

Gustavo Menezes Mateus

Utilização da Pedra de Barro como Agregado Graúdo para Concretos

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Mestrado Profissional e Processos Construtivos e
Saneamento Urbano

Dissertação orientada pelo Professor Dênio Ramam Carvalho de
Oliveira



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSOS CONSTRUTIVOS E
SANEAMENTO URBANO**

**UTILIZAÇÃO DA PEDRA DE BARRO COMO AGREGADO GRAÚDO PARA
CONCRETOS**

ENG. GUSTAVO MENEZES MATEUS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano da Universidade Federal do Pará como requisito para a obtenção do grau de Mestre.

Belém/Pará

2015

UTILIZAÇÃO DA PEDRA DE BARRO COMO AGREGADO GRAÚDO PARA CONCRETOS

ENG. CIVIL GUSTAVO MENEZES MATEUS

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Processos Construtivos e Saneamento Urbano, área de concentração Estruturas, Construção Civil e Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano (PPCS) do Instituto de Tecnologia (ITEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Aprovada em 21 de Janeiro de 2015.

Dênio Ramam Carvalho de Oliveira, D.Sc. – Coordenador do PPCS

Dênio Ramam Carvalho de Oliveira, D.Sc. – Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Adelson Bezerra de Medeiros, Dr. – UFPA
(Examinador Externo)

Alcebíades Negrão Macêdo, Dr. – UFPA
(Examinador Interno)

Belém/Pará
Janeiro de 2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus que sempre me abençoou e esteve comigo em todas as etapas deste intento. Dedico também à minha querida esposa que amo muito, Isabel Cristina P. O. Mateus, aos meus filhos, Yara e Kauã, à minha mãe, Maria Antônia de Menezes Mateus (in memória) e ao meu pai, João Mateus de Matos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador, Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira; pela excelente orientação, confiança e amizade demonstrada na elaboração desta dissertação.

Aos professores da Universidade Federal do Pará que ministraram o curso de Mestrado na cidade de Rio Branco.

Ao Departamento de Estrada e Rodagem do Acre – DERACRE, na pessoa do então Diretor Marcus Alexandre Médice Aguiar, pela bolsa de mestrado concedida.

A Fundação de Tecnologia do Estado do Acre - FUNTAC, pela disponibilização do projeto, pelos equipamentos e materiais utilizados na produção da pedra de barro, pelo empréstimo das fôrmas para a confecção dos corpos-de-prova e pela realização dos ensaios físicos e mecânicos.

Aos colegas da primeira turma de Mestrado em Engenharia Civil, pela amizade, pelo conforto nos momentos difíceis e pela alegria compartilhada nestes anos de convívio.

RESUMO

O Acre convive, desde sempre, com a carência crônica de agregado rochoso para a construção civil devido a sua indisponibilidade na composição do solo do estado e pelo elevado custo de importação deste produto. Por outro lado, há a abundância de matéria-prima para a indústria cerâmica: “o barro”. Em Rio Branco, por exemplo, há grande experiência acumulada com uso de cacos de tijolos cerâmicos como agregados para concreto de edificações e pavimentação. Este trabalho objetiva apresentar um agregado para concretos obtido a partir de argila calcinada de maneira similar à utilizada na produção de artefatos cerâmicos. O novo produto permite reduzir o custo da obra na região e aumentar a qualidade das estruturas em detrimento da utilização de cacos de tijolos. São apresentados os resultados para a caracterização física e mecânica dos agregados de argila, além das propriedades mecânicas de concretos dosados com tais agregados. O resultados mostraram que a resistência dos agregados é satisfatória, assim como as propriedades mecânicas dos concretos dosados com quantidades usuais de cimento, ratificando a viabilidade técnica dos agregados de argila para concretos estruturais.

Palavra-chave: pedra de barro, agregado graúdo, concreto.

ABSTRACT

Acre state faces since a long time the chronic shortage of rock aggregate for the construction industry due to its unavailability in its soil composition and the high cost of importing of this product. On the other hand, there is plenty of raw material for the ceramic industry, "clay". In Rio Branco city, for example, there is a large experience with use of pieces of ceramic bricks as aggregate for concretes of buildings and paving. This work presents an aggregate for concrete made from clay calcined in a similar way to that used in the production of ceramic artifacts. The new product reduces the construction's costs in the region and enhances the quality of structures over the use of brick pieces. The results for the physical and mechanical characterization of the clay aggregates are shown in addition to the mechanical properties of concrete dosed with such aggregates. The results showed that the strength of the aggregates is satisfactory and the mechanical properties of the concrete dosed with usual amounts of cement confirmed the technical feasibility of the clay aggregates for structural concrete.

Keyword: stone clay, coarse aggregate, concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais APLs de cerâmica em operação no Brasil.....	9
Figura 2 – Estocagem a céu aberto	10
Figura 3 – Estocagem em galpões cobertos	11
Figura 4 – Peças de cerâmica secando ao ar livre	14
Figura 5 – Calcinação de blocos cerâmicos em forno de barro.....	15
Figura 6 – Estoque de blocos cerâmicos em uma grande empresa.....	15
Figura 7 – Fluxograma do processo de produção de produtos de cerâmica vermelha	16
Figura 8 – Diagrama granulométrico de winkler.....	19
Figura 9 – Estados físicos da argila e formula de encontrar o índice de plasticidade (IP)	21
Figura 10 – Exemplo de difratograma de raios-X	23
Figura 11 – Exemplo de análises térmicas diferenciadas em amostras de solos argilosos.	25
Figura 12 – Exemplos de curvas de análise termogravimétricas em amostras de argila.	27
Figura 13 – Modelo de curva de Bigot	29
Figura 14 – Amostras secas na estufa	45
Figura 15 – Solos secos com adição gradativa de água	48
Figura 16 – Amostra próxima ao limite de plasticidade	48
Figura 17 – Cortes dos corpos-de-prova (100mm x 15mm)	49
Figura 18 – Corpo-de-prova sendo rompido no ensaio de compressão	50
Figura 19 – Mistura das massas cerâmicas	51
Figura 20 – Extrusão das pedras de barro	52
Figura 21 – Pedras de barro armazenados para secagem.....	52
Figura 22 – Misturas dos materiais na betoneira	54
Figura 23 – Moldagem dos corpos-de-prova	54
Figura 24 – a) Moldagem do corpo-de-prova no tronco de cone; b) Retirada do tronco do cone; c) Medida do abatimento do tronco de cone	56
Figura 25 – Corpos-de-prova moldados.....	57
Figura 26 – a) Corpo-de-prova preparado para ensaiode compressão; b) Corpo-de-prova sendo rompido; c) Corpo-de-prova rompido.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Os principais setores cerâmicos, matérias-primas e processo de fabricação.	5
Tabela 2 – Principais APLs de cerâmica em operação no Brasil	9
Tabela 3 – Composição granulométrica dos produtos cerâmicos	18
Tabela 4 – Porcentagem de água necessária para que o argilomineral alcance a plasticidade	22
Tabela 5 – Valores de resistência à compressão de acordo com a massa específica aparente dos concretos	31
Tabela 6 – Processo de fabricação de agregados leves de argila expandida	33
Tabela 7 – Características de alguns agregados leves comerciais produzidos no Brasil.....	35
Tabela 8 – Relações entre a resistência à compressão e as resistências à tração por compressão diametral e à tração na flexão dos concretos leves	41
Tabela 9 – Equações para cálculo do módulo de deformação.....	42
Tabela 10 – Resumo do programa experimental	44
Tabela 11 – Ensaio químicos e físicos realizados nas matérias-primas	45
Tabela 12 – Valores do teor de umidade e dos limites de plasticidade das amostras para extrusão	49
Tabela 13 – Valores da resistência a compressão obtidas em três temperaturas de queimas diferentes	50
Tabela 14 – Características e propriedades do cimento CII-Z-32.....	53
Tabela 15 – Consumos teóricos de cimento, areia, agregado e água para a moldagem dos corpos-de-prova de concreto	59
Tabela 16 – Consumos reais de cimento, areia, agregado e água para a moldagem dos corpos-de-prova de concreto.....	54
Tabela 17 – Ensaio realizados nos corpos-de-prova de concreto	55
Tabela 18 – Resultado da análise das matérias-primas coletadas	58
Tabela 19 – Característica física do agregado graúdo utilizado no corpo-de-prova de concreto	59
Tabela 20 – Consumos de material (real), abatimento e fator água/cimento utilizado nos corpos-de-prova de concreto	60
Tabela 21 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova de concreto.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	CERÂMICA.....	3
2.2	DISTINÇÃO ENTRE PRODUTOS CERÂMICOS	4
2.3	CERÂMICA VERMELHA	6
2.3.1	Matérias-primas e etapas da fabricação de produtos de cerâmica vermelha	7
2.3.1.1	Matérias-primas.....	7
2.3.1.2	Extração da matéria-prima.....	10
2.3.1.3	Beneficiamento da matéria-prima	11
2.3.1.4	Conformação	12
2.3.1.5	Tratamento térmico e expedição	13
2.3.2	Propriedade da cerâmica vermelha.....	16
2.3.3	Características da matéria-prima	18
2.3.4	Propriedades físicas das argilas calcinadas.....	27
2.4	CONCRETO ESTRUTURAL LEVE	30
2.4.1	Tipos de agregados leves para concreto	32
2.4.2	Processo de fabricação	32
2.4.3	Propriedades dos agregados leves	33
2.4.3.1	Forma e textura superficial	33
2.4.3.2	Estrutura interna, resistência mecânica e módulo de deformação dos agregados leves.....	34
2.4.3.3	Impurezas	34
2.4.3.4	Porosidade, absorção de água e massa específica dos agregados leves	35
2.4.4	Produção dos concretos leves.....	36
2.4.4.1	Mistura e teor de umidade dos agregados.....	36
2.4.4.2	Transporte, lançamento e adensamento	37
2.4.4.3	Cura	37
2.4.5	As propriedades dos concretos leves em seu estado endurecido	38

2.4.5.1	Resistência à compressão e massa específica	38
2.4.5.2	Resistência à tração	40
2.4.5.3	Módulo de deformação	41
2.4.5.4	Retração linear de secagem.....	42
2.4.5.5	Absorção de água e porosidade aparente	43
2.4.5.6	Durabilidade.....	43
3	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	44
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	44
3.2	SELEÇÃO DAS EMPRESAS E COLETA DAS MATÉRIAS-PRIMAS	44
3.3	ENSAIOS REALIZADOS NAS MATÉRIAS-PRIMAS COLETADAS	45
3.3.1	Determinação da umidade natural.....	46
3.3.2	Limite de plasticidade – ABNT NBR 7180:1984.....	46
3.3.3	Análise granulométrica – ABNT NBR 7181:1984.....	47
3.4	CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DE ARGILA.....	47
3.5	ENSAIOS REALIZADOS NOS CORPOS-DE-PROVA	49
3.5.1	Resistência à compressão	50
3.6	PRODUÇÃO DOS AGREGADOS DE PEDRA DE BARRO.....	51
3.7	PRODUÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO.....	53
3.8	ENSAIOS REALIZADOS NOS CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO.....	55
3.8.1	Abatimento	55
3.8.2	Resistência à compressão - ABNT NBR 5739:2007	56
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	58
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS NO CONCRETO.....	58
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO.....	59
4.2.1	Consumos de material (real), abatimento e fator água/cimento	59
4.2.2	Resistência à compressão	60
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
	ANEXOS	67

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas três décadas a construção civil vem enfrentando uma onda de desenvolvimentos de suas técnicas construtivas, principalmente nos concretos estruturais. Houve uma grande evolução dos equipamentos e técnicas para análise dos concretos além do surgimento de novos materiais que têm como finalidade principal diminuir o peso geral das estruturas em concreto armado. Uma desses novos materiais que surgiu através dessa necessidade são os agregados leves.

Segundo Rossignolo e Agnesini (2002), o concreto com agregados leves é um material bastante utilizado e já consagrado na construção civil em todo o mundo. Isso concorre pelo vasto leque de aplicabilidade desse material, sendo que sua utilização está ligada a diversas áreas da construção civil, desde edificações pré-fabricadas e pontes até mesmo na construção de plataformas marítimas. Conforme Zhang & Gjørv (1991), pelo lado mecânico, a utilização dos agregados leves traz uma redução da massa específica do concreto, trazendo também dessa forma uma redução de esforço na estrutura das edificações. Já pelo lado econômico, a utilização desse material traz economia com fôrmas e cimbramento, além de diminuir os custos com transporte e montagem de construções pré-fabricadas.

Estudos sobre o concreto com agregados leves elaborados desde o ano 2000 no Laboratório de Construção Civil da Escola de Engenharia de São Carlos – USP demonstram que, segundo Santis (2012), esse tipo de matéria tem um grande potencial de utilização na produção de elementos pré-fabricados, como painéis estruturais e de vedação.

Todavia, apesar dos benefícios evidentes com a utilização de agregados leves, no Brasil, de acordo com Rossignolo (2009), há utilização desse tipo de matéria ainda é pouco, sendo que esta praticamente concentrada no estado de São Paulo e em estados vizinhos, esse fato está intimamente ligado ao fato de que a única empresa fabricante de agregados leves no país a CINEXPAN localizasse em Várzea Paulista – SP.

Entretanto, conforme Santis (2012), a única alternativa viável para discernir as técnicas de concreto com agregados leves pelo restante das regiões do país seria a produção de agregados leves de argila calcinada, utilizando a cerâmica vermelha, presente praticamente em todos os estados brasileiros. Para tanto, pegasse como base estudos referenciais preliminares de Soares et al. (1998). Estes autores indicam em seus estudos, a viabilidade da produção e utilização de agregado leve de argila calcinada, visto o grande número de fabricas

de argila calcinada vermelha espalhada pelo país, numero esse que pode ser superior a 11.000 empresas de acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (SEBRAE, 2008).

1.1 JUSTIFICATIVA

A proposta de estudo apresentada nesse projeto de pesquisa justifica-se pela necessidade de desenvolvimento de agregados leves alternativos para a confecção de concretos no país. Pesquisas preliminares que indicam a viabilidade da produção de agregados artificiais de argila calcinada de cerâmica vermelha com a possibilidade de utilizar os produtores de cerâmica vermelha (blocos e telhas) espalhados pelo país. Para produção dos agregados leves artificiais com pequenos ajustes no arranjo produtivo e de viabilizar a tecnologia do concreto leve estrutural para todo o território nacional.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa apresenta como objetivo a análise da viabilidade técnica da utilização da cerâmica vermelha para a produção de agregados leves de pedra de barro para utilização em concreto estrutural.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 é apresentada a distinção entre os produtos cerâmicos no nosso país e as propriedades dos produtos cerâmicos e suas características. O capítulo 3 apresenta os tipos de agregados leves, processos de fabricação, a produção dos concretos leves e a propriedades dos agregados e concretos leves. No capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento experimental com a seleção de empresas e coletas de matérias-primas, confecção dos corpos-de-prova e ensaios realizados. O capítulo 5 apresenta os resultados dos resultados da caracterização dos agregados e dos corpos-de-prova. O capítulo 6 apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros. Na parte final são apresentados as referências bibliográficas e os anexos dos ensaios realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CERÂMICA

De acordo com Gomes (2008), cerâmica vem do grego *keramos* que significa coisa queimada. Inicialmente é preciso que a cerâmica esteja em estado plástico para posteriormente ser moldada e cozida, dando origem assim a manufaturas utilizadas nas mais diversas áreas, desde como utensílios domésticos até como matérias utilizadas na construção civil.

A utilização da cerâmica esta intimamente ligada com o processo histórico do desenvolvimento das civilizações. De acordo com o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – SEBRAE (2008), a cerâmica é utilizada desde os primórdios da sociedade atual, a indícios que sua utilização teve inicio logo após a descoberta do fogo e que inicialmente, as peças cerâmicas eram utilizadas para guarda alimentos. Arqueólogos encontraram, na região da parte asiática da Turquia, artefatos de cerâmica datados de 5.000 a.C. o que comprova a utilização de tais manufaturas por povos pré-históricos.

Apesar da vasta utilização em todos os períodos históricos das civilizações, foi na Grécia, entre 1.000 e 330 a.C., que esse tipo de manufatura teve sua merecida importância. As cerâmicas gregas eram feitas e pintadas pelos homens e tinham como tema principal retratar as cenas de batalhas. Outra importante difusora das técnicas e utensílios cerâmicos foi a China, entre 550 e 480 a.C., que utilizavam tais objetos em ritos e cultos. Foi no período das grandes navegações, no século XV, que a utilização da cerâmica se difundiu na Europa e posteriormente no restante do mundo. Não somente os objetos cerâmicos chegaram ao Ocidente como as técnicas de sua produção foram ensinadas e utilizadas já no século XVI (SEBRAE, 2008).

No Brasil, estudos comprovam que mesmo antes da chegada dos portugueses trazendo as novas tendências europeias, uma dessas a cerâmica, já havia indícios da fabricação e utilização da mesma por parte dos indígenas há mais de 2.000 anos. Cerâmicas mais elaboradas foram encontradas na ilha de Marajó e estudos também comprovam a presença de uma cerâmica mais simples na região amazônica, há mais de 5.000 anos (SEBRAE, 2008).

No tocante a utilização de cerâmicas na construção civil há poucas informações, e as que existem são imprecisas, todavia, no que tange à cerâmica vermelha¹, as informações disponíveis relatam sua utilização no período Colonial. A partir das técnicas rudimentares trazidas pelos jesuítas que, por meio da necessidade de construir colégios e conventos utilização tais técnicas construtivas. Depois do primeiro governador geral do Brasil Tomé de Souza, houve uma grande estímulo na produção de materiais construtivos para a criação e desenvolvimento das cidades (SEBRAE, 2008).

Em 1575 há indícios do uso de telhas na formação da vila que viria a ser a cidade de São Paulo/SP. E foi a partir desse estímulo que começa a se desenvolver a atividade cerâmica de forma mais intensa, sendo as olarias o marco inicial da indústria em São Paulo. Com maior concentração nas últimas décadas do século XIX, a produção nas olarias se dava por meio de processos manuais, e em pequenos estabelecimentos, e tinham como produto final tijolos, telhas, tubos, manilhas, vasos, potes e moringas, os quais eram comercializados localmente (SEBRAE, 2008).

Foi somente em 1893 que foi fundada a primeira grande fábrica de produtos cerâmicos brasileira em São Paulo. Os fundadores eram quatro irmãos franceses naturais de Marselha na França, o nome da fábrica era Sacomam Frères, esse nome foi alterado posteriormente para Cerâmica Sacoman S.A a qual encerrou suas atividades 63 anos depois, deixando como herança as denominações “francesas” ou “marselhesas” para as telhas comumente utilizadas atualmente (SEBRAE, 2008).

Entre o final do século XIX e início do XX por causa da evolução e aperfeiçoamento das técnicas de produção empregada pelas empresas fabricantes de cerâmica, houve a grande necessidade de separar as olarias (destinadas a produção de tijolos e telhas), das “cerâmicas” (destinadas a produção de itens mais sofisticados, como manilhas, tubos, azulejos, louças, potes, talhas, etc.) (SEBRAE, 2008).

2.2 DISTINÇÃO ENTRE PRODUTOS CERÂMICOS

Por ser à base de diversos tipos de produtos, a cerâmica pode ser classificada em grupos setoriais, essa classificação leva em consideração a finalidade do produto, a natureza de seus constituintes, as características textuais da massa base, além de outras distinções cerâmicas, técnicas e econômicas. A Tabela 1 apresenta os setores cerâmicos, como também

¹ Nesse seguimento estão inclusos os tijolos furados, tijolos maciços, tabelas ou lajes, blocos de vedação e estruturais, telhas, manilhas e pisos rústicos. (BUSTAMANTE e BRESSIANI, 2000)

relaciona seus produtos e as respectivas matérias-primas que são utilizadas no processo de fabricação. Entre os grupos caracterizados na tabela supracitada, a cerâmica vermelha é a que tem o maior destaque no mercado nacional, pois englobam os tijolos, blocos, lajes, telhas e agregados leves, produtos esses que são utilizados em grande escala na construção civil.

Tabela 1 – Os principais setores cerâmicos, matérias-primas e processo de fabricação (MOTTA et al., 2001)

Classificação		Produto	Matéria-prima								Moagem via úmida Moagem via seca	Processo de conformação				Temperatura de queima (°C)									
Tipos de cerâmica	Grupo/ Setor		Plástica			Não plástica						Extrusão	Tomeiraria	Prensagem	Colagem	800	900	1.000	1.100	1.200	>1.200				
			Argila comum	Argila plástica	Caulim	Feldspato	Filito	Talco	Calcário	Quartzo												Outros			
Cerâmica silicática de base argilosa (ou tradicional)	1	Cerâmica vermelha	Blocos e lajes	P									P												
			Telhas	P				O						P	P										
			Agregados leves	P										P											
	2	Cerâmica branca	Grés sanitário		P	S	P	O		S	O	P													
			Porcelana mesa		P		P				P	P	S		O										
			Porcelana eletr.		P		P				P	P	S		O										
			Faiança		P	O		S		P	S	P			P										
	3	Revestimentos	Pisos rústicos	P	O								P												
			Pisos via seca	P								P			P										
			Azulejos		P	P			O	S		P			P										
			Pisos gresificados	O	P	S	S	P	O		S	P		O	P										
			Grês porcelânico		P	S	P		O		S	O	P		P										
Outras	4	Refratários			O					O	P														
	5	Isolantes				O				O	P														
	6	Especiais								O	P														
	7	Cimento	S						P	S	O	P													
	8	Vidro				S			S	P	P														
P	Processo ou composição principal (>20%)			S	Processo ou composição secundária (<10%)						O	Processo ou composição ocasional													

2.3 CERÂMICA VERMELHA

De acordo com SEBRAE (2008), os produtos caracterizados como cerâmica vermelha são aqueles que possuem uma cor avermelhada. Conforme Cabral Júnior et al. (2009), essa cor avermelhada deve-se ao alto conteúdo de óxido de ferro que encerram, sendo geralmente de 4%, valor que foi corroborado pelos estudos efetuados em depósitos brasileiros na região do Recôncavo Baiano. Entre os produtos que fazem parte desse grupo estão: os tijolos, blocos, telhas, tubos, lajes para forro, lajotas, vasos ornamentais, agregados leve de argila expandida e outros (SEBRAE, 2008).

De acordo com Associação Brasileira de Cerâmica – ABC existe cerca de 11.000 empresas de pequeno porte distribuídas em todo o território nacional destinada especificamente para a produção de cerâmica vermelha, sendo que o número de empregados chega a 300.000 pessoas. Juntas essas empresas geram uma produção de 70 milhões de toneladas ao ano e possuem um faturamento da ordem de R\$ 2,8 bilhões. (SEBRAE, 2008)

Todavia, os dados demonstrados acima se tornam pouco confiáveis se analisarmos o grande número de empresas desse ramo que trabalham na informalidade, dessa forma fica evidente a importância de se fazer um levantamento da real quantidade de material produzido, pois segundo um estudo realizado pela União Nacional de Construção – UNC, em 2006, aponta que 22,5% do valor adicionado ao PIB daquele ano pelo setor da construção civil foram oriundos de atividade informais (SEBRAE, 2008).

Segundo Bustamante e Bressiani (2000), “a renda originária da produção de cerâmica vermelha fica nos locais de produção, com alto significado social na criação de emprego ao propiciar a construção em geral principalmente moradias”. Entretanto, apesar da grande importância econômica nas regiões de sua implantação, de acordo com Cabral Júnior et al. (2009), o setor de produção de cerâmicas vermelhas é bastante assimétrica, pulverizado e de capital estritamente nacional. Assim predomina os pequenos empreendimentos familiares artesanais (olarias, em grande parte não incorporadas nas estatísticas oficiais), onde há uma grande deficiência de mecanização e gestão.

A questão da regionalização da produção de cerâmica vermelha tem como fator determinante o baixo valor agregado de seus produtos, ou seja, os processos sofridos entre a matéria-prima até o produto final são poucos, o que explica o baixo valor agregado no produto final. Dessa forma, é considerado inviável o transporte desses produtos para grandes distâncias o que ocasiona o surgimento de um grande número de pequenas indústrias

espalhadas por diversas partes do território nacional. Segundo informações do SEBRAE (2008), o raio médio de envio de produtos de cerâmica vermelha é de 250 km, sendo que em casos de produtos mais trabalhados como as telhas especiais, esse raio pode chegar até a 700 km. Sobre isso Motta et al. (2001) explica:

Do ponto de vista da matéria-prima, o setor de cerâmica vermelha utiliza basicamente argila comum, em que a massa é tipo monocomponente - só argila -, e pode ser denominada de simples ou natural [...] (MOTTA et al. 2001).

Pelo fato de possuir uma matéria-prima de baixo valor agregado, a grande maioria das empresas destinadas a produção de cerâmica vermelha, localiza-se próximas as grandes reservas de argila vermelha abundantes em todas as regiões do país, isso contribui para a formação de micros empresas nessas localidades.

2.3.1 Matérias-primas e etapas da fabricação de produtos de cerâmica vermelha

Entre os produtos constituídos de cerâmica vermelha, os tijolos são os que possuem maior relevância na construção civil desde os primórdios das civilizações humana. De acordo com Grun (2007), pode-se afirmar que o uso de tijolos cerâmicos data de quase cinco mil anos, dessa forma, esse material é considerado o mais antigo material ainda em uso pelo homem. Todavia, apesar de ser utilizado há bastante tempo, esse material construtivo ainda é o preferido dos usuários, visto que possui pouco valor agregado o que o torna uma solução bastante viável em relação a outros materiais construtivos que possuem a mesma finalidade. O processo de fabricação de cerâmica vermelha possui cinco etapas principais, sendo elas: coleta da matéria-prima, beneficiamento, conformação, tratamento térmico e transporte final.

2.3.1.1 Matérias-primas

Como já foi afirmado anteriormente, a principal matéria-prima para a produção de cerâmicas vermelhas é a argila. No processo de fabricação desse tipo de cerâmica, empregam-se duas ou mais argilas para a obtenção de uma massa mais adequada para a produção. De acordo com Santos (1989), argila pode ser definida como sendo uma matéria-prima natural, terrosa, de granulometria fina, que geralmente adquire certa plasticidade quando umedecido em água. Segundo Cabral Júnior et al. (2009), as argilas são constituídas predominantemente

de argilominerais (filossilicatos), sendo que seus tipos mais comuns são formados de folhas tetraédricas (T) de silício e octaédricas (O) de alumínio, podendo com menor frequência se formado de magnésio e/ou ferro. Sobre sua estrutura Cabral Júnior et al. (2009) explica:

Constituem unidades estruturadas na proporção 1:1 (TO) ou 2:1 (TOT). Além do arranjo estrutural, o espaçamento basal dessas unidades caracteriza os argilominerais dos diversos agrupamentos, destacando-se os grupos da caulinita, illita e esmectita como os mais importantes ao uso cerâmico. Com as partículas de argilominerais ocorrem outros minerais, geralmente nas frações silte ($2\ \mu\text{m}=0,002\ \text{mm} < F < 0,62\ \text{mm}$) e areia ($F > 0,62\ \text{mm}$). Nessas granulometrias maiores, o mineral mais comum e abundante é o quartzo, seguido de micas, feldspatos e minerais opacos (CABRAL JÚNIOR et al. 2009).

De um modo geral, em conformidade com a Associação Brasileira de Cerâmica – ABC (2002), as argilas ideais para o processo de fabricação da cerâmica vermelha possuía as seguintes características: fácil desagregação e permitir moldagem adequada; apresentar granulométrica fina e distribuição granulométrica conveniente (para garantir o controle das dimensões finais do produto); possuir teor de matéria orgânica que possa conferir, juntamente com a granulometria, boa plasticidade e resistência mecânica suficiente para evitar deformações e permitir o manuseio das peças cruas; apresentar baixo (ou nenhum) teor de carbonatos, sulfatos e sulfetos. Conforme apresenta a Tabela 2 e demonstrado na figura 1 os principais Arranjos Produtivos Locais – APLs² de argila em operação no Brasil.

² Arranjos Produtivos Locais são aglomerações de empresas, localizadas em um mesmo território, que apresentam especialização produtiva e mantêm vínculos de articulação, interação, cooperação e aprendizagem entre si e com outros atores locais, tais como: governo, associações empresariais, instituições de crédito, ensino e pesquisa. (Associação Brasileira de Cerâmica – ABC, 2002)

Tabela 2 – Principais APLs de cerâmica em operação no Brasil
(CABRAL JÚNIOR et al., 2009)

Rio Grande do Sul		São Paulo		Rio Grande do Norte	
1	Santa Catarina	23	Itu	41	Parelhas
2	Pelotas	24	Tambaú	42	Goianinha
3	Santa Maria	Rio de Janeiro		43	Açu
4	Lajeado	25	Campos dos Goytacazes	Ceará	
5	Feliz	26	Itaboraí	44	Russa
6	Porto Alegre	27	Três Rios	45	Calcaia
Santa Catarina		Minas Gerais		Maranhão	
7	Canelinha	28	Governador Valadares	46	Timon
8	Pouso Redondo	29	Igaratinga	Pará	
9	Criciúma	30	Sete Lagoas	47	São Miguel do Guama
Paraná		31	Embu	48	Santarém
10	Curitiba	32	Monte Carmelo	Rondônia	
11	Prudentópolis	33	Uberlândia	49	Porto Velho
12	São Carlos do Ivaí	34	Ituiutaba	Acre	
13	Londrina	Espírito Santo		50	Rio Branco
14	Foz do Iguaçu	35	Itapemirim	Mato Grosso	
São Paulo		36	Colatina	51	Várzea Grande
15	Panorama	Bahia		Mato Grosso do Sul	
16	Penápolis	37	Recôncavo	52	Três Lagoas
17	Ourinho	38	Caetité	53	Rio Verde
18	Bragança Paulista	Pernambuco		54	Campo Grande
19	Tatuí	39	Paudalho	Goiás	
20	Rio Claro	Paraíba		55	Anápolis
21	Mogi Guaçu	40	Juazeirinho		
22	Barra Bonita				



Figura 1 – Localização dos principais APLs de cerâmica em operação no Brasil
(CABRAL JÚNIOR et al., 2009)

Todavia, certamente existe um numero ainda maior de APLs em funcionamento no Brasil. De acordo com Cabral Júnior et al. (2009), há uma grande defasagem de informações oficiais sobre essas aglomerações. Isso ocorre principalmente por causa das características empresariais desse setor, cuja produção é encarada pelo empreendedor como apenas mais uma etapa da produção de cerâmica.

2.3.1.2 Extração da matéria-prima

Como geralmente as empresas se localizam próximas às jazidas onde é extraída a argila, o percurso entre a as jazidas e a empresas produtora é muito curto. Após a extração as matérias-primas são armazenadas, sendo que, geralmente nas pequenas empresas essa armazenagem ocorre a céu aberto como mostra a Figura 2. Já nas grandes empresas essa estocagem ocorre em galpões cobertos, como mostra a Figura 3. Como o processo de fabricação normalmente necessita de mais de um tipo de matéria-prima, existem diferentes locais de armazenamento, para que dessa forma não aja mistura de materiais durante esse processo.



Figura 2 – Estocagem a céu aberto (SANTIS, 2012)



Figura 3 – Estocagem em galpões cobertos (SANTIS, 2012)

A extração das materiais primas utilizadas na fabricação das cerâmicas é feita utilizando-se maquinário pesados, sendo que os mais comuns são as retroescavadeiras ou equipamentos similares com a mesma finalidade. Como a matéria-prima encontrasse nas jazidas, a extração normalmente ocorre a céu aberto. Sobre o processo de extração Cabral Júnior et al. (2009) afirma:

[...] são lavrados principalmente por escavadeiras hidráulicas sobre esteiras e, em alguns casos, por carregadeiras sobre rodas, podendo ainda ser auxiliadas por carregadeiras de esteiras e tratores sobre rodas. Estes equipamentos são amplamente empregados para produções de pequeno a médio porte. Minas com produções elevadas podem requerer equipamentos de grande porte (CABRAL JÚNIOR et al., 2009).

Ainda segundo Cabral Júnior et al. (2009), nessa etapa de extração, as empresas devem buscar soluções para que esse processo de coleta seja um processo mais racional e que respeite todas os parâmetros ambientais para que dessa forma não venha ocorrer a infertilidade do solo onde são extraídas as materiais primas. Para tanto, é de fundamental importância, utilizar novas tecnologias de coleta de matéria-prima que tenham como finalidade monitorar as jazidas para que haja um maior controle de esgotamento e reposição do solo arável.

2.3.1.3 Beneficiamento da matéria-prima

Nesse processo compreende as etapas de estocagem, moagem, dosagem, controle de umidade, desintegração e laminação. Conforme Cabral (2005) um fato interessante que ocorre

quando a estocagem é feita a céu aberto. O processo de intemperismo (sol e chuva) traz um benefício bastante importante, pois com esse processo, há uma melhora na homogeneidade e aumenta a facilidade de se trabalhar com a argila.

A moagem ou britagem ocorre quando as matérias-primas são “duras”, esse é um método de cominuição que tem como finalidade diminuir o tamanho das partículas, ou seja, transformá-las em pó. A etapa de dosagem consiste em abastecer o processo de fabricação com as dosagens corretas de matérias-primas, respeitando as devidas proporções de cada matéria, esse processo é basicamente feito por volume de material ou por peso.

Na dosagem por volume de material, os volumes são as “conchas” da pá-carregadeira. Para esse método é de fundamental importância que as matérias-primas individuais estejam armazenadas em lotes separados. Por outro lado, a dosagem por peso pode ser feita através de esteira rolante, onde as matérias-primas são dosadas através de um caixão alimentador com Fundentes Argilas Quartzos registro regulável sobre uma esteira aferida (é preciso verificar o peso dosado por minuto), ou por meio de balanças eletrônicas. Após o processo de dosagem, inicia-se a etapa de desintegração. Nessa etapa, os torrões maiores (até 30 cm), que porventura possam estar presentes nas argilas, são desmanchados e o solo fica pronto para a mistura.

Para o processo de mistura, pode ser necessário o acréscimo de água, para que dessa forma a argila fique com uma maior plasticidade e atingir um teor de umidade que propicie a fabricação das peças cerâmicas. Conforme Santis (2012), “geralmente nessa etapa, mistura-se um solo “gordo”, ou seja, com muita matéria orgânica e conseqüentemente com alta plasticidade com um solo “magro”, rico em quartzo e de baixa plasticidade”. Após esse processo de mistura, a massa gerada no processo anterior para pelo processo de homogeneização, feito manualmente ou por pás carregadeiras. Após o processo de homogeneização, para torna a massa ainda mais homogênea a mesma passar pelo processo de laminação, que consiste em “amassar” a mistura, ou seja, comprimi-la.

2.3.1.4 Conformação

A conformação é a terceira etapa do processo de fabricação da cerâmica. Compreende as etapas de extrusão e corte. Nessa etapa da fabricação, a mistura passará de uma massa disforme para uma peça com um formato definido. Segundo Grun (2007), a extrusão é método de conformação bastante empregado pelas empresas cerâmicas, onde a

massa plástica rígida (teor de umidade entre 18 e 24%), formada nos processos anteriores de produção, é “empurrada” através de uma boquilha, para formar assim uma barra de seção constante. Esse tipo de processo é utilizado na produção de perfis cerâmicos complexos como tijolos e capas para lajes. A máquina mais utilizada nesse processo é uma extrusora de vácuo, também conhecida com “maromba”. Essa máquina possui um caracol de forma helicoidal, que vai empurrando a massa, que é cortada em tamanhos pré-determinados, essa máquina confere boa homogeneização à massa.

Segundo Cabral (2005) ainda existe outros sistemas para extrusão, pistão e os cilindros. A extrusão a pistão confere grande uniformidade de velocidade e pressão na saída da massa, todavia, não pode ser utilizado à vácuo pois não tem fluxo contínuo. Já a extrusão com cilindros apresenta diferença de velocidade e pressão na seção de saída da massa e dessa forma não confere boa homogeneização da mistura, entretanto, por apresentar fluxo contínuo de alimentação, permite sua utilização à vácuo.

2.3.1.5 Tratamento térmico e expedição

Após os processos de extração, beneficiamento e conformação, inicia-se o processo de tratamento térmico das peças. É nessa etapa que as peças são submetidas ao efeito do aumento de temperatura. De acordo com Santis (2012) na produção das telhas cerâmicas, a processo de tratamento térmico é precedido por uma prensagem das peças, o que as torna mais compactas e homogêneas. O processo de tratamento térmico é dividido em duas fases, a secagem e a queima.

Entre os processos de fabricação, a secagem é a que necessita de um maior controle e atenção. Conforme Vieira et al. (2003a), o objetivo geral da secagem é o de eliminar a água, que foi utilizada no processo de conformação, água essa necessária para a obtenção de uma massa plástica. Pelo fato das peças cerâmicas possuírem uma complexidade de formas, o processo de conformação utiliza uma quantidade relativamente alta de água, entre 16% e 26% dependendo das matérias-primas utilizadas. Dessa forma, o processo de secagem deve ser acompanhado com muito cuidado. Santis (2012) explica que o processo de secagem pode ser feito em estufas, onde é o usado o próprio forno de queima (que serve como estufa) ou em galpões aberto, ao ar livre, o que ocorre na maioria das pequenas empresas, conforme mostra a Figura 4.



Figura 4 – Peças de cerâmica secando ao ar livre (SANTIS, 2012)

Quando a empresa utiliza a secagem em estufa, segundo Cabral (2005) é de fundamental importância a análise da curva de *Bigot*³ das argilas, para que dessa forma seja possível conhecer o momento em que se é permitido a aceleração da secagem, sem causar danos nos produtos finais. Após o processo de secagem, o produto deve ter resistência suficiente para possibilitar a manipulação e o transporte até o local da queima do corpo cerâmico Soares et al. (1998).

Após o processo de secagem, as peças partem para o processo de calcinação (queima). De acordo com Santis (2012), a calcinação é feita em fornos tipo túnel – em grandes empresas – ou em fornos de barro, sem controle preciso de temperatura – o que acontece normalmente em pequenas empresas. A Figura 5 mostra a calcinação de blocos de cerâmica vermelha em um forno de barro.

³ Bigot é uma representação gráfica da percentagem de água de conformação em função da retração de secagem. O conhecimento desta curva auxilia no estabelecimento de um ciclo de secagem. (VIEIRA et al. 2003a).

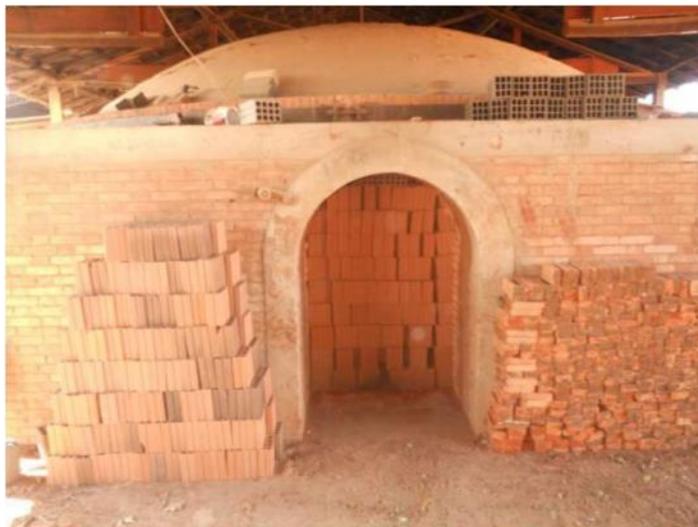


Figura 5 – Calcinação de blocos cerâmicos em forno de barro (SANTIS, 2012)

De acordo com Cabral (2005) apud Santis (2012), a calcinação é a operação fundamental no processo de fabricação de uma cerâmica, pois é nesse processo que se define as características de cada produto cerâmica, já que é nesse processo que essas peças sofrem transformações físico-químicas que alteram suas propriedades mecânicas.

Depois do processo de queima, as peças cerâmicas passam pelo processo de inspeção, que na maioria das vezes é visual. Logo após, as peças são encaminhadas para o estoque e por fim à expedição. Segundo Santis (2012) nesse processo final as grandes empresas são mais organizadas e bem dimensionadas em relação as pequenas, conforme mostra a Figura 6.



Figura 6 – Estoque de blocos cerâmicos em uma grande empresa (SANTIS, 2012)

Por fim, através da Figura 7 e possível verificar o resumo de todo o processo de fabricação de cerâmica vermelha.

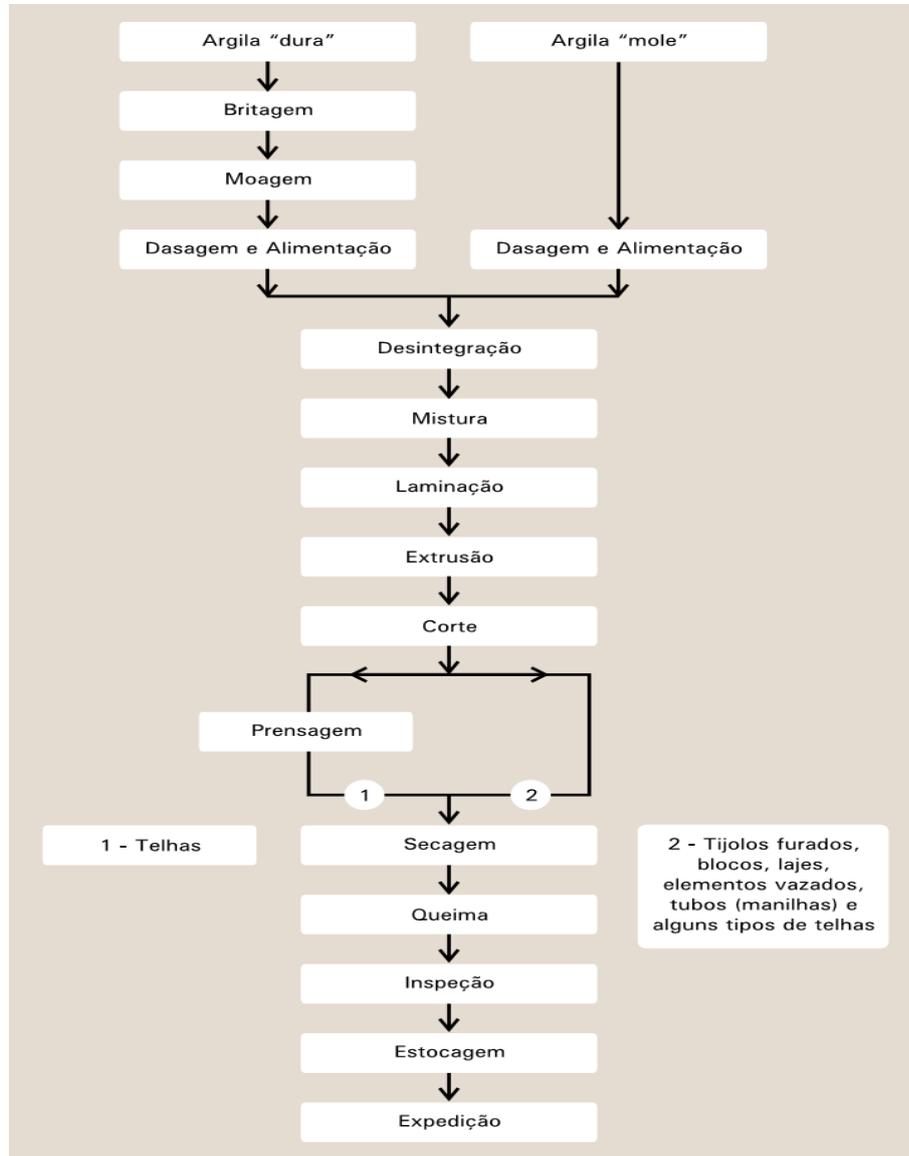


Figura 7 – Fluxograma do processo de produção de produtos de cerâmica vermelha (SEBRAE, 2018)

2.3.2 Propriedade da cerâmica vermelha

Por se tratar de um produto com uma especificação determinada e que dessa forma precisa manter um padrão normativo, e de fundamental importância conhecer as propriedades da cerâmica vermelha. Sua plasticidade, o teor de umidade, a absorção de água e a temperatura de queima ideal. De acordo com Grun (2007), por se tratar de uma matéria-prima

muito heterogênea, a constituição e as características do produto cerâmico dependem da natureza e da quantidade dos minerais ou compostos químicos presente em sua composição. Outros parâmetros que são próprios da matéria-prima como a granulometria, o comportamento térmico e o comportamento em presença de água. Essa heterogeneidade é fruto de um baixo nível de controle de sua extração, dessa forma, além de apresenta diversos tamanhos de grãos de partículas, essa matéria-prima também apresenta muito material orgânico e impureza. Sobre isso Grun (2007) afirma:

As matérias-primas empregadas na fabricação de peças cerâmicas, ou seja, as argilas são compostas normalmente por diferentes espécies mineralógicas que se misturaram durante o processo de formação. Devido a este fator, suas propriedades dependem da natureza dos minerais presentes, do seu estado de degradação e de suas proporções (GRUN, 2007).

Conforme Santis (2012), para o processo de análise das propriedades da cerâmica vermelha são utilizados vários tipos de ensaios. Esses ensaios estão divididos em dois grandes grupos: aqueles que são feitos na matéria-prima, antes da calcinação, e aquelas nas peças cerâmicas, após a calcinação. Segundo Grun (2007), caracterizar a matéria-prima utilizada é conhecer a variabilidade de suas propriedades, utilizando-se de técnicas comuns (como as usadas para medir propriedades físicas e mecânicas) ou mais sofisticadas (como é o caso da difração de raios-X).

Os ensaios realizados na matéria-prima tem como finalidade determinar as características envolvidas no processo de produção de produtos cerâmicos, com o objetivo torna a utilização dessa matéria-prima mais eficiente, obtendo assim as melhores configurações de misturas para a produção. Existem diversas técnicas que podem ser utilizadas para caracterização de argilas, as mais usuais são: análise granulométrica, determinação da umidade natural, determinação dos limites de consistência (limite de plasticidade e de liquidez), análise química (espectrometria e fluorescência de raios-x), análise térmica diferencial, análise termogravimétrica e difração de raios-x.

Já os ensaios realizados nas peças cerâmicas, de acordo com Santis (2012), têm como função determinar e analisar as características e propriedades das peças de cerâmicas vermelha após o processo de calcinação quando submetidas à diferentes solicitações, comparando-se com parâmetros normativos mínimo para cada tipo de produto de cerâmica vermelha.

2.3.3 Características da matéria-prima

De acordo com Grun (2007) *apud* Santis (2012), as propriedades e as características dos produtos cerâmicos dependem basicamente da quantidade mineral presentes em suas estruturas, essa composição determinar fatores como resistência a abrasão, durabilidade, resistência à água e plasticidade de sua massa.

Dessa forma, fica evidente a necessidade de se realizar estudos e análises das características das matérias-primas utilizadas para a fabricação de produtos cerâmicos. E essas características podem ser obtidas por meio das seguintes análises:

a. Análise granulométrica

De acordo com Grun (2007) a análise granulométrica consiste na determinação dos tamanhos das partículas que constituem as amostras. Dessa forma, com essas análise é possível determinar qual a quantidades de cada uma das matérias que estão presente dentro de cada amostra. Como se tratar de uma matéria prima que exigir uma homogeneização eficiente, é de fundamental importância determinar as composições granulométricas ideais ou mais próximas de ideais para cada tipo de utilização da peça cerâmica. Para determinar a composição granulométrica de uma massa cerâmica⁴ através da utilização de diversos tipos de materiais, deve-se utilizar o diagrama de winkler. Conforme Santis (2012), o diagrama de winkler determina a melhor composição granulométrica para a produção de cada um dos diferentes tipos de produtos cerâmicos, como apresenta na Tabela 3 e mostra na Figura 8.

Tabela 3 – Composição granulométrica dos produtos cerâmicos (PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997)

Regiões	Composição granulométrica (%)		
Tipos de produto	2µm	2 a 20 µm	20 µm
Materiais de qualidade com dificuldade de produção	40 a 50	20 a 40	20 a 30
Telhas, capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	25 a 55

⁴ Massa cerâmica corresponde a um tipo de matéria-prima ou à mistura de diferentes materiais primas, acrescidos de água para a conformação. (SANTIS, 2012)

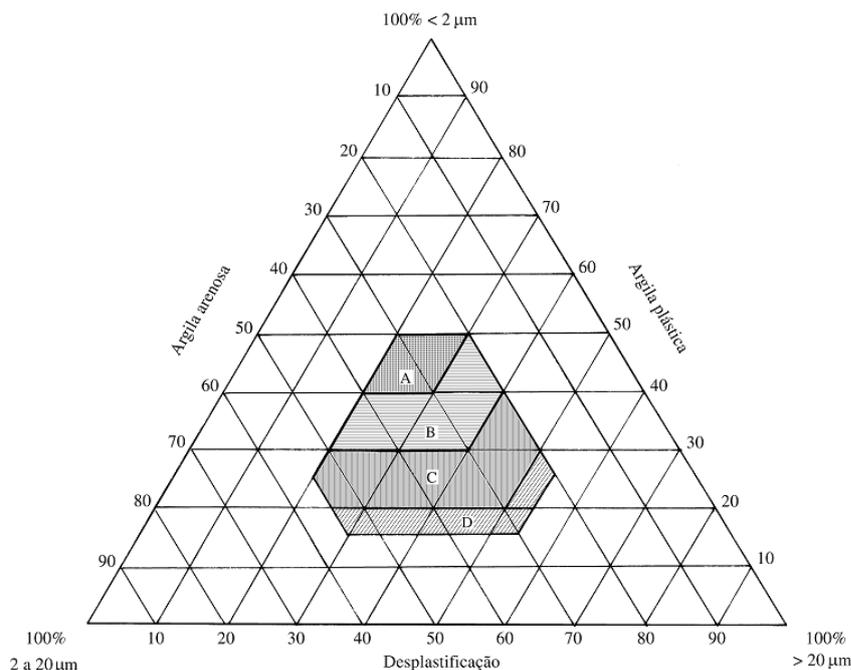


Figura 8 – Diagrama granulométrico de Winkler (PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997)

De acordo com Pracidelli e Melchiades (1997), as argilas que apresentam uma granulometria muito fina, com diâmetro dos grãos menores que 2 µm, tem como característica uma boa plasticidade, além de uma alta resistência mecânica a seco é após a calcinação, todavia necessidade de uma maior quantidade de água para desenvolver completamente essa plasticidade. Além de uma maior quantidade de água, em razão do alto grau de compactação desse tipo de argila, essa água tem dificuldade de ser eliminada no processo de secagem. Dessa forma para esse tipo de composição, é muito importante que o processo de secagem deva ser longo, com aquecimento lento no início.

Nesse sentido, de acordo com Pérez et al. (2010) apud Santis (2012), para que a massa destinada a produção de peças cerâmicas tenha uma composição ideal é de suma importância que ela não seja constituída apenas de solos com granulometria muito fina, pois por causa da grande quantidade de água utilizada, fica difícil o processamento e a queima dos produtos cerâmicos.

Dessa forma, fica evidente que o ensaio granulométrico tem uma grande importância no processo de análise da matéria-prima, pois através dele pode-se conhecer as quantidades de cada material presentes no solo utilizado e com isso determinar qual o melhor processo para alcançar mistura adequada.

b. Determinação da umidade natural

Esse ensaio serve para determinar a umidade natural do solo. Esse é um método simples que não necessita de conhecimento amplo e nem de máquinas sofisticadas. Conforme Santis (2012), primeiro é feita uma pesagem do solo úmido (“in natura”) e depois é feita essa mesma pesagem após o processo de secagem. A umidade do solo dá-se pela diferença de peso entre a pesagem inicial e a final. Esse estudo é importante para determinar a quantidade de água existente no solo antes da conformação. Dessa forma, é possível conhecer a quantidade de água necessária para a conformação a partir do limite de plasticidade ou de liquidez de cada amostra de solo.

c. Limites de consistência

De acordo com Santis (2012), esse ensaio tem como finalidade medir a plasticidade do material, ou seja, a capacidade de um material ou mistura de materiais de se deformarem, após a aplicação de uma determinada força e de manterem deformadas quando da retirada dessa força. O índice de plasticidade é obtido pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Esses dois limites são mensurados pelas Normas Brasileiras NBR 6459 (ABNT, 1984)⁵ e NBR 7180 (ABNT, 1984)⁶, respectivamente.

Conforme Santis (2012), a plasticidade das argilas utilizadas na fabricação de cerâmica é resultado das forças de atração entre as partículas de argilominerais e das partículas de água. Esse processo ocorre quando tem água cobrindo toda a superfície da argila, facilitando assim, o deslizamento das placas umas sobre as outras, quando da aplicação de uma força tangencial.

De acordo com Vieira et al. (2003a), os limites de consistência, ou limites de Attenberg⁷ são classificados em limite de plasticidade (LP) e limite de Liquidez (LL) e, conhecendo-se esses limites, obtém-se o Índice de plasticidade (IP) da amostra. Segundo Greco (2008), “um solo argiloso, dependendo de seu teor de umidade, pode apresentar características iguais às de um líquido ou de um sólido. Entre esse dois estados limites, o solo

⁵ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459/1984)

⁶ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459/1984)

⁷ Foram definidos pelo Eng. Atterberg, em 1908, para caracterizar as mudanças entre os estados de consistência. (GRECO, 2008)

passa por um estado plástico e por um estado semi-sólido. São os estados de consistência do solo”. Isso pode ser mostrado na Figura 9.

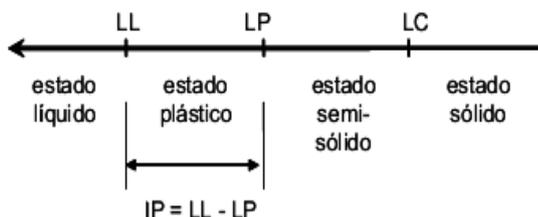


Figura 9 – Estados físicos da argila e fórmula de encontrar o índice de plasticidade (IP) (GRECO, 2008)

Ainda segundo Greco (2008), o Limite de Liquidez (LL) é o teor de umidade que indica a passagem do estado plástico para o estado líquido. Esse limite está relacionado com a capacidade do solo em absorver água. Já o Limite de Plasticidade (LP) é o teor de umidade que indica a passagem do estado semi-sólido para o estado plástico.

Conforme Pérez et al. (2010), os valores adequados para a moldagem por extrusão de peças cerâmicas são de 15% a 25% para o Limite de Plasticidade e de 10% a 35% para o Índice de plasticidade, sendo que as amostras com índice de plasticidade superior a 15% podem ser classificadas como materiais altamente plásticos.

Materiais que apresentam um alto limite de plasticidade necessitam de uma maior quantidade de água para serem estruturadas, com isso, o processo de secagem tornasse mais demorado e problemático, aumento dessa forma o risco de defeitos nas peças cerâmicas. Todavia, matérias-primas que possuem um baixo índice de plasticidade necessitam de pouca água para serem moldados. Nesse sentido, o problema deixa de ser na secagem e passa a ocorrer na calcinação, pois o tempo de queima dessas peças deve ser reduzido, pois do contrário as peças podem apresentar defeitos estruturais. Conforme Santos (1989), a plasticidade das massas cerâmicas dependerá das características dos diversos grupos de argilominerais existentes, como apresenta na Tabela 4.

Tabela 4 – Porcentagem de água necessária para que o argilomineral alcance a plasticidade (SANTOS, 1989)

Argilomineral	Água de plasticidade (%)
CAULINITA	8,9 a 56,3
ILITA	17,0 a 38,5
ESMECTITA	82,9 a 250

Sobre a plasticidade das argilas Pracidelli e Melchiades (1997) afirmam:

As argilas plásticas (denominação industrialmente por “argilas gordas”) apresentam granulometria muito fina, isto é, grãos abaixo de 2 μ m. Como consequência, o processamento de uma composição contendo excessivamente este tipo de argila torna-se complicado. Para facilitar o processo de fabricação, são introduzidas outras argilas (denominadas por “argilas magras”), que apresentam um maior teor de impureza misturado aos argilominerais, reduzindo a plasticidade da massa [...], há necessidade de se fazer uma mistura entre estas argilas, juntamente com os materiais não plásticos moídos (PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997).

De acordo com Santis (2012), o método mais eficiente para a eliminação do excesso de água nas argilas, por causa de alto grau de compactação, seria a utilização de desplastificantes. Esse desplastificante deve possuir granulometria acima de 60 μ m. Entre os mais utilizados estão:

- Areia (granulometria entre 50 μ m e 500 μ m)
- Chamoto (granulometria entre 80 μ m e 800 μ m)
- Pó de carvão

Todavia, para o processo de desplastificação é de fundamental importância o conhecimento sobre a granulometria das matérias-primas utilizadas.

d. Difração de raios-X

De acordo com Grun (2007), o ensaio de difração de raios-X, possibilita a identificação dos minerais presentes na matéria-prima, além de permite também estudar as características cristalográficas destes minerais. O equipamento responsável pela difração de raios-x é basicamente um tubo emissor de raios-X, uma câmara circular onde se situa a amostra (goniômetro) e um detector que recebe os raios difratados. Conforme Santos (1989)

apud Santis (2012), os raios-X entram em contato com a amostra de matéria-prima colocada sobre uma placa de apoio. Esses raios entram em contato com a amostra e se difratam com uma angulação até atingirem um contador Geiger. O contador registra o ângulo Θ e as difrações correspondentes a este Θ .

Segundo Grun (2007) a difração de raios-X tem a vantagem de que o difratograma apresenta um número grande de picos, o que facilita a identificação dos argilominerais presentes na amostra, principalmente no caso de misturas onde pode haver superposição de alguns picos, mas nunca de todos. Na Figura 10 é possível verificar picos claros que indicam a presença de caulinita (C) e quartzo (Q), com um pico muito acentuado próximo a 27° .

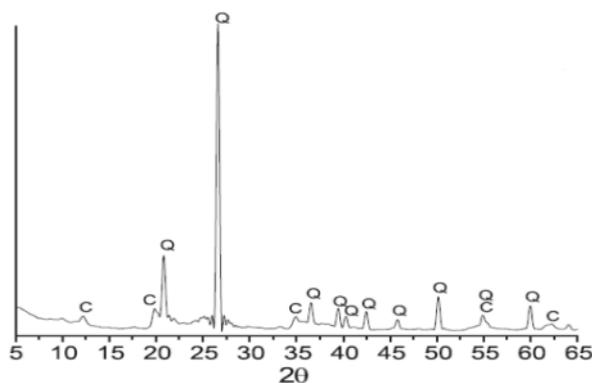


Figura 1 – Exemplo de difratograma de raios-X (VIEIRA et al. 2003b)

e. Análise química

Conforme Grun (2007), além das análises granulométrica, a análise química das substâncias presentes na matéria-prima dos produtos cerâmicos é fundamental para que se possa produzir uma massa de boa qualidade. Essa análise química fornece os percentuais de óxidos presentes e também os valores de perda no processo de calcinação. Ainda segundo Grun (2007), apesar do nome, a análise química pode ser realizada por meio de métodos físicos ou químicos. Os métodos físicos podem ser realizados através de espectrofotometria ou ainda fluorescência de raios-X. Já os métodos químicos são feitos através de reações de precipitação seletiva e reações de formação de complexos corantes.

Todavia, de acordo com Cabral (2005) entre os métodos para à análise química dos componentes presentes na matéria-prima, a espectrometria de fluorescência de raios-X é a mais eficiente, pois este método consegue realizar uma análise química menos complexa e mais rápida. Isso por que ela elimina a etapa da fusão e insolubilização da sílica, seguida por

separação dos elementos. De acordo com a interpretação de uma análise química de uma matéria-prima argilosa pode ser descrita da seguinte forma:

- **Óxido de sódio (Na₂O) e potássio (K₂O):** são substâncias fundentes e estão presentes geralmente na forma de feldspatos, são fundentes e conferem resistência mecânica quando sintetizados entre 950 e 1000°C; (GRUN, 2007).

- **Óxido de cálcio (CaO) e magnésio (MgO):** são agentes fundentes e sua presença nas massas cerâmicas tendem a diminuir a refratariedade das peças, indicam a presença de calcita, dolomita e massas calcárias que requerem moagem e temperaturas desinterização aproximadamente a 1100°C; (GRUN, 2007).

- **Sílica ou óxido de silício (SiO₂):** indica a presença de silicatos e sílica livre. Os silicatos são os argilominerais, as micas e os feldspatos. A sílica livre corresponde ao quartzo, opala, ágata e calcedônia; (GRUN, 2007).

- **Alumina ou óxido de alumínio (Al₂O₃):** está em sua maior parte combinada, formando os argilominerais, normalmente a caulinita. (SANTOS, 1989);

- **Óxido de ferro (Fe₂O₃):** de acordo com Grun (2007) é essa substância que é responsável pela coloração vermelha ou amarelada na maioria das argilas. As que não contem óxido de ferro em sua matéria-prima possuem uma cor branca. O óxido de ferro reduz a plasticidade, mas também diminui a retração e facilita a secagem. Segundo Bitencourt (2004), essa substância também diminui a resistência mecânica, mas o pouco que funde na sinterização proporciona dureza ao vidrado.

- **Óxido de titânio (TiO₂):** de acordo com Santos (1989), essa substância esta presente é praticamente todos os tipos de argilas, sendo normal dá-se em argilas sedimentadas. Sua característica principal é que desvia a cor para um tom acinzentado;

- **Óxido de enxofre (SO₃):** de acordo com Grun (2007) essa substância pode indicar a presença de gesso;

- **Óxido de manganês (MnO₂):** Grun (2007) afirma que a presença dessa substância altera a cor da massa cerâmica para marrom;

- **Carbonatos:** Segundo Grun (2007) essa substância ajuda no branqueamento das peças, diminuem a expansão e aumentam a porosidade;

- **Perda ao fogo:** conforme Grun (2007) é a diminuição de peso da peça cerâmica já calcinada, até um valor constante, que indica uma perda de massa devido ao aumento de temperatura. Essa análise indica o teor de matéria orgânica presente na argila e a quantidade

de gás e vapor que são formados durante o aquecimento e queima das peças cerâmicas, resultantes da decomposição dos carbonatos.

f. Análise térmica

Conforme Santos (1989), esse método de análise tem como finalidade observar as reações endotérmicas ou exotérmicas. Para tanto, a peça cerâmica é aquecida, em velocidade constante, juntamente com uma substância térmica inerte (geralmente o óxido de alumínio-alfa), registrando assim, as diferenças de temperatura entre o padrão inerte e a argila em estudo.

No Brasil, segundo Grun (2007), o método utilizado é o da Análise Térmica Diferenciada (ATD). De acordo com Santos (1989) esse método visa principalmente à identificação dos argilominerais presente. Esse método é tradicionalmente utilizado nas argilas plásticas para uso em cerâmica vermelha.

A Figura 11 mostra as transformações ocorridas na amostra quando submetidas a altas temperaturas. De acordo com Grun (2007) para cada troca ocorre um pico no gráfico, que de acordo com sua direção e temperatura de ocorrência, pode-se identificar a transformação ocorrida na amostra.

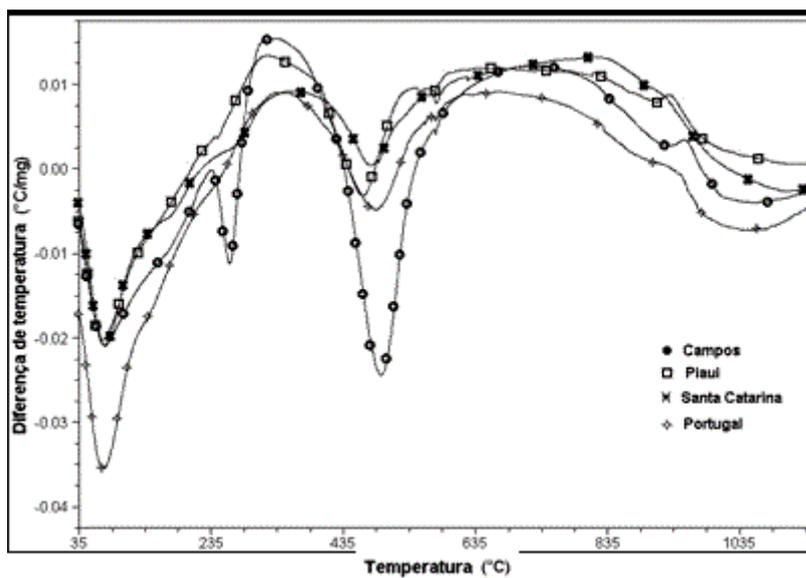


Figura 2 – Exemplo de análises térmicas diferenciadas em amostras de solos argilosos (VIEIRA et al., 2003b)

Conforme Oliveira e Marganha (2006) as reações ocorridas no método de análise térmica diferenciada constituem, as seguintes conversões físicas e químicas:

- Até 100°C: ocorre a eliminação da água livre não eliminada totalmente no processo de secagem;
- Até 200°C: ocorre a eliminação da água coloidal, que permanece intercalada entre as pequenas partículas da argila;
- De 350 a 650°C: ocorre a combustão das substâncias orgânicas contidas na massa cerâmica;
- 570°C: ocorre a rápida transformação do quartzo;
- Acima de 700°C: ocorrem reações químicas da sílica com o a alumina, formando sílico-aluminatos complexos que dão a massa cerâmica suas características de dureza, estabilidade, resistência física e química;
- De 800 a 950°C: ocorre a decomposição dos carbonatos e o surgimento do CO₂;
- Acima de 1000°C: os sílico-aluminatos que estão em forma vítrea começam a amolecer, assimilando as partículas menores e menos fundentes, dando ao corpo maior dureza, compatibilidade e impermeabilidade. (SANTIS, 2012).

De acordo com Santos (1989), a análise térmica é importante por que é através dela que é possível determinar as transformações que ocorrem com a massa cerâmica nas diferentes temperaturas.

g. Análise termogravimétrica (TG)

Conforme Grun (2007), esse tipo de análise tem a finalidade de complementar a análise térmica diferencial. Da mesma forma que ocorre na análise térmica, da termogravimétrica, as amostra são aquecida em uma velocidade constante, o diferencial é que nesse tipo ocorre a distinção entre as reações em que ocorre perda ou não de massa.

Sobre a análise termogravimétrica, Santis (2012) afirma que:

[...] a análise termogravimétrica não detecta transformações polimórficas (quartzo-alfa em quartzo-beta) pois, este tipo de transformação não envolve perda ou ganho de massa e sim uma perda ou ganho de energia (SANTIS, 2012).

A Figura 12 mostra um exemplo de gráfico de análise termogravimétrica realizado em amostras de argila.

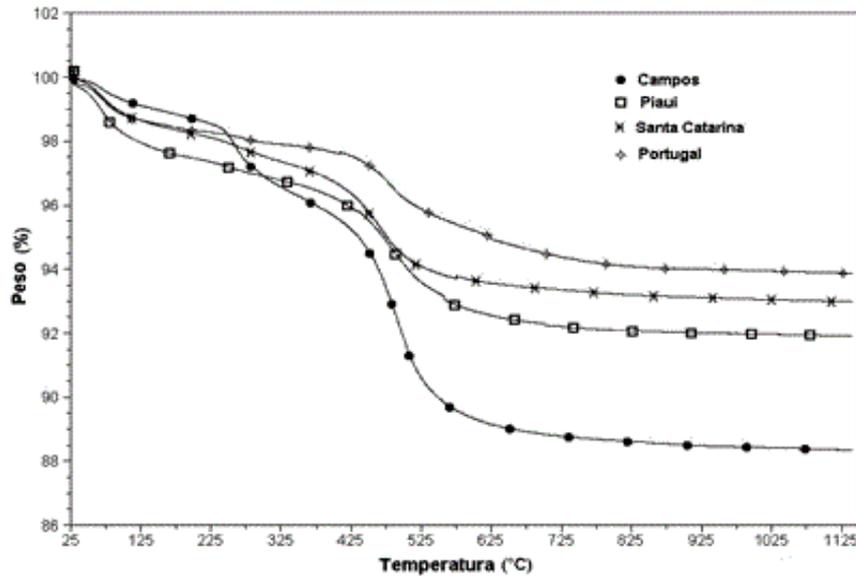


Figura 3 – Exemplos de curvas de análise termogravimétrica em amostras de argila (VIEIRA et al., 2003b)

2.3.4 Propriedades físicas das argilas calcinadas

De acordo com Grun (2007), as principais propriedades físicas que podem ser analisadas nas argilas calcinadas são a absorção de água, a retração linear, a porosidade e a densidade aparente. Essas análises podem ser realizadas em corpos-de-prova, e são observadas após a secagem ou após a calcinação.

a. Absorção de água

Pode ser afirmado com certeza que no processo de fabricação de uma peça cerâmica um dos materiais mais importantes e indispensáveis é a água, pois é a aplicação dessas substâncias que determina os critérios mínimos de plasticidade e por sua vez torna essas peças moldáveis. Todavia, segundo Grun (2007), a absorção de água pelos produtos já calcinados (prontos) é um péssimo sinal, pois uma maior absorção pode estar ligada a presença de poros nas peças, o que acarreta uma maior porosidade e conseqüentemente menos resistência.

Segundo Vieira et al. (2003a), as quantidades máximas aceitáveis de absorção de água pelas peças cerâmicas são: de 25% para tijolos maciços e blocos cerâmicos, 20% para telhas e para as telhas romanas a quantidade máxima de absorção deve ser inferior a 18%.

Todavia é de suma importância saber que o aumento da temperatura estar inversamente ligado a absorção de águas nas peças cerâmicas calcinadas. Pois, de acordo com Grun (2007), quanto maior a temperatura de queima das peças cerâmicas, mas densas essas peças se torna, com esse maior compactação sobre menos espaço para à penetração de água.

b. Retração linear

Conforme Grun (2007), a retração linear seria a variação das dimensões lineares das peças cerâmicas em porcentagem, sendo que essa variação será positiva quando houver retração (diminuição) e negativa quando houver expansão (aumento) das dimensões lineares por causa de perda de água durante as etapas de secagem ou queima. Para compreender a retração linear é importante entender que, de acordo com Vieira et al. (2003a), a água adicionada na argila pode ser dividida em dois tipos: as águas intersticial que é aquela necessária para preencher os poros das partículas e a água livre ou de plasticidade que se localiza entre as partículas argilosas, facilitando o processo de conformação. Todavia, é a água de plasticidade que é responsável pela retração das peças.

Segundo Santis (2012), a água de plasticidade é necessária para que as peças cerâmicas obtenham características moldáveis, todavia, com o processo de queima ou secagem dessas peças há uma retração do tamanho da peça por causa da perda da água de plasticidade, entretanto ainda fica a água intersticial. É importante explicar que mesmo a água intersticial seja eliminada da peça não haverá uma redução das dimensões da peça cerâmica.

De acordo com Vieira (2003b), o aumento da retração linear pode ocasionar o aparecimento de trincas durante o processo de queima da peça cerâmica. Pode ser obter uma representação gráfica da evolução da retração linear em função da perda de água de plasticidade através da *curva de Bigot*, como mostra a Figura 13. Esse gráfico tem a finalidade auxiliar na hora de se fazer um cliço de secagem, pois com essas informações é possível diminuir o tempo gasto nessa etapa e, conseqüentemente, o seu custo.

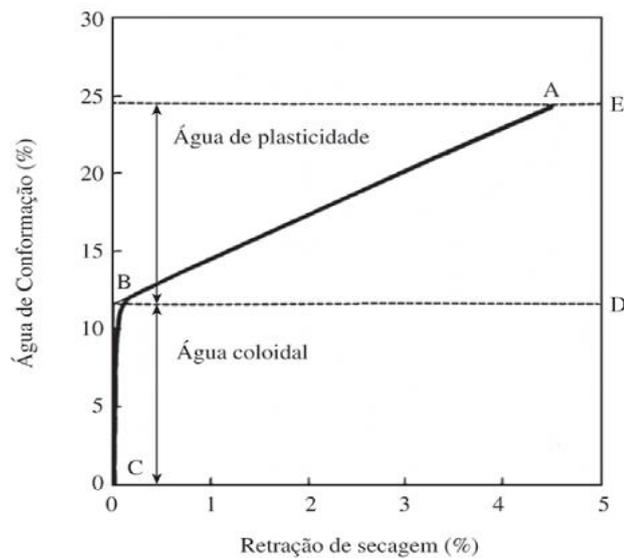


Figura 4 – Modelo de curva de *Bigot* (VIEIRA et al. 2003a)

Segundo Cabral (2005) apud Santis (2012), “a retração linear de secagem e de queima, somadas, não deve exceder o valor de 12%. Acima deste valor, as peças correm grande risco de apresentarem trincas”. De um modo geral, a retração linear e a absorção de água são características que dependem da temperatura e do tempo de queima das peças cerâmicas. A primeira quanto maior o tempo e a temperatura de calcinação da peça cerâmica maior será a retração linear, por outro lado, nessa mesma situação de calcinação haverá uma menor absorção de água.

c. Porosidade aparente

Outra propriedade física de grande importância na análise das propriedades das argilas calcinadas é a porosidade aparente. De acordo com Santis (2012), a porosidade aparente, refere-se a quantidade de poros abertos existentes em uma amostra de cerâmica, dessa forma, ela está intimamente ligada às outras propriedades dos produtos de cerâmica vermelha, como a absorção de água, a massa específica aparente e a resistência à compressão.

Em uma análise direta, pode-se afirmar, de acordo com Santis (2012), que a porosidade aparente está inversamente ligada à temperatura de queima dos produtos cerâmicos, sendo que dessa forma, quanto maior a temperatura de queima das amostras, menor a porosidade aparente das mesmas.

d. Massa específica aparente

Essa propriedade está ligada a porosidade aparente, pois a massa específica aparente está diretamente relacionada com a temperatura de queima das amostras cerâmicas, da mesma forma que a porosidade aparente, quanto maior a temperatura de queima, maior a densificação das amostras e, conseqüentemente, maior a massa específica das mesmas. Sobre isso Santis (2012) explica:

[...] a massa específica aparente está ligada também à porosidade aparente, a absorção de água e a resistência à compressão das peças, já que quanto maior a massa específica dos produtos, menores os valores de porosidade aparente e absorção de água das peças (SANTIS, 2012).

Com isso pode ser afirmado que, da mesma forma que Santis (2012), quanto maior a massa cerâmica específica, maior a densificação dos produtos que essa massa irá originar, dessa forma, maior será a resistência à compressão das peças.

2.4 CONCRETO ESTRUTURAL LEVE

Nas três últimas décadas a construção civil encarou uma onda de desenvolvimento nunca visto antes. Nesse processo, houve uma grande evolução nas tecnologias utilizadas nos concretos estruturais, isso ocorreu pela utilização de novas técnicas e equipamentos para estudos dos concretos e ao uso de novos componentes em sua criação. De acordo com Rossignolo e Oliveira (2006), entre os novos materiais introduzidos nas últimas três décadas pode-se destacar os aditivos redutores de água e as adições minerais pozolânicas, esses novos materiais possibilitaram melhorias significativas nas propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade dos concretos. O desenvolvimento desses novos materiais resultou em incremento da utilização dos chamados agregados leves.

A utilização de agregados leves proporciona uma redução do peso próprio da estrutura de concreto e, conseqüentemente, das cargas na fundação, reduzindo dessa forma, os custos finais da obra. De acordo com Santis (2012), o concreto leve estrutural, na atualidade, é um material de construção bastante utilizado em todo o mundo, com aplicações em diversas áreas da construção civil, como nas edificações pré-fabricadas, pontes e plataformas marítimas. Sobre os benefícios da utilização do concreto estrutural leve Santis (2012) afirma:

A utilização desse material de massa específica reduzida pode promover benefícios diversos, como a redução de esforços na estrutura das edificações, gerando economia nas fundações, a economia com fôrmas e cimbramento, além da diminuição dos custos de montagem e transporte de estruturas pré-fabricadas (SANTIS, 2012).

De acordo com os estudos de Rossignolo (2003), na construção civil, os concretos leves podem ser obtidos, sem perda de eficiência e resistência técnica, através da substituição total ou parcial dos agregados convencionais por agregados leves e, geralmente, são classificados de acordo com o valor de sua massa específica seca. Essa classificação é normatizada pela NBR 6118 (ABNT, 2007)⁸, sendo que, o concreto leve deve apresentar massa específica seca abaixo de 2000 Kg/m³. Conforme o American Concrete Institute (2003), em seu Guia para concreto estrutural de agregado leve⁹, o concreto estrutural de agregado leve deve em sua estrutura apresentar, aos 28 dias de idade, uma resistência a uma compressão superior à 17 MPa, com uma massa específica aparente entre 1120 e 1920 kg/m³.

A Tabela 5 apresenta os valores máximos de massa específica aparente e determina suas resistências à compressão dada pela NBR NM 35 (ABNT, 1995) para os concretos leves. Além disso, de acordo com Santis (2012) a NBR NM 35 (ABNT, 1995) especifica também que “os agregados utilizados para a confecção dos concretos leves devem apresentar massa unitária no estado solto abaixo de 1120 Kg/m³ (agregados miúdos) e 800 Kg/m³ (agregados graúdos)”.

Conforme Santis (2012), a utilização de agregados leves no concreto teve início com o Império Romano. Um dos marcos históricos deixado por esse império é o Coliseu, nessa construção foi utilizado concreto leve com aglomerante à base de cal e rochas vulcânicas, para a confecção de sua estrutura de fundação e de diversas paredes.

Tabela 5 – Valores de resistência à compressão de acordo com a massa específica aparente dos concretos (SANTIS, 2012)

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Massa específica aparente (Kg/m³)
28	1840
21	1760
17	1680

⁸ Ver: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 (2007)

⁹ Ver: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. ACI 2013-R-03 (2003)

2.4.1 Tipos de agregados leves para concreto

De acordo com Rossignolo (2003) os agregados leves para concreto pode ser classificados em: os agregados leves naturais e os agregados leves artificiais, sendo que ambos os tipos são gerados através do processo de calcinação da matéria-prima. Conforme Santis (2012), os agregados leves classificados como naturais são aqueles obtidos através da extração direta em jazidas, seguida pela classificação granulométrica, dessa forma, apresentam uma grande variação em suas propriedades, o que limita seu uso em concretos estruturais. Nesse tipo de agregado estão contidas as pedras pomes e as escórias vulcânicas. Os agregados leves artificiais, segundo Rossignolo (2003), são aqueles originados por processos industriais e, por isso possuem um grande controle de suas propriedades e uma versatilidade maior do que a natural. O agregado leve artificial é classificado com base na matéria-prima utilizada em sua fabricação. Nesse tipo de agregado se encontram as argilas expandidas e as escórias sintéticas.

2.4.2 Processo de fabricação

Conforme Rossignolo (2003), os processos mais utilizados na fabricação dos agregados leves artificiais são a Sintetização e o Forno Rotativo. No processo de fabricação por meio da sintetização a matéria-prima é misturada com uma proporção adequada de combustível, esse combustível pode ser carvão finamente moído ou coque. Após a mistura, a massa é submetida a altas temperaturas, para isso, segundo Gomes Neto (1998), utiliza-se uma grelha móvel, que se expande em função da formação de gases.

Para Rossignolo (2003), os agregados obtidos através do processo de sintetização têm como características principais os poros abertos, sem recobrimento e com altos valores de absorção de água. Além disso, afirma que o produto originado através desse processo de sintetização é um clínquer muito irregular e de arestas “vivas”, com isso necessita de uma britagem para atender a todas as graduações granulométricas necessárias para a produção dos concretos leves. Conforme Rossignolo (2003), o outro processo de fabricação agregados leves o de forno rotativo, também denominado Nodulação, tem como principal característica o aproveitamento das características presentes em cada tipo de material de se expandirem. Esse processo de fabricação utilizando o forno rotativo é dividido em oito etapas como apresenta na Tabela 6.

Tabela 6 – Processo de fabricação de agregados leves de argila expandida (SANTIS, 2012)

Etapa	Nomenclatura	Processo executado
1	Homogeneização	Homogeneização da matéria-prima
2	Desintegração	Redução dos torrões em diâmetro máximos de 5cm.
3	Mistura e Nova Homogeneização	Mistura da matéria-prima e correção de água para aumentar a expansão durante a queima.
4	Laminação	Passagem do material por dois cilindros para eliminação dos torrões, deixado a mistura pronta para a extrusão.
5	Pelotização	Extrusão da matéria-prima, que passa por moldes cilíndricos e depois é cortada em seu tamanho final dos agregados.
6	Secagem e queima	Primeiramente ocorre a secagem dos agregados extrudados, seguida da queima dos mesmos à altas temperaturas.
7	Resfriamento	Resfriamento dos agregados após a queima
8	Classificação e estocagem	Classificação dos agregados de acordo com o tamanho final e estocagem dos mesmos.

2.4.3 Propriedades dos agregados leves

2.4.3.1 Forma e textura superficial

De acordo com Rossignolo (2003), a forma e a textura dos agregados leves tem uma grande influencia nas propriedades dos concretos, como a resistência mecânica que possuem uma intima relação com a quantidade de água necessária para a obtenção da massa que será trabalhada. Basicamente, a forma e a textura do agregado leve dependem do processo de fabricação e das matérias-primas utilizadas para isso.

Ainda segundo Rossignolo (2003), os agregados produzidos através do processo de sintetização têm como características, uma alta rugosidade, formas angulares e superfície porosa. Essa alta rugosidade lhe proporcionam uma boa aderência à pasta de cimento. Todavia, por causa de suas formas angulares, esse tipo de agregado necessita de uma maior quantidade de água para que possa ser trabalhado, o que lhe concede uma alta taxa de absorção de água.

Já os agregados produzidos em fornos rotativos, de acordo com Rossignolo (2003), apresentam uma forma esférica e uma fina camada externa com baixa porosidade, por apresentar essas características, esses agregados possuem uma boa trabalhabilidade, com baixa absorção de água. Entretanto, por possuir uma forma arredondada, esse tipo de agregado leve possui uma maior facilidade para segregação do que os produzidos através do processo de sintetização.

2.4.3.2 Estrutura interna, resistência mecânica e módulo de deformação dos agregados leves

Conforme Rossignolo (2003), no processo de utilização dos agregados leves, a estrutura internas desse material, tem um efeito muito importante na resistência mecânica e no módulo de deformação. Como já foi dito anteriormente, na forma e textura superficial, os agregados com uma estrutura de maior porosidade são menos resistentes do que os que possuem uma estrutura pouco porosa. Uma característica importante levantada por Rossignolo (2003) é que “o tamanho e a distribuição dos poros também são decisivos na resistência mecânica dos agregados leves”. De acordo com Holm e Bremmer (1994), um exemplo que claro da importância da estrutura interna ocorre na argila expandida, nesse tipo de material, em que a camada externa que possui uma baixa porosidade aumenta a resistência mecânica desse tipo de agregado.

De um modo geral, segundo Holm e Bremmer (1994), a resistência mecânica de um agregado leve depende basicamente das matérias-primas utilizadas e do tipo de processo de fabricação imposto ao agregado. Sendo que, mesmo possuindo as mesmas matérias-primas, alguns agregados podem apresentar uma diferença significativa na resistência mecânica só pelo fato de terem sido produzidas por processos distintos.

De acordo com Rossignolo (2003), o módulo de deformação dos agregados pode ser calculado a partir dos valores de massa específica (γ) (kg/m^3) do agregado leve. De acordo com Holm e Bremner (1994) apud Rossignolo (2003), os valores obtidos através do módulo de deformação dos agregados leves que são utilizados em concretos estruturais variam entre 10 e 18 GPa, sendo que, quanto maior o valor do módulo de deformação dos agregados leves, maior o valor do módulo de deformação e da resistência à compressão dos concretos produzidos com os agregados leves de acordo com a Equação (1).

$$E = 0,008 \cdot \gamma^2 \quad \text{Equação (1)}$$

2.4.3.3 Impurezas

De acordo com Rossignolo (2003), de um modo geral, os agregados leves artificiais, que tem como matéria-prima a argila expandida, são quimicamente inertes e livres de impurezas. Todavia, já com a utilização de argila obtidas em jazidas onde se alternam camada

de argila com outras de calcário, as partículas dessa matéria-prima poderão conter certa quantidade de cal, com tendência a criar eflorescência na presença de água.

2.4.3.4 Porosidade, absorção de água e massa específica dos agregados leves

De acordo com Rossignolo (2003), as características de porosidade e absorção de água dos agregados leves têm ligação direta com as propriedades dos concretos no estado fresco e o processo de hidratação do cimento. A absorção de água dos agregados leves depende dos seguintes fatores: “porosidade total; conectividade entre os poros; características da superfície do agregado e umidade do agregado antes da mistura (ROSSIGNOLO, 2003)”. Para Santis (2012), para conferir a redução de massa, os agregados leves apresentam uma elevada porosidade. Dessa forma, os agregados leves absorvem de 5% a 25% de seu peso em água, nas primeiras 24 horas de imersão, sendo que os agregados convencionais absorvem aproximadamente 2% de seu peso em água no mesmo período.

De acordo com Rossignolo (2003), a alta taxa de absorção de água pelos agregados leves pode afetar em algumas propriedades do concreto no estado endurecido, como o aumento da retração por secagem, aumento da massa específica e redução da resistência ao fogo. Entretanto, a absorção de água dos agregados leves apresenta alguns aspectos positivos, como a melhoria das propriedades da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento, através da redução do efeito parede. Além disso, a água absorvida pelo agregado leve beneficia a “cura interna” do concreto. A Tabela 7 apresenta os valores de absorção de água, massa específica e outras características de agregados leves de argila expandida nacional.

Tabela 7 – Características de alguns agregados leves comerciais produzidos no Brasil (SANTIS, 2012)

Nome comercial	Fabricação	Massa específica (Kg/dm ³)	Massa unitária (Kg/dm ³)	Dimensão (mm)	Absorção de água 24h (%)
Cinexpan 0500	Forno Rotativo	1,5	0,9	0 – 4,8	6
Cinexpan 1506		1,1	0,6	6,3 – 12,5	7
Cinexpan 2215		0,6	0,5	12,5 - 19	10

2.4.4 Produção dos concretos leves

Por possuir propriedades diferentes dos agregados convencionais, na produção dos agregados leves, fazem-se necessários alguns cuidados, para que a mistura possua as características desejadas.

2.4.4.1 Mistura e teor de umidade dos agregados

De acordo com Rossignolo (2003), quando se mistura as matérias-primas em um equipamento como eixo inclinado, pode-se observar que, no início da mistura, há uma segregação dos agregados leves graúdos, que tendem a sair do misturador, entretanto, após algum tempo de mistura, esse problema tende a desaparecer. Já no misturador vertical, de acordo com, Rossignolo (2003), esse problema não ocorre.

Conforme Rossignolo (2009) apud Santis (2012), na produção de concretos convencionais, a definição da relação água/cimento é feita levando-se em consideração a quantidade de água necessária para a hidratação do cimento. Por outro lado, na produção de agregados leves, essa definição deve ser feita levando-se em consideração a quantidade de água que os agregados leves absorvem, para que dessa forma, essa absorção não utilize a água necessária para a hidratação do cimento.

Segundo Chandra e Berntsson (2002) apud Santis (2012), para que os agregados leves possuem níveis mínimos de trabalhabilidades, proteção e ancoragem da armadura, é de fundamental importância à utilização de uma taxa de consumo de cimento maior que 300 Kg/m³.

Conforme Holm e Bremner (1994) apud Rossignolo (2003), quando os agregados leves apresentarem baixa absorção de água, valores abaixo de 10%, em massa, após 24 horas de imersão, pode-se adotar os meus processo de produção feito nos agregados convencionais, por outro lado, se os agregados leves apresentarem uma absorção de água superior a 10% em massa após 24 horas de imersão, recomenda-se a utilização do método de pré-saturação destes agregados, pois, caso esse procedimento não seja realizado, pode ocasionar uma grande dificuldade em manter a trabalhabilidade adequada do material durante o lançamento.

2.4.4.2 Transporte, lançamento e adensamento

De acordo com Rossignolo (2003) por possuírem baixos valores de massa específica, os agregados leves tendem a segregar durante o processo de transporte. Este processo pode ser evitado ou pelo menos amenizado, “com a dosagem de concretos com coesão e consistência adequados, controlando-se a relação água/cimento e o teor dos agregados miúdos e com a utilização de adições minerais, como a sílica ativa (ROSSIGNOLO, 2003)”.

Quando se utiliza o concreto bombeável, de acordo com Santis (2012), a granulometria dos agregados e principalmente sua umidade assume papel fundamental, pois com o aumento da pressão no processo de bombeamento, há uma maior absorção de água por parte dos agregados, isso ocasiona uma diminuição da trabalhabilidade do concreto. Quando isso ocorrer, de acordo com Eurolightcon (2000) apud Rossignolo (2003), a utilização de agregados leves saturados, para que eles não atrapalhem o processo de bombeamento.

Já para os concretos leves, geralmente é utilizada técnica usuais de vibração, como as que são utilizadas nos concretos convencionais, todavia esses concretos leves exigem uma maior energia de vibração do que os tradicionais. Para Rossignolo (2003), no caso específico dos vibradores de imersão, é de fundamental importância que se utilize um raio de ação correspondente a metade dos utilizados nos concretos tradicionais. Para Santis (2012), durante esse processo de vibração, os concretos leves tendem a segregar, isso ocorre, como já foi supracitado, devido a sua baixa massa específica, dessa forma, é importante que se utilize vibradores com baixa frequência. Tudo por que, de acordo com Rossignolo (2003), o correto adensamento dos concretos evita a formação de vazios nos concretos.

2.4.4.3 Cura

De acordo com Holm e Bremner (1994) apud Rossignolo (2003), o mesmo procedimento de cura utilizado na fabricação dos concretos tradicionais deve ser imposto para a fabricação dos concretos leves, todavia, deve-se ter cuidado especiais com a temperatura do concreto.

Ainda Segundo Rossignolo (2003), o calor liberado durante o processo de hidratação do cimento, acarreta uma grande elevação da temperatura dos concretos leves. Dessa forma, para evitar a formação de fissuras térmicas, em ambientes com baixa temperatura, é importante retirar o concreto das formas, ou cobri-los com mantas isolantes. Segundo

Eurolightcon (2000) *apud* Rossignolo (2003), quando for utilizado o processo de cura térmica, deve-se adotar um período maior de cura ou uma velocidade de elevação de temperatura menor (ROSSIGNOLO, 2003).

Conforme Santis (2012), outro aspecto importante sobre o comportamento da cura dos concretos leves é a ocorrência da cura interna (durante a hidratação do cimento nas idades iniciais, a água retida no agregado leve é transferida para a pasta de cimento, beneficiando este processo). Dessa forma, de acordo com Rossignolo (2003) esse fenômeno, torna os concretos leves menos sensíveis às variações do processo de cura nas idades iniciais.

2.4.5 As propriedades dos concretos leves em seu estado endurecido

Os agregados comuns apresentam uma grande parcela do peso geral das estruturas em concreto armado. Dessa forma, a substituição dos agregados comuns pelos agregados leves torna-se uma opção bastante vantajosa para a construção. As alterações ocorridas por essa substituição de agregados, dependem além das propriedades gerais da pasta de cimento, das propriedades dos novos agregados. Assim, as principais características que serão abordadas nesse trabalho são: a resistência à compressão, massa específica, resistência à tração, módulo de deformação, retração linear por secagem, absorção de água e porosidade aparente.

2.4.5.1 Resistência à compressão e massa específica

De acordo com Rossignolo (2003), a resistência à compressão e a massa específica são as características mais utilizadas para caracterizar um concreto leve estrutural. Eles estão relacionados com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado. Conforme Santis (2012), a relação entre essas duas características corresponde ao fator de eficiência (*FE*) dos concretos, como pode ser observado na Equação (2).

$$FE = \frac{f_c}{y} \quad (\text{MPa} \cdot \text{dm}^3/\text{Kg}) \quad \text{Equação(2)}$$

Onde,

f_c = resistência à compressão do concreto (MPa);

y = massa específica do concreto (Kg/dm^3).

Segundo Santis (2012), os concretos leves de alto desempenho apresentam fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³/Kg. Conforme Rossignolo (2003), os concretos obtidos a partir da utilização de agregados convencionais, com resistência à compressão de 60 MPa e massa de 2500 Kg/m³, são classificados como de alta resistência.

De acordo com Santis (2012), a resistência à compressão do concreto e a massa específica dependem do tipo de agregado leve, da quantidade de água utilizada, da relação água/cimento, do tipo de mistura dos componentes, do processo de lançamento e também de cura dos concretos utilizados.

Como já foi falando anteriormente, os agregados leves possuem uma resistência baixa quando comparados aos agregados convencionais, dessa forma, a pasta de cimento apresenta grande importância na resistência à compressão dos concretos leves. Sobre isso Rossignolo (2003) afirma:

Na análise das propriedades dos concretos leves, deve-se considerar que os agregados apresentam resistência mecânica relativamente baixa e, com isso, a resistência mecânica da matriz de cimento apresenta grande importância na resistência mecânica dos concretos (ROSSIGNOLO, 2003).

Conforme Rossignolo (2003), nos concretos leves, por possuir uma menor resistência, utiliza-se a resistência mecânica potencial da matriz de cimento do que nos concretos tradicionais. Isso ocorre por causa da similaridade entre os valores dos módulos de deformação dos agregados e da matriz e da excelente qualidade da zona de transição agregado-matriz. Dessa forma, os concretos leves, geralmente, não rompem devido à diferença entre as deformações dos agregados e da matriz de cimento, mas sim, devido ao colapso da argamassa, que, normalmente, ocorre na região ao redor do agregado.

Ainda segundo Rossignolo (2003), os agregados leves apresentam estabilização dos valores finais de resistência à compressão, mais rapidamente do que os concretos tradicionais. Por conseguinte, Eurolightcon (2000) apud Rossignolo (2003) afirma que, geralmente, com 7 dias os concretos leves já apresentam 80% da resistência à compressão, todavia, depois dos 28 dias de idade, essa revolução torna-se lenta, quando comparado à apresentada pelos concretos convencionais.

Para Santis (2012), como os valores da massa específica e da resistência à compressão dos agregados leves são inversamente proporcionais à sua granulometria e

dimensão, essas características têm bastante influência sobre os valores de resistência à compressão e massa específica dos concretos leves.

Por fim, de acordo com estudos realizados por Gomes Neto (1998) apud Santis (2012), há uma relação linear entre a resistência à compressão e a massa específica dos concretos, sendo que quanto maior o valor da massa específica, maior o valor da resistência à compressão dos concretos.

2.4.5.2 Resistência à tração

De acordo com Eurolightcon (2000) apud Rossignolo (2003), as principais diferenças entre os concretos leves e os concretos convencionais, em relação a resistência à tração, são:

- O tipo de fratura: Nos concretos leves, a fratura ocorre através do agregado e não ao redor do agregado, na zona de transição agregado-matriz, como ocorre nos concretos tradicionais;
- O teor de umidade: Nos concretos leves esse teor pode ser maior do que nos concretos tradicionais, observando as mesmas condições de cura e pode causar uma redução significativa no valor da resistência à tração;
- A resistência à tração na flexão nos concretos leves é mais afetada do que a resistência à tração na compressão diametral.

Segundo Holm e Bremner (1994) apud Rossignolo (2003), os valores da resistência à tração dos concretos leves, tanto na compressão diametral, como na flexão, são “ligeiramente inferiores aos observados nos concretos com massa específica normal para o mesmo nível de resistência à compressão”. Isso ocorre por que há um grande volume de vazios dos agregados leves. De acordo com Santis (2012), nos concretos leves produzidos como argila expandida, os valores de resistência à tração por compressão diametral variam de 6% a 9%, já para flexão variam de 8% a 11% dos valores da resistência à compressão dos concretos.

A Tabela 8 apresenta algumas expressões de documentos normativos internacionais para a estimativa dos valores das resistências à tração por compressão diametral e à tração na flexão dos concretos leves em função da resistência à compressão.

Tabela 8 – Relações entre a resistência à compressão e as resistências à tração por compressão diametral e à tração na flexão dos concretos leves (ROSSIGNOLO, 2003)

Referência	Resistência à tração (MPa)		Observações
	Compressão diametral (fid)	Flexão (fctm)	
Zhang e Gjφrv (1991)	$0,23.fcu^{0,67}$	$0,73.fcu^{0,5}$	$62 \geq fc \geq 21$ MPa
CEB/FIP (1997)	$0,23.fcu^{0,67}$	$0,46.fcu^{0,67}$	
ACI 318 (2007)	$0,48.fc^{0,5}$	$0,53.fc^{0,5}$	

fc = Resistência à compressão em corpos-de-prova cilíndricos (MPa);

fcu = Resistência à Compressão em corpos-de-prova cúbicos (MPa).

2.4.5.3 Módulo de deformação

De acordo com Rossignolo (2003), da mesma forma que as demais propriedades dos concretos leves, o módulo de deformação está intimamente ligada ao tipo e quantidade de agregado leve utilizado. O valor desse módulo depende dos valores do módulo de deformação dos componentes individuais, do proporcionalmente entre os materiais e da qualidade da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento. Conforme Santis (2012), “como os agregados leves apresentam muitos vazios e valores de módulo de deformação relativamente baixos, os valores do modulo de deformação dos concretos leves normalmente são inferiores aos valores observados para os concretos convencionais”.

Segundo o Rossignolo (2003), o valor do módulo de deformação do concreto leve varia entre 30 e 70% do valor do concreto tradicional, para o mesmo nível de resistência à compressão. Já para concretos leves com resistência à compressão superior a 60 MPa, segundo Eurolightcon (2000) apud Rossignolo (2003), o valor do módulo de deformação varia entre 20% e 30%, porcentagens inferiores aos que são obtidas nos concretos com agregados tradicionais. Da mesma forma que a resistência à tração, o módulo de deformação também pode ser estimado levando em consideração expressões mencionadas em documentos normativos internacionais que relacionam o módulo de deformação com a resistência à compressão e massa específica dos concretos leves, como apresenta a Tabela 9.

Tabela 9 – Equações para cálculo do módulo de deformação (SANTIS, 2012)

Referência	Equação	Observações
Rossignolo (2005)	$E_c = 0,049 \cdot y^{1,5} \cdot f_{ck}^{0,5}$ (MPa)	$f_c \leq 50$ MPa
ACI 318 (2007)	$E_c = 0,043 \cdot y^{1,5} \cdot f_c^{0,5}$ (MPa)	$f_c \leq 41$ MPa
NS 3473 (1998)	$E_c = 9,5 \cdot f_{ck}^{0,3} \cdot (y/2400)^{1,5}$ (GPa)	$f_{ck} \leq 85$ MPa
BS 3473 (1998)	$E_c = 1,7 \cdot (y/1000)^2 \cdot f_{ck}^{0,3}$ (GPa)	
CEB (2009)	$E_c = 1,6 \cdot y^2 \cdot (f_{ck} + 8)^{0,33} \cdot 10^{-6}$ (GPa)	

E_c = Módulo de deformação; Y = Massa específica (Kg/m³); f_c = resistência à compressão (150 mm x 300 mm – cilíndrico); f_{ck} = resistência à compressão (100 mm x 200 mm – cilíndrico); f_{ck} = resistência à compressão (cubo 100 mm).

2.4.5.4 Retração linear de secagem

Conforme Rossignolo (2009), os concretos estruturais leves apresentam, geralmente, para uma mesma resistência à compressão, valores de retração por secagem superiores aos obtidos na com os experimentos com concretos convencionais. Isso ocorre por que os agregados leves possuem pouca resistência à movimentação causada pela pasta de cimento e, além disso, os concretos produzidos com agregados leves geralmente necessitam de maior quantidade de água durante a moldagem. De acordo com Hoff (1991) apud Santis (2012), os concretos produzidos com agregados leves apresentam valores de retração por secagem da ordem de 500×10^{-6} e 1000×10^{-6} . De acordo com NBR NM 35 (ABNT, 1995), a retração linear para o concreto leve, de ser no máximo 0,10%, para concretos produzidos a partir de uma parte de cimento para seis partes de agregado, medidos em volume (proporção 1:6). Segundo Cabral Júnior et al. (2009), mesmo a granulometria, forma, textura e a dimensão máxima dos agregados serem vistos como fatores que têm influencia sobre a retração linear, é o módulo de deformação que exerce maior influência sobre essa grandeza, sendo que quanto maior esse valor, menor a retração linear dos concretos.

Outro fator que influência na retração linear de secagem é a porosidade dos agregados leves. De acordo com Cabral Júnior et al. (2009), isso ocorre por que uma maior porosidade dos agregados, tendem a restringir menos a retração dos concretos do que os agregados menos porosos. De acordo com a Rossignolo (2003), a retração por secagem pode ser prevista para uma idade qualquer t , de acordo com a retração linear observada a uma certa idade, como demonstra a Equação (3).

$$S_{ult} = ((35+t)/t) \cdot S_t \quad \text{Equação (3)}$$

Onde,

S_{ult} = valor estimado para a retração linear de secagem ($\times 10^{-6}$);

t = tempo em dias;

S_t = valor medido da retração linear de secagem ($\times 10^{-6}$).

2.4.5.5 Absorção de água e porosidade aparente

Como já foi explicada anteriormente nesse mesmo estudo, a absorção de água dos concretos esta diretamente ligada com a porosidade aparente tanto do concreto, como também dos agregados utilizados para sua produção. Dessa forma, os concretos produzidos a partir de agregados que possuem baixa absorção de água, tendem a absorver menos águas do que os que são produzidos com agregados de alta absorção. De acordo com Holm e Brenner (1994) apud Santis (2012), normalmente os concretos produzidos com agregados leves tendem a apresentar, para uma mesma faixa de resistência à compressão, valores semelhantes ou distintos de absorção de água, isso os diferem dos concretos convencionais. Essa variação que ocorre com os concretos leves é ocasionada pelos seus baixos valores da relação água/aglomerante quando comparados aos concretos convencionais, para se obter uma mesma resistência à compressão.

2.4.5.6 Durabilidade

Conforme Santis (2012), a durabilidade dos concretos esta diretamente ligada com sua permeabilidade, que é causada pelo excesso de água livre, o que ocasiona a formação de poros capilares. Além disso, a permeabilidade dos concretos também pode ser causada pela ocorrência de fissuras internas nos concretos, essas fissuras são causadas pelos diferentes valores de módulo de deformação dos materiais utilizados para a fabricação do concreto.

3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com os objetivos desta pesquisa, descritos nos capítulos anteriores, este capítulo descreve os procedimentos experimentais adotados para o estudo da viabilidade da produção de agregados leves de argila calcinada para a utilização em concretos estruturais, que podem ser divididos em 7 etapas, conforme apresenta a Tabela 10.

Tabela 10 – Resumo do programa experimental (SANTIS, 2012)

Etapa	Descrição
1	Seleção das empresas e coleta das matérias-primas.
2	Ensaio realizados nas matérias-primas coletadas.
3	Confecção dos agregados e corpos-de-prova de argila calcinada.
4	Ensaio realizados nos corpos-de-prova queimados.
5	Produção dos agregados de argila calcinada.
6	Produção dos corpos-de-prova de concreto.
7	Ensaio realizados nos corpos-de-prova de concreto.

3.2 SELEÇÃO DAS EMPRESAS E COLETA DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Para a realização do presente trabalho, foram selecionadas 3 empresas em diferentes regiões do estado do Acre. Em todas as empresas visitadas foram coletadas amostras de matéria-prima para a confecção dos agregados. Coletaram-se as misturas que as empresas utilizavam para a produção de seus produtos e também as diferentes matérias-primas “in natura” que as empresas utilizavam em suas misturas, totalizando-se assim, 9 amostras coletadas nas cidades abaixo¹⁰.

- Cidade de Rio Branco;
- Cidade de Senador Guiomard;
- Cidade de Bujari.

¹⁰ Por motivos didáticos, os diferentes locais de extração de matéria-prima para este trabalho serão chamados, neste texto, apenas pelo nome da cidade onde as empresas estão alocadas e foram coletadas as matérias-primas.

3.3 ENSAIOS REALIZADOS NAS MATÉRIAS-PRIMAS COLETADAS

As 9 amostras de solo coletadas foram submetidas a diversos ensaios físicos e químicos, como apresenta na Tabela 1, recomendados por Santis (2012).

Tabela 2 – Ensaio químicos e físicos realizados nas matérias-primas

Ensaio	Descrição	Normalização
a	Determinação da umidade natural	ABNT NBR 6459:1984
b	Limite de Liquidez	ABNT NBR 7180:1984
c	Limite de Plasticidade	ABNT NBR 7181:1984
d	Análise granulométrica	ABNT NBR 7181:1984
e	Massa específica dos sólidos	-

Os ensaios de granulometria, limites de consistência e massa específica dos sólidos foram realizados no FUNTAC – Fundação Tecnológica do Acre. Para a realização dos ensaios, separou-se aproximadamente 2 Kg de cada uma das 9 amostras de solo coletadas. As amostras passaram por um processo de secagem em estufa, como mostra a Figura 14.

Após a secagem, as amostras foram submetidas à primeira fase do processo de destorroação, que corresponde à passagem dos grãos pela peneira número 4.



Figura 14 - Amostras secas em estufa.

3.3.1 Determinação da umidade natural

Para a determinação da umidade natural das amostras de solo, foram coletadas, para cada uma das amostras, três recipientes com aproximadamente 20 gramas de solo cada e colocadas na estufa, a uma temperatura de 100 °C, por 5 dias, para a determinação do teor de umidade das matérias-primas “in natura”.

3.3.2 Limite de plasticidade – ABNT NBR 7180:1984

O limite de plasticidade de um solo refere-se ao ponto de umidade limite em que o solo perde suas características semi-sólidas e passa para o estado plástico. Para o início do ensaio, primeiramente o solo passou pelo processo de destorroamento, passando pela peneira número 40, com o auxílio do pilão e do almofariz. O solo que passou pela peneira foi separado e dividido em duas amostras, uma seca colocada em um pequeno saco plástico e uma umedecida, colocada em um pote plástico. Todas as amostras ficaram descansando por no mínimo 72 horas.

Após as 72 horas de descanso, para início do ensaio, separou-se um pouco de solo úmido e adicionou-se, quando necessário, um pouco de solo seco, até a amostra ficar moldável à mão. Em seguida, amassou-se o solo com a palma da mão, formando-se uma superfície quase que plana. Com o auxílio de uma espátula, foram cortadas pequenas “tiras” de solo úmido com dimensões próximas de 3mm. Em seguida, essas tiras foram roladas e transformadas em filetes de solo com a palma da mão, em cima da placa de vidro, em movimentos para frente e para trás. Esses movimentos são repetidos até se obter um cilindro de aproximadamente 3mm de diâmetro. Quando o cilindro atingiu o diâmetro desejado, com o auxílio de uma lupa, observou-se a formação ou não formação de pequenas rachaduras no molde. Em alguns casos, quando não ocorrem as rachaduras ou quando elas ocorrem antes de o cilindro atingir a espessura de 3 mm, o ensaio deve ser interrompido e iniciado novamente.

É importante salientar aqui que em alguns casos, por os solos serem muito argilosos, não ocorreram fissuras durante o ensaio. Quando isso ocorreu, aplicou-se uma força de flexão no centro da amostra com os 3 mm de diâmetro. Nesses casos, termina-se o ensaio quando do aparecimento de pequenas rachaduras na amostra com a aplicação desta pequena carga de flexão. Após a pesagem das amostras úmidas e secas, determinou-se o teor de umidade dos

solos e, com isso, o limite de plasticidade dos mesmos, que corresponde à média aritmética das umidades obtidas com o ensaio.

3.3.3 Análise granulométrica – ABNT NBR 7181:1984

O ensaio de análise granulométrica ocorreu através do peneiramento das amostras. A análise granulométrica tem como objetivo discriminar as principais faixas granulométricas das amostras analisadas. O ensaio de análise granulométrica, que consiste no peneiramento das amostras de solo. Esse peneiramento é executado utilizando-se uma peneira de número 200 (aberturas de 0.074 mm). Para a execução do ensaio, primeiramente retirou-se da estufa as amostras de solo que haviam ficadas retidas na peneira número 10 (depois das amostras terem passado pelo agitador mecânico). O material que ficou retido na peneira número 200 foi adicionado com o material retido na peneira número 10 e colocado na estufa para uma nova secagem.

Para completar o ensaio de análise granulométrica, foi executado mais um peneiramento com as amostras de solo que haviam sido peneiradas depois da sedimentação e ficaram retidas na peneira número 200, juntamente com o material retido na peneira número 10 do início do ensaio. Nesse peneiramento, as amostras passaram por um jogo de peneiras (número 4, 10, 16, 30, 50, 70, 100, 140, 200) e ficaram peneirando por um período de 10 minutos. Após o peneiramento, as amostras retidas em cada uma das peneiras e no fundo foram pesadas e, com esses valores pôde-se concluir o gráfico de granulometria e, conseqüentemente, a análise granulométrica das amostras.

3.4 CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DE ARGILA

Os corpos-de-prova com pedra de barro foram produzidos no Laboratório de Concreto Armado da FUNTAC, na cidade de Rio Branco/Acre. Os corpos-de-prova foram extrudados em formato de barras cilíndricas com 10 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro, utilizando-se as massas de produção de cada uma das 3 empresas estudadas. Para a confecção das massas para a extrusão, as amostras de solo foram destorroadas e moídas, ficando em forma de pó, com diâmetro das partículas inferior a 0,2mm. Para isso, elas foram submetidas a um peneiramento. Para a preparação das massas, em um primeiro momento, estipulou-se que a quantidade de água a ser adicionada a cada uma das amostras seria a

mínima para a extrusão, ou seja, a correspondente ao limite de plasticidade de cada uma das amostras. Após a adição da água, as amostras foram misturadas manualmente em um recipiente durante 5 minutos, como mostra nas figuras 15 e 16.



Figura 15 – Solo seco com adição gradativa de água



Figura 16 – Amostra próxima ao limite de plasticidade

Porém, em alguns casos, a massa produzida com adição de quantidade mínima de água para se atingir o limite de plasticidade de cada uma das amostras, não apresentavam características adequadas para o equipamento de extrusão. Assim, decidiu-se adicionar mais água a cada uma das misturas, até que elas apresentassem características de moldagem. A Tabela 12 apresenta os valores do teor de umidade de cada uma das amostras para atingirem características de moldagem.

Tabela 3 – Valores do teor de umidade e dos limites de plasticidade das amostras para extrusão

Características	Rio Branco	Senador Guimard	Bujari
LP	19,1	30,7	21,7
We (%) ¹	19,4	27,5	18,2

(1) Umidade das amostras para extrusão

Após serem preparadas, as massas foram extrudadas, em uma extrusora de pequeno porte produzida pela Funtac. Para a extrusão, utilizou-se boquilha de formato cilíndrico, com diâmetro de 15 mm, como mostra a Figura 17. Depois de conformados, secos em estufa e queimados, os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão.



Figura 17 – Corte dos corpos-de-prova (100 mm x 15 mm)

3.5 ENSAIOS REALIZADOS NOS CORPOS-DE-PROVA

Para se determinar as características físicas das peças queimadas e posteriormente escolher qual a matéria-prima a ser utilizada para a confecção dos agregados para a utilização nos concretos estruturais estudados nesta pesquisa, os corpos-de-prova queimados foi submetido a resistência à compressão.

3.5.1 Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, os corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro foram cortados em corpos-de-prova com comprimento igual a duas vezes o diâmetro, ficando assim com 30 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro. Após estarem cortados, os corpos-de-prova foram submetidos à força de compressão aplicada através de um equipamento de ensaio de compressão, como mostra na Figura 18.



Figura 18 – Corpo-de-prova sendo rompido no ensaio de compressão

Os valores das resistências à compressão dos corpos-de-prova ensaiados são apresentados na Tabela 13. Percebe-se que a resistência à compressão aumenta com o aumento da temperatura de queima das peças pois, com o aumento da temperatura, aumentam-se a densificação das peças e a massa específica das mesmas.

Tabela 4 – Valores da resistência à compressão obtidos em três temperaturas de queima diferentes

Temperatura de queima (°C)	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão
800	26,2	6,3
900	39,5	5,4
1000	56,2	11,9

3.6 PRODUÇÃO DOS AGREGADOS DE PEDRA DE BARRO

Com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados nos corpos-de-prova da pedra de barro, foram escolhidas duas massas para a confecção dos agregados leves de argila. Os agregados leves de argila foram confeccionados no Laboratório da Funtac, na cidade de Rio Branco/AC. Da mesma forma que na produção dos copos de prova de argila, para a produção dos agregados leves as amostras de solo foram destorroadas e moídas, ficando com diâmetro de partículas inferior a 0,2 mm.

Após o destorroamento, as amostras foram adicionadas quantidades de água necessárias para cada uma das amostras atingirem seus respectivos limites de plasticidade (LP).

Após a adição de água, as amostras foram misturadas e, para as duas amostras, a adição de água foi insuficiente para adquirirem características moldáveis. Dessa forma, adicionou-se mais água a cada uma delas, até que apresentassem características moldáveis, como mostra a Figura 19.



Figura 19 – Mistura das massas cerâmicas

Após serem preparadas, as massas foram extrudadas, em uma extrusora de pequeno porte produzida pela Funtac. Para a extrusão, utilizou-se boquilha de formato cilíndrico, com diâmetro de 15 mm. Durante a extrusão, os agregados foram cortados em seu tamanho final (aproximadamente 15 mm x 15 mm) e armazenados em bandejas para secagem, conforme mostram nas figuras 20 e 21.



Figura 20 – Extrusão das pedras de barro



Figura 21 – Pedras de barro armazenadas para secagem

Após serem cortadas, as pedras de barro foram levados à estufa ventilada, a uma temperatura de 60 °C, por um período de 72 horas. Após secos, as pedras de barro foram queimados em uma mufla da marca Fornos Jung, modelo 10013, número 6192, do ano de 2009, com potência de 7 kW, com temperatura de 900 °C (temperatura comumente utilizada por empresas produtoras de produtos de cerâmica vermelha). A queima foi realizada com rampa de aquecimento de 4 °C / min. e de resfriamento de 6 °C/min., sendo que as pedras de barro foram submetidas à temperatura máxima por 60 minutos.

3.7 PRODUÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO

Para a realização dessa pesquisa foram confeccionados corpos-de-prova de concreto com agregados produzidos com agregados argila denominada pedra de barro.

Os corpos-de-prova foram moldados no Laboratório de Concreto da Funtac. Para a moldagem, utilizou-se areia proveniente do Rio Acre, com dimensões máximas dos grãos de 4,8 mm, massa específica saturada de 2624 Kg/m³ e massa unitária no estado solto de 1551 Kg/m³, além de cimento tipo CP II-Z-32, produzido pela empresa Votorantim Cimentos Brasil S/A, ensacada em Outubro de 2013, cujas características são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 5 – Características e propriedades do cimento CII-Z-32 (Votorantim Cimentos do Brasil, 2013)

Características e propriedades		Unidade	Valores
FINURA	Resíduo na peneira #75	%	≤12
	Área específica	m ² /Kg	≥260
TEMPO DE PEGA	Início	h:min	≥1
	Fim	h:min	≤10(1)
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (NBR 7215)	3 dias	MPa	≥10
	7 dias	MPa	≥20
	28 dias	MPa	≥30

Analisando-se a Tabela 15, percebe-se que os agregados possuem características distintas, o que pode refletir diretamente nas características finas dos concretos produzidos com cada um dos agregados.

Conhecendo-se as características de cada um dos agregados, procurou-se manter em um mesmo patamar os consumos de cimento e areia para os quatro tipos de concreto. Assim como uma relação água/cimento (0,5) e o volume dos agregados graúdos para todos os corpos-de-prova, como apresentada na Tabela 15, de modo a analisar as alterações promovidas nos concretos para cada tipo de agregado.

Tabela 6 – Consumos teóricos de cimento, areia, agregado e água para a moldagem dos corpos-de-prova de concreto

CP	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Agregado (Kg)	Água (Kg)	Relação água/cimento
BRITA Nº1	395,5	988,9	838,6	197,8	0,5
RIO BRANCO	395,6	988,9	284,8	197,8	0,5
SENADOR GUIOMARD	395,1	987,6	493,8	197,5	0,5
BUJARI	394,1	985,3	543,9	197,1	0,5

A mistura dos materiais foi realizada utilizando-se uma betoneira e, a moldagem das fôrmas deu-se com o auxílio de uma mesa vibratória. Para o concreto foram moldados 9 corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, como mostram nas figuras 22 e 23.



Figura 5 - Mistura dos materiais na betoneira



Figura 23 – Moldagem dos corpos-de-prova

A Tabela 16 apresenta os consumos reais de areia, cimento, agregado e água na moldagem dos corpos-de-prova de concreto, levando-se em consideração a incorporação de ar no processo de moldagem. Os corpos-de-prova moldados foram secados no ambiente do laboratório por um período de 24 horas. Após esse período, os corpos-de-prova foram desformados e foram submetidos ao processo de cura, em uma câmara úmida com umidade variando de 90% a 95% e temperatura variando de 20 °C a 23 °C até atingirem a idade de 28 dias. Transcorrido esse período, os corpos-de-prova foram transferidos para uma sala climatizada, com temperatura variando de 22 °C a 26 °C e umidade variando de 62% a 78%, aonde permaneceram até 91 dias de idade.

Tabela 7 – Consumos reais de cimento, areia, agregado e água para a moldagem dos corpos-de-prova de concreto

CP	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Agregado (Kg)	Água (Kg)	Relação água/cimento
Brita nº1	387,5	968,8	821,6	193,8	0,5
Rio Branco	377,4	943,5	271,7	188,7	0,5
Senador Guiomard	383,9	959,8	479,9	192,0	0,5
Bujari	389,2	972,9	537,1	194,6	0,5

3.8 ENSAIOS REALIZADOS NOS CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO

Para a realização desta pesquisa, foram realizados ensaios nos corpos-de-prova no estado fresco e no estado endurecido, conforme apresenta a Tabela 17.

Tabela 8 – Ensaios realizados nos corpos-de-prova de concreto

Ensaio	Estado	Idade (dias)	Normatização
a Abatimento	Fresco	Moldagem	NBRNM 67:1998
b Resistência à compressão	Endurecido	7, 28 e 91	ABNT NBR 5739:2007

3.8.1 Abatimento

O abatimento do concreto foi obtido através do ensaio de abatimento do tronco de cone. No momento da moldagem dos corpos-de-prova, uma quantidade de concreto foi colocada dentro do cone metálico apoiado sobre uma placa metálica. A colocação feita em três etapas, sendo que em cada uma das etapas usou-se uma haste metálica para adensar o concreto. Após estar completamente cheio de concreto, o cone foi retirado. A diferença entre

a altura do cone metálico e a altura do concreto fresco representa o abatimento do concreto, como mostram as figuras 24 a, b e c.

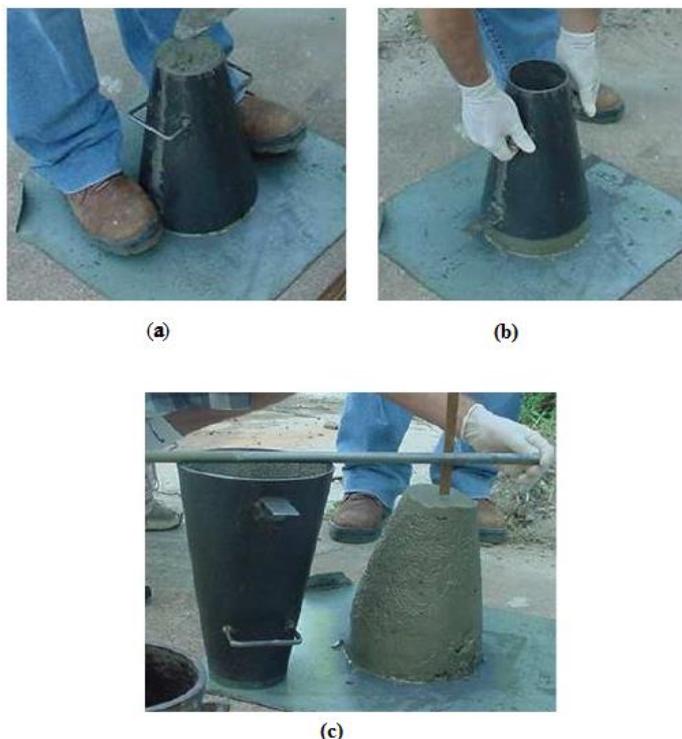


Figura 6 – a) Moldagem do corpo-de-prova no tronco de cone; (b) Retirada do tronco de cone; (c) Medida do abatimento do tronco de cone.

3.8.2 Resistência à compressão - ABNT NBR 5739:2007

Para o ensaio de resistência à compressão foram preparados 21 corpos-de-prova para cada um dos tipos de concreto confeccionados (dosagem diferente dos agregados). O ensaio foi realizado em quatro idades diferentes, sendo que aos 7 dias de idade foram rompidos 3 corpos-de-prova de cada tipo de concreto, aos 14 dias de idade foram rompidos mais 3 corpos-de-prova de cada tipo de concreto, aos 28 de idade foram rompidos 9 corpos-de-prova sendo 3 de cada tipo de concreto e aos 90 dias foram rompidos 5 corpos-de-prova para cada tipo de concreto, respectivamente.

Após a moldagem, os corpos-de-prova curaram por 24 horas, apenas para poderem ser desmoldados. Após esse período, os corpos-de-prova passaram pelo processo de capeamento, que consiste na aplicação de massa nas extremidades superiores e inferiores para o nivelamento, como mostra a Figura 25. Após o capeamento, os corpos-de-prova foram transferidos para a câmara úmida, onde permaneceram até 28 dias de idade.



Figura 25 – Moldagem dos corpos-de-prova

Nas datas referentes às idades de 7, 14, 28 e 90 dias de idade, os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, através de um equipamento de ensaio de compressão fabricado pela empresa “Alfred J. Amsler & Co”, como mostram as figuras 26 a, b e c.

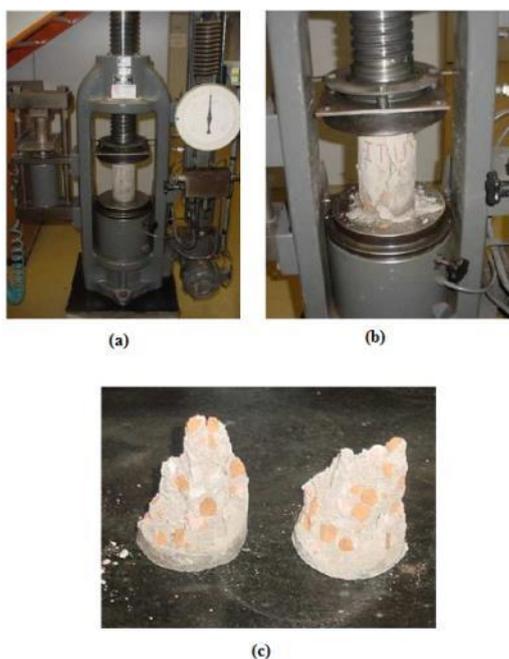


Figura 26 - (a) Corpo-de-prova preparado para ensaio de compressão; (b) Corpo-de-prova sendo rompido; (c) Corpo-de-prova rompido

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa sobre agregados pedra de barro para concretos estruturais. A análise será dividida em 2 etapas, sendo elas: caracterização das matérias-primas coletadas e a caracterização dos corpos-de-prova. Como optou-se pela confecção de agregados apenas com as massas de produção das empresas, na apresentação dos resultados serão apresentados apenas resultados referentes à essas amostras.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS NO CONCRETO

A coleta dos agregados, análises granulométricas NBR 7217 (ABNT, 1987), os ensaios de limites de consistência de massa específica dos sólidos NBR 7251 (ABNT, 1982), de impurezas orgânicas NBR 7220 (ABNT, 1987) e teor de material pulverulento – NBR 7219 (ABNT, 1989), foram realizados Laboratório da Fundação de Tecnologia do Acre - FUNTAC. Coletaram-se os agregados em empresa fornecedora dos agregados como a areia lavada na empresa Areal Aquiry e a pedra de barro produzida no Laboratório da Fundação de Tecnologia do Acre – FUNTAC para a produção dos corpos-de-prova. Os valores estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 9 – Resultado da análise das matérias-primas coletadas

Matéria prima coletada	Resultados obtidos					
	Composição granulométr. (mm)	Densidade aparente (Kg/dm ³)	Densidade real – miúdo (Kg/dm ³)	Densidade real - graúdo (Kg/dm ³)	Teor material pulver. (%)	Impurezas orgânicas (ppm)
AREIA LAVADA	0,03	1,337	2,632	-	3,58	300
PEDRA DE BARRO	19,00	1,109	-	2,331	-	-

A Tabela 19 apresenta as características físicas do tipo de agregado graúdo, passante na peneira de 25 mm e retido na peneira 4,8 mm, utilizado para a produção dos corpos-de-prova de concreto. Ressalta-se aqui que, por os agregados produzidos com as massas cerâmicas de Rio Branco, Senador Guiomard e Bujari apresentarem elevados valores de absorção de água, esses agregados foram utilizados na condição saturada, permanecendo

imersos em água à temperatura ambiente por 24 horas antes da moldagem. Para conferir as mesmas condições a todos os corpos-de-prova, os agregados de argila expandida e basalto também foram utilizados nas mesmas condições.

Tabela 10 – Característica física do agregado graúdo utilizado no corpo-de-prova de concreto

Agregado	Massa unitária de solo solto (Kg/m ³)	Massa específica saturada (Kg/m ³)	Absorção de água (%)
BRITA Nº1	1543	2930	0,8
PEDRA DE BARRO/ RIO BRANCO	503	947	12,6
PEDRA DE BARRO/ SENADOR GUIOMARD	965	2039	21,6
PEDRA DE BARRO/ BUJARI	1066	2129	15,6

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO

Os ensaios de resistência à compressão nos corpos-de-prova confeccionados com diferente proporção de agregados e foram realizados no Laboratório da Fundação de Tecnologia do Acre - FUNTAC. Foram ensaiados corpos-de-prova confeccionados e queimados com as misturas de matérias-primas utilizadas pelas empresas para a construção de estruturas em concreto armado. Esses ensaios foram realizados com o objetivo de se determinar as principais características dos agregados para a produção de concretos estruturais.

4.2.1 Consumos de material (real), abatimento e fator água/cimento

Neste trabalho procuramos variar o consumo de cimento, areia e o volume de agregados graúdos para os 6 diferentes tipos de traços de concreto. Os valores obtidos de traços, abatimento e fator água/cimento estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 11 – Consumos de material (real), abatimento e fator água/cimento utilizado nos corpos-de-prova de concreto

Consumo cimento (Kg/m ³)	Dosagem			Fator água/cimento	Abatimento (mm)
	Cimento	Areia	Pedra de barro		
200	1	3,984	4,541	1,17	50
250	1	3,037	3,652	0,92	55
300	1	2,410	3,063	0,75	60
350	1	2,011	2,688	0,59	55
370	1	1,830	2,518	0,58	60
400	1	1,648	2,347	0,52	50

4.2.2 Resistência à compressão

Ressalta-se aqui a importância dessas propriedades dos corpos-de-prova para a confecção dos agregados de pedra de barro, já que quanto maior a massa específica dos agregados, maiores suas resistências à compressão. Portanto, concretos confeccionados com pedra de barro com alta massa específica poderão apresentar maiores valores de resistência à compressão do que os concretos confeccionados com agregados leves de argila calcinada com baixos valores de massa específica. Porém, maiores valores de resistência à compressão estão diretamente ligados à maiores valores de massa específica dos concretos.

Para os ensaios de resistência à compressão e de massa específica aparente foram utilizados corpos-de-prova de concreto cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200mm de altura. O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 5739 (ABNT, 2007), em quatro idades diferentes, 7, 14, 28 e 90 dias. Para cada consumo de cimento foram utilizados 6 corpos-de-prova, para a idade de 7 e 14 dias foram utilizados 1 (um) corpo-de-prova para cada, para 28 dias 3 (três) corpos-de-prova e para 90 dias 1 (um) corpo-de-prova. Os valores obtidos para a resistência à compressão dos corpos-de-prova são apresentados na Tabela 21.

Tabela 12 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova de concreto

Consumo cimento (Kg/m ³) / Idade	Resistência à compressão							
	7 dias (MPa)	Carga máxima (kN)	14 dias (MPa)	Carga máxima (kN)	28 dias (MPa)	Carga máxima (kN)	90 dias (MPa)	Carga máxima (kN)
200	3,1	54	4,6	82	6,0	106	7,6	146
250	4,8	84	8,4	148	9,4	172	12,9	242
300	11,9	210	12,8	226	15,0	298	20,9	370
350*	12,6	222	16,6	294	21,5	408	34,0	614
370	16,4	290	17,3	306	25,6	468	32,1	574
400	12,0	212	23,0	406	26,6	508	31,5	594

*mistura ideal obtida para utilização em concreto

Analisando-se a Tabela 21, observa-se que com idade de 90 dias, a resistência à compressão dos corpos-de-prova variou de 7,6 MPa a 34,0 MPa alterando o consumo de cimento de 200 Kg/m³ até o consumo de 400 Kg/m³. Concluímos que com o consumo de 350 Kg/m³ encontramos a resistência máxima alcançada nos rompimentos com idade de 90 dias, e que com acréscimo de cimento acima dos 350 Kg/m³ não ocasionará nenhum acréscimo de resistência ao concreto e sim a diminuição de resistência do mesmo e um aumento de consumo de cimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos neste trabalho, há indicações de que a produção de concretos com agregados leves de pedra de barro pode ser viável na sua fabricação e aplicação, o que permite concluir que este tipo de concreto (com agregado de pedra de barro) pode ser empregado em estruturas. O agregado leve de pedra de barro mostra-se como uma alternativa viável para utilização na cidade de Rio Branco - AC, já que concretos confeccionados com esses agregados apresentaram desempenho em um patamar de resistência aceitável, além da possibilidade de disseminação desta tecnologia por todo o território nacional, já que existe uma grande quantidade de empresas produtoras de cerâmica no país.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguem abaixo algumas sugestões de continuidade deste trabalho:

- Realização de ensaios de abrasão Los Angeles nos agregados graúdos pedras de barro e de abrasão hidráulica nos concretos com esse agregado para melhor caracterização dos materiais;
- Estudos voltados para a redução dos valores de absorção de água dos agregados para níveis abaixo de 10% com adição de aditivos;
- Análises das possibilidades de reduções do valor da massa específica aparente e do aumento do valor da resistência mecânica dos agregados;
- Avaliação da durabilidade dos concretos com agregados de pedra de barro;
- Estudo da influência dos agregados leves de argila calcinada na microestrutura da zona de transição matriz-agregado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos de Concreto. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7251: Agregados em estado solto. Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7220: Agregados - Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7219: Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRNM 35: Agregados leves para concreto estrutural – Especificações. Rio de Janeiro, 1995.

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

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for structural lightweight aggregate concrete. ACI – 213R-03. ACI Manual of Concrete Practice, part 1, 27p., 2003.

ACI 318 – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Reliability- based Calibration of Design Code for Concrete Structures. The Board of Regents of the University of Nebraska. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABC. Anuário Brasileiro de Cerâmica 2002. São Paulo: 2002. 194p.

BUSTAMANTE, G. M., BRESSIANI, J. C. A indústria cerâmica brasileira. *Cerâmica Industrial*, São Carlos, v.5, n.3, maio/jun., 2000.

CABRAL, G. L. L. Metodologia de Produção e emprego de Agregados de Argila Calcinada Para Pavimentação. 2005. 358 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

CABRAL JUNIOR, M., MOTTA, J. F. M., ALMEIDA, A. S., TANNO, L. C. Argilas para Cerâmica Vermelha. In: LUZ, A. B.; FREITAS; LINS, F. A. F.. (Org.). *Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009, v. 1, p. 747-770.

CEB-FIP - COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON (CEB) e FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE (FIP). Design Code. Lausanne: CEB, p. 437, 1997. CEB-FIP Bulletin 53 – Model code for structural concrete: textbook on behaviour, design and performance Volume 3: Design of durable concrete structures. Lausanne, p. 390, 2009.

CHANDRA, S., BERNTSSON, L. *Lightweight aggregate concrete: science, technology, and applications*. Noyes Publications, USA, 409p., 2002.

EUROLIGHTCON. Project BE96-3942/R11. Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete. Pumping of lightweight aggregate concrete based on expanded clay in Europe. Noruega, 67p. 2000a.

EUROLIGHTCON. Project BE96-3942/R15. Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete. Light Weight Aggregate. Noruega, 25p. 2000b.

EUROLIGHTCON. Project BE96-3942/R23. Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete. Mechanical Properties of Lightweight Aggregate Concrete. Noruega, 48p. 2000c.

FRANÇA, M. O. Atuar em Ações Coletivas; Foco e Arranjos Produtivos Locais. In: VI Simpósio Sobre Recursos Naturais Sócio-Econômico do pantanal. 11, 2004.

GOMES, E. A. Cerâmicas odontológicas: o estado atual. *Cerâmica*, Set 2008, vol.54, no.331, p.319-325.

GOMES NETO, D. P. Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura – Estudo de caso. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 156p, 1998.

GRECO, J. A. S. Materiais para pavimentação Solos – Conceitos e Ensaio da Mecânica dos Solos Classificação dos Solos para fins rodoviários. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. Disponível em:

- <http://etg.ufmg.br/~jisela/pagina/Notas%20de%20aula%20solos.pdf>> Acesso em: 15 de Set de 2013.

GRUN, E. Caracterização de Argilas Provenientes de Canelinha/SC e Estudo de Formulações de Massas Cerâmicas. Joinville: CCT/UDESC, 2007.

HOFF, G. C. Guide for the use of low-density concrete in civil works projects. Innovations for navigation projects research program. U. S. Army Corps of Engineers, Washington – DC, 2002.

HOLM, T. A., BREMNER, T. W. High strength lightweight aggregate concrete, In: SHAH, S. P.; AHMAD, S. H., eds. High performance concrete: properties and applications. New York, McGraw-Hill. Cap. 10, pp. 341-374, 1994.

MOTTA, J. F. M., ZANARDO, A., CABRAL JÚNIOR, M. As Matérias – Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. Cerâmica Industrial, v. 6, n. 2, p. 28-39, Março / Abril, 2001.

OLIVEIRA, M. C., MARGANHA, M. F. B. Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica branca e de revestimento. São Paulo: CETESB, 84 p. 2006.

PÉREZ, C. A. S., PADUANI, C., ARDISSON, J. D., GOBBI, D., THOMÉ, A. Caracterização de massas cerâmicas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha em São Domingos do Sul – RS. Cerâmica Industrial, v. 15, n. 1, p. 38-43, Janeiro / Fevereiro 2010.

PRACIDELLI, S., MELCHIADES, F. G. Importância da Composição Granulométrica de Massas para Cerâmica Vermelha. Cerâmica Industrial, v. 2, n. 1/2, 1997.

ROSSIGNOLO, J. A., AGNESINI, M. V. C. Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete. Cement and Concrete Research, v. 32, n. 3, 2002.

ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré – fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo - USP, São Carlos - SP, 211p, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A., AGNESINI, M. V. C. Concreto leve estrutural. In: ISAIA; G. C. (Ed.) Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo, IBRACON, v.02, p. 1333-62, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A., OLIVEIRA, I. L.. Concreto Leve Estrutural Com Metacaulim. Revista Minerva – Pesquisa & Tecnologia. V. 3, Nº 2, p – 177-187. Julho a Dezembro de 2006.

ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações. 1 ed., São Paulo, Ed. PINI, 2009a.

SANTIS, B. C. Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutural: viabilidade da cerâmica vermelha do Estado de São Paulo. São Carlos, 2012. 146f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de São Paulo.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia das Argilas. 2 ed. Ver. Atual. Volume 1. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda. 1989a. 496 p. Il.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia das Argilas. 2 ed. Ver. Atual. Volume 2. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda. 1989b. 496 p. Il.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia das Argilas. 2 ed. Ver. Atual. Volume 3. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda. 1989c. 496 p. II.

SEBRAE – SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. Cerâmica vermelha para construção: telhas, tijolos e tubos. Estudos de Mercado SEBRAE/ESPM, 40p, 2008.

SOARES, A. L. C. P., BATISTA, F. G. S., CABRAL, G. L. L. Estudo da Viabilidade Técnica do Agregado de Argila Calcinada para a Pavimentação da Amazônia. Projeto de Fim de Curso, Instituto Militar de Engenharia-IME, Rio de Janeiro, 1998.

VIEIRA, C. M. F., FEITOSA, H. S., MONTEIRO, S. N. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot. Cerâmica Industrial, v. 8, n. 1, pp. 42–46, Janeiro/ Fevereiro, 2003a.

VIEIRA, C. M. F., SOARES, T. M., MONTEIRO, S. N. Massas Cerâmicas para Telhas: Características e Comportamento de Queima. v. 49, n. 312, p – 245-250, 2003b.

ZHANG, M. N. & GJØRV, O. E. Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete. ACI Materials Journal, v.88, n.3, p.240-247, 1991.

ANEXOS

Anexo 1 – Resultado da análise do agregado fino – areia lavada

FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE - FUNTAC					
GERÊNCIA PRESTAÇÃO DE SERVIÇO - LABORATÓRIO DE CONCRETO E ARGAMASSA			RECEBIDO EM: 27/01/14		
MATERIAL: AREIA LAVADA - RIO ACRE		COLETADO POR: JOELSON		REALIZADO EM: 04/02/14	
PROCEDÊNCIA: Rio Acre			AMOSTRA:		
INTERESSADO: Gustavo Menezes Mateus			LABORAT.: JOELSON		
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA - ABNT - NBR 7217					
PESO DA AMOSTRA					
ABERT. PENEIRA (mm)	PESO RETIDO			PERC. RETIDA	
	1ºDET.	2ºDET.	MÉDIA	INDIVIDUAL	ACUMULADA
76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,2	2,60	2,60	2,60	0,26	0,26
0,6	6,40	6,60	6,50	0,65	0,91
0,3	30,40	32,10	31,25	3,13	4,04
0,15	855,40	854,40	854,90	85,49	89,53
FUNDO	105,20	104,30	104,75	10,48	100,00
TOTAL	1.000,00	1.000,00	1.000,00	100,00	-
DIAMETRO MÁXIMO (mm)		0,3	MÓDULO DE FINURA:		0,95
DENSIDADE APARENTE OU MASSA - ABNT NBR 7251					
AGREGADO GRAÚDO			AGREGADO MIÚDO (X)		
A- VOL. RECIP.	14.842,00	PESO DO RECIP.(g)		3.089,00	
DETERMINAÇÃO	1º	2º	3º	MÉDIA (Kg/dm³)	
PESO RECIPIENTE + AGREGADO (g)	22.841,00	22.980,00	22.994,00	1,337	
B- PESO DO AGREG.	19.752,00	19.891,00	19.905,00	1,331	
MASSA UNITÁRIA	1,331	1,340	1,341	1,337	
IMPUREZAS ORGÂNICAS - ASTM-NBR 7220					
IND. DE COLORAÇÃO (VALOR MAX. 300ppm)	1º	2º	3º	MÉDIA (ppm)	
	300	300	300	300	
DENS. REAL OU MASSA ESPEC.- MIÚDO-CHAPMAN					
DETERMINAÇÃO	1º	2º	MÉDIA (Kg/dm³)		
Nº DO FRASCO DE CHAPMAN	1,0	2,0	2,632		
LF - LEITURA FINAL (cm³)	390,0	390,0	2,632		
MASSA ESPECÍFICA 500 LF -200	2,632	2,632	2,632		
DENS. REAL OU MASSA ESPEC.-GRAÚDO-VOLUME					
DETERMINAÇÃO	1º	2º	MÉDIA (Kg/dm³)		
A-PESO DO AGREGADO SECO			1,337		
B-VOLUME DE ÁGUA SAÍDA			1,331		
MASSA ESPECÍF. A B			1,337		
TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO - NBR 7219					
DETERMINAÇÃO	1º	2º	(valor max. igual a 5,0%)		
A-PESO DO AGREGADO SECO - INICIAL	1.000,0	1.000,0	3,58		
B-PESO DO AGREGADO SECO/APÓS LAVAGEM	963,3	965,1	3,58		
TEOR DE MAT. PULV. A - B X 100 A	3,67	3,49	3,58		
VISTO TÉCNICO					

Anexo 2 – Resultado da análise do agregado graúdo – pedra de barro

FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE - FUNTAC					
GERÊNCIA PRESTAÇÃO DE SERVIÇO - LABORATÓRIO DE CONCRETO E ARGAMASSA			RECEBIDO EM: 27/01/14		
MATERIAL: PEDRA DE BARRO		COLETADO POR: JOELSON		REALIZADO EM: 04/02/14	
PROCEDÊNCIA: FUNTAC			AMOSTRA:		
INTERESSADO: Gustavo Menezes Mateus			LABORAT.: JOELSON		
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA - ABNT - NBR 7217					
PESO DA AMOSTRA					
ABERT. PENEIRA (mm)	PESO RETIDO			PERC. RETIDA	
	1ºDET.	2ºDET.	MÉDIA	INDIVIDUAL	ACUMULADA
76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9,5	2744,10	2740,20	2742,15	91,41	91,41
4,8	189,30	191,20	190,25	6,34	97,75
2,4	39,90	39,70	39,80	1,33	99,07
1,2	0,00	0,00	0,00	0,00	99,07
0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	99,07
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	99,07
0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	99,07
FUNDO	26,70	28,90	27,80	0,93	100,00
TOTAL	3.000,00	3.000,00	3.000,00	100,00	-
DIAMETRO MÁXIMO (mm) 19			MÓDULO DE FINURA.: 6,85		
DENSIDADE APARENTE OU MASSA - ABNT NBR 7261					
AGREGADO GRAÚDO (X)			AGREGADO MIÚDO ()		
A- VOL. RECIP.		14.842,00	PESO DO RECIP.		3.089,00
DETERMINAÇÃO	1º	2º	3º	MÉDIA (Kg/dm³)	
PESO RECIPIENTE + AGREGADO	19.545,00	19.540,00	19.545,00	1,109	
B- PESO DO AGREG.	16.456,00	16.451,00	16.456,00	1,109	
MASSA UNITÁRIA	1,109	1,108	1,109	1,109	
IMPUREZAS ORGÂNICAS - ASTM-NBR 7220					
IND. DE COLORAÇÃO (VALOR MAX. 300ppm)	1º	2º	3º	MÉDIA (ppm)	
	-	-	-		
DENS. REAL OU MASSA ESPEC.- MIÚDO-CHAPMAN					
DETERMINAÇÃO	1º	2º	MÉDIA (Kg/dm³)		
Nº DO FRASCO DE CHAPMAN					
LF - LEITURA FINAL (cm³)					
MASSA ESPECÍFICA $\frac{500}{LF - 200}$					
DENS. REAL OU MASSA ESPEC.-GRAÚDO-VOLUME					
DETERMINAÇÃO	1º	2º	MÉDIA (Kg/dm³)		
A-PESO DO AGREGADO SECO	1.270,3	1.223,6	2,331		
B-VOLUME DE ÁGUA SAÍDA	540,0	530,0			
MASSA ESPECÍF. $\frac{A}{B}$	2,352	2,309			
TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO - NBR 7219					
DETERMINAÇÃO	1º	2º	MÉDIA		
A-PESO DO AGREGADO SECO - INICIAL					
B-PESO DO AGREGADO SECO/APÓS LAVAGEM					
TEOR DE MAT. PULV. $\frac{A - B}{A} \times 100$					
A					
VISTO TÉCNICO					

Anexo 3 – Resultado da resistência obtida dos corpos-de-prova – consumo 200 Kg/m³

<p style="text-align: center;">FUNTAC FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE</p>											
<p>ENSAIOS DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA</p>											
OBRA: Pesquisa Pedra de Barro (FUNTAC)						DATA: 07/05/2014					
DOSAGEM: 1 : 3,984 : 4,541			CONSUMO: 200 kg/m ³			CIMENTO: Votorantim CPII - 32					
<small>Cim Areia Pedra de Barro</small>											
FATOR A/C: 1,17			SLUMP: 50 mm			D.MÁX.AGREG.: 19 mm					
ELEMENTO ESTRUTURAL: Ensaio Experimental						HORA: 11:00					
7 DIAS			14 DIAS			28 DIAS			90 DIAS		
Nº	CARGA	TENSÃO	Nº	CARGA	TENSÃO	Nº	CARGA	TENSÃO	Nº	CARGA	TENSÃO
C. P. (s)	(Kg)	(M pa)	C. P. (s)	(Kg)	(M pa)	C. P. (s)	(Kg)	(M pa)	C. P. (s)	(Kg)	(M pa)
1497	5.400	3,06	1498	8.200	4,64	1499	10.600	6,00	1502	14.600	8,26
						1500	10.600	6,00	1503	12.400	7,02
						1501	10.600	6,00			
MÉDIA		3,06			4,64			6,00			7,64
DÉSVIO											
RELATIVO											
14/02/2014			21/02/2014			28/02/2014			24/04/2014		

Anexo 4 – Resultado da resistência obtida dos corpos-de-prova – consumo 250 Kg/m³

<p style="text-align: center;">FUNTAC FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE</p>											
<p>ENSAIOS DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA</p>											
OBRA: Pesquisa Pedra de Barro (FUNTAC)						DATA: 07/05/2014					
DOSAGEM: 1 : 3,037 : 3,652			CONSUMO: 250 kg/m ³			CIMENTO: Votorantim CPII - 32					
<small>Cim Areia Pedra de Barro</small>											
FATOR A/C: 0,92			SLUMP: 55 mm			D.MÁX.AGREG.: 19 mm					
ELEMENTO ESTRUTURAL: Ensaio Experimental						HORA: 14:00					
7 DIAS			14 DIAS			28 DIAS			90 DIAS		
Nº	CARGA	TENSÃO	Nº	CARGA	TENSÃO	Nº	CARGA	TENSÃO	Nº	CARGA	TENSÃO
C. P. (s)	(Kg)	(M pa)	C. P. (s)	(Kg)	(M pa)	C. P. (s)	(Kg)	(M pa)	C. P. (s)	(Kg)	(M pa)
1504	8.400	4,75	1505	14.800	8,38	1506	16.000	9,05	1509	21.200	12,00
						1507	16.400	9,28	1510	24.200	13,69
						1508	17.200	9,73			
MÉDIA		4,75			8,38			9,36			12,85
DÉSVIO											
RELATIVO											
14/02/2014			21/02/2014			28/02/2014			24/04/2014		

Anexo 7 – Resultado da resistência obtida dos corpos-de-prova – consumo 370 Kg/m³

<p style="text-align: center;">FUNTAC FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE</p>											
ENSAIOS DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA											
OBRA: Pesquisa Pedra de Barro (FUNTAC)						DATA: 07/05/2014					
DOSAGEM: 1 : 1,830 : 2,518			CONSUMO: 370 kg/m ³			CIMENTO: Votorantim CII - 32					
<small>Cim Areia Pedra de Barro</small>											
FATOR A/C: 0,579			SLUMP: 60 mm			D.MÁX.AGREG.: 19 mm					
ELEMENTO ESTRUTURAL: Ensaio Experimental						HORA: 10:30					
7 DIAS			14 DIAS			28 DIAS			90 DIAS		
Nº C. P. (s)	CARGA (Kg)	TENSÃO (M pa)	Nº C. P. (s)	CARGA (Kg)	TENSÃO (M pa)	Nº C. P. (s)	CARGA (Kg)	TENSÃO (M pa)	Nº C. P. (s)	CARGA (Kg)	TENSÃO (M pa)
1483	29.000	16,41	1482	30.600	17,32	1484	46.800	26,48	1487	56.000	31,69
						1485	43.600	24,67	1488	57.400	32,48
						1486	45.200	25,58			
MÉDIA		16,41			17,32			25,58			32,09
DÉSVIO											
RELATIVO											
14/02/2014			21/02/2014			28/02/2014			24/04/2014		

Anexo 8 – Resultado da resistência obtida dos corpos-de-prova – consumo 400 Kg/m³

<p style="text-align: center;">FUNTAC FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE</p>											
ENSAIOS DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA											
OBRA: Pesquisa Pedra de Barro (FUNTAC)						DATA: 07/05/2014					
DOSAGEM: 1 : 1,648 : 2,347			CONSUMO: 400 kg/m ³			CIMENTO: Votorantim CII - 32					
<small>Cim Areia Pedra de Barro</small>											
FATOR A/C: 0,52			SLUMP: 50 mm			D.MÁX.AGREG.: 19 mm					
ELEMENTO ESTRUTURAL: Ensaio Experimental						HORA: 10:00					
7 DIAS			14 DIAS			28 DIAS			90 DIAS		
Nº C. P. (s)	CARGA (Kg)	TENSÃO (M pa)	Nº C. P. (s)	CARGA (Kg)	TENSÃO (M pa)	Nº C. P. (s)	CARGA (Kg)	TENSÃO (M pa)	Nº C. P. (s)	CARGA (Kg)	TENSÃO (M pa)
1518	21.200	12,00	1519	40.600	22,98	1520	50.800	28,75	1523	52.000	29,43
						1521	48.800	27,62	1524	59.400	33,61
						1522	41.400	23,43			
MÉDIA		12,00			22,98			26,60			31,52
DÉSVIO											
RELATIVO											
14/02/2014			21/02/2014			28/02/2014			24/04/2014		