistência à tração na flexão;
- f) Absorção de água;
- g) Módulo de elasticidade;
- h) Massa específica no estado endurecido.

A Tabela 3.13 mostra a quantidade dos corpos de prova que foram moldados para cada ensaio.

Tabela 3.13 – Número de corpos de prova a serem moldados.

Ensaio	Idade (dias)	Nº de corpos de prova		
		CSR	CLV50	CLV100
Resistência à compressão	7	3	3	3
	28	3	3	3
Resistência à tração	7	3	3	3
	28	3	3	3
Resistência à tração na flexão	7	3	3	3
	28	3	3	3
Absorção por imersão	28	3	3	3
Módulo de elasticidade	7	3	3	3
	28	3	3	3
Total parcial		27	27	27
Total geral		81		

Fonte: Autoria própria (2011).

3.4.4 Moldagem e cura dos corpos de prova.

Para os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, massa específica, índice de vazios e absorção de água, foram moldados 63 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10cm x 20cm. Enquanto que para o ensaio de resistência à tração na flexão foram moldados 18 corpos de prova prismáticos com dimensões de 10cm x 10cm x 35cm.

Os corpos-de-prova foram moldados e curados de acordo com os procedimentos descritos na NBR 5738 (2003). Após o processo de moldagem, os CP's foram acondicionados dentro do laboratório de engenharia civil da UFPA, em local protegido da ação das intempéries e mantendo-os desse modo por 24 horas até a execução do processo de desforma. Após a desforma, os mesmos foram depositados em câmara úmida com temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa superior a 95%, e lá permaneceram até as datas de realização dos ensaios.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com as análises dos agregados produzidos a partir da lama vermelha e dos concretos. A discussão será dividida em três etapas: caracterização das propriedades dos agregados, caracterização das propriedades dos concretos e análise microestrutural da interface agregado-matriz de cimento.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS PRODUZIDOS COM LAMA VERMELHA.

O ensaio de Abrasão “Los Ángeles” foi realizado no laboratório de engenharia civil da UFPA. As determinações de porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente foram realizadas no laboratório de engenharia química da UFPA.

4.1.1 Abrasão “Los Ángeles”

O ensaio de Abrasão “Los Ángeles” foi realizado com o intuito de quantificar a resistência do agregado de lama vermelha (agregado de LV) ao impacto e ao desgaste. O resultado deste ensaio, executado de acordo com NBR NM 51 está apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultado do ensaio de Abrasão “Los Ángeles”.

Material	Graduação	Nº de esferas	Abrasão “Los Ángeles” (%)
Agregado de LV	F	12	39,95

Fonte: Autoria própria (2011).

O resultado demonstra que o material, apresenta potencial para ser utilizado na produção de concretos na indústria da construção civil. Visto que a abrasividade está diretamente ligada à resistência e a vida útil das estruturas em concreto.

O resultado deste ensaio para o agregado de LV demonstrou, por exemplo, que este material possui resistência superior a do seixo, agregado comumente utilizado na região norte para a produção de concretos, visto que este segundo apresenta valores de perda por abrasão geralmente em torno 49,80%.

Ressalta-se que a perda por abrasão para o material em questão está de acordo com as exigências da NBR 7211, a qual afirma que o índice de desgaste por abrasão “Los Angeles” deverá ser inferior a 50% em massa do material. A Figura 4.1 mostra à esquerda a máquina “Los Angeles” utilizada para a realização do ensaio e à direita o agregado de LV após o desgaste.

Figura 4.1- Máquina “Los Angeles” e o agregado após o desgaste.



Fonte: Autoria própria (2011).

4.1.2 Porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente.

A metodologia utilizada para a realização destes ensaios foi citada por Santos (1989) e Souza (2010). Para a realização destes ensaios foram colhidas aleatoriamente 06 amostras de 06 “fornadas” diferentes, cada uma com 15 unidades de agregados de LV. Os valores de porosidade aparente (PA), absorção de água (AA) e massa específica aparente (MEA), todos em função da temperatura e do tempo de queima, são apresentadas nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4.

Tabela 4.2 – Amostra 01 e 02: porosidade aparente, absorção de água e massa específica.

AMOSTRA 01				AMOSTRA 02			
Agregado (LV)	PA (%)	AA (%)	MEA (g/cm ³)	Agregado (LV)	PA (%)	AA (%)	MEA (g/cm ³)
1	1,15	0,53	2,17	1	1,41	0,73	1,93
2	1,20	0,57	2,13	2	1,02	0,49	2,08
3	2,05	0,97	2,11	3	0,96	0,49	1,95
4	0,00	0,00	2,12	4	0,64	0,29	2,18
5	1,91	0,88	2,18	5	0,51	0,25	2,04
6	0,00	0,00	2,23	6	0,91	0,42	2,18
7	0,73	0,34	2,14	7	1,12	0,53	2,13
8	1,59	0,72	2,21	8	0,75	0,34	2,18
9	1,60	0,75	2,12	9	1,35	0,64	2,10
10	1,02	0,48	2,12	10	1,14	0,54	2,10
11	0,90	0,42	2,14	11	1,39	0,63	2,21
12	0,00	0,00	2,30	12	1,27	0,59	2,17
13	1,47	0,69	2,12	13	0,00	0,00	2,13
14	0,79	0,38	2,06	14	1,47	0,63	2,32
15	0,00	0,00	2,26	15	0,75	0,33	2,28
MÉDIA	0,96	0,45	2,16	MÉDIA	0,98	0,46	2,13

Fonte: Autoria própria (2011).

Tabela 4.3 – Amostra 03 e 04: porosidade aparente, absorção de água e massa específica.

AMOSTRA 03				AMOSTRA 04			
Agregado (LV)	PA (%)	AA (%)	MEA (g/cm ³)	Agregado (LV)	PA (%)	AA (%)	MEA (g/cm ³)
1	20,37	16,79	1,21	1	1,43	0,68	2,11
2	3,43	2,35	1,46	2	1,45	0,73	1,98
3	2,68	1,08	2,49	3	0,00	0,00	2,25
4	6,93	4,70	1,48	4	0,70	0,34	2,03
5	3,33	1,83	1,82	5	0,00	0,00	2,21
6	13,25	5,90	2,25	6	1,56	0,73	2,13
7	1,55	0,94	1,64	7	0,00	0,00	2,14
8	8,77	3,21	2,74	8	1,48	0,75	1,98
9	4,76	3,36	1,42	9	1,55	0,72	2,14
10	2,60	0,97	2,69	10	0,00	0,00	1,99
11	2,56	1,53	1,68	11	0,72	0,33	2,19
12	6,17	4,00	1,54	12	1,55	0,74	2,11
13	3,36	1,75	1,92	13	0,00	0,00	2,23
14	5,06	3,39	1,49	14	0,00	0,00	2,18
15	3,57	1,86	1,92	15	0,00	0,00	2,25
MÉDIA	5,89	3,58	1,85	MÉDIA	0,70	0,33	2,13

Fonte: Autoria própria (2011).

Tabela 4.4 – Amostra 05 e 06: porosidade aparente, absorção de água e massa específica.

AMOSTRA 05				AMOSTRA 06			
Agregado (LV)	PA (%)	AA (%)	MEA (g/cm ³)	Agregado (LV)	PA (%)	AA (%)	MEA (g/cm ³)
1	0,00	0,00	2,01	1	4,21	4,40	0,96
2	0,00	0,00	2,05	2	13,62	15,77	0,86
3	0,70	0,36	1,96	3	3,96	2,95	1,34
4	1,10	0,61	1,81	4	2,54	1,42	1,79
5	0,39	0,19	2,03	5	2,33	2,38	0,98
6	0,54	0,29	1,84	6	1,37	0,88	1,55
7	0,95	0,58	1,65	7	1,46	1,49	0,99
8	1,18	0,62	1,91	8	12,79	10,38	1,23
9	1,60	0,77	2,08	9	20,08	13,64	1,47
10	1,23	0,57	2,15	10	3,38	2,45	1,38
11	1,38	0,71	1,95	11	8,04	5,19	1,55
12	0,00	0,00	1,83	12	7,24	5,34	1,36
13	0,52	0,25	2,08	13	16,43	12,37	1,33
14	0,69	0,36	1,92	14	17,86	13,51	1,32
15	0,54	0,28	1,96	15	2,01	1,63	1,23
MÉDIA	0,72	0,37	1,95	MÉDIA	7,82	6,25	1,29

Fonte: Autoria própria (2011).

Observa-se que os valores de massa específica das amostras 01 a 06 variam de 0,86 g/cm³ a 2,74 g/cm³. De acordo com a NM 35, o agregado para ser considerado leve, deverá possuir valores de massa específica aparente entre 0,88 g/cm³ a 1,12 g/cm³. Desse modo, apenas parte dos agregados em estudo foram considerados leves, os demais, considerados de massa específica normal.

Observa-se que houve variação bastante acentuada nos valores de porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente. Tal fato atribui-se a utilização de um forno inadequado para o processo de sinterização dos agregados, pois a distribuição de temperatura não ocorreu de maneira homogênea, indicando, desse modo, que dentro do forno havia um gradiente de temperatura, apesar das resistências elétricas (fontes quentes) estarem distribuídas em todas as paredes, o que deveria garantir a temperatura uniforme.

No forno elétrico de câmara utilizado, foram adaptadas mobílias, formadas por quatro placas refratárias apoiadas em pinos refratários, formando espécies de plataformas, aumentando, desse modo, a capacidade do forno. Observou-se que os

agregados depositados na primeira placa, e próximo às laterais, locais onde ficam situadas as resistências, apresentaram uma maior expansão, e conseqüentemente apresentaram os menores valores de massa específica. Os agregados situados na segunda e na terceira plataforma apresentaram expansão inferior aos situados na primeira placa, apresentando valores de massa específica superiores aos depositados na primeira. Já os agregados depositados na quarta placa, praticamente não sofreram expansão, apresentando os maiores valores de massa específica. A Figura 4.2 mostra a distribuição das placas refratárias e as resistências no fundo e paredes do forno.

Figura 4.2- Visão interna do forno.



Fonte: Autoria própria (2011).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS

Todas as análises experimentais referentes à caracterização das propriedades dos concretos produzidos foram realizadas no laboratório de engenharia civil da Universidade Federal do Pará - UFPA.

4.2.1 Propriedades no estado fresco

Todos os concretos produzidos apresentaram coesão e consistência adequadas, permitindo assim, a moldagem dos corpos-de-prova. Ressalta-se que em nenhum dos concretos observou-se o fenômeno da exsudação e segregação dos agregados.

4.2.1.1 Índice de consistência

Os valores do índice de consistência para os três concretos foram determinados por meio do abatimento do tronco de cone, segundo especificações da NBR NM 67, obedecendo ao intervalo de 70 ± 10 mm. A Tabela 4.5 apresenta as propriedades do concreto no estado fresco.

Tabela 4.5 – Propriedades dos concretos no estado fresco.

Concreto	Agregado de LV (%)	Índice de consistência (mm)	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m ³)	Massa esp. (kg/m ³)
CSR	0	70	0,58	345	2300
CLV50	50	80	0,58	345	2150
CLV100	100	70	0,50	345	2000

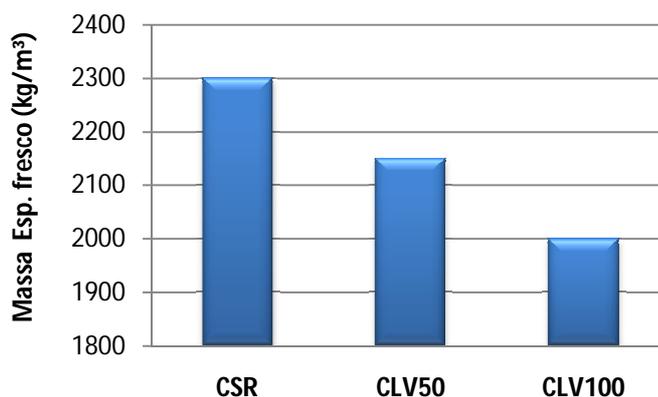
Fonte: Autoria própria (2011).

4.2.1.2 Massa específica

Os valores de massa específica dos concretos no estado fresco foram determinados de acordo com procedimentos descritos na NBR 9833 e são apresentados na Tabela 4.5, os quais variaram entre 2000 kg/m³ e 2300 kg/m³. Verificou-se que na medida em que o percentual de substituição do seixo rolado pelo agregado sintético é aumentado, ocorre uma diminuição no valor da massa específica, deixando evidente a leveza do material produzido a partir do resíduo do beneficiamento da bauxita.

Os concretos produzidos com 50% de agregado de LV apresentaram um decréscimo dos valores de massa específica de 6,5% em relação ao concreto de referência (CSR). Já o concreto com 100% de agregado de lama vermelha apresentou um decréscimo de 13% em relação ao concreto de referência. A Figura 4.3 apresenta os valores de massa específica obtidos para cada concreto.

Figura 4.3- Massa específica no estado fresco para os concretos CSR, CLV50 e CLV100.



Fonte: Autoria própria (2011).

4.2.2 Propriedades no estado endurecido.

4.2.2.1 Resistência à compressão e massa específica.

A resistência à compressão foi determinada de acordo com a NBR 5739. Os corpos-de-prova cilíndricos de (10x20) cm foram ensaiados nas idades de 07 e 28 dias. Para cada grupo de concreto (CSR, CLV50 e CLV100) e idade foram moldados 03 CP's. Os valores de massa específica, do concreto no estado seco, foram determinados segundo prescrições existentes na NBR 9778, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos de (10x20) cm, os quais foram ensaiados somente aos 28 dias. A Tabela 4.6 apresenta os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão e massa específica.

Tabela 4.6 – Resistência à compressão e massa específica.

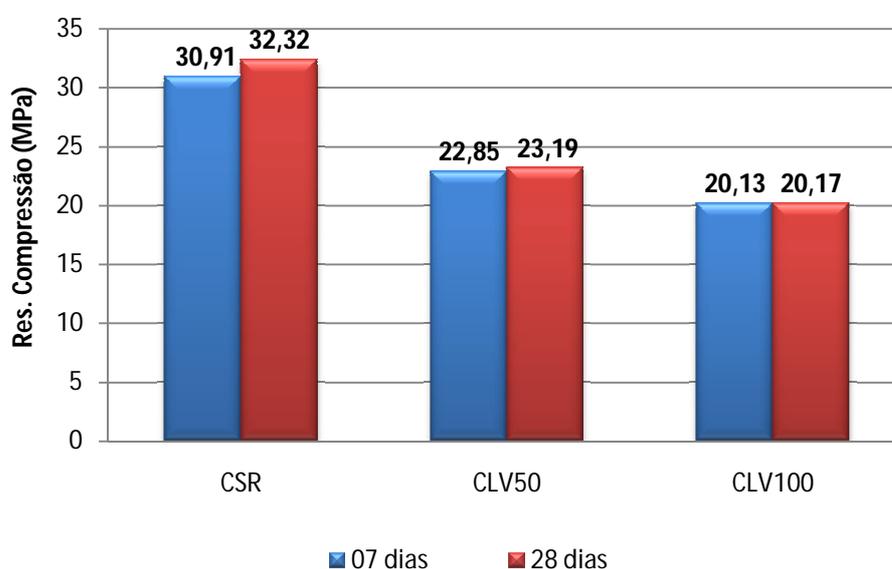
Concreto	Resistência à compressão (MPa)								Massa específica (kg/m³)
	07 dias				28 dias				
	CP 01	CP 02	CP 03	Média	CP 01	CP 02	CP 03	Média	
CSR	31,21	30,57	30,96	30,91	34,27	30,32	32,36	32,32	2180
CLV50	21,15	24,46	22,93	22,85	23,57	22,68	23,31	23,19	2050
CLV100	20,13	20,13	20,13	20,13	20,51	19,49	20,50	20,17	1880

Fonte: Autoria própria (2011).

Comparando-se os três grupos de concretos, observa-se que o concreto de referência produzido com 100% de seixo rolado, apresentou valores de resistência

superiores àqueles que utilizaram o agregado de LV. Para a idade de 07 dias, os concretos produzidos com 50% de agregado de LV apresentaram um decréscimo de 26,08% em relação ao concreto de referência (CSR). Já o concreto com 100% de agregado de lama vermelha apresentou um decréscimo de 28,25% em relação ao concreto de referência. Aos 28 dias, o decréscimo dos valores de resistência dos concretos com agregado de LV, em relação aos de referência, foi da ordem de 28,25% e 37,60%, para os concretos com 50% de LV e 100% de LV, respectivamente. A Figura 4.4 apresenta os valores de resistência à compressão nas idades de 07 e 28 dias para os três grupos de concreto.

Figura 4.4- Resistência à compressão aos 07 e 28 dias.



Fonte: Autoria própria (2011).

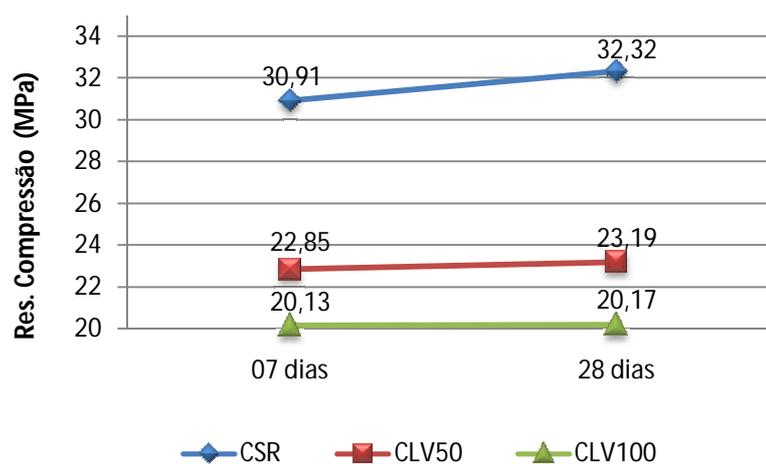
Atribui-se a redução dos valores de resistência à compressão dos concretos CLV50 e CLV100, em relação ao concreto CSR, ao fato de que parte dos agregados sintéticos utilizados neste trabalho possui valores de massa específica inferiores ao do agregado natural (seixo). Massa específica e resistência são grandezas diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior o valor da massa específica dos agregados, maior resistência estes terão, e conseqüentemente essas características são transmitidas aos concretos produzidos.

Observa-se ainda, que praticamente não houve aumento nos valores de resistência à compressão do concreto CLV100 da idade de 07 para 28 dias,

indicando assim que estes apresentaram estabilização dos valores dessa propriedade, assemelhando-se desse modo aos concretos leves.

A estabilização dos valores de resistência à compressão à idade de 07 dias assemelha-se a uma característica dos concretos produzidos com agregados leves, que de modo geral, aos 07 dias de idade os valores de resistência à compressão da matriz de cimento são superiores aos valores da resistência à compressão do agregado. Assim sendo, a resistência final do concreto não se beneficia na mesma proporção com o aumento da resistência à compressão da matriz de cimento. A Figura 4.5 demonstra a estabilidade dos valores de resistência à compressão dos concretos produzidos com o agregado de lama vermelha.

Figura 4.5- Variação da resistência à compressão da idade de 07 para 28 dias.



Fonte: Autoria própria (2011).

Observou-se durante a realização das análises experimentais que as rupturas do concreto CLV100, quando submetido à compressão foram mais frágeis. O concreto com massa específica normal quando submetido à tensão de compressão, a propagação das fissuras, de modo geral, ocorre na matriz de cimento ou na interface agregado-matriz, pois, geralmente, o agregado mostrar-se mais resistente do que a matriz de cimento. Segundo Zhang; GjØrv, (1991) nos concretos produzidos com agregados leves, caracteristicamente menos resistentes que a matriz de cimento, a propagação das fissuras ocorre, geralmente, nos agregados, fazendo com que ocorra um acúmulo de tensões na matriz de cimento, ocasionando, desse modo, uma ruptura brusca no concreto. Tal fato, possivelmente explique a

ruptura mais frágil do concreto CLV100, quando comparado ao concreto tradicional, produzido somente com seixo rolado. A Figura 4.6 mostra um corpo-de-prova ensaiado à compressão aos 07 dias, com ruptura ocorrida no agregado de lama vermelha.

Figura 4.6- Ruptura ocorrida no agregado.

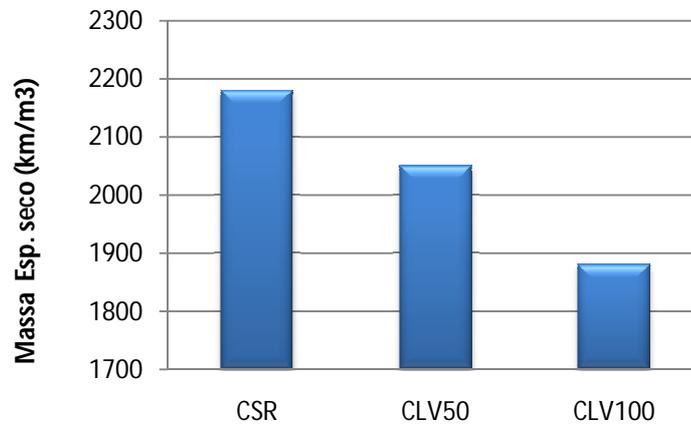


Fonte: Autoria própria (2011).

O concreto produzido com 100% de agregado de lama vermelha (CLV100) apresentou valor médio de massa específica de 1880 kg/m^3 , atendendo aos requisitos descritos em alguns documentos normativo como, ACI 213r-03 ($1120 < \gamma < 1920$), EUROCODE 2 ($900 \leq \gamma \leq 2000$), CEB-FIP ($\gamma < 2000$), NS 3473 E ($1200 < \gamma < 2200$) e RILEM ($\gamma < 2000$). Apesar de apresentar baixo valor de massa específica, este concreto não foi considerado leve, pois de acordo com a NM 35, para um concreto ser considerado leve deverá apresentar valores de massa específica entre 1680 à 1840 kg/m^3 .

Comparado ao concreto de referência, que apresentou massa específica de 2180 kg/m^3 , os concretos produzidos com o agregado sintético, CLV50 e CLV100, apresentaram redução dos valores de massa entre 5,96% e 13,76%, respectivamente. A Figura 4.7 apresenta os valores de massa específica obtidos em laboratório.

Figura 4.7- Massa específica dos concretos no estado seco.



Fonte: Autoria própria (2011).

4.2.2.2 Resistência à tração

Os valores de resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão foram determinados de acordo com as recomendações existentes na NBR 7222 e NBR 12142, respectivamente. Para a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de (10x20) cm, ensaiados aos 07 e 28 dias. Os valores de resistência à tração na flexão aos 07 e 28 dias foram determinados utilizando-se corpos de prova prismáticos com 10 cm de altura, 10 cm de largura e 35 cm de comprimento. Foram moldados 03 corpos de prova para cada grupo de concreto e idade.

a) Resistência à tração por compressão diametral.

Os valores de resistência à tração por compressão diametral obtidos em laboratório para os 18 corpos-de-prova ensaiados aos 07 e 28 dias são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resistência à tração por compressão diametral.

Resistência à tração por compressão diametral (MPa)								
Concreto	07 dias				28 dias			
	CP 01	CP 02	CP 03	Média	CP 01	CP 02	CP 03	Média
CSR	2,07	1,97	2,04	2,03	2,52	2,45	2,52	2,50
CLV50	1,91	1,97	1,94	1,94	2,23	2,48	2,36	2,36
CLV100	1,24	2,23	1,75	1,74	1,75	1,72	1,75	1,74

Fonte: Autoria própria (2011).

Ao serem comparados os três grupos de concretos observa-se que o de referência, produzido com 100% de seixo rolado apresentou valores de resistência à tração por compressão diametral superiores aos produzidos com o agregado de lama vermelha.

Os concretos produzidos com 50% de lama vermelha e 50% de seixo (CLV50) apresentaram aos 07 dias, valores de resistência à tração por compressão diametral inferiores aos de referência (CSR), com um decréscimo de 4,43%. Já o concreto produzido com 100% de agregado de lama vermelha, para essa mesma idade, apresentou um decréscimo de 14,29% em relação ao concreto de referência. Para a idade de 28 dias, o decréscimo dos valores de resistência à tração por compressão diametral dos concretos com agregado de LV, em relação aos de referência, foi da ordem de 5,6% e 30,4%, para os concretos CLV50 e CLV100, respectivamente. A Figura 4.8 mostra os corpos de provas após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os três grupos de concreto.

Verificou-se ainda, que o teor de substituição do agregado natural (seixo) por agregado sintético (agregado de LV) e resistência à tração por compressão diametral são grandezas inversamente proporcionais, ou seja, na medida em que se aumenta o percentual de substituição, ocorre uma diminuição dos valores de resistência.

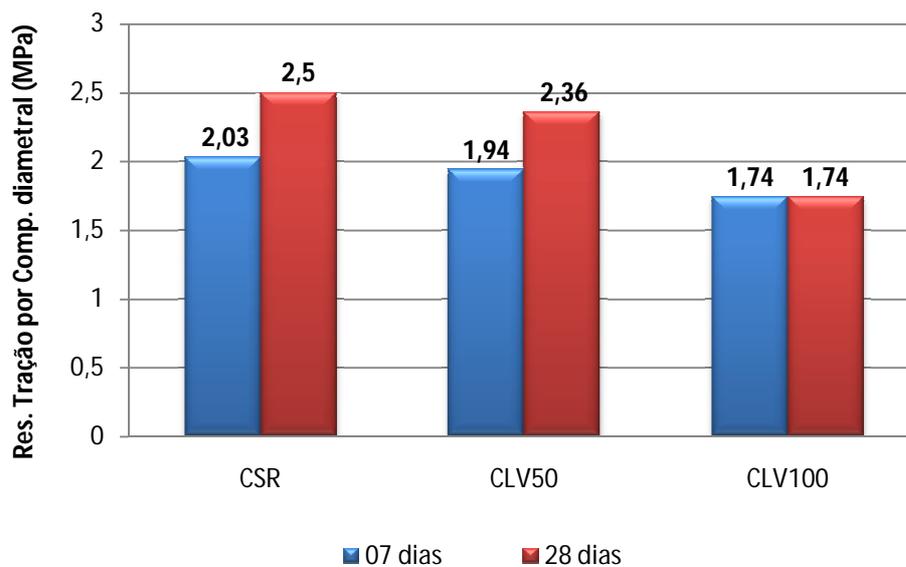
Figura 4.8- CP's após ensaio de tração por compressão diametral (CSR, CLV50 e CLV100).



Fonte: Autoria própria (2011).

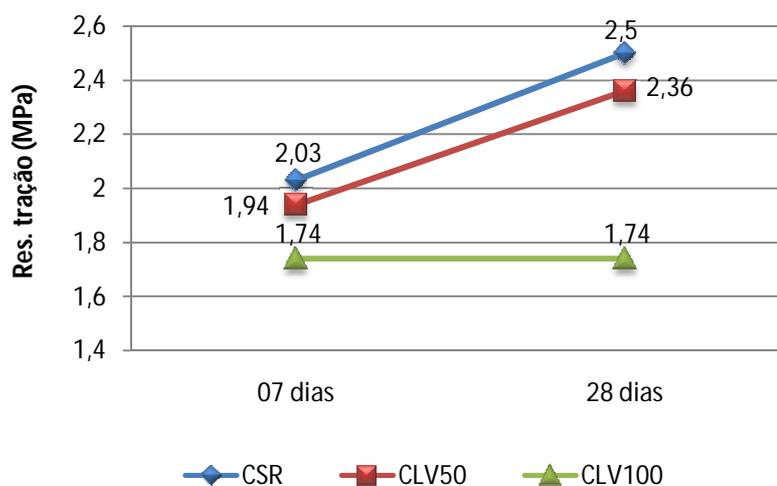
Em relação ao concreto produzido com 100% de lama vermelha, observa-se que em média, não houve aumento de resistência à tração por compressão diametral da idade de 07 para 28 dias, ou seja, a resistência verificada na primeira idade foi igual a verificada aos 28 dias (1,74 MPa). As Figuras 4.9 e 4.10 mostram os valores de resistência para cada grupo de concretos e a baixa variação dos valores de resistência de 07 para 28 dias.

Figura 4.9- Resistência à tração por compressão diametral aos 07 e 28 dias.



Fonte: Autoria própria (2011).

Figura 4.10- Variação da resistência à tração por comp. diametral da idade de 07 para 28 dias.



Fonte: Autoria própria (2011).

b) Resistência à tração na flexão.

Os valores de resistência à tração na flexão obtidos em laboratório para os 18 corpos-de-prova ensaiados aos 07 e 28 dias são apresentados na Tabela 4.8.

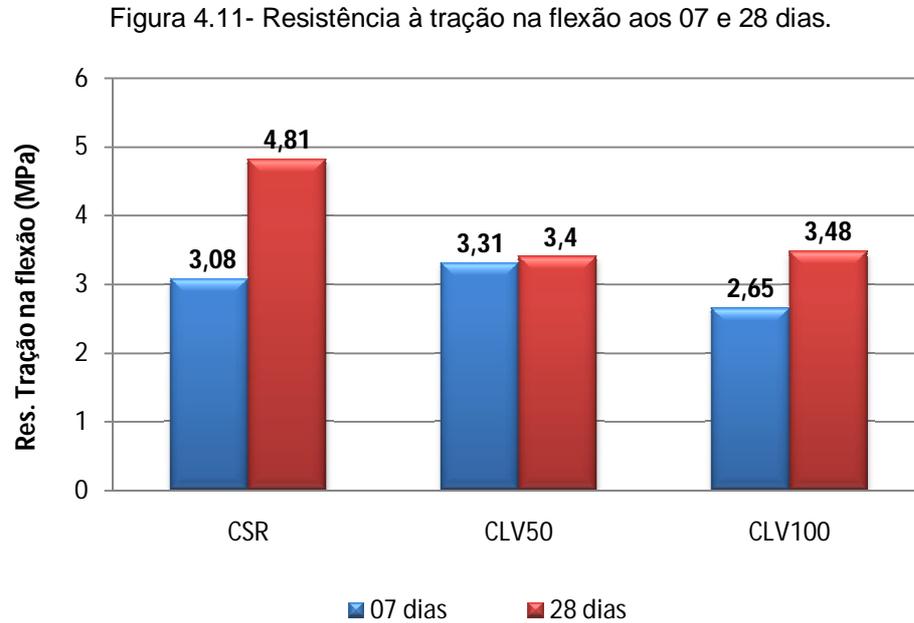
Tabela 4.8– Resistência à tração na flexão.

Resistência à tração na flexão (MPa)								
Concreto	07 dias				28 dias			
	CP 01	CP 02	CP 03	Média	CP 01	CP 02	CP 03	Média
CSR	3,06	3,09	3,08	3,08	4,80	4,83	4,80	4,81
CLV50	3,60	2,70	3,63	3,31	3,30	3,30	3,60	3,40
CLV100	2,52	2,70	2,72	2,65	3,84	3,30	3,30	3,48

Fonte: Autoria própria (2011).

Em média, o valor de resistência à tração na flexão para os concretos produzidos com 50% de LV apresentou um aumento de 7,47% aos 07 dias, em relação ao concreto de referência. Já o concreto com 100% de LV, apresentou uma diminuição de 13,96% da resistência em relação ao concreto produzido somente com seixo. Para a idade de 28 dias, o decréscimo dos valores de resistência à tração na flexão dos concretos com agregado de LV, em relação aos de referência, foi da ordem de 29,31% e 27,65%, para os concretos CLV50 e CLV100, respectivamente. A Figura 4.11 apresenta os valores de resistência à tração na

flexão para cada grupo de concretos ensaiados nas idades de 07 e 28 dias. A Figura 4.12 mostra os corpos de provas após o ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: Autoria própria (2011).

Figura 4.12- CP's após ensaio de tração na flexão.



Fonte: Autoria própria (2011).

Verificou-se que os valores de resistência à tração na flexão obtidos tanto para 07 quanto para 28 dias, diferem dos resultados esperados. Como os agregados de lama vermelha apresentaram-se bastante porosos, com baixos valores de massa específica e por consequência menos resistentes que o seixo, o previsto é que os valores de resistência fossem diminuindo na medida em que fossem aumentados os percentuais de substituição do agregado convencional pelo sintético. Uma possível

justificativa para tal divergência pode ser devido à coleta de informações equivocadas em alguma etapa da realização dos ensaios de laboratório.

4.2.2.3 Módulo de deformação

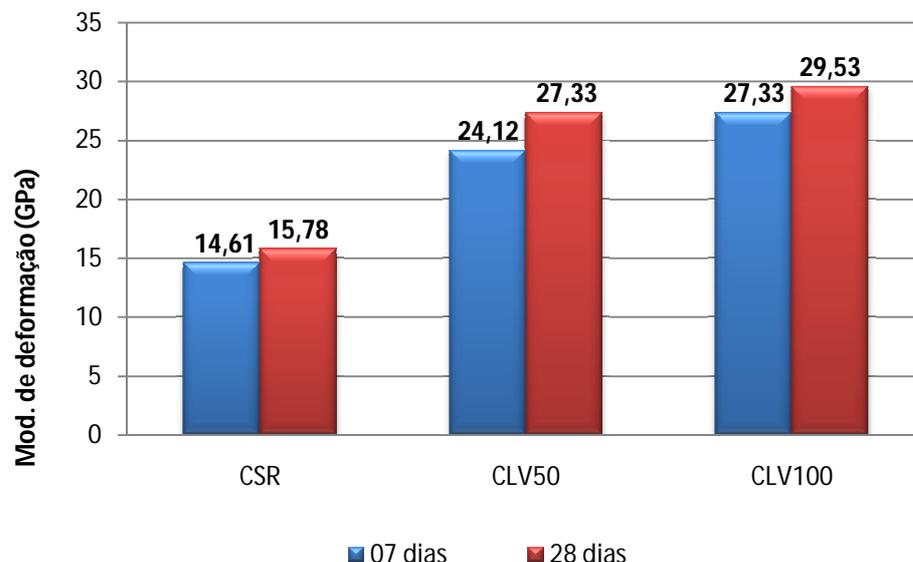
A determinação dos valores de módulo de deformação tangente inicial dos concretos foi realizada de acordo com recomendações descritas na NBR 8522. Para a realização do ensaio foram moldados 03 corpos de prova cilíndricos de (10x20) cm para cada grupo de concreto e idade (07 e 28 dias), totalizando 18 CP's. O carregamento aplicado foi constante de $(0,5 \pm 0,05)$ MPa/s e calculou-se o valor do módulo de deformação utilizando-se a tensão correspondente a 30% do carregamento último. A Tabela 4.9 e a Figura 4.13 apresentam os valores de módulo de deformação obtidos em laboratório.

Tabela 4.9 – Valores de módulo de deformação nas idades de 07 e 28 dias.

Módulo de deformação (GPa)								
Concreto	07 dias				28 dias			
	CP 01	CP 02	CP 03	Média	CP 01	CP 02	CP 03	Média
CSR	13,75	15,02	15,07	14,61	15,29	16,72	15,32	15,78
CLV50	25,31	23,55	23,51	24,12	27,84	27,19	26,95	27,33
CLV100	27,71	26,80	27,49	27,33	31,06	26,56	30,97	29,53

Fonte: Autoria própria (2011).

Figura 4.13- Módulo de deformação aos 07 e 28 dias.



Fonte: Autoria própria (2011).

De acordo com os resultados apresentados na tabela acima, os valores de módulo de deformação tangente inicial, obtidos para o concreto CLV100 foram significativamente superiores àqueles apresentados pelo concreto de referência.

Em média, o valor do módulo de deformação para os concretos produzidos com 50% de LV apresentou um aumento de 65,09% aos 07 dias, em relação ao concreto de referência. Já o concreto com 100% de LV, apresentou um aumento de 87,06% em relação ao concreto produzido somente com seixo. Para a idade de 28 dias, o aumento dos valores de módulo de deformação tangente inicial dos concretos produzidos com agregado de LV, em relação aos de referência, foi da ordem de 73,19% e 78,14%, para os concretos CLV50 e CLV100, respectivamente.

Verificou-se ainda que o acréscimo dos valores de módulo de deformação, da idade de 07 para 28 dias foi de 8%, 13% e 8%, respectivamente para os concretos CSR, CLV50 E CLV100.

Os resultados demonstram que houve um aumento nos valores de módulo de deformação na medida em que se aumenta o percentual de substituição do agregado natural pelo sintético.

A Tabela 4.9 apresenta uma comparação entre os valores de módulo obtidos em laboratório, de acordo com a NBR 8522 e os obtidos por meio de equações indicadas pelo NS 3473 (Norwegian Concrete Code), ACI 318 (American Concrete Institute), BS 8110 (British Standard) e CEB – Comité Euro-Internacional Du Béton (1978). Foram adotadas as relações apresentadas nas equações 13a e 13b para o cálculo dos valores do módulo de deformação.

Tabela 4.10 – Valores de módulo de deformação obtidos em laboratório e calculados.

Concreto	Resistência à compressão aos 07 dias (MPa)	Massa específica (kg/m ³)	Módulo obtido em laboratório (Gpa)	Módulo de deformação calculado (GPa)			
				NS 3473	ACI 318	BS 8110	CEB
CSR	30,91	2180	14,61	23,02	23,00	23,27	25,45
CLV50	22,85	2050	24,12	19,17	18,00	18,79	20,85
CLV100	20,13	1880	27,33	16,21	14,90	15,22	17,01

Fonte: Autoria própria (2011).

Tabela 4.11 – Equações para cálculo do módulo de deformação.

Referência	Equação*	Observações
NS 3473 (1992)	$E_{ck} = 9,5 \cdot f_{cck}^{0,3} \left(\frac{\rho}{2400} \right)^{1,5}$	$f_{cck} \leq 85$ MPa
ACI 318 (1992)	$E_c = 0,043 \cdot \rho^{1,5} \cdot f_c^{0,5}$	$F_c < 41$ MPa
BS 8110 Part. 2 (1985)	$E_{ck} = 1,7 \cdot \left(\frac{\rho}{1000} \right)^2 \cdot f_{ck}^{0,3}$	-
CEB (1978)	$E_c = 1,6 \cdot \rho^2 \cdot (f_{cck} + 8)^{0,33} \cdot 10^{-6}$	-

Fonte: ROSSIGNOLO (2003).

* E_c = módulo de elasticidade; ρ = massa específica (kg/m^3); f_c = res. compressão (150 x 300 mm – cilíndrico); f_{cck} = res. compressão (100 x 200 mm – cilíndrico); f_{ck} = res. compressão (cubo – 100 mm).

$$F_c = 0,9 \cdot f_{cck} \quad (13a) \quad f_{ck} = 1,1 \cdot f_{cck} \quad (13b) \quad (13) \quad (\text{ZHANG e GJ}\Phi\text{RV, 1990})$$

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.9, verifica-se que todas as equações utilizadas para os concretos produzidos com os agregados de LV (CLV50 e CLV100), subestimaram os valores do módulo de deformação. Enquanto que para o concreto de referência, os valores obtidos por meio das equações foram superiores àqueles obtidos em laboratório. A diferença entre os valores obtidos em laboratório e aqueles obtidos a partir das equações, para o concreto produzido com 100% de agregado de lama vermelha foi de 40,7% (NS 3473), 45,5% (ACI 318), 44,3% (BS 8110) e 37,8% (CEB 1987). Desse modo, averigua-se que a equação apresentada pelo CEB, dentre as analisadas mostrou-se a mais aproximada para se estimar o valor do módulo de deformação dos concretos CLV50 e CLV100 em estudo. É de suma importância mencionar que as grandes diferenças ocorridas entre os valores obtidos em laboratório e aqueles obtidos por meio das equações, pode ser devido ao fato de tais equações serem referentes a estudos realizados em agregados com propriedades, como por exemplo, resistência mecânica, composição, dimensão e textura, diferentes das analisadas nesta pesquisa.

4.2.2.4 Absorção de água por imersão e índice de vazios

A determinação dos valores de absorção de água por imersão e índice de vazios foi realizada de acordo com a NBR 9778, para os concretos com idade de 28 dias, utilizando corpos-de-prova cilíndricos de (10x20) cm. Para cada grupo de

concreto foram moldados 03 CP's. Os valores de absorção de água por imersão e índice de vazios estão apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Absorção de água e índice de vazios aos 28 dias.

Ensaio	Nº CP	Concreto		
		CRS	CLV50	CLV100
Absorção de água (%)	CP 01	6,45	7,01	6,76
	CP 02	6,29	6,92	6,68
	CP 03	6,39	7,32	6,77
	Média	6,38	7,08	6,74
Índice de vazios (%)	CP 01	14,02	14,33	12,69
	CP 02	13,76	14,27	12,56
	CP 03	13,96	14,97	12,72
	Média	13,91	14,52	12,65

Fonte: Autoria própria (2011).

Observou-se que o concreto CLV100, apresentou valor médio de absorção de água aos 28 dias de 6,74%, valor considerado adequado de acordo com especificações descritas na NBR 11173, que estabelece limite de valor de absorção de água das argamassas estruturais em 8%. Verificou-se que o acréscimo do percentual de absorção de água, do concreto CLV100 em relação ao de referencia foi de 5,64%.

Com base nos valores apresentados na Tabela 4.12, verificou-se que os resultados obtidos em laboratório referentes ao CLV100, diferem daqueles previstos. Tanto para a Absorção de água quanto para Índice de vazios, o esperado é que houvesse um aumento dos valores dessas propriedades na medida em que fossem aumentados os percentuais de substituição do agregado convencional pelo sintético. Para o concreto CLV50 em relação ao concreto de referencia, constatou-se que houve um aumento dos valores dessas duas propriedades, conforme previsto, no entanto, o CLV100 apresentou valores inferiores aos demais grupos de concreto. Uma possível justificativa para tal divergência pode ser devido à coleta de informações equivocadas em alguma etapa da realização dos ensaios de laboratório.

4.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Neste capítulo foi realizada uma complementação das informações obtidas na caracterização das propriedades dos concretos produzidos, por meio de uma análise microestrutural dos concretos produzidos.

4.3.1 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)

A análise da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio foi realizada para os 03 grupos de concretos produzidos (CSR, CLV50 e CLV100), com 100 dias de idade. As análises foram realizadas pelo Grupo de Crescimento de Cristais e Materiais Cerâmicos do Instituto de Física de São Carlos (EESC/USP). Os valores da porosidade total, do volume de mercúrio introduzido nas amostras e os diâmetros médios dos poros são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos produzidos.

Características	Grupo de concretos		
	CSR	CLV50	CLV100
Volume intrudido (ml/g)	0,0534	0,0593	0,1289
Porosidade total (%)	13,61	13,86	28,76
Diâmetro médio dos poros (volume) (μm)	0,1400	0,0971	0,3081
Diâmetro médio dos poros (área) (μm)	0,0129	0,0194	0,0129
Diâmetro médio dos poros (4V/A) (μm)	0,0492	0,0484	0,0686

Fonte: Autoria própria (2011).

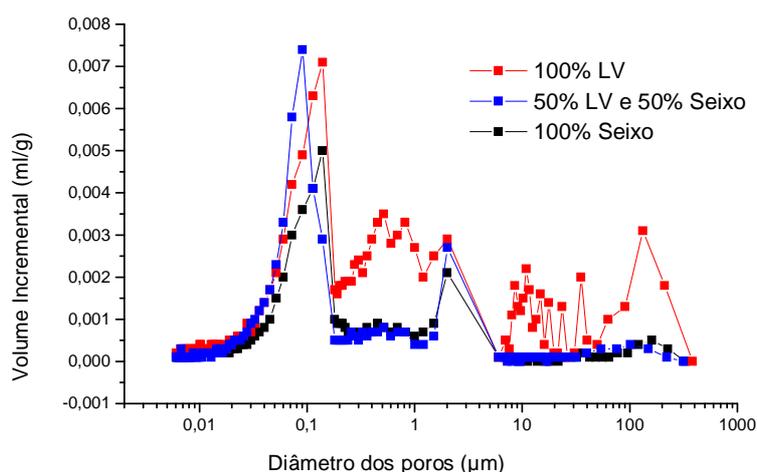
Ao serem analisados os valores apresentados na tabela 4.13, verificou-se, que entre os três grupos de concreto produzidos, àquele produzido com 100% de agregado de lama vermelha (CLV100), foi o que apresentou maior valor de porosidade total. Nos demais, verificou-se uma redução bastante significativa da porosidade total, e isso está diretamente ligado ao percentual de substituição do agregado natural pelo sintético. Ou seja, à medida que esse percentual de substituição é aumentado aumenta-se a porosidade total do concreto. Tal fato pode ser atribuído ao fato de que parte dos agregados sintéticos produzidos apresentou baixos valores de massa específica e consequentemente elevada porosidade.

Os resultados da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) são apresentados de duas formas:

- a) Volume de mercúrio incremental *versus* diâmetro dos poros: demonstra a quantidade de poros de um determinado diâmetro, por meio do volume de mercúrio intrudido.
- b) Volume de mercúrio acumulado *versus* diâmetro dos poros: explicita a quantidade total de mercúrio intrudido na amostra, ao atingir-se um determinado nível de pressão durante a realização do ensaio, representando o grau de porosidade dos concretos produzidos até o diâmetro do poro correspondente.

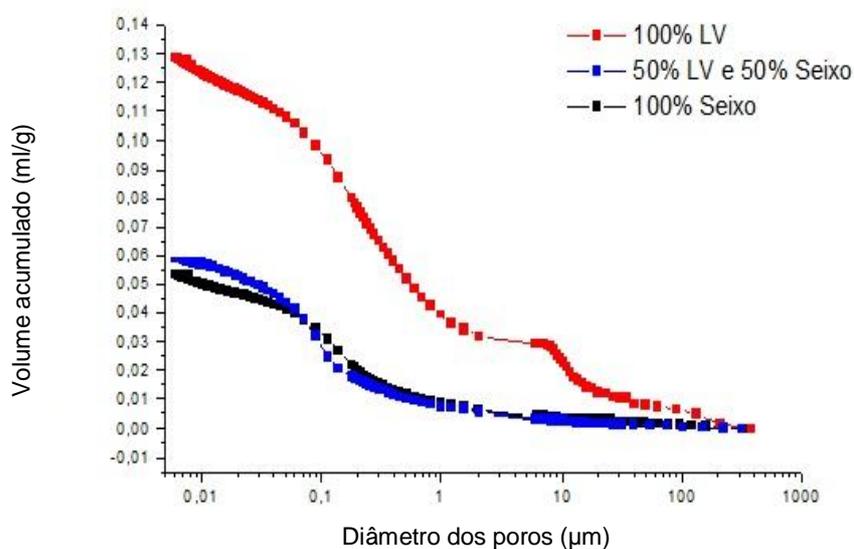
A influência da substituição do seixo rolado pelo agregado produzido com o resíduo do beneficiamento da bauxita (agregado de LV) em relação ao aumento dos valores de porosidade dos concretos pode ser mais bem entendida, ao analisar-se as relações entre a distribuição dos tamanhos dos poros e o volume por eles ocupado, demonstrados nas Figuras 4.14 e 4.15.

Figura 4.14- Volume incremental (ml/g) *versus* diâmetros (μm).



Fonte: Autoria própria (2011).

Figura 4.15- Volume acumulado (ml/g) versus diâmetros (μm).



Fonte: Autoria própria (2011).

Nas Figuras 4.14 e 4.15 é possível observar que o concreto produzido com 100% de agregado de lama vermelha (CLV100), apresentou quantidade de poro superior ao concreto produzido com 100% de seixo (CSR) e àquele produzido com o seixo e com agregado de lama vermelha (CLV50). Já o concreto CLV 50 em relação ao de referência, apresentou aumento da quantidade de poros com diâmetro entre 0,1 a 2 μm . Esse efeito foi crescente com o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo sintético.

Além do aumento da porosidade total, a substituição do agregado natural pelo sintético, provocou o aumento do tamanho dos poros, com conseqüente aumento da permeabilidade do concreto.

4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

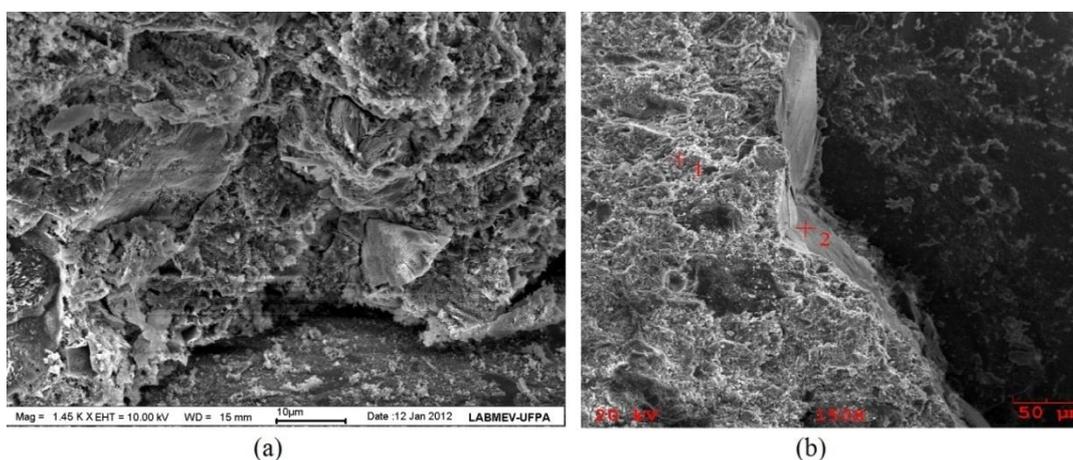
A técnica de MEV foi realizada com o intuito de analisar a interface entre a matriz de cimento e o agregado para 03 grupos de concretos produzidos (CSR, CLV50 e CLV100). As análises foram realizadas nos concretos com 100 dias de idade, pelo laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Centro de Geociências da UFPA.

Por meio das micrografias apresentadas nas Figuras 4.16, 4.18 e 4.20, identificam-se as três fases da microestrutura do concreto: agregado, matriz de cimento e zona de transição.

A área mais clara das micrografias é identificada como a matriz de cimento, a região mais escura, o agregado, e entre estas duas está situada a zona de transição.

O concreto de referência apresenta-se mais compacto e com menos poros perceptíveis, principalmente os com maiores dimensões. Já nas micrografias dos concretos CLV50 (ponto 1) e CLV100 (ponto 3), é possível observar uma maior quantidade de poros na região ocupada pelo agregado de lama vermelha.

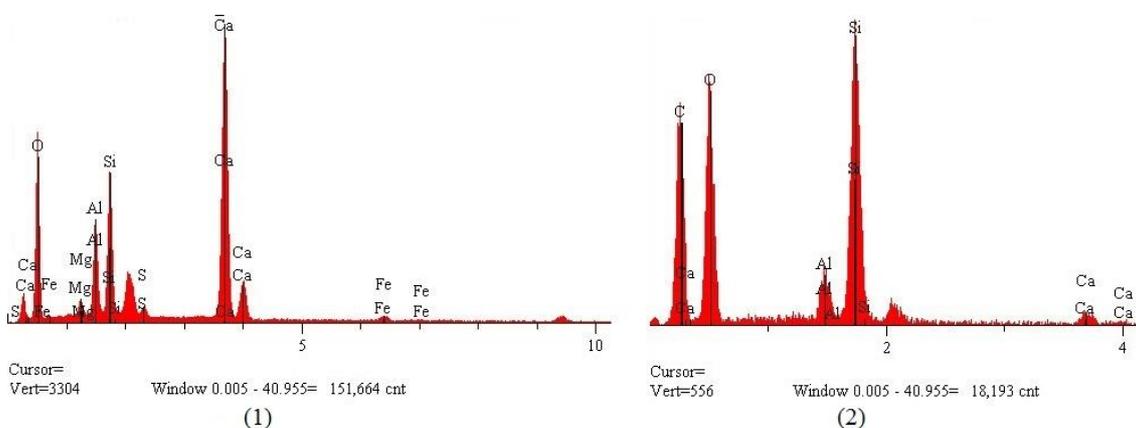
4.16- Micrografia (MEV) do concreto CRS.



Figura

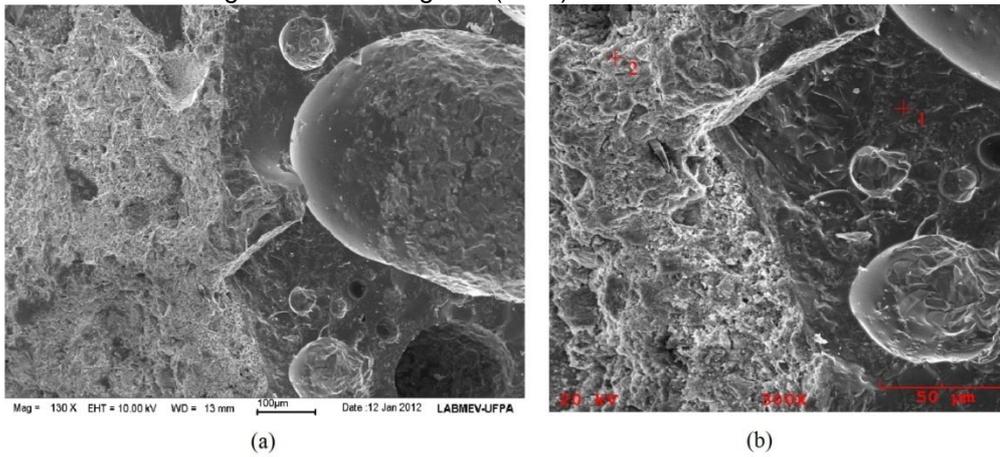
Fonte: Autoria própria (2011).

Figura 4.17- Espectro do ponto 1 e 2 da Figura 4.16(b) do concreto CRS.



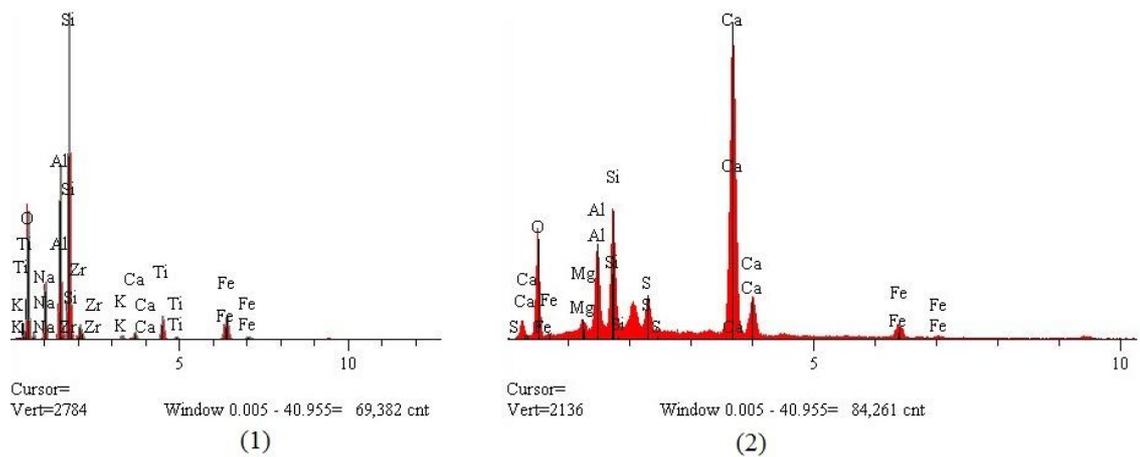
Fonte: Autoria própria (2011).

Figura 4.18- Micrografia (MEV) do concreto CLV50.



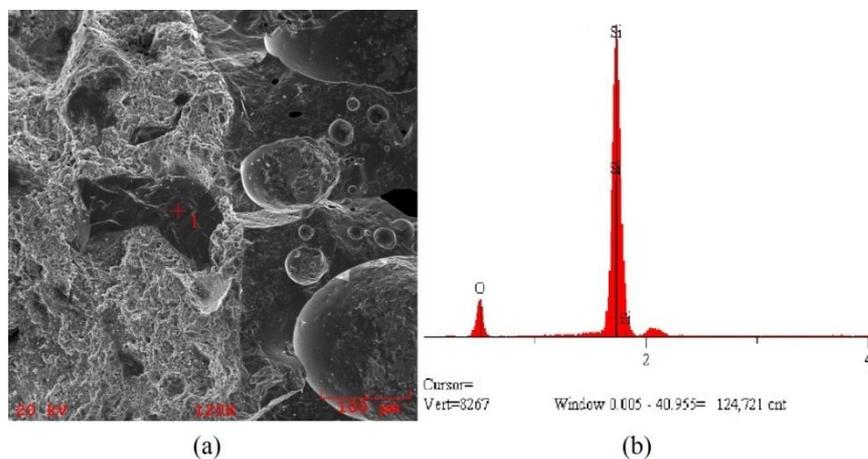
Fonte: Autoria própria (2011).

Figura 4.19- Espectro do ponto 1 e 2 da Figura 4.18(b) do concreto CLV50.



Fonte: Autoria própria (2011).

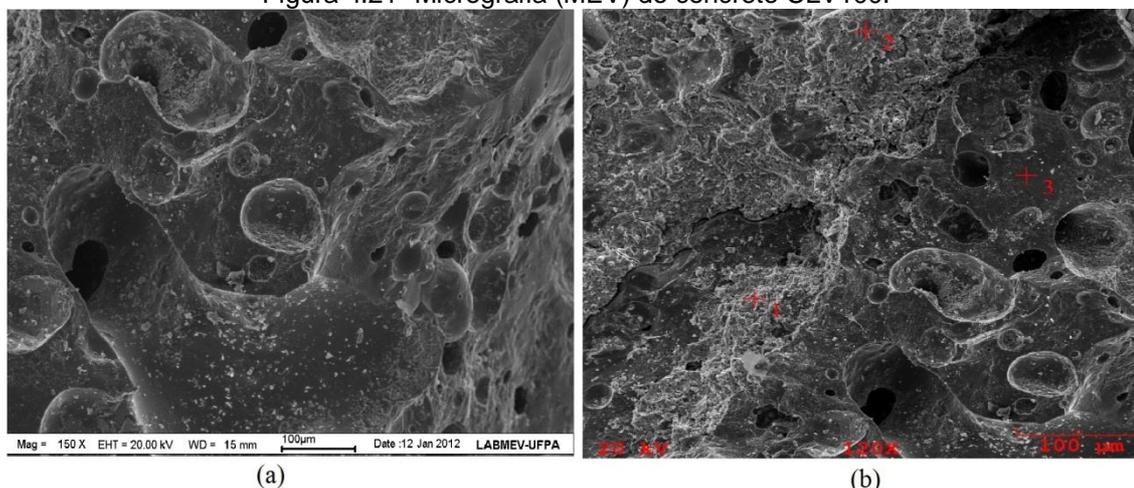
Figura 4.20- (a) Micrografia (MEV) do concreto CLV50; (b) Espectro do ponto 1.



Fonte: Autoria própria (2011).

Na Figura 4.20(a) é possível observar a presença do seixo rolado identificado pelo ponto 1, o qual demonstra-se bastante compacto, diferentemente do agregado de lama vermelha que apresenta-se altamente poroso.

Figura 4.21- Micrografia (MEV) do concreto CLV100.

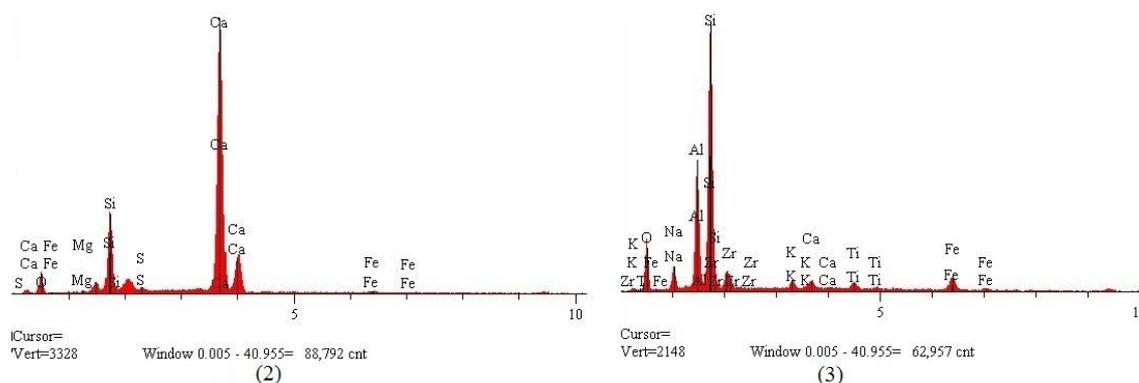


(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2011).

Figura 4.22- Espectro do ponto 2 e 3 da Figura 4.21(b) do concreto CLV100.



(2)

(3)

Fonte: Autoria própria (2011).

Na Figura 4.21(b) observa-se a presença de fissuras ou descolamentos na zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado de lama vermelha. Tal fato pode ter se dado em decorrência do grande volume de vazios presentes nessa região.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a produção de agregados sintéticos a partir do resíduo de beneficiamento da bauxita (lama vermelha) e o uso destes na produção de concretos. Os concretos produzidos encontram aplicação no setor da construção civil, na medida em que apresentaram resultados bastante satisfatórios, principalmente no que se refere à resistência.

De acordo com os objetivos pré-definidos, o programa experimental adotado mostrou-se adequado para a análise das características e propriedades dos agregados de LV e dos concretos produzidos com este material.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO DE LAMA VERMELHA

Em relação às propriedades dos concretos no estado fresco, os três grupos (CSR, CLV50 e CLV100), apresentaram trabalhabilidade, coesão e consistência adequada, permitindo assim o manuseio e moldagem dos corpos-de-prova.

Ainda em relação ao concreto no estado fresco, em nenhum dos grupos de concreto foi observado o fenômeno de segregação dos agregados e exsudação.

O concreto produzido com 100% de agregado de lama vermelha (CLV100) apresentou valores de massa específica no estado seco 13,76% abaixo dos valores apresentados no concreto de referência, produzido somente com seixo rolado, agregado comumente utilizado na região.

Os valores de resistência à compressão, tração por compressão diametral e tração na flexão do concreto produzido com 100% de agregado de lama vermelha (CLV100), foram considerados satisfatórios. No entanto, tais valores foram inferiores àqueles obtidos para o concreto de referência.

Observa-se ainda, que para os concretos produzidos com o agregado de lama vermelha, os valores de resistência à compressão nas duas idades de ensaio, mantiveram-se praticamente constantes, ou seja, a resistência medida aos 07 dias foi a mesma verificada aos 28 dias.

Os valores do módulo de deformação dos concretos produzidos com o agregado de LV foram significativamente superiores aos obtidos para o concreto de

referência. Vale ressaltar que tais valores aumentam à medida que o percentual de substituição do agregado de lama vermelha pelo seixo é aumentado.

Em relação à absorção de água por imersão, os concretos produzidos com agregado de LV, apresentaram percentuais superiores ao concreto de referências.

5.2 ESTUDOS MICROESTRUTURAIS

Por meio da análise de porosimetria por Intrusão de mercúrio (PIM), foi possível observar que a substituição do agregado convencional pelo agregado produzido em laboratório, fez com que houvesse um aumento da porosidade total dos concretos e do diâmetro dos poros capilares.

Dentre os três grupos de concreto produzidos, àquele produzido com 100% de agregado de lama vermelha, foi o que apresentou maior valor de porosidade total.

Por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada ao EDS, foi possível identificar as três fazes da microestrutura do concreto: agregado, matriz de cimento e zona de transição.

O concreto de referência apresentou-se mais compacto e com uma quantidade menor de poros, já nos concretos (CLV50 e CLV100) que para a produção utilizou-se o agregado produzido a partir do resíduo de beneficiamento da bauxita, foi possível observar uma grande quantidade de poros, na região ocupada por tal agregado.

O concreto CLV100 apresentou fissuras na zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

5.3 PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No decorrer desta pesquisa, foi possível identificar diversos aspectos relevantes a este assunto, nos quais se viu uma possibilidade de aprofundar o conhecimento ou adquirir um maior esclarecimento sobre o tema dessa dissertação. A seguir apresentam-se algumas sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros:

- a) Em relação à produção dos agregados, utilizar no processo de queima, um forno rotativo, de modo que o aquecimento ocorra de maneira homogênea;

- b) Fazer um estudo mais detalhado do agregado, realizando análises microestruturais por meio de difratometria de raios-x, MEV, e PIM, visando quantificar as fases formadas, visando compreender a influência do teor de impurezas, como metais de transição por exemplo.
- c) Substituir a biomassa utilizada para a geração de gases e formação dos poros nos agregados, no caso o carvão vegetal, por outra, que cause menos ou nenhum impacto ao meio ambiente;
- d) Fazer um estudo a longo prazo, da interação entre os componentes do concreto: agregados, cimento, aditivo, etc.
- e) Analisar propriedades referentes à durabilidade do concreto produzido com o agregado leve de LV, focando nos seguintes aspectos: desgaste superficial (por meio do ensaio de abrasão hidráulica), permeabilidade à água e aos gases, ataque por sulfatos, carbonatação, resistência à penetração de cloretos e reação álcali-agregado.
- f) Utilizar o cimento CPIIZ 32 na produção dos concretos feitos com o agregado de lama vermelha.

REFERÊNCIAS

ABAL. **Relatório da sustentabilidade da indústria de alumínio**, 2007. Disponível em: Disponível em: < www.abal.org.br>. Acesso em: 12 nov. 2010.

ALBUQUERQUE, N. G. et al. Processo de obtenção de agregados leves para concretos convencionais a partir do resíduo de lama vermelha. In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007. Bento Gonçalves. **Anais...**Bento Gonçalves: IBRACON, 2007.

ALBUQUERQUE, N. G. **Estudo das propriedades mecânicas de concretos dosados com agregados produzidos a partir de lama vermelha**. 2007. Trabalho de conclusão de curso. (Especialização em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

ALCOA. Disponível em: <<http://www.alcoa.com/brazil>> Acesso em: 10 nov. 2010.

ALUNORTE. Relatório Anual. **Relatório da Administração, 2008**.

_____. Relatório Anual. **Relatório da Administração, 2009**.

AMBROISE, J.; PÉRA, J. **Red mud, an interesting secondary raw material**. Construction & Environment, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete**. ACI – 213R-87. ACI Manual of Concrete Practice, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 35: **Agregados leves para concreto estrutural - Especificação**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. NM 67: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NM 51: **Agregado graúdo – Ensaio de Abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NM 45: **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

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

_____. NBR 8522: **Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 9833: **Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NM 52: **Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 7211: **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 7218: **Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 7222: **Concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 12142: **Concreto: determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

BERTOCCHI, A. F. et al. **Red mud and fly ash for remediation of mine sites contaminated with As, Cd, Cu, Pb and Zn**. Journal of Hazardous Materials, 2006.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Informe Mineral Pará**. Brasília, DF, 2008.

_____. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília, DF, 2009.

_____. **Sumário Mineral**. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <www.dnpm.gov.br/>. Acesso em: 21 dez. 2010.

_____. **Sumário Mineral**. Brasília, DF, 2009.

CONSTANTINO, V. L. et al. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 490-498, 2002.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com cinza da casca de arroz residual sem beneficiamento**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. **Produção e propriedade de concretos de alta resistência**. 1996. Tese (Mestre em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1996.

FAHEY, M.; NEWSON, T. A.; FUJIYASU, Y. Engineering with tailings. **Environmental Geotechnics**. Rio de Janeiro, v. 2, p. 947-973, 2002.

GOMES NETO, D. P. **Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura: estudo de caso**. 1998. Dissertação (Mestrado)-. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

HILDEBRANDO, E. A. **Aplicação do rejeito do processo Bayer (lama vermelha) como matéria-prima na indústria cerâmica estrutural**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química.) -. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 1998.

HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review, *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*, n. 146, p.359-374, 1999.

KUMAR, S.; KUMAR, R.; BANDOPADHYAY, A. T. **Innovative methodologies for the utilization of wastes from metallurgical and allied industries**. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006.

LIMA, F. S. S. **Utilização da lama vermelha e do resíduo caulínico na produção de pigmento pozzolânico para argamassas e concretos de cimento Portland**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

LIU, W.; YANG, J.; XIAO, B. Application of Bayer red mud for iron recovery and building material production from aluminosilicate residues. **Journal of Hazardous materials**, 2008.

MANFROI, E. P. **Avaliação da lama vermelha como material pozzolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MAYCÁ, J.; RECENA, F. A. P.; CREMONINI, R. A. Estudo da resistência à compressão de concretos leves produzidos com argila expandida Nacional. In: **CONGRESSO BARSILEIRO DO CONCRETO**, 51., 2009, Curitiba. Anais...Curitiba, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. CD-ROM

MINERAÇÃO RIO DO NORTE (MRN). Relatório Anual, 2008. Disponível em: <www.mrn.com.br/downloads/inform_financ.html>. Acesso em: 25 nov. 2010.

_____. Disponível em: <<http://www.mrn.com.br>> Acesso em: 3 de maio 2010.

_____. Relatório Anual. **Relatório da Administração, 2008**. Disponível em: <www.mrn.com.br/.../Relatório%20Anual/Relatório%20Anual%20200....>. Acesso em: 21 out. 2010.

PASSUELO, Alexandra et al. **Concreto: ciência e tecnologia**. 1.ed. São Paulo: G .C. Lima, 2001. v.1

PEREIRA, M. R. **Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

PINTO, L. F. **“O Para Mineral”**, **Jornal Pessoal**, Belém, 2009.

REVISTA ANEFAC. Rio de Janeiro, n 137, out. 2009

RIBEIRO, D.V; MORELLI, M. R. Estudo da viabilidade da utilização do resíduo de bauxita como adição ao cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS., 2008, Pernambuco. **Anais...** Pernambuco: CBECIMAT, 2008.

ROSSI, C. R. C. **Concretos para reparo com agregados de lama vermelha sob abrasão hidráulica**. 2009. Trabalho de conclusão de curso. (Especialização em Engenharia Civil)- Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para Pré: Fabricados Esbeltos: dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. Tese. (Doutorado em Interunidade: Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

_____. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2009.

SANTOS, M. E. et al. Argila expandida como agregado para concreto leve. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON. 1986. São Paulo. **Reunião...**São Paulo, 1986.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. Sao Paulo: E. Blucher, 1989.

SILVA FILHO, E. B. et al. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**, v. 12, n. 2, 2007.

SMITH, N. J.; BUCHANAN, V. E.; OLIVER, G. The potential application of red mud in the production of castings. *Materials Science & Engineering*, 2006.

SOUZA, J. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil**. 2010. Tese. (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia), Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

SOUZA, W. B. Estudo da adição de lama de bauxita em Polímero de Poli (Metacrilato de Metila) por meio de Polimerização em massa e moldagem em Casting. 2008. Dissertação (Mestrado) - Institutos de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008.

TSAKIRIDIS, P. E.; AGATZINI-LEONARDOU, S.; OUSTADAKIS, P. Red mud addition in the raw meal for the production of portland cement clinker. **Journal of Hazardous Materials**, 2004.

VICK, S. G. Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. **United States of America**, 1983.

VIEIRA, M. G. **Betões de elevado desempenho com agregados leves: durabilidade e microestrutura**. 2000. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2000.

VILLAR, L. F. S. **Estudo do adensamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 2002. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

YANG, J.; XIAO, B. **Development of unsintered construction materials from red mud wastes produced in the sintering alumina process**. Construction and Building Materials, 2007.

ZHANG, M.H.; GJΦRV, O.E. **Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete**. ACI Materials Journal, v.88, n.2, p. 150-158, 1991b