

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

EDISLEY MARTINS CABRAL

FABRICAÇÃO DE CONCRETO COM AGREGADO DE ARGILA
CALCINADA PRODUZIDA COM SOLO DO PÓLO OLEIRO DO
AMAZONAS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
AMAZONAS, COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

Manaus
2008

EDISLEY MARTINS CABRAL

FABRICAÇÃO DE CONCRETO COM AGREGADO DE ARGILA
CALCINADA PRODUZIDA COM SOLO DO PÓLO OLEIRO DO
AMAZONAS

Aprovada por:

.....
Profº Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos - Presidente
Universidade Federal do Amazonas

.....
Profº Dr. Raimundo Kennedy Vieira
Universidade Federal do Amazonas

.....
Profº Dr. Guilherme Chagas Cordeiro
Universidade Federal do Norte Fluminense

Agradecimentos

Nesta caminhada do mestrado encontrei muitas dificuldades, porém, também encontrei muitas pessoas boas que se tornaram muito importantes. Pessoas que me incentivaram com palavras simples que mesmo sem saber, ajudaram-me a persistir nesse processo de construção do conhecimento.

Em especial agradeço a Deus que me proporcionou saúde para estudar, trabalhar e ânimo para enfrentar as dificuldades.

Agradeço também aos meus familiares: Mamãe, João, Ivanete, Luizete, Edvaney, Val, Zinho, Eliton, Lauri, Adriana, Vitória, Fabi, Raiomara e Gabriel, que suaram a camisa na moldagem dos agregados, bem como meu irmão Zé que, cada um, ao seu modo, disponibilizaram apoio incondicional à realização dessa pesquisa. Também não poderia esquecer do Joãozinho, meu sobrinho, que através da sua ajuda, muitos agregados foram jogados e esmagados.

Meu eterno agradecimento ao meu falecido Pai, Cosmo Cabral.

À Maiza, que ao meu lado, se dispôs a me compreender e acolher nos momentos mais difíceis, oferecendo seu apoio e carinho irrestritos, exaltando as minhas potencialidades e me ajudando a crescer frente aos desafios.

Aos meus amigos Zeca, Eude, Dani e Alberto que também desprenderam seu tempo e seus esforços, por acreditarem no êxito desse trabalho.

Agradeço também à Arlene e ao Aleixo pelos momentos que estudamos juntos e pela troca de informações que foram importantes.

Aos técnicos do laboratório Nilson, Jorge, Dolores. Não poderia esquecer à Ivana que sempre se empenhou em atender as necessidades que esse trabalho exigia.

Às professoras Ellen e Annunziata por terem cedido o laboratório de Saneamento para a execução dos ensaios. Agradeço aos técnicos desse laboratório: Ester, Ana e Alexandra pela ajuda.

Aos meus mestres que muito colaboraram nesse aprendizado, prof. Raimundo Vasconcelos, prof. Kenedy Vieira, prof. Sanderson, prof. Casarine, prof. Bosco Ladislau, prof. Francisco Rocha, prof^a. Adalena Kenedy, prof^a Consuelo Frota. Ao professor Vilar Câmara que nos momentos oportunos me motivou com sua experiência e simplicidade.

Ao laboratório de Pavimentação, através do professor Nilton de Souza Campelo que disponibilizou os equipamentos para execução dos ensaios.

Ao laboratório de mecânica dos solos, por intermédio da professora Consuelo Alves da Frota que disponibilizou os equipamentos para execução dos ensaios.

Agradeço aos meus companheiros de laboratório Luciane e Rogério pela colaboração e pela experiência partilhada que foram além das contribuições acadêmicas, criando verdadeiros vínculos de respeito e amizade.

Ao professor Rui que disponibilizou do seu tempo para avaliar meus dados, sugerir mudanças e pela colaboração na construção do abstract.

Agradeço de modo especial ao professor Raimundo Pereira de Vasconcelos por ter me acolhido e apoiado no momento mais importante dessa pesquisa, pelo incentivo e confiança a mim depositados. Quero registrar meu respeito e admiração pela sua dedicação ao ensino, cordialidade e compromisso para com os seus orientandos, fazendo-me descobrir em sua pessoa a verdadeira vocação de um orientador.

Resumo

A região amazônica pela sua formação geológica não dispõe de rochas de fácil extração para uso na construção civil, devido a isto, o seixo rolado obtido da dragagem do leito dos rios, é o agregado graúdo comercialmente mais utilizado para a produção de concreto. Devido a isso, a busca de agregados alternativos tem sido uma fonte constante de pesquisa.

Neste trabalho é apresentado um estudo das características e propriedades tecnológicas de duas massas cerâmicas utilizadas para produção de tijolo, oriundas das cidades de Iranduba – AM e Manacapuru – AM, com a finalidade de fabricar agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto.

As massas cerâmicas foram submetidas a ensaios de difração de raios X, composição química, distribuição do tamanho das partículas e plasticidade. Foram confeccionados corpos-de-prova por prensagem uniaxial a 20 MPa para a queima nas temperaturas de 850, 950, 1050, 1150 °C. Sendo as propriedades tecnológicas após queima avaliadas por: retração linear, absorção de água, massa específica aparente, massa unitária e a temperatura de gresificação. A massa cerâmica que apresentou menor massa específica aparente e o menor percentual de umidade de moldagem foi escolhida como matéria-prima para a fabricação do agregado sintético de argila calcinada.

Esse agregado foi usado em substituição ao agregado natural da região amazônica, o seixo rolado, em concreto estrutural, o qual demonstrou que com esse tipo de aplicação pode-se obter um produto com resistência mecânica satisfatória e menor massa específica aparente, atendendo assim a finalidade dessa pesquisa.

Abstract

The Amazonia area for geological formation doesn't have rocks of easy extraction for use in the building site, due to this, the natural gravel obtained of the dredging of the bed of the rivers, it is the great aggregate commercially more used for the concrete production. Due to that, the search of alternative aggregate has been a constant source of research.

Therefore, this work presents a study of the characteristics and technological properties of two ceramic pastes, coming from the country of Iranduba and Manacapuru - AM, with the purpose of manufacturing synthetic aggregate of calcined clay for use in concrete.

The ceramic pastes were submitted to analysis of X-ray diffraction, chemical composition, particle size distribution and plasticity. Samples were made by uniaxial pressure at 20 MPa to burn in the following temperatures : 850, 950, 1050, 1150 °C. The technological properties evaluated were: linear shrinkage, water absorption, apparent specific mass and vitrification temperature. The ceramic paste that presented the smallest apparent specific mass and smallest percentile of molding humidity was chosed for synthetic aggregate.

The results obtained for the concrete produced with the synthetic aggregate of calcined clay show its potential as a substitute of the natural aggregate of Amazonic region, the natural gravel, which, it demonstrated that with that application type it can be obtained a product with mechanical resistance satisfactory and smaller apparent specific mass, assisting like this the purpose of that research.

\

Lista de figura

Figura 2.1 – Agregado leve Haydite.	24
Figura 2.2 – Fabricação do Lytag EUA.	25
Figura 2.3 – Forno rotativo para a produção de agregados leves em escala piloto.	29
Figura 2.4 – Digrama de blocos da fabricação do agregado leve de argila expandida da cinasita.	30
Figura 3.1 Depósito de argila da olaria de Iranduba.	40
Figura 3.2 – Depósito de argila da olaria de Manacapuru.	40
Figura 3.3 – Máquina de prensagem das barrinhas.	48
Figura 3.4 – Forno elétrico tipo mufla.	49
Figura 3.5 – Prensa elétrica para ruptura dos corpos-de-prova.	50
Figura 3.7 – Ensaio de fervura.	55
Figura 3.8 – Abatimento do concreto.	56
Figura 3.9 – Misturas dos materiais na betoneira.	57
Figura 3.10 – Moldagem dos corpos-de-prova.	58
Figura 3.11 – Secagem dos corpos-de-prova.	59
Figura 3.12 – Imersão dos corpos-de-prova.	60
Figura 3.13 – Obtenção da massa imersa.	60
Figura 3.14 – Ensaio de resistência à compressão.	61
Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo 1.	68
Figura 4.2 – Curva granulométrica do solo 2.	68
Figura 4.3 – Resultado da difração de raios-X do solo 1.	70
Figura 4.4 – Resultado da difração de raios-X do solo 2.	70
Figura 4.5 – Gráfico de gresificação do solo 1.	72
Figura 4.6 – Gráfico de gresificação do solo 2.	72
Figura 4.7 – Gráfico da massa específica versus temperatura.	73
Figura 4.8 – Gráfico do módulo de ruptura a flexão versus temperatura.	74
Figura 4.9 – Gráfico da Porosidade versus Temperatura.	74
Figura 5.1 – Forno usado para queima dos produtos tijolos.	84
Figura 5.2 – Boquilhas de moldagem.	87
Figura 5.3 – Moinho para extrusão da matéria-prima.	87
Figura 5.4 – Corte das barras moldados para a secagem.	88
Figura 5.5 – Secagem ao dos agregados.	89
Figura 5.6 – Secagem em estufa dos agregados.	89
Figura 5.7 – Variação da absorção de água com o tempo de queima.	90
Figura 5.8 – Queima dos agregados de argila.	90
Figura 6.1 – Curva granulométrica do seixo rolado.	98
Figura 6.2 – Curva granulométrica da areia.	99
Figura 6.3 – Gráfico da resistência do concreto AC8N.	102
Figura 6.4 – Gráfico da resistência do concreto AC8NA.	103
Figura 6.5 – Gráfico da resistência do concreto AC8I.	105
Figura 6.6 – Gráfico da resistência do concreto AC8IA.	106
Figura 6.7 – Gráfico da resistência do concreto AC1N.	108
Figura 6.8 – Gráfico da resistência do concreto AC1NA.	109
Figura 6.9 – Gráfico da resistência do concreto AC1I.	110
Figura 6.10 – Gráfico da resistência do concreto AC1IA.	111

Lista de tabela

Tabela 2.1 Sistema de Classificação de Agregados Sintéticos Graúdos.....	17
Tabela 2.2 – Composição química preferencial da matéria-prima.....	23
Tabela 2.3 – Composição química da matéria-prima do agregado Aglite.....	25
Tabela 2.4 – Parâmetros obtidos para a construção do diagrama de dosagem.....	38
Tabela 4.1 – Caracterização das amostras de solo.....	67
Tabela 4.2 – Composição granulométrica dos produtos da cerâmica vermelha.	69
Tabela 4.3 – Composição dos elementos químicos das amostras.	71
Tabela 6.1 – Caracterização física dos agregados graúdos.	98
Tabela 6.2 – Características técnicas do aditivo.....	99
Tabela 6.3 – Dosagem dos componentes do concreto AC8N.....	101
Tabela 6.4 – Resultado das dosagens do AC8N.....	101
Tabela 6.5 – Dosagem dos componentes do concreto AC8NA.	102
Tabela 6.6 – Resultado das dosagens do AC8NA.	103
Tabela 6.7 – Dosagem dos componentes do concreto AC8I.....	104
Tabela 6.8 – Resultado das dosagens do AC8I.....	104
Tabela 6.9 – Dosagem dos componentes do concreto AC8IA.....	106
Tabela 6.10 – Resultado das dosagens do AC8IA.....	106
Tabela 6.11 – Dosagem dos componentes do concreto AC1N.	107
Tabela 6.12 – Resultado das dosagens do AC1N.....	107
Tabela 6.13 – Dosagem dos componentes do concreto AC1NA.	108
Tabela 6.14 – Resultado das dosagens do AC1NA.....	108
Tabela 6.15 – Dosagem dos componentes do concreto AC1I.....	109
Tabela 6.16 – Resultado das dosagens do AC1I.....	110
Tabela 6.17 – Dosagem dos componentes do concreto AC1IA.....	111
Tabela 6.18 – Resultado das dosagens do AC1IA.....	111
Tabela 6.19 – Dosagem dos componentes do concreto com seixo.....	112
Tabela 6.20 – Resultado das dosagens do seixo.....	112

Sumário

1	Introdução.....	11
1.1	Considerações iniciais	11
1.2	Escopo do trabalho	14
2	ARGILA EMPREGADA COMO AGREGADO SINTÉTICO	16
2.1	Considerações iniciais	16
2.2	Matéria-prima para produção do agregado sintético cerâmico.....	19
2.3	Agregado sintético de argila expandida	23
2.4	Agregado sintético de argila calcinada.....	32
2.5	Utilização de agregados sintéticos de argila em concreto	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1	Fases da pesquisa	39
3.2	Coleta dos solos	39
3.2.2	Caracterização das amostras dos solos	41
3.2.3	Difração de raios-X	43
3.2.4	Análise química elementar	45
3.2.5	Ensaio tecnológicos.....	47
3.3	Caracterização dos agregados para o concreto	52
3.3.1	Granulometria dos agregados.....	52
3.3.2	Massa unitária	53
3.3.3	Massa específica e absorção dos agregados.....	53
3.3.4	Desgaste por Abrasão “Los Angeles”.....	53
3.3.5	Perda de massa após fervura	54
3.4	Confecção e caracterização do concreto.....	56
3.4.1	Determinação da consistência	56
3.4.2	Confecção dos corpos-de-prova	57
3.4.3	Massa específica do concreto.....	58
3.4.4	Resistência à compressão simples	61
4	ESTUDO DE DOIS TIPOS DE SOLO PARA FABRICAÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA	62
4.1	Considerações iniciais	62
4.2	Resultados e discussão	66
4.2.1	Caracterização física e mineralógica das amostras de solo.	66
4.2.2	Composição química e sinterização das amostras de solo.....	71
5	FABRICAÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA.....	76
5.1	A indústria da cerâmica	76
5.2	Fabricação da cerâmica	78
5.2.1	Extração das argilas	79
5.2.2	Estocagem e mistura da matéria-prima.....	80
5.2.3	Moldagem	81
5.2.6	Secagem	82
5.2.5	Queima.....	83
5.3	Fabricação do agregado de argila calcinada.	85
6	APLICAÇÃO DO AGREGADO DE ARGILA CALCINADA EM CONCRETO.....	92
6.1	Características do concreto	92
6.2	Caracterização dos componentes do concreto	96

6.2.1 Agregado graúdo	96
6.2.2 Agregado miúdo	98
6.2.3 Água.....	99
6.2.4 Plastificante	99
6.3 Produção de concretos	100
6.3.1 Concretos com agregado calcinado a 850 °C.....	100
6.3.1.1 Sem imersão do agregado	100
6.3.1.2 Com imersão do agregado.....	103
6.3.2 Concretos com agregado calcinado a 1125 °C.....	107
6.3.2.1 Sem imersão do agregado	107
6.3.2.2 Com imersão do agregado.....	109
6.3.3 Concretos com seixo rolado	111
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	113
7.1 Conclusões	113
7.2 Sugestões para futuras pesquisas	115
Referência bibliográfica	116

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

O Estado do Amazonas com uma superfície de aproximadamente de 1.577.820,2 km², mantém fronteira com a Venezuela, Colômbia e Peru, além dos limites estaduais com Roraima, Pará, Mato grosso, Rondônia e Acre. Caracteriza-se por uma extensa cobertura sedimentar fanerozóica, distribuída nas bacias do Acre, Solimões, Amazonas e alto Tapajós que se depositou sobre um substrato rochoso pré-cambriano onde predominam rochas de natureza ígnea, metamórfica e sedimentar.

Essa formação geológica peculiar vem se tornando um importante obstáculo ao desenvolvimento, pois mais da metade do estado do Amazonas é coberto por sedimentos finos como argila, silte e areia. Essa característica abrange grande parte da Amazônia legal e, devido a essa formação, existe uma enorme dificuldade de se encontrar jazidas economicamente viáveis de rochas minerais capazes de fornecerem agregados britados naturais. Em decorrência da escassez de agregados pétreos e da elevada distância de transporte de agregados, o custo desses insumos é relativamente alto, dificultando as obras de engenharia.

Existem quatro tipos de rochas que constituem a fonte de brita no estado do Amazonas:

- 1) Arenitos silicificados da formação Alter do Chão, extraído no entorno da cidade de Manaus;
- 2) Riólito, riodacito e outras rochas vulcânicas extraída da BR-174 no município de Presidente Figueiredo a 115 km de Manaus;

3) Rochas graníticas em Presidente Figueiredo, com duas frentes de lavra na BR-174 entre os quilômetros 154 e 160;

4) As rochas gnaisse encontradas no município de Barcelos, distando de cerca de 255 km de Manaus pelo rio Negro.

Por outro lado, o seixo rolado utilizado no estado do Amazonas é retirado do leito dos rios, sendo normalmente extraído por meio de dragas. A intensa utilização desse mineral decorre da grande demanda dos municípios, o custo elevado da brita e sua aplicação semelhante a dos outros agregados, sendo utilizado em concreto betuminoso e estrutural.

As atuais lavras de extração do seixo rolado estão localizadas nos rios Japurá, Solimões, Negro, Nhamundá e Aripuanã que é o principal fornecedor de seixo do estado. Essa extração é danosa ao meio ambiente, pois provoca o assoreamento do leito dos rios, sendo inclusive condenada pelos órgãos ambientais.

Dessa forma, em função da escassez de agregados pétreos na região e da elevada distância de transporte desses agregados, que geram um aumento considerável nos custos da construção civil, torna-se interessante o estudo da viabilidade de utilização de outro material alternativo existente nas localidades, como o solo argiloso para a produção de agregados sintéticos.

Nos municípios de Iranduba e Manacapuru está instalado o maior pólo oleiro de cerâmica vermelha do Estado do Amazonas, que dispõe de extensas áreas de depósitos aluvionares e de alteração constituindo as principais fontes de matéria-prima para a produção de tijolos e telhas (CPRM, 2006).

Estudos geológicos efetuados pela CPRM, realizados com base em sondagens e ensaios cerâmicos preliminares fornecem a indicação para o pólo de um grande potencial de argila para cerâmica vermelha. Esses estudos permitiram a inferência de reservas geológicas da ordem de 4,315 bilhões de metros cúbicos.

Basicamente existem três tipos de materiais argilosos conhecidos e usados no Amazonas:

1) Argilas muito plásticas que se encontram nas aluviões recentes que se relacionam a ambientes de planície de inundação, sendo amplamente empregadas na indústria da cerâmica vermelha;

2) Argilas pouco plásticas, mosqueada e pouca arenosa, oriundas de depósitos residuais formados a partir de alteração de rochas da formação Alter do Chão, responsável pela totalidade da produção de tijolos cerâmicos desse pólo.

3) Argilas levemente arenosas oriundas de latossolos e que tem utilização na construção de aterros, no preparo de argamassa e também na produção de cimento.

Com base nessas informações, o estudo da fabricação de agregado sintético de argila iniciou-se na tentativa de produção da argila expandida. No entanto, esse tipo de agregado possui um custo elevado, porque, necessita de altas temperaturas durante a queima, e as argilas precisam ter propriedades piroexpansivas. Porém, a produção de argila calcinada é feita com temperatura mais baixa que a expandida, diminuindo assim o custo do produto cerâmico. Além disso, a matéria-prima não precisa apresentar características piroexpansivas, tornando assim muito mais fácil a sua produção, tendo em vista a abundância de solo argiloso na região.

Neste contexto, foram realizados estudos e ensaios laboratoriais de solos do pólo oleiro de Manacapuru e Iranduba visando verificar o potencial desta matéria-prima para fabricação de agregado sintético de argila calcinada, de modo a ser utilizado em substituição ao agregado convencional da região amazônica para uso em concreto.

Para se alcançar este objetivo foi desenvolvido métodos e equipamentos que permitissem produzir um agregado sintético a partir do umedecimento da argila. Como ponto de partida, foi realizada uma visita nas olarias, a fim de se adquirir conhecimento do processo

de produção de tijolos. A segunda etapa foi montar uma máquina capaz de reproduzir em laboratório o processo de produção das olarias. Com isso foram produzidos agregados de argila calcinada nas dimensões de 4,8; 9,5 e 12,5 mm, sendo estas dimensões superior e inferior relacionados respectivamente ao tamanho máximo encontrado no seixo e às restrições dos moldes de produção. Em seguida os agregados foram calcinados na temperatura de 850 °C, pois os fornos da região apresentam capacidade de queima em torno deste valor. Além dessa temperatura os agregados também foram calcinados na temperatura de gresificação da matéria-prima, cujo valor é obtido através da intersecção das curvas de absorção de água com a retração linear. Finalmente foram produzidos concretos com agregados de argila calcinada com valores de massa específicas mais baixas que aqueles obtidos para o concreto com o agregado tradicionalmente produzido com seixo, com resistência compatível a este.

Sendo assim, neste trabalho é apresentada a pesquisa com este agregado sintético como uma alternativa tecnicamente viável a substituição do seixo rolado, de modo a minimizar os impactos ambientais causados pela extração desse agregado.

1.2 Escopo do trabalho

Esta dissertação está estruturada em 7 capítulos que tratam dos seguintes temas:

Capítulo 1 – Introdução: São apresentadas as justificativas para o desenvolvimento do estudo, os objetivos e a sua estruturação;

Capítulo 2 – Fundamentação teórica: É apresentado um histórico e os conceitos da fabricação do agregado sintético de argila, bem como as características da matéria-prima e a aplicação desses agregados na construção civil.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos: São apresentados os materiais e os métodos experimentais utilizados, bem como, a descrição dos ensaios e procedimentos realizados na experimentação.

Capítulo 4 – Estudos dos solos: Neste capítulo são caracterizados os dois solos usados em olarias para fabricação de tijolo. A partir desses resultados foi selecionada a matéria-prima para a fabricação do agregado sintético de argila calcinada.

Capítulo 5 – Fabricação do agregado: Apresenta a metodologia adotada para fabricar os agregados sintéticos.

Capítulo 6 – Aplicação do agregado em concreto: São apresentadas as dosagens do agregado sintético em concreto comparada com a obtida para seixo rolado e as especificações.

Capítulo 7 – Conclusão: apresenta as conclusões obtidas e sugestões para novas pesquisas.

2 ARGILA EMPREGADA COMO AGREGADO SINTÉTICO

2.1 Considerações iniciais

A queima de argilas e folhelhos argilosos com determinadas características químicas para a produção de agregados não é uma técnica recente. A técnica para se queimar argilas para uso rodoviário tem sido desenvolvida há cerca de 90 anos. O empreiteiro e fabricante de tijolos Stephen J. Hayes, da cidade de Kansas, em Missouri, EUA, é apontado como o criador da indústria de argila expandida. Tentando resolver um problema de inchamento anormal dos tijolos fabricados com alguns folhelhos argilosos, acabou criando toda uma indústria de agregados leves. Hayes patenteou o seu processo em fevereiro de 1918 e desde então, o emprego deste agregado evoluiu e espalhou-se rapidamente, sendo utilizado tanto para fins estruturais quanto para pavimentação rodoviária (DNER, 1981).

Na produção dos agregados de argila, Lees (1969) descreve a metodologia empregada na Guiana Inglesa na década de trinta, do século passado, para obtenção destes para uso em construção rodoviária. Através de um dispositivo bastante simples, toras de madeira eram utilizadas para se fazer um colchão de 10 x 15 m² com 0,60 m de espessura sobre o qual se colocava uma camada de 0,60 m de solo argiloso a ser queimado (VIERA, 2000 apud BATISTA, 2004).

Após a operação de queima, que duravam de 6 a 8 horas, novas camadas de lenha e argila com as mesmas espessuras anteriores eram alternadamente sobrepostas, até que um total de quatro camadas de solo fosse queimado. Extinto o fogo, 5 a 6 dias eram necessários para o resfriamento e a utilização dos agregados produzidos (VIERA, 2000 apud BATISTA, 2004).

O Departamento de Estradas e Rodagem do Texas publicou, em 1969, um relatório especial intitulado “A Recommended Synthetic Coarse Aggregate Classification System” estabelecendo um sistema de classificação de agregados de argila, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Sistema de Classificação de Agregados Sintéticos Graúdos.

Classe	Grupo	Massa específica Aparente (g/cm ³)		Saturação em 100 minutos	Congel. e degelo	Desgaste após fervura	Abrasão Los Angeles
		Máx	Min	Máx (%)	Perda (%)	Máx (%)	Máx (%)
I Argila Expandida	A	0,88	0,56	15	7	6	35
	B	0,88	0,56	20	15	6	40
	C	0,88	0,56	-	-	10	45
II Argila não Expandida	A	-	0,88	-	7	6	35
	B	-	0,88	-	15	6	40
	C	-	0,88	-	-	10	45

Fonte: Texas Highway Department, 1969.

Nesta classificação os agregados de argila estão divididos em duas classes, os expandidos e os não expandidos (argila calcinada), e cada classe está dividida com três grupos A, B e C, organizados em ordem decrescente de qualidade.

A determinação da massa específica aparente nesse caso, é feito com agregados graúdos que passam na peneira 1/2” e retidos na peneira n^o 4. A amostra deve, por outro lado apresentar 30 a 70% de grão retidos na peneira 3/8”.

A determinação do desgaste na água após fervura, é o ensaio mais decisivo na seleção e classificação para uso dos agregados de argila, podendo até conforme os estudos realizados no Texas, prescindir do ensaio de abrasão Los Angeles. A aparelhagem usada neste ensaio é a mesma usada em laboratórios de solos, acrescido apenas, de uma panela de pressão de uso doméstico. O teste consiste em se ferver os agregados em uma panela de pressão, medindo-se depois a porcentagem de desgaste dos mesmos após agitação com água em um agitador de peneiras.

A determinação do desgaste por abrasão Los Angeles é semelhante ao executado, pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Texas, com pequenas modificações do ensaio padronizado (DNER ME-35-64 e ASTM C-131) que visaram adaptá-lo para o caso de

agregados leves. A massa dos agregados a serem ensaiadas foi reduzida de tal modo, a se evitar um volume excessivo de materiais dentro da máquina Los Angeles. A massa correta é calculada a partir da massa específica aparente do agregado leve a ensaiar e da massa específica aparente dos agregados pétreos convencionais, admitida igual a 1,55 ton/m³. Da mesma forma, a carga abrasiva que é composta por esferas de aço, indicada para a faixa granulométrica do agregado também é reduzida.

Os agregados fabricados com argila ou folhelhos argilosos podem ser divididos em duas classes: agregados leves (expandidos ou sinterizados) e agregados calcinados.

Os agregados leves de argila podem ser classificados em dois grupos principais. O primeiro grupo baseia-se no fato de que certas argilas, folhelhos argilosos e ardósia incham ou borbulham quando aquecidos à temperatura de fusão incipiente. No segundo grupo, a baixa massa específica aparente é obtida pela sinterização do material granular, de tal maneira que uma estrutura sólida celular é obtida, na qual os vazios intersticiais são preservados como poros abertos ou fechados; o sólido original pode inchar ou expandir durante a queima, mas tal fato não é fundamental para a fabricação do agregado leve.

Define-se sinterização como o processo de aglutinação entre duas ou mais partículas sólidas, que pelo aquecimento da massa cerâmica a uma temperatura inferior a de fusão, provoca reações químicas entre as interfaces dos grãos que gradativamente vão se unindo e promove a difusão de duas redes cristalinas.

A temperatura e o tempo de calcinação são variáveis importantes que devem ser determinadas na fase inicial do estudo. A temperatura influencia diretamente as características físicas e mecânicas do agregado produzido, ou seja, elevando-se a temperatura melhora-se a qualidade do agregado. Em relação ao tempo de calcinação, deve-se determinar o ponto ótimo, pois um valor excessivo não melhora a qualidade do agregado e um valor pequeno

pode não ser suficiente para que atinja as melhores condições para uma determinada temperatura (CABRAL, 2005).

Na década de 80 o IPR (Instituto de Pesquisa Rodoviária) promoveu uma pesquisa para fabricação de um protótipo de usina móvel de agregados de argila expandida, cujas características foram adaptadas às necessidades rodoviárias. Esse protótipo foi fabricado e montado em cima de duas carretas, sendo que uma delas correspondia à unidade de conformação das argilas e a outra de queima (ECL, 1986).

2.2 Matéria-prima para produção do agregado sintético cerâmico

As matérias-primas usadas na produção de agregados artificiais cerâmicos são os solos argilosos. Em alguns casos quando se deseja melhorar algumas propriedades dos produtos cerâmicos, utiliza-se solos que apresentam maior percentual de elementos fundentes.

Santos (1975) define argila como um material terroso, de granulação muito fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade; quimicamente, as argilas são formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Designa ainda o nome “argila” um grupo de partículas do solo cujas dimensões se encontram entre uma faixa especificada de valores. O termo “folhelhos” é usado para argilas laminadas ou estratificadas naturalmente; podendo o folhelho ter a mesma consistência ou textura das argilas usuais ou ser completamente adensado e duro, chamando-se de “argilito”.

As argilas por sua vez, classificam-se em duas categorias: argilas primárias e argilas secundárias ou sedimentares. As primeiras são formadas no mesmo local da rocha mãe e são pouco atacadas pelos agentes atmosféricos. Possuem partículas mais grossas e coloração mais clara, são pouco plásticas, porém de grande dureza e possuem alto nível de fusão (BATISTA, 2004).

As argilas sedimentares são as que foram transportadas para mais longe da rocha mãe pela água, pelo vento e incluindo ainda o degelo. A água especialmente tritura a argila em partículas de diferentes tamanhos, fazendo com que as mais pesadas se depositem primeiro, enquanto que as outras vão se depositando de acordo com seu peso no decorrer do caminho, sendo que os grãos mais leves se depositam onde a água pára. Essas argilas são mais finas e mais plásticas que as primárias, podendo, entretanto, conter impurezas ao se misturarem com a matéria orgânica (BATISTA, 2004).

Existem uma grande variedade de material cristalino nas argilas, e todos aqueles que não são argilominerais são conhecidos como minerais acessórios. Os minerais acessórios mais comuns em argilas são: quartzo, feldspatos, micas, óxidos e hidróxidos de ferro, titânio, sílica e manganês. O termo “argila” inclui uma variedade de argilominerais, e os principais são os dos grupos da caulinita, montmorilonita e illita.

As massas cerâmicas sofrem variações intensas nas suas propriedades físico-químicas devido ao processamento, e utiliza-se normalmente uma faixa para designar o termo argila que é composto por partículas com dimensões especificadas. A faixa normalmente utilizada para determinar a fração argila, são os valores estabelecidos pela ABNT, onde esta fração é composta por partículas com dimensão inferior a 0,005 mm.

O tamanho das partículas de uma massa cerâmica é uma característica de fundamental importância, pois as propriedades físicas necessárias para obtenção de um produto cerâmico de qualidade como, por exemplo, plasticidade, absorção de água, módulo de ruptura a flexão a seco e após a queima são influenciadas pela granulometria.

Com relação à granulometria deve-se ressaltar que uma massa cerâmica deve possuir características que garantam a trabalhabilidade adequada, que está diretamente relacionada à plasticidade, obtendo-se assim características finais necessárias ao processo de conformação. No caso de agregados artificiais de argila calcinada bem como os demais produtos da

cerâmica vermelha, essa trabalhabilidade é obtida fazendo-se o correto proporcionamento granulométrico de materiais plásticos e não plásticos.

Segundo Funtac e IEL (1990) citado por Nascimento (2005), pode-se evitar a incidência de muitos problemas nos materiais cerâmicos, com o conhecimento da distribuição granulométrica e a forma das partículas constituintes da massa que podem implicar nos seguintes defeitos:

- i) Falha na formação do produto no processo de extrusão;
- ii) Baixa resistência mecânica;
- iii) Aumento da absorção de água;
- iv) Porosidade aparente alta.

Sabe-se que as argilas são compostas de material plásticos e não-plásticos. Os materiais não-plásticos atuam como desplastificantes (areia e outros) nas composições, visto que reduzem a plasticidade destas quando misturados com os materiais argilosos. Uma massa cerâmica composta somente por argilas plásticas (denominadas industrialmente por argilas gordas), apresenta grandes dificuldades no processo de moldagem, secagem e queima. Neste caso há a necessidade de se fazer uma mistura de argilas, juntamente com os não plásticos moídos, dosando-se grãos finos, médios e grossos de modo a obter uma distribuição granulométrica adequada (PRACIDELLI, 1997).

A excessiva plasticidade das argilas e seu comportamento refratário devido à composição química, produzem peças cerâmicas queimadas com excessiva porosidade. Como consequência é comum à ocorrência de elevados valores de absorção de água. Por isso o conhecimento da composição química fornece informações importantes para seu uso específico.

Como alternativa para a redução da porosidade faz-se necessário reformular a massa cerâmica, aumentando o teor de fundentes ou aumentando a temperatura de queima. Os

fundentes ao longo do processo de queima se transformam em líquido, durante a formação desta fase líquida há o preenchimento dos poros do material, contribuindo para densificação e redução da porosidade (RIELLA, 2000; VIEIRA, 2002).

Os fundentes mais utilizados na indústria cerâmica são as matérias-primas com elevado percentual de óxidos alcalinos (Na_2O e K_2O) e com baixa perda ao fogo. Estes elementos formam a fase líquida por fusão própria, ou em reação com a sílica (SiO_2) proveniente da decomposição dos argilominerais, em temperatura superior a $700\text{ }^\circ\text{C}$ (KINGERY, 1976). Este processo de sinterização é comumente chamado de vitrificação.

A importância desses elementos está relacionada à capacidade de diminuir a temperatura da formação da fase líquida durante o processo de queima. A maioria dos produtos cerâmicos apresentam elevada porosidade, com pouca fase vítrea, decorrente da baixa temperatura de queima (variando de $850\text{ }^\circ\text{C}$ a $950\text{ }^\circ\text{C}$) desses produtos.

A temperatura de queima, percentual e proporção de álcalis e procedência mineralógica dos fundentes são fatores determinantes no processo de vitrificação. Entre os fundentes mais comumente empregados na composição da massa para a cerâmica tradicional em uso na construção civil, destacam-se argilas ilíticas, feldspatos, filito e fonolito (MOTA, 2001).

O documento de patente GB 465318, encontrado nas bases de dados do European Patent Office (EPO), publicado em 05/05/1937, e intitulado “Concreto com partículas de argila queimada como agregado”, sob a titularidade de Hugo Schwartzkopff da Alemanha, estabelece a composição química da matéria-prima que irá produzir os agregados de “argila queimada”, conforme a Tabela 2.3 (CABRAL, 2005).

Tabela 2.2 – Composição química preferencial da matéria-prima.

Elementos químicos	Percentual (%)
SiO ₂	64,4
Al ₂ O ₃	21,9
Fe ₂ O	3,0
MgO	1,4
K ₂ O + Na ₂ O	3,0
H ₂ O + compostos orgânicos	4,7

(Fonte: SCHWARTZKOPFF, apud CABRAL 2005).

Atualmente a indústria cerâmica vem evoluindo e aprimorando as técnicas dos processos cerâmicos cujo o objetivo é produzir materiais de melhor qualidade encurtando o tempo de queima. Interações entre as matérias-primas presentes no corpo a verde e entre minerais constituintes podem ser afetadas por qualquer alteração no tratamento térmico. Por isso, interações mútuas entre minerais podem ser largamente reduzidas quando se aumenta a taxa de queima. Uma das principais influências da taxa de aquecimento está na transformação de fases para a formação da mulita (CASTELEIN apud SANCHEZ-MUÑOS, 2002).

Matérias-primas contendo caulinita são normalmente utilizadas no desenvolvimento de massas cerâmicas. As argilas, provenientes de depósitos naturais formados durante distintos e longos processos geológicos, é uma mistura complexa de diferentes variedades mineralógicas. Como resultado deste longo processo, as argilas industriais contêm, além de caulinita, pequenas quantidades de quartzo, feldspatos, esmectita ou mica. Estes minerais até certo ponto influenciam o comportamento térmico do corpo cerâmico (SANCHEZ-MUÑOS, 2002).

2.3 Agregado sintético de argila expandida

As vantagens de certos agregados minerais de baixa massa específica aparente, conhecidos pelo nome de agregado leve, têm sido consideradas e com o uso diverso na construção civil.

Nos Estados Unidos e em alguns países, agregados leves são produzidos e comercializados sob os nomes de Haydite, Rocklite, Gravelite, Cel-Seal Nodulite e outros.

Haydite é feito pelo aquecimento de fragmentos de argila ou folhelhos argilosos em fornos rotativos em temperaturas que variam entre 1000 °C e 1150 °C, até que o grau desejado de formação de vesículas seja obtido (Figura 2.1). Segundo seu fabricante o índice de absorção desse agregado é de aproximadamente 10% (SANTOS, 1975; HAYDITE, 2007).



Figura 2.1 – Agregado leve Haydite.
Fonte: Haydite, 2007.

Rocklite é feita por processo semelhante a 1200 °C e durante a queima, os fragmentos irregulares amolecem, incham até adquirir a forma de pelotas ou esferas, desenvolvendo uma casta ou película superficial de cerca de 1 mm de espessura (SANTOS, 1975).

Gravelite é preparada pela queima de cilindros extrudados de argila úmida com óleo combustível, em fornos rotativos (SANTOS, 1975).

Cel-Seal é fabricado pela mistura de pequenas proporções de óxidos de ferro e materiais combustíveis ricos em carbono com a argila bruta, extrudados, cobertos com argilas refratárias e queimados em temperatura adequada em forno rotativo (SANTOS, 1975).

Nodulite é preparada com terra da Flórida, pelletizada, coberta com sílica moída e queimada a 1100 °C em fornos rotativos (SANTOS, 1975).

A produção do agregado leve por sinterização é idêntica em princípio à sinterização de minério de zinco ou níquel: uma carga da matéria-prima é misturada intimamente com uma proporção adequada de combustível e depositada em forma não compactada em uma grelha móvel de um forno tipo Dwight-Lloyd e incendiada. A queima do combustível é assegurada pela sucção ou injeção de ar através da grelha, as partículas de argila se fundem

superficialmente e se ligam, formando uma camada ou leito sinterizado, que é depois britado e separado em frações de granulometrias adequadas (SANTOS, 1975).

Esse tipo de agregado é fabricado nos Estados Unidos, utilizando como matéria-prima folhelhos argilosos, através da sinterização (SANTOS, 1975), cujo o processo pode ser visto na Figura 2.2.

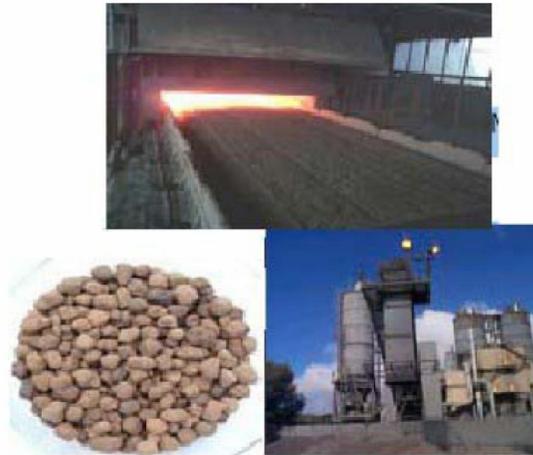


Figura 2.2 – Fabricação do Lytag EUA.
Fonte: Lytag, 2006.

Outro produto semelhante é fabricado na Inglaterra com o nome de Aglite e a sua matéria-prima é misturada com combustível, apresentando composição química conforme descrito na Tabela 2.3 (SANTOS, 1975; LYTAG, 2006).

Tabela 2.3 – Composição química da matéria-prima do agregado Aglite.

Elementos químicos	Percentual (%)
SiO ₂	43,1
CaO	39,0
Fe	3,51
Carbono fixo	11,55
Combustíveis voláteis	11,35

Fonte: CATCHPOLE, 1959 apud SANTOS, 1975.

O termo “estrutura celular” de um agregado leve é usado para identificar uma textura em que os vazios estão isolados entre si por paredes impermeáveis. O termo “estrutura porosa ou esponjosa” indica uma textura em que os vazios estão interconectados com o meio, como

em uma esponja. As reações que ocorrem quando uma argila é aquecida em um forno rotativo para formar um agregado leve são as seguintes (SANTOS, 1975).

- a) Período da secagem (remoção da umidade de moldagem).
- b) Período de remoção de água adsorvida e de matéria orgânica.
- c) Período de remoção da água de constituição (hidroxilas).
- d) Período de oxidação de enxofre, ferro, carbono e outros elementos.
- e) Período de dissociação – redução (carbonatos de Ca e Mg; sulfatos; óxidos férricos a óxidos ferrosos).
- f) Período de vitrificação (primeira fusão de vidro ou fusão incipiente).
- g) Período pirolástico em que algumas argilas, folhelhos e ardósias incham ou expandem.
- h) Período de fusão total, em que há predominância de fase líquida de baixa viscosidade, havendo desaparecimento da estrutura celular e perda de forma do agregado.

Segundo Bauer (1949) apud Santos (1975) as condições necessárias para que o inchamento ou expansão pirolástica de uma argila ou folhelho produza uma estrutura celular, essencial para um agregado leve de alta qualidade, são as seguintes:

- O material na condição pirolástica deve possuir um teor suficiente de vidro para tapar os poros e reter os gases formados;
- O material deve conter quantidade adequada de substâncias produtoras de gases para produzir o grau de inchamento suficiente a fim de obter a massa específica aparente desejada;
- As substâncias produtoras de gases devem liberar uma quantidade, em velocidade adequada numa temperatura e momento que coincidam com as condições pirolásticas ótimas do material;

- Nessas condições ótimas tempo, temperatura e formação vítrea, o material deve possuir uma viscosidade adequada que permita a formação de um grande número de bolhas ou vesículas para propiciar uma baixa massa específica aparente à partícula do agregado leve e uma espessura de parede das vesículas que leve à máxima resistência ao esmagamento;
- O material deve inchar em uma estrutura celular na temperatura a mais baixa possível;
- A faixa ou intervalos de temperatura em que ocorre o início do inchamento e a fusão total deve ser superior a 20 °C, para evitar que os fragmentos de agregado leve se grudem e provoquem o entupimento do forno.

Se não existir um teor de fundentes adequados para formar uma fase vítrea ou se uma fase vítrea de baixa viscosidade é formada desde o início, os gases escapam e não há inchamento da partícula de argila, esses efeitos podem ser corrigidos pela adição de fundentes adequados pelo deslocamento do período de liberação de gás para uma temperatura mais alta, por um aquecimento mais rápido com menor introdução de ar ou pela adição de substâncias que elevam a viscosidade da fase vítrea (SANTOS, 1975).

Quantidades exageradas de substâncias formadoras de gases produzindo uma liberação violenta de gases são prejudiciais especialmente em temperaturas muito baixas para a formação vítrea. Com a presença de enxofre ou carbono é necessário um aquecimento muito rápido e condições fortemente redutoras. Essa produção violenta de gases pode ser diminuída pelo aquecimento mais lento (mais ar sendo introduzido) ou misturando materiais mais refratários à argila para contabalançar com a elevada viscosidade a pressão dos gases em temperaturas mais baixas (SANTOS, 1975).

Estudos do U.S. Bureau of Mines nos Estados Unidos 1948 procurando correlacionar as propriedades de inchamento pirolástico com a composição química das argilas levaram à conclusão de que a composição mineralógica, principalmente a das impurezas existentes nas argilas, folhelhos argilosos e ardósias é o fator predominante nas propriedades de inchamento. Portanto, uma correlação desse tipo deve levar em consideração a temperatura de fusão e de dissociação desses minerais, as temperaturas de fusão dos eutéticos dos vários minerais entre si, as diferentes reações de dissociação, a natureza dos gases formados e as viscosidades em função da temperatura das várias fases vítreas (SANTOS, 1975).

Em São Paulo o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) realizou várias pesquisas visando encontrar argilas que pudessem ser utilizadas na fabricação de agregados leves pelo processo do forno rotativo. Desta forma, então, foram estudadas trezentas argilas do Estado de São Paulo, cuja composição química e mineralógica as indicava como possíveis de inchamento pirolástico. Através dos ensaios laboratoriais foi possível selecionar quatro tipos de argilas, tendo estes sido escolhidas por questões econômicas para a industrialização.

Santos (1975) apud Nascimento (2004) descreveu as etapas da pesquisa industrial para a implantação da fábrica de agregado leve, CINASITA, na década de 60, cuja capacidade inicial seria de 9000 m³/mês. Embora essa referência seja antiga, foi a única possível de ser obtida para o presente estudo. Algumas dessas etapas foram transcritas nos próximos oito parágrafos para propiciar um melhor entendimento da metodologia de produção desses agregados.

A argila homogeneizada em depósito de 10.000 ton de capacidade do qual é abastecida a fábrica. Por intermédio de pá carregadeira abastece-se um caixão dosador, que permite obter um fluxo contínuo de argila no processo industrial. Do caixão dosador cai em um desintegrador de argila que reduz os grandes pedaços até um diâmetro máximo de 5cm, por intermédio de uma correia transportadora o material é conduzido a um misturador – homogeneizador- umificador; onde é homogeneizado e acertada a umidade adequada para a extrusão. As matérias primas selecionadas necessitam de adição de uma pequena quantidade de óleo para facilitar a extrusão.

Do misturador, a argila passa por um laminador que é constituído de dois rolos espaçados de 3 mm a 5 mm. Aí são retidas as pedras e outros objetos estranhos, laminando a argila e preparando-a para a extrusão. Do laminador passa uma máquina de extrusão contínua (maromba) e pela passagem por um bocal com orifícios circulares (boquilha) obtêm-se cilindros de 10 mm a 15 mm de diâmetro. Uma cortadeira rotativa em frente ao bocal vai cortando os cilindros no comprimento médio de 15 mm.

Nesses cilindros de argila assim produzidos são conduzidos à entrada do forno por uma transportadora de correia. Como a indústria opera 24 horas por dia e 7 dias por semana, existem dois conjuntos de extrusão que funcionam alternadamente 12 horas cada conjunto. O forno é rotativo (figura 2.3) com 2,4 m de diâmetro e 50 m de comprimento, girando com velocidade variável de uma volta a cada 30 s a 50 s pela rotação e inclinação do forno, os cilindros levam cerca de 2 horas para atravessá-lo. Na zona de combustão que atinge 1100 ° C, a pelota de argila expande e cai num trocador de calor. O combustível utilizado pode ser o óleo combustível de baixo ponto de fusão (BPF) ou de alto ponto de fusão – baiano (APF).

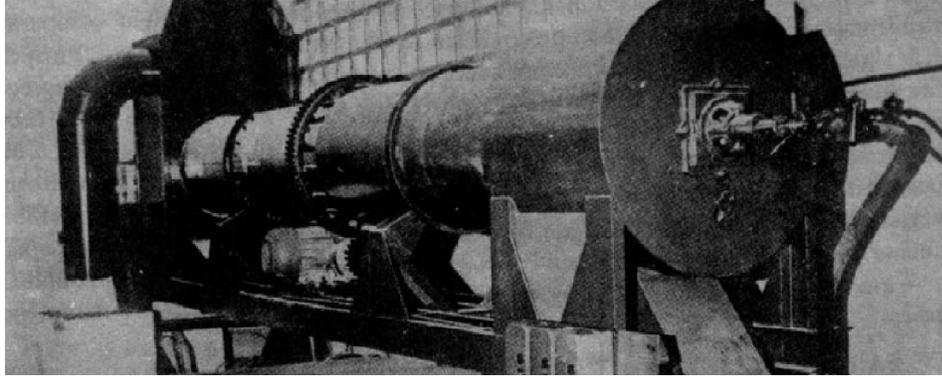


Figura 2.3 – Forno rotativo para a produção de agregados leves em escala piloto.
Fonte: Santos, 1975.

No trocador de calor, o agregado expandido se resfria à temperatura ambiente e o ar aquecido é injetado no forno como ar secundário de queima. O forno opera com tiragem forçada.

Após o resfriamento no trocador de calor, o agregado leve é conduzido a um depósito com capacidade para 15.000 m³. Desse depósito, por gravidade, o material é transportado mecanicamente para a instalação de peneiramento e armazenagem. Consta de peneiras de três estágios com peneiras de 20 mm, 13 mm e 5 mm de abertura. A fração mínima de 20 mm é encaminhada a um britador de martelo e fragmentada a um diâmetro máximo de 10 mm e armazenada em um silo de 100 m³ de capacidade. Cada uma das frações obtidas no peneiramento é armazenada em silos semelhantes de 100 m³ cada. Esses silos estão em altura adequada, de maneira que o carregamento se efetua por gravidade diretamente no caminhão.

Durante todo o processo de fabricação o produto não é tocado ou manuseado, resultando grande economia de mão-de-obra. Toda a fábrica, inclusive pessoal de escritório, opera com 32 funcionários, sendo o pessoal efetivo de produção distribuídos em 4 turnos com total de 24 pessoas.

O diagrama de blocos da figura 3.3 identifica o fluxograma do processo de fabricação industrial do agregado leve da cinasita.

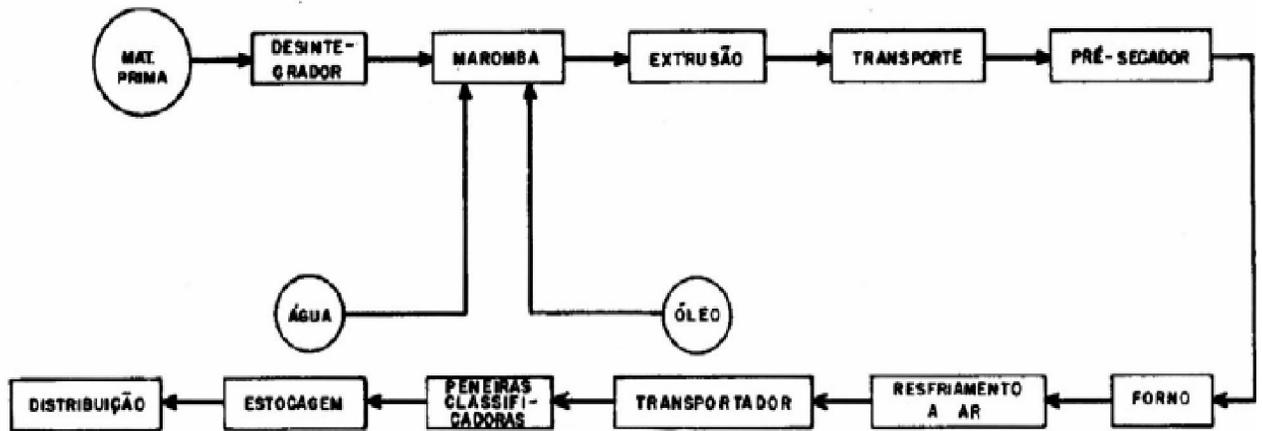


Figura 2.4 – Digrama de blocos da fabricação do agregado leve de argila expandida da cinasita.
Fonte: Santos, 1975.

O projeto da usina de argila expandida do DNER teve como objetivo o estudo e a elaboração de anteprojetos de usinas para a fabricação de agregado de argila, atendendo a necessidade da região, em função da carência de agregados pétreos.

Essa usina fora fabricada pela empresa ENAPLIC, em São Paulo e modificada pela empresa CIBER, no Rio Grande do Sul, e foi instalada na cidade de Manaus dentro da 1ª Unidade-Estrutura Terrestre (1ª UNIT) e sofreu paralisação em outubro de 1989, onde ficou sem funcionamento por mais de dez anos (CABRAL, 2005).

O motivo que levou o IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias) a fabricar a usina protótipo móvel adaptadas às necessidades rodoviárias, foi o fato de que os equipamentos conhecidos no mercado mundial eram na época, em geral, de grande porte e destinados a instalações fixas. Logo, com as conclusões obtidas, o protótipo da usina móvel foi concebido e construído de acordo com as seguintes diretrizes (FABRÍCIO apud CABRAL 2005):

- Apresentar condições de mobilidade e transporte de modo que pudesse ser levada para os locais das obras com certa facilidade;
- Utilizar um sistema de queima que propiciasse economia de combustíveis nobres que no caso os derivados de petróleo;

- Propiciar certa flexibilidade de operação, de fabricação para pesquisas de qualidade, custos e emprego dos agregados produzidos.

O protótipo da usina foi fabricado e montado em cima de duas carretas, sendo que uma delas correspondia a unidade de processamento da argila e a outra, unidade de queima. Assim sendo, a usina estava preparada para produção média de cerca de 40 a 50 m³ de agregado por dia, podendo ser removível e transportada com performance adequada para a produção de argila expandida nas obras onde viria a ser utilizado o agregado sintético.

Debates regionais foram realizados, em virtude do interesse demonstrado pelo protótipo, por diversas organizações da região amazônica. Então, em setembro de 2000, a usina passou por delegação do DNIT, para a Universidade Federal do Amazonas, que pretendia colocá-la em funcionamento com o propósito de complementar os trabalhos de pesquisas regionais executados e em andamento (CABRAL, 2005).

Segundo Cabral (2005), em outubro de 2000, por iniciativa do Prof. Nilton de Souza Campelo, que recebeu a usina protótipo cedida à Universidade Federal do Amazonas, foram efetuadas reuniões entre técnicos da ECL – Engenharia, Consultoria e Economia S.A., e docentes da universidade, para elaborar um programa de novos estudos, e operacionalizar novamente a usina protótipo móvel do DNIT, porém desta vez voltada para a tecnologia do agregado de argila calcinada, em vez do agregado de argila expandida.

Em função da paralisação da usina seriam necessários alguns reparos para a mesma voltar a funcionar; revisão da parte elétrica e mecânica, mudança no sistema de aquecimento, mudança e aperfeiçoamento do sistema de pelotização da argila.

Desde janeiro de 2001 até junho de 2004, não havia sido possível o desenvolvimento do programa da parceria, cujo objetivo mais importante era a recuperação da usina protótipo móvel do DNIT (CABRAL, 2005). Atualmente não se tem notícias da recuperação dessa

usina que seria de grande importância para o desenvolvimento da região amazônica, visto que esta não possui jazidas de agregados pétreos economicamente viáveis para exploração.

2.4 Agregado sintético de argila calcinada

Segundo Santos (1975), agregados leves podem ser feitos com uma variedade maior de argilas pelo processo de sinterização do que pelo do forno rotativo, porém produtos obtidos pelos dois processos são essencialmente diferentes, como é o caso das partículas esféricas, recobertas com uma película protetora impermeável.

Estudos, pesquisas e projetos em busca da utilização de agregados não rochosos vêm sendo desenvolvidos, visando superar as dificuldades da obtenção de material pétreo. A pesquisa científica com o objetivo de obter matérias-primas que propiciem a fabricação e o emprego de agregados artificiais teve ênfase nos últimos anos, a nível mundial, em particular naqueles países onde a carência de jazidas de material pétreo é a principal condicionante para a engenharia local. As dificuldades que motivam a pesquisa de novos materiais são:

- A impossibilidade de se explorar jazidas de rocha próximas a centros urbanos;
- A extração do seixo rolado no leito dos rios que provoca o assoreamento das margens dos rios;
- O impacto ambiental negativo, muitas vezes irreversível, causado pela exploração de uma pedreira;
- Formação geológica desfavorável ao aproveitamento da rocha como brita;

Pode-se estabelecer que a origem da pesquisa do agregado artificial de argila calcinada no Brasil, partiu da experiência também proveniente do DNER (atualmente DNIT), após

visita técnica realizada aos Estados Unidos (Texas e Louisiana), mais precisamente em Outubro de 1979, cujas organizações rodoviárias utilizavam agregados fabricados com argila.

Dentre as conclusões obtidas desta visita, destacam-se as seguintes:

- Os “agregados sintéticos” fabricados pela queima de argila a partir de 760 °C, oferece possibilidades bastante interessantes para o uso rodoviário, pois a experiência do estado do Texas demonstra que a argila queimada nesta temperatura se desidroxila, podendo fornecer agregados estáveis e aptos para serem usados em condições mais econômica que o agregado sintético de argila expandida. De acordo com esta experiência, foi trazida a informação de que praticamente qualquer argila que, depois de molhada e moldada em forma de pelotas, viria a formar grãos duros e secos ao ar, podendo servir para a fabricação de agregados de “argila queimada”.

- O uso deste “agregado sintético” no Texas já havia sido estudado e pesquisado, gerando inclusive um relatório chamado “A recommend synthetic coarse aggregate classification system”, publicado em 1969, que estabeleceu um sistema de classificação de agregados de argila “queimados” e expandidos. Classificação esta que também iria especificar alguns testes que dariam o enquadramento no sistema citado.

Pelas necessidades da região Amazônica é interessante pesquisar um agregado sintético de argila calcinada, pois a região dispõe de solos argilosos aptos para serem usados como matéria-prima. A principal característica deste agregado sintético é de que não há necessidade da matéria-prima ter propriedades piroexpansivas e a temperatura para a sua produção é menor que a da argila expandida.

Diversas pesquisas foram desenvolvidas, com a utilização de solos amazônicos na fabricação do agregado sintético de argila calcinada. Esses estudos fizeram a comparação física e mecânica com os agregados rochosos. Resumidamente serão descritos alguns trabalhos realizados com a argila calcinada.

Frota (2003) comparou as características físicas e mecânicas de misturas asfálticas confeccionadas com agregado natural (seixo rolado) e com o agregado sintético de argila calcinada. Procurando mostrar uma alternativa para falta de agregado granular na região amazônica.

Frota (2004) procurou obter agregados sintéticos de argila calcinada como substituto do material granular natural (agregado graúdo) para construção de camadas de pavimentos rodoviários (base, sub-base, reforço do subleito). Foram coletados três solos argilosos para realização dos seguintes ensaios geotécnicos: limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos sólidos e granulometria com sedimentação. Após tais experimentos foram realizados ensaios específicos para a verificação da potencialidade de calcinação: o processo de fervura, a perda de massa e a abrasão “Los Angeles”. Os resultados demonstraram que os solos possuíam predominância da fração argilosa, com índice de plasticidade elevado ($IP > 15$) e apenas dois desses solos estudados estavam aptos, quanto à potencialidade de calcinação.

Batista (2004) fez a caracterização dos agregados de argila calcinada produzidos em laboratório, com amostras provenientes do município de Santarém-Pará. Após a escolha do solo que serviria para fabricação do agregado sintético, este foi moldado, queimado e utilizado em substituição ao agregado tradicional para a execução de ensaios em misturas asfálticas.

Nascimento (2005) realizou um estudo referente a fabricação e o emprego de agregados artificiais de argila calcinada na composição de misturas asfálticas e de bases de solo-agregado em obras rodoviárias no Estado do Acre. Avaliou a possibilidade da utilização dos processos de produção de agregados leves e peças cerâmicas para produção de agregados calcinados com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento de uma alternativa técnica e economicamente viável à produção agregados calcinados em grande escala.

Cabral (2005) descreve um processo metodológico para a fabricação e utilização do agregado de argila calcinada em pavimentação rodoviária. São apresentados os resultados das propriedades de resistência mecânica, porosidade e absorção, mistura solo-agregado, misturas asfálticas e consequentemente os custos envolvidos.

Silva (2006) realizou um estudo experimental sobre o efeito do condicionamento da mistura asfáltica com agregado de argila calcinada antes da compactação, utilizando dois ligantes, asfalto modificado com polímero e asfalto modificado com borracha. Foram analisadas as possíveis soluções para inibir o efeito da absorção e do escoamento do ligante.

Cabral, Rebelo *et al*(2007) compararam os efeitos da densificação a partir da variação da temperatura dos agregados de argila calcinada, moldados manualmente em forma de pelotas, tendo sido essas características comparadas com as obtidas com o seixo rolado.

2.5 Utilização de agregados sintéticos de argila em concreto

O seixo e pedra britada são os principais agregados granulares usados na região amazônica, e por serem densos com massa específica dos grãos superior a 2500 kg/m^3 , o concreto feito com eles apresenta uma massa em torno de 2400 kg/m^3 . Alguns agregados minerais de baixa massa específica têm sido analisados e considerados as vantagens oferecidas por estes, como a leveza e sua boa resistência à compressão.

A Cinasita descreve que o uso do concreto leve vem desde a época dos romanos, os quais o utilizavam em grande escala, em obras que podem ser apreciadas até hoje, como por exemplo, a Via Appia e o Pantheon, com sua cúpula de 43 metros de diâmetro, ambos localizados em Roma.

Com o agregado leve conhecido por haydite, é possível obter concretos estruturais de 1600 a 1800 kg/m^3 de massa específica aparente e de resistência à compressão entre 28 a 35 MPa, sem apresentar expansão apreciável devida a reação álcali-agregado.

Concretos produzidos com o agregado leve conhecido por rocklite, alcançam massas específicas aparentes de 1400 a 1600 kg/m³ e resistência à compressão variando de 7 a 35 MPa.

Embora seja utilizado um agregado leve para a manufatura de concretos de baixa massa específica, deve-se salientar que não existe uma definição precisa para caracterizar um concreto de baixa massa específica. O termo pode ser aplicado a qualquer concreto em que seu peso próprio seja inferior ao do concreto produzido com agregado rochoso de massa específica média, em torno de 2500 kg/m³.

Nos Estados Unidos, cerca de metade do concreto em bloco que é utilizado em construção contém agregado leve. As características proporcionadas pelo emprego do agregado leve é a redução do peso total da estrutura, baixa retração, baixa condutividade térmica, baixos custos de produção e um coeficiente de dilatação próximo ao do aço (SANTOS, 1975).

O DNER (1981) relata que um dos fatos que chamou a atenção para a ótima qualidade do concreto fabricado com argila expandida foi o navio norte americano USS Selma, lançado no mar em 1919, cujo casco foi construído utilizando-se esse tipo de concreto leve. Em 1953, o Expanded Shale Clay And Slate Institute dos EUA encomendou a uma firma a análise das condições estruturais do concreto do casco, que por essa ocasião havia sido afundado. O laudo dos peritos mostrou que, mesmo depois de decorridos 34 anos, o concreto estava em excelentes condições em todas as partes examinadas. Além disso, foi constatado que mesmo os elementos do casco que ficaram expostos alternadamente à água salgada e ao ar não apresentavam trincas ou outros sinais de deterioração, e que as barras de aço das armaduras estavam em bom estado (BATISTA, 2004).

Agregados leves de argila vêm sendo ainda largamente utilizados pela indústria de pré-moldados de concreto armado e protendido, em todos os tipos de construção civil. Um das

obras que mais despertou a atenção dos profissionais para as grandes vantagens técnicas do uso da argila expandida, foi a construção da ponte sobre a baía de Oakland, em São Francisco. Estima-se que a redução da massa, proporcionada pelo uso do agregado no revestimento do tabuleiro da ponte foi da ordem de 134 kg/m², possibilitando uma economia no custo total da obra de cerca de três milhões de dólares, em valores da época da construção (SANTOS, 1975).

Outro exemplo de economia devido ao uso do agregado leve foi no edifício da General Petroleum em Los Angeles, onde foi reduzido 180 000 dólares em aço estrutural (SANTOS, 1975).

Os agregados leves produzidos pela cinasita reduzem em torno de 25% a 30% no peso da estrutura de concreto estrutural, em relação ao concreto tradicional, como consequência obtém-se economia na fundação e ferragens, sem prejuízos nas demais propriedades do concreto, tais como: resistência mecânica, impermeabilidade, retração de secagem, durabilidade, e ainda melhora o isolamento térmico em coberturas de residências e edifícios (CINASITA, 2006).

Em blocos de concreto a redução ficou em torno de 40% do peso em relação aos fabricados com brita e areia, utilizados como elemento de vedação ou estrutural sem levar em consideração a possibilidade de se fabricar blocos de concretos de aspecto idêntico aos tradicionais, porém com mais resistência, estabilidade, resistência ao fogo, isolamento térmico e acústico (CINASITA, 2006).

Ventorini (2006) realizou várias dosagens para a identificação das principais propriedades de concretos contendo agregado graúdo de argila calcinada. Após a caracterização dos materiais selecionados para a confecção do concreto, sendo o agregado graúdo de argila calcinada oriundo do município de Santarém – PA, foi construído o diagrama de dosagem do mesmo, sendo então determinados os traços para a identificação das principais

propriedades mecânicas: Compressão uniaxial, tração indireta por compressão diametral, tração indireta na flexão e módulo de elasticidade. Pelos resultados obtidos até então, foi possível identificar a aplicabilidade deste tipo de concreto.

Tabela 2.4 – Parâmetros obtidos para a construção do diagrama de dosagem.

Traço (massa)	Fator a/c	Fc (MPa) aos 28 dias	Consumo de cimento (kg/m ³)	Abatimento (mm)
1:4,0	0,68	14,9	373	60
1:5,0	0,73	13,1	314	70
1:5,5	0,78	12,5	289	60
1:6,0	0,81	11,1	269	68
1:6,5	0,85	10,3	251	70

Fonte: Ventorini, 2006.

Na Tabela 2.4 observa-se os resultados da resistência do concreto produzido com agregado graúdo de argila calcinada. Aos 28 dias a resistência está próximo de 15 MPa, com um consumo de 373 kg/m³. Também identifica-se uma elevada quantidade de água usada no amassamento do concreto, devido a absorção do agregado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Fases da pesquisa

Os procedimentos experimentais executados neste trabalho foram divididos em três fases obedecendo à seqüência metodológica utilizada.

- Fase inicial: esta fase é representada pela coleta dos solos nos municípios de Iranduba e Manacapuru, no estado do Amazonas. Também nesta fase foram obtidos a areia, seixo, cimento e o aditivo;
- Fase intermediária: foi o momento utilizado para a visita nas olarias e pesquisa dos equipamentos utilizados para fabricação do agregado sintético. Após o conhecimento dos mecanismos de produção de tijolo, deu-se início ao processo de adaptação de um moinho para fabricação dos agregados;
- Fase final: fase constituída pela caracterização dos componentes do concreto, a aplicação do seixo e do agregado sintético de argila calcinada como agregado graúdo em concreto.

3.2 Coleta dos solos

A coleta de amostras deformadas de argila *in natura* deu-se na região dos municípios de Iranduba e Manacapuru, Estado do Amazonas, nos depósitos de argila das olarias, conforme as figuras 3.1 e 3.2.



Figura 3.1 Depósito de argila da olaria de Iranduba.



Figura 3.2 – Depósito de argila da olaria de Manacapuru.

A partir da coleta de argila usada para fabricação de tijolos de duas olarias, estas foram identificadas como solo 1 (retirado de Iranduba) e solo 2 (retirado de Manacapuru). O solo 1 apresentava uma coloração em tons mais claro, já o solo 2 era mais avermelhado. A caracterização das amostras de argila teve o objetivo de conhecer o comportamento físico, químico e mineralógico, de tal forma que se pudesse prever sua melhor utilização.

No laboratório de pavimentação da Universidade Federal do Amazonas, as amostras de solo foram então colocadas para secar a sombra para retirar a umidade em excesso. Em seguida, foram destorroadas e submetidas aos ensaios de caracterização física, química, mineralógica e ensaios tecnológicos. Os procedimentos realizados foram: caracterização, determinação da granulometria do material argiloso, determinação dos limites de consistência - de liquidez e de plasticidade - e a moldagem de corpos-de-prova prismáticos (barrinhas) para execução dos ensaios cerâmicos.

3.2.2 Caracterização das amostras dos solos

As análises granulométricas servem para especificar as várias frações constituintes do solo, definindo quantitativamente o percentual de pedregulho (76 a 4,8 mm), areia (4,8 a 0,05 mm), silte (0,05 a 0,005mm) e argila (inferior a 0,005 mm). O objetivo da realização do ensaio de granulometria é a obtenção dos pares de valores, tamanho da partícula e seu percentual de ocorrência, utilizados na plotagem da curva granulométrica do solo.

Este ensaio pode ser realizado apenas por peneiramento simples para solos grossos (pedregulho e areia) com partículas maiores que 0,075 mm, enquanto que, para solos finos (silte e argila) com dimensão inferior a 0,075 mm deverá ser utilizado o processo de sedimentação em água destilada, empregando-se um densímetro, por exemplo.

O ensaio de sedimentação é realizado medindo-se a densidade de um meio aquoso (mistura de solo e água), no decorrer do tempo. Com a medida da densidade da solução em determinado tempo, calcula-se a percentagem de partículas sólidas que ainda não sedimentaram e sua velocidade de queda. Este procedimento se baseia na lei de Stokes, que segundo a qual a velocidade de queda de uma esfera em meio fluido é proporcional ao quadrado do diâmetro de uma esfera. Porém, como as partículas de solo não são esféricas, este

ensaio tem um coeficiente de proporcionalidade que leva em consideração a massa específica da partícula de solo, a massa específica e a viscosidade dinâmica do fluido.

Conforme a NBR 7181, para o ensaio de granulometria, recomenda-se realizar a sedimentação com partículas com dimensão menor que 0,2 mm. Uma partícula de solo com dimensão maior que 0,2 mm, movimenta-se em água destilada com uma velocidade capaz de gerar turbulência ao seu redor e influenciar a queda de outras partículas, não satisfazendo, portanto, as hipóteses de Stokes (NOGUEIRA, 2001).

A análise granulométrica conjunta é realizada em solos que contenham partículas grossas e finas, compreendendo tanto o peneiramento quanto a sedimentação. Este procedimento de ensaio é padronizado pela ABNT – NBR 7181.

Os limites de consistência são compostos pelos limites de liquidez e de plasticidade, sendo comumente utilizados para separarem os estados de consistência de um solo fino ou da fração fina de um solo grosso, através de um teor limite entre dois estados físicos. Desta forma, define-se o limite de liquidez como sendo o teor de umidade, ou melhor, o percentual de água que se adiciona ao solo com a tendência de torná-lo líquido. O limite de plasticidade, por sua vez, é o teor de umidade que tende a tornar plástico o solo, separando o estado plástico do semi-sólido.

Esses limites também são conhecidos como limites de Atterberg em homenagem ao engenheiro sueco que propôs a utilização desses parâmetros na cerâmica. Após a década de 30, Casagrande modificou o procedimento atual e padronizou o equipamento. Esses limites são utilizados em engenharia na classificação de solos. Assim, ambos podem ser definidos como:

Limite de liquidez é o teor de umidade de um solo que fecha uma ranhura com 25 golpes, realizada por um cinzel padronizado. Este valor é obtido através de um gráfico, no

qual, estão plotados os valores referentes à umidade no eixo das abscissas e o número de golpes em escala logarítmica nas ordenadas.

Limite de plasticidade é o teor de umidade obtido quando se molda um cilindro de solo, de 3 mm de seção transversal por 100 mm de comprimento, sobre uma base áspera, para qual as fissuras começam a aparecer ao longo de um cilindro. Esta umidade é obtida pela média aritmética dos valores de no mínimo cinco ensaios realizados com a execução da moldagem desses cilindros.

Índice de plasticidade é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

3.2.3 Difração de raios-X

Os Raios-x, são comumente utilizados para visualizar o interior de objetos ou de pessoas que ao colocá-los entre uma fonte de raios-X e uma chapa fotográfica gera a radiografia. De fato, esta é a aplicação mais comum desse tipo de radiação e a primeira a ser utilizada desde a época da descoberta desses raios, quando Rontgen fez uma radiografia da mão de sua esposa em 1895. Assim, devido ao fenômeno da difração de raios-x, é possível estudar materiais a nível atômico, descobrindo a forma de sua estrutura.

A descoberta dos raios-X, deu-se a partir de experimentos com tubos catódicos, sendo estes equipamentos utilizados em experimentos no final do século XIX estes consistiam em tubo de vidro, ligado a uma bomba de vácuo, onde era aplicada uma diferença de potencial entre dois terminais opostos, gerando uma corrente elétrica dentro do tubo.

O físico alemão Wilhelm Conrad Rontgen estudou os chamados raios catódicos (nome utilizado a época para designar o fluxo de elétrons gerado no tubo), que foi denominada devido a sua natureza desconhecida de raios-X. A radiação tinha então propriedades semelhante à da luz, mas não era possível que fosse identificada o tipo de radiação, já que experimento havia sido feito com o tubo blindado. Desta forma, a radiação passou a ser

estudada com mais afinco, e posteriormente foram descobertas suas principais propriedades, como a propagação em linha reta (explica-se o fato de formar sombras bem delimitadas), alta capacidade de penetração, indiferença a campos magnéticos e capacidade de impressionar chapas fotográficas.

O estudo da difração dos raios-X em cristais se deu com Laue a partir de 1912, quando este cientista esteve discutindo aspectos da propagação da luz em cristais. Logo, um cristal serviria como uma grade ideal para a difração dos raios-x. Experimentos foram feitos para detectar o fenômeno, e em 1912 Laue conseguiu obter o primeiro diagrama de difração, utilizando o sulfato de cobre. Aplicando seus conhecimentos sobre a difração da luz por grades de uma e duas dimensões, Laue formulou uma teoria de difração de raios-X para estruturas tridimensionais (cristais), obtendo assim o prêmio Nobel de Física em 1912.

Uma das técnicas mais importantes utilizadas para o estudo dos argilominerais é a difração de raios-X, correspondendo a uma das principais formas de estudo e caracterização da microestrutura de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais precisamente na física de estados sólidos, engenharia de materiais, química, geologia e outras.

Os raios-X ao atingirem um material podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (dispersão ou espalhamento coerente). O fóton de raios-X após a colisão com um elétron muda a sua trajetória, mantendo, porém, a mesma fase e energia do fóton incidente. Para que ocorra a difração de raios-X em uma estrutura cristalina, é preciso levar em consideração a diferença de caminhos percorridos pelos os raios, o comprimento de onda da radiação incidente. Essa condição é expressa pela lei de Bragg, ou seja, $n \lambda = 2 d \sin \theta$, onde λ é o comprimento de onda da radiação incidente, n um número inteiro (ordem da difração), distância interplanar para o conjunto de planos da estrutura cristalina e θ o ângulo de incidência dos raios (BLEICHER, 2000).

Os planos de difração e as densidades de átomos ao longo de cada plano cristalino, são características específicas e únicas de cada composto cristalino, seja ele inorgânico ou orgânico, da mesma forma que o diagrama difratométrico por ele gerado, sendo equivalente á impressão digital de cada pessoa. Existe um banco de dados contendo as informações cristalográficas básicas e algumas propriedades físicas de alguns compostos cristalinos. Atualmente estão disponíveis informações referentes a mais de 70 000 compostos, sendo que as mais importantes para a identificação, são as distâncias interplanares e as intensidades difratadas (BLEICHER e SASAKI, 2000).

As análises mineralógicas foram efetuadas no laboratório de Difração de Raios-X do departamento de Geociências do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas. As amostras foram separadas granulometricamente, através de uma centrífuga, coletando-se a fração argila. As análises foram feitas na amostra total e na fração argila. Nas amostras onde ocorreram reflexões em ângulo $< 10^\circ$ (2θ), que são indicativos da presença de argilominerais expansivos, a lâmina foi submetida à atmosfera de etileno-glicol, em um dessecador a vácuo, por um período de 12 h, e, posteriormente, analisada no difratômetro Shimadzu, modelo XRD6000, com radiação $\text{CuK}\alpha$, sendo identificadas as fases cristalinas presentes. A interpretação dos difratogramas foi obtida através do programa computacional Shimadzu-Powder Diffraction File.

3.2.4 Análise química elementar

A técnica analítica nuclear de fluorescência de raios-X (XRF) tem sido utilizada para a avaliação qualitativa e quantitativa da composição química de vários tipos de amostras, de interesse industrial, geológico e ambiental. Esta técnica, por ser não destrutiva e instrumental, e por permitir a análise de vários elementos simultaneamente, de modo rápido e a baixo custo, tem um elevado potencial de aplicação em várias áreas.

A análise multielementar instrumental por fluorescência de raios X (XRF) é baseada na medida das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra, quando devidamente excitada. Até 1966 a XRF era realizada unicamente por espectrômetros por dispersão por comprimento de onda (WD-XRF, abreviação de *wave-length dispersive X-ray fluorescence*), baseados na lei de Bragg, os quais necessitam de um movimento sincronizado e preciso entre o cristal difrator e o detector.

Com o desenvolvimento do detector semicondutor de Si(Li), capaz de discriminar raios X de energias próximas, foi possível o surgimento da fluorescência de raios-X por dispersão de energia (ED-XRF, *energy dispersive X-ray fluorescence*), também conhecida como fluorescência de raios-X não dispersiva.

Quando um elemento de uma amostra é excitado, este tende a ejetar os elétrons do interior dos níveis dos átomos, e como consequência disto, elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada transição eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron, e esta energia é emitida na forma de um fóton de raio-X, de energia característica e bem definida para cada elemento. Assim, de modo resumido, a análise por fluorescência de raios X consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios-X.

A caracterização química nas amostras dos solos de Iranduba e Manacapuru foi realizado por espectrometria de fluorescência de raios-X, através de energia dispersiva (Shimadzu modelo EDX700HS), sendo quantificados os respectivos elementos químicos. Essas análises foram executadas no laboratório de Difração de Raios-X do departamento de Geociências do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas

3.2.5 Ensaios tecnológicos

Para o estudo do comportamento do material cerâmico, recorreu-se à metodologia desenvolvida no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), criada pelo Prof.º Pérsio Santos (SANTOS, 1975), a qual visa prever os usos industriais de argilas, a partir de ensaios cerâmicos simples como: absorção de água, retração linear e módulo de ruptura a flexão em três pontos.

Essa metodologia, segundo Santos (1975), foi desenvolvida procurando satisfazer aos seguintes requisitos: a) utilizar a menor quantidade possível de argila; b) utilizar um corpo-de-prova de forma, dimensões e moldado em condições a poder ser submetido ao maior número possível de ensaios; c) permitir o ensaio simultâneo de um grande número de amostras; d) ser de fácil interpretação, mesmo quando utilizado por pessoas inexperientes.

O método padronizado pela *American Ceramic Society* quanto à forma e dimensões para ensaios cerâmicos (ACS APUD SANTOS, 1975) são barras prismáticas de 200 mm x 20 mm x 10 mm. Porém, exigem uma quantidade apreciável de amostras para o ensaio. Desta forma, o IPT veio por bem empregar um corpo-de-prova de perfil retangular, de 60 mm x 20 mm x 5 mm, possibilitando moldar corpos-de-prova com menor quantidade de argila e facilidade no seu manuseio. A dimensão do corpo-de-prova adotado neste trabalho será de 60 mm x 20 mm x 8 mm, considerando as limitações técnicas-instrumentais, do Laboratório de Pavimentação, onde os ensaios foram realizados.

Na moldagem dos corpos-de-prova, utilizou-se um molde com dimensões estabelecidas anteriormente e moldadas por prensagem, sob pressão de 20 MPa através de uma prensa elétrica (Figura 3.3). A massa cerâmica foi utilizada com umidade em torno de 10% em massa semi-seca (umidade higroscópica), que proporcionou aos corpos-de-prova após secagem, o manuseio sem se esfarelar. Os corpos-de-prova depois de moldados foram

medidos e pesados antes e depois da secagem em estufa a 120 °C por 24 h, com intuito de avaliar a retração linear de secagem da massa cerâmica.



Figura 3.3 – Máquina de prensagem das barrinhas.

Os corpos-de-prova foram queimados nas temperaturas de 850 °C, 950 °C, 1050 °C e 1150 °C, em um forno elétrico tipo mufla (Figura 3.4), durante uma hora em temperatura patamar, sendo cinco corpos-de-prova para cada temperatura. Após o resfriamento, que se deu naturalmente, registraram-se as massas e as medidas, com objetivo novamente de levantar a retração linear sendo que agora, a de queima.



Figura 3.4 – Forno elétrico tipo mufla.

Após a queima, os corpos foram rompidos numa prensa elétrica (Figura 3.5) para avaliação da resistência mecânica por medida de tensão de ruptura à flexão em três pontos. As análises da absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente foram determinadas pelo método de Arquimedes. Com esses dados, foi construída a curva de gresificação, que serviu para verificar o comportamento da massa cerâmica, em função da temperatura onde a formação de fase cristalina ocorre em altas temperaturas, correspondendo no ponto de interseção entre a curva de absorção de água e retração linear.



Figura 3.5 – Prensa elétrica para ruptura dos corpos-de-prova.

Para se obter as características físico-mecânicas do material cerâmico foi realizada uma série de ensaios que forneceu os valores de retração linear, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e tensão de ruptura em três pontos. As fórmulas para se obter os valores estão descritas a seguir.

Retração Linear, R (%): Permite observar o percentual da variação linear que o corpo-de-prova sofre com a secagem a 120 °C e após a queima à 850 °C, 950 °C, 1050 °C e 1150 °C.

$$R_s(\%) = \frac{L_i - L_s}{L_s} \cdot 100$$

$$R_q(\%) = \frac{L_q - L_s}{L_s} \cdot 100$$

Sendo R_s e R_q as variações das dimensões lineares em porcentagens após secagem a 120 °C e após a queima, respectivamente; L_i comprimento inicial do corpo-de-prova após a

moldagem (cm); L_s o comprimento final do corpo-de-prova após a secagem a 120 °C (cm); e L_q o comprimento do corpo-de-prova após queima.

Absorção de Água, AA (%): Indica o percentual de água absorvida pelo corpo-de-prova após queima, sendo imerso em água durante 24 h.

$$AA(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \cdot 100$$

Onde P_u é a massa do corpo-de-prova úmido (em g); P_s a massa do corpo-de-prova seco (g).

Porosidade Aparente, PA (%): Avalia a existência dos poros abertos contidos no corpo-de-prova (espaço intergranular).

$$PA(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \cdot 100$$

Sendo P_u o peso do corpo-de-prova úmido (g); P_s o peso do corpo-de-prova seco (g); P_i o peso do corpo-de-prova imerso em água (g).

Massa Específica Aparente, MEA (g/cm³): É a razão entre a massa total e o seu volume total, incluindo os espaços intergranulares.

$$MEA(g/cm^3) = \frac{P_s}{V_a} = \frac{P_s}{P_u - P_i} = \frac{PA}{AA}$$

Sendo P_s o peso do corpo-de-prova seco (em g); V_a o volume aparente do corpo-de-prova (cm³); PA a porosidade aparente do corpo-de-prova (%); AA a absorção de água do

corpo-de-prova (%); P_u o peso do corpo-de-prova úmido (g); V_{as} o volume sólido aparente do corpo de prova (cm³); P_f o peso do corpo-de-prova imerso em água (g).

Módulo de Ruptura à Flexão em três pontos, MRF(kgf/cm²): Avalia por medida de tensão à ruptura a resistência mecânica do corpo-de-prova.

$$MRF(kgf/cm^2) = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Sendo **MRF** o módulo de ruptura a flexão do corpo-de-prova após secagem e queima, respectivamente; P a carga (kgf) atingida no momento da ruptura; L a distância (cm) entre os apoios do corpo-de-prova; b a largura (cm) do corpo-de-prova; h a altura (cm) do corpo-de-prova.

3.3 Caracterização dos agregados para o concreto

Na caracterização física dos componentes do concreto foram avaliadas a granulometria, a massa unitária, a massa específica e a absorção de água.

3.3.1 Granulometria dos agregados

O ensaio de granulometria foi realizado conforme a NBR 7217 – Agregados – determinação da composição granulométrica. Esse método permite determinar a composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos destinados ao preparo do concreto.

3.3.2 Massa unitária

A massa unitária foi determinada segundo as prescrições da NBR 7251 – Agregado em estado solto – determinação da massa unitária.

3.3.3 Massa específica e absorção dos agregados

A massa específica e a absorção de água foram obtidas pelo método da norma do DNER – ME 195/97 – Agregados – determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo.

3.3.4 Desgaste por Abrasão “Los Angeles”

O ensaio de desgaste foi realizado pelo método padronizado pelo DNER-ME 035/98 – Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Esse procedimento tem por objetivo verificar o desgaste sofrido pelo agregado graúdo, quando colocado em máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva (esferas de aço) que são submetidos a 500 revoluções no tambor da máquina, a uma velocidade de 30 a 33 rotações/minuto (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Máquina de abrasão “Los Angeles”.

Após as rotações, os agregados são retirados do tambor, para serem peneirados e lavados na peneira de 1,7 mm. O resultado é expresso em percentagem, através da relação entre a massa que passou na peneira e a massa total.

3.3.5 Perda de massa após fervura

O ensaio da perda de massa após fervura, obedeceu aos procedimentos descritos no método do DNER-EM 225/94. Este procedimento é adotado pelo laboratório do departamento de estradas do Texas denominado “Pressure Slaking Test” tendo por objetivo verificar se a desidratação dos agregados foi satisfatória.

Para realização deste ensaio são executados os seguintes procedimentos:

1 – Coloca-se no frasco de vidro de 500 cm³ uma quantidade de amostra que encha o até a metade;

2 – Adiciona-se 200 cm³ de água destilada à amostra contida no vidro;

3 – Coloca-se o frasco dentro de uma panela de pressão e adicionar água destilada a panela, até formar uma lâmina d'água de mais ou menos 2 cm;

4 – Aquecer a panela, depois de hermeticamente fechada, até a válvula de pressão indicar a fervura;

5 – Deixar ferver por 15 minutos e em seguida retirar o frasco da panela de pressão (Figura 3.7);



Figura 3.7 – Ensaio de fervura.

6 – Deixar esfriar o frasco com amostra e água até mais ou menos $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$;

7 – Arrolhar o frasco e colocá-lo em um recipiente, e este, a seguir, no agitador de peneiras;

8 – Agitar o frasco pelo período de 30 minutos;

9 – Em seguida retirar o frasco do agitador e lavar a amostra na peneira de 0,42 mm de abertura;

10 – Secar em estufa s $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, separadamente, o material retido e o que passou na peneira de 0,42 mm.

O resultado do desgaste é: $\text{Desg} = (\text{massa do material que passa na peneira} / \text{massa total do material}) * 100$.

3.4 Confeção e caracterização do concreto

Para avaliar os efeitos da adição dos agregados sintéticos de argila calcinada foram utilizados três diferentes consumos de cimento, e para comparar os resultados foi produzido um concreto com o agregado convencional (seixo rolado). O desempenho físico mecânico dos concretos, foi verificado através dos ensaios abatimento e de rompimento dos corpos-de-prova cilíndricos.

3.4.1 Determinação da consistência

A medida da consistência foi realizada pelo abatimento do tronco de cone (slump), conforme prescreve a NBR 7223 – Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Este ensaio recomenda que o tronco de cone seja preenchido em três camadas com 25 golpes em cada camada para adensá-lo.

O abatimento do tronco de cone é a distância entre o plano correspondente a base superior do molde e o centro da base superior da amostra que sofreu o abatimento (Figura 3.8).



Figura 3.8 – Abatimento do concreto.

3.4.2 Confeção dos corpos-de-prova

O concreto foi preparado com o auxílio de uma betoneira com capacidade para 48 litros conforme Figura 3.9.



Figura 3.9 – Misturas dos materiais na betoneira.

A inserção dos componentes obedeceu rigorosamente o seguinte procedimento:

- 1 – Adicionou-se totalmente o agregado graúdo;
- 2 – Metade da água foi inserida;
- 3 – O cimento foi adicionado aos poucos;
- 4 – Todo o agregado miúdo foi inserido;
- 5 – O restante da água foi adicionado aos poucos até obter a consistência adotada.

Os corpos-de-prova foram moldados do modo como são tradicionalmente utilizados para a avaliação das características dos concretos convencionais, em moldes cilíndricos, cujas dimensões estão de acordo com a NBR 5738 – Concreto – Moldagem e cura dos corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Moldagem dos corpos-de-prova.

As fôrmas foram previamente untadas com desmoldantes para em seguida serem preenchidas com concreto e adensadas mecanicamente e após 24 horas foram desmoldadas.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram mantidos em câmara úmida até a idade de realização dos respectivos ensaios.

A cura é um procedimento fundamental para a manutenção da umidade e melhorar as condições do concreto. Temperaturas elevadas pioram as condições da superfície do concreto. Um concreto de superfície mais frágil provoca perda de desempenho da estrutura de concreto que ao longo do tempo, reduz sua vida útil.

3.4.3 Massa específica do concreto

A massa específica do concreto com seixo, neste trabalho definido como convencional e do produzido com agregado sintético, aqui definido como não convencional foi obtida através do método de ensaio estabelecido pela NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.

Para a determinação da massa do corpo-de-prova ao ar, estes foram mantidos em estufa pelo tempo de permanência de 72 horas à temperatura de $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Secagem dos corpos-de-prova.

Após a completa secagem em estufa foi determinada a massa, e então, realizou-se o processo de imersão em água à temperatura de $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, durante 72 horas. Nas primeiras 4 horas foi imerso 1/3 do volume das amostras e 2/3 nas 4 horas subseqüentes, ficando completamente imerso nas 64 horas restantes (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Imersão dos corpos-de-prova.

Completo o tempo de saturação, procedeu-se a pesagem em balança hidrostática, determinando a massa da amostra imersa em água (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Obtenção da massa imersa.

3.4.4 Resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão axial foram conduzidos de acordo com a NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto (Figura 3.14). Foram rompidos 2 corpos-de-prova aos 7 dias e 5 aos 28 dias.



Figura 3.14 – Ensaio de resistência à compressão.

4 ESTUDO DE DOIS TIPOS DE SOLO PARA FABRICAÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA

4.1 Considerações iniciais

Na indústria cerâmica tradicional as matérias-primas estratégicas são as argilas e ou folhelho argilosos, que desempenham papel fundamental na aglutinação e processamento no estado verde, assim como, a presença de elementos fundentes que contribuem para o processo de sinterização responsável pelo desenvolvimento, após a calcinação, da resistência mecânica e de sua estabilidade física nas condições de uso. Sendo a argila um solo, que é proveniente da decomposição das rochas, este sempre traz consigo impurezas e minerais associados como carbonatos, feldspatos, micas, óxidos, quartzo e outros.

Chamam-se indústria da cerâmica vermelha a produção de blocos, tijolos, telhas, ladrilhos e outros. Sua produção depende muito das características de suas matérias-primas, portanto é de extrema importância o estudo experimental dessas propriedades. Como já mencionado anteriormente, sabe-se que as argilas são compostas de material argiloso e materiais não-plásticos. Os materiais não-plásticos, com granulometria mais elevada, são representados essencialmente por pedregulhos e areias, atuando na mistura como os agentes desplastificantes, haja vista, que estes com menor superfície específica reduzem sobremaneira a plasticidade quando inseridos na massa cerâmica.

As argilas plásticas, conhecidas pelos oleiros como “argilas gordas”, apresentam granulometria muito fina, ou seja, grãos com dimensões inferiores a 0,005 mm. Logo, a consequência imediata, do processamento de uma composição contendo exclusivamente esse tipo argila é o surgimento de fissuras ou trincamento das peças cerâmicas provocado pelo excesso de umidade na moldagem. Para reduzir os riscos de defeitos do produto final, usam-se no processo de fabricação outras argilas (argilas magras), que em sua composição apresentam

maior percentual de impurezas (materiais não-plásticos) reduzindo o teor de umidade de plasticidade da massa cerâmica.

As argilas apresentam grande superfície específica como consequência elevada plasticidade, necessitando de uma considerável quantidade de água para se tornar completamente plástica, por outro lado, é verificada melhorias em sua resistência mecânica a seco e após a queima. Em razão de seu alto grau de compactação, os canais internos existentes entre as partículas são reduzidos, dificultando a eliminação da água durante o processo de secagem. Desta forma, ocorre o efeito do aumento do gradiente de umidade no interior do produto, provocando fortes retrações volumétricas e deformações, acarretando perdas no processo de produção da cerâmica. Portanto, para solos com esse tipo de composição, o ciclo de secagem deve ser longo, com aquecimento lento para evitar retrações diferenciais.

O uso das “argilas magras” como desplastificantes tem por objetivo reduzir o grau de compactação da massa cerâmica, e o teor de umidade de moldagem pelo o efeito da redução da plasticidade. Sua introdução nas composições argilosas reduz as contrações sofridas pela massa, tanto nos processos de secagem como de queima. Para que possam agir com eficácia, devem apresentar granulometria acima de 0,06 mm e ser usados em quantidades moderadas, (PRACIDELLI, 1997).

Segundo Ripoli (1997) as matérias-primas usadas pelas indústrias cerâmicas são constituídas essencialmente por argilas plásticas, cujos argilominerais predominantes são a caulinita e illita. Santos (1975) descreve argilomineral como minerais constituintes característicos das argilas, geralmente cristalinos; quimicamente são silicatos de alumínio hidratados, contendo em certos tipos outros elementos, como magnésio, ferro, cálcio, sódio, potássio, lítio e outros.

A indústria de cerâmica estrutural vermelha possui uma representatividade muito importante na economia do país, movimentando 2,5 bilhões de dólares ao ano, que significa,

cerca de 1% do Produto Interno Bruto (PIB). Possui entre 8.500 a 11.000 unidades, no país, produzindo cerca 2 bilhões de peças mês, contribui socialmente com geração de empregos entre 250 a 400 mil, ocupando, em média 25 a 30 pessoas por empresa. O produto cerâmico pode ser utilizado amplamente na construção civil, pelo fato de apresentar grande aplicabilidade (LOSSO e ARAÚJO, 1994; BUSTAMANTE e BRESSANI, 2000; TAPIA et al 2000 apud PASCHOAL, 2003).

A fabricação de cerâmica vermelha nos municípios de Iranduba e Manacapuru, estado do Amazonas, constitui um setor de destaque na economia local. Nestes dois municípios, há 26 indústrias oleiras em funcionamento, sendo que apenas duas olarias fabricam telhas, as restantes produzem apenas tijolos cerâmicos furados (geralmente de oito furos) e maciços, estes últimos sob encomenda (SEYE, 2003). O parque oleiro de Iranduba (maior pólo produtor) está com uma produção em torno de oito milhões de tijolos por mês (tipo oito furos), enquanto Manacapuru produz cerca de dois milhões por mês.

O pólo oleiro de Iranduba esta situado no município de Iranduba localizado à margem esquerda do rio Solimões, com uma área de 2.354 km² e sua sede dista cerca de 25 km, em linha reta, na direção NO-SE da cidade de Manaus capital do estado do Amazonas. Conforme o último senso (IBGE, 2007), sua população é de 30.472 habitantes. Sua ligação com a capital dá-se por meio fluvial ou terrestre – muito embora que neste último caso, há a necessidade da travessia do rio Negro, por meio de balsas, até a localidade do Cacau Pirêra, à margem direita do rio Negro – onde se encontra a rodovia estadual Manuel Urbano (AM – 070), que interliga Manaus aos Municípios de Iranduba, Manacapuru e Novo Ayrão. O Departamento Nacional de Pesquisa Mineral DNPM definiu que geologicamente, o município situa-se em planície de dissecação, prevalecendo às rochas sedimentares da formação Alter do Chão, cuja sedimentação deu-se em ambiente continental, fluvial e lacustrino, constituída por intercalações de arenitos, siltitos e conglomerados. Os arenitos são de granulometria fina a

média, mal consolidados, apresentam bolsas de areias distribuídas irregularmente; e os conglomerados são de seixos de quartzo e arenito silicificado.

O município de Mancapuru está situado à margem esquerda do rio Solimões, apresentando área de 7.062 km², com população recenseada de 82.309 habitantes (IBGE, 2007). Encontra-se distante em linha reta da cidade de Manaus 79 km, na direção NO-SE. Sua interligação a capital do Estado pode ser feita tanto de barco como pela rodovia AM-070, sendo necessária a travessia do rio Negro, por balsa, até a localidade de Cacau Pirêra, distrito de Iranduba.

A unidade mais antiga desta área são as rochas silicilásticas da formação Alter do Chão, do Cretáceo superior, sobre as quais se desenvolvem toda a sedimentação fluvial quaternária, composta principalmente de argila. Estes depósitos argilosos juntamente com o latossolo amarelo que recobrem a formação Alter do Chão são utilizados como matéria-prima na indústria da cerâmica vermelha e também na agricultura. A deposição por suspensão e migração de pequenas formas de leito em regime de fluxo inferior é subordinada, e processos pedogenéticos, relacionados à colonização por plantas, explicam os níveis avermelhados e mosqueados com fragmentos de madeira (paleossolo). Os depósitos posicionados em cotas abaixo de 60 m, em relação ao nível do mar, são compostos principalmente de material argiloso-siltico arenoso, coloração cinza-esbranquiçada a cinza médio, apresentando mesclas avermelhadas e amarelas nas partes mais superiores dos perfis. Em geral, os sedimentos são maciços até a profundidade de 3,5 m, quando começam a exibir a laminação plano-paralela, definida pela intercalação de lâminas de pelito e areia muito fina (SOARES, 2001 apud SEYE, 2002).

O Quaternário da Amazônia ocidental é pouco conhecido, do ponto de vista geológico, principalmente se comparado com o conhecimento do Quaternário de outras regiões do Brasil. A bacia amazônica representa cerca de 20% de sedimentos aflorantes de idade Quaternária, e

sem dúvida, corresponde à parte significativa da história do Quaternário brasileiro. Ainda também, a formação Alter do Chão é composta principalmente por fácies de composição quartzosa caulínica, por vezes silicificadas, intercaladas com fácies mais argilosas. Apresenta em geral coloração esbranquiçada e rosada, variando a granulometria de fina a grossa (SANTOS, apud SEYE, 2000).

Como foi dito no Capítulo 3, as amostras dos solos 1 e 2 foram coletadas, respectivamente nas cidades de Iranduba e Manacapuru, no depósito de matéria-prima das olarias da localidade, através do procedimento de escavação superficial com uso de pá e enxada.

4.2 Resultados e discussão

Feita a coleta das amostras dos solos, estas foram levadas aos Laboratório de Materiais e de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia onde foram realizados diversos ensaios, os quais são descritos a seguir.

4.2.1 Caracterização física e mineralógica das amostras de solo.

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados da caracterização física das amostras dos solos 1 e 2. Nesta tabela, observa-se a elevada plasticidade do solo 1, que afeta diretamente a umidade de moldagem, sendo necessária adicionar maior quantidade de água para se obter uma massa trabalhável. Este teor de umidade indica que esta argila necessita de no mínimo 55% de água para ser conformada, afetando diretamente a etapa de secagem, que pode ser mais problemática com o aumento do risco de defeitos provocados pela retração, surgimento de trincas, e o prolongamento do tempo de secagem. Deve-se destacar que os valores

razoáveis de umidade para extrudar uma massa cerâmica estão entre 22-24%, quando se utiliza uma extrusora a vácuo (VIEIRA, 2003).

Tabela 4.1 – Caracterização das amostras de solo.

Amostras	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)	Limite de Plasticidade (%)	Limite de Liquidez (%)	Índice de plasticidade (%)
Solo 1	46,61	47,61	5,98	---	55	86	31
Solo 2	42,00	42,76	14,18	1,06	28	50	22

Sendo o limite de liquidez (LL), o teor de umidade que uma massa cerâmica começa a se comportar como um líquido e se relaciona com a água adsorvida associada à argila, correspondendo a máxima umidade que ainda permite a sua moldagem a massa cerâmica moldada com umidade em torno do (LL) produziu um agregado muito poroso, considerando que a excessiva quantidade de água é retirada durante a secagem, e os poros anteriormente ocupados por água ficavam vazios.

Quanto à plasticidade dos solos para a fabricação do agregado sintético de argila calcinada, poderão ser utilizadas argilas ou misturas argilosas que possuam índice de plasticidade (IP) superior a 15%. Este fato demonstra que a matéria-prima para a fabricação do agregado sintético precisa ter alta plasticidade. O menor IP encontrado nos solos estudados é 22%, portanto acima do limite estabelecido anteriormente.

Com relação à granulometria, observa-se que o teor de argila é praticamente o mesmo, em ambos os solos estudados, no entanto, os teores de silte e areia são diferentes. O menor teor de areia encontrado no solo 1 certamente contribuiu para o maior valor de plasticidade obtido neste solo em relação ao solo 2.

O solo 2 apresentou menor limite de plasticidade, tendo em vista que esse parâmetro indica o teor de umidade mínimo para que a uma argila ainda possa ser conformada minimizando-se os riscos de fissuras nas peças cerâmicas. Desta forma, a massa cerâmica conformada no LP apresentou porosidade inferior ao obtido quando utilizado o LL.

As curvas granulométricas do solo 1 e 2 estão identificadas nas figuras 4.1 e 4.2 respectivamente. O solo 1 é classificado como A-7-5 e o solo 2 como A-7-6 conforme o sistema de classificação HRB (Highway Reserarch Bord).

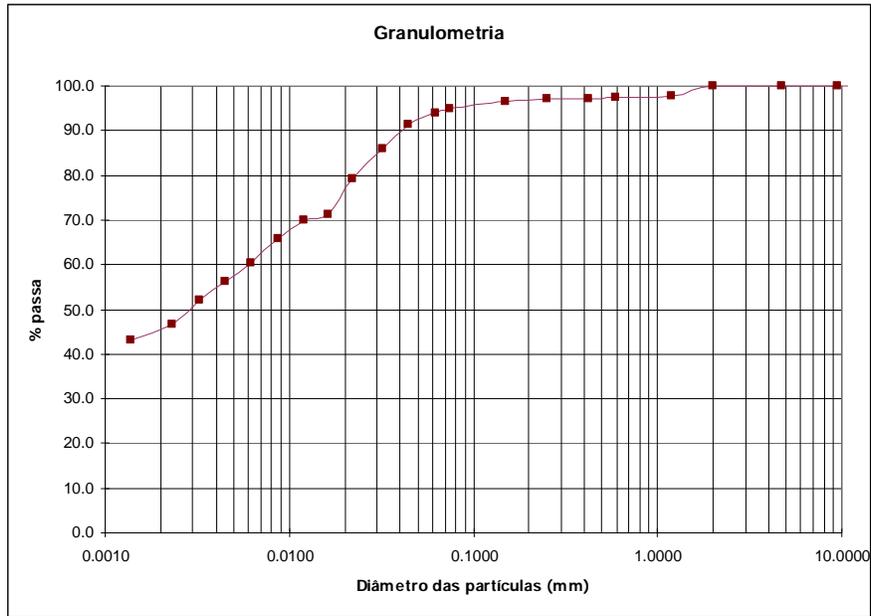


Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo 1.

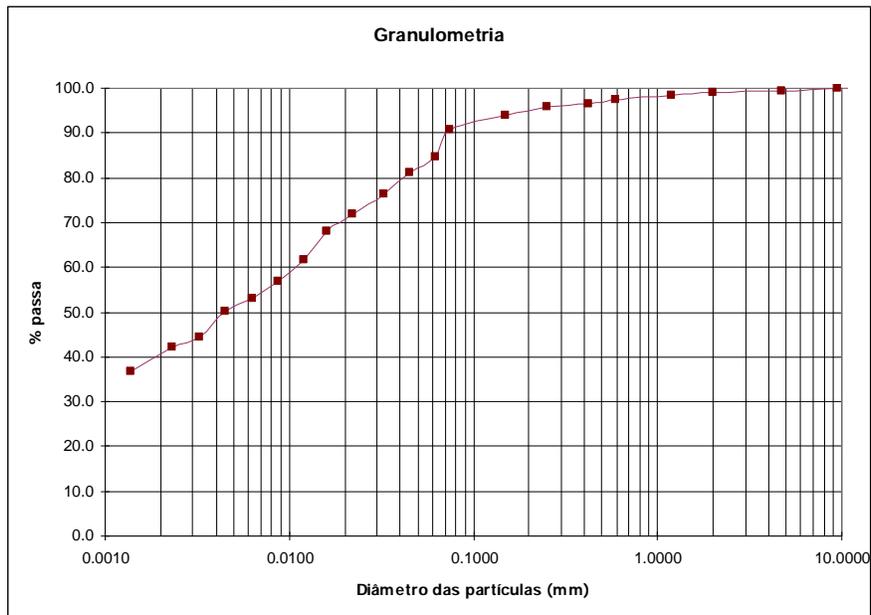


Figura 4.2 – Curva granulométrica do solo 2.

A Tabela 4.2 estabelece os percentuais das partículas de solo que devem compreender as dimensões específicas para cada tipo de aplicação da matéria-prima. Uma massa cerâmica não deve conter somente um tipo de argila, caso seja pouco plástica, a resistência mecânica do produto estará comprometida, tanto após a secagem quanto a queima. Já a constituição somente de argilas plásticas, pode apresentar dificuldades no processo de moldagem de secagem e de queima.

Um estudo experimental realizado por Pracideli (1997) verificou a influência da composição granulométrica e da utilização do gráfico Winkler. Esses pesquisadores chegaram a seguinte conclusão: “A composição granulométrica de massas de cerâmica vermelha exerce papel fundamental no processamento e nas propriedades dos diversos tipos de produto. Para cada produto, há uma distribuição que parece ser a mais adequada”.

A composição granulométrica dos solos para produtos da cerâmica vermelha está indicada na Tabela 4.2, onde se encontra as regiões com as granulometrias específicas para cada aplicação. Na região “A” têm-se uma matéria-prima para fabricação de materiais de alta qualidade, porém com certa dificuldade de produção. Já nas regiões “B, C e D” encontram-se respectivamente, solos adequados para produção telhas, tijolos furados e tijolos maciços.

Tabela 4.2 – Composição granulométrica dos produtos da cerâmica vermelha.

Regiões Tipos de materiais	Composição granulométrica (%)		
	2 μm	2 a 20 μm	20 μm
A	40 a 50	20 a 40	20 a 30
B	30 a 40	20 a 50	20 a 40
C	20 a 30	20 a 55	20 a 50
D	15 a 20	20 a 55	20 a 55

Fonte: PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997.

Os solos 1 e 2, encontram-se na região “A”, caracterizando-se como matéria-prima de qualidade para fabricação do agregado sintético de argila calcinada. Devido ao seu percentual elevado de argila superior a 40%, é preciso tomar alguns cuidados com o processo moldagem, pois poderão ocorrer retrações e fissuras nas peças cerâmicas.

Nos resultados obtidos da difração, conforme as Figuras 4.3 e 4.4, observam-se a presença da caulinita e de quartzo. Em nenhum dos solos foi encontrado argilominerais

expansivos como a montmorilonita. No entanto, encontraram-se picos de difração característicos de illita, a qual pertence ao grupo dos minerais encontrados em argila e que apresenta essencialmente a estrutura da muscovita, sendo menos expansiva que a montmorilonita. Observa-se ainda que nesses dois solos, a incidência de picos característicos de caulinita é maior. A baixa plasticidade encontrada no solo 2 deve-se ao fato de que neste há um elevado percentual de minerais não-plásticos como mica muscovita e a goetita.

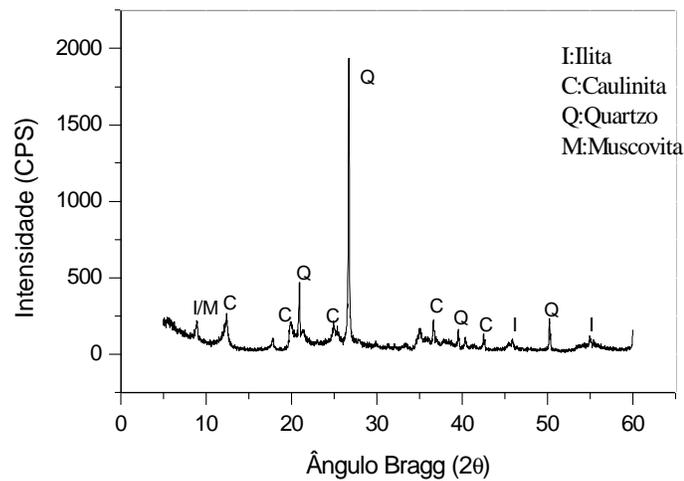


Figura 4.3 – Resultado da difração de raios-X do solo 1.

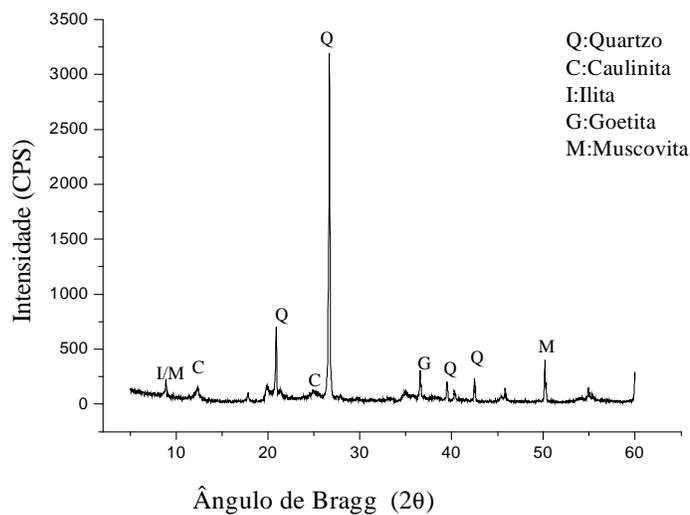


Figura 4.4 – Resultado da difração de raios-X do solo 2.

4.2.2 Composição química e sinterização das amostras de solo

Na tabela 4.3, observa-se que o solo 1, apresenta maior teor de alumina que é um indicativo da existência do maior percentual de minerais argilosos. Este percentual justifica os elevados índices de consistência encontrados para este solo. Também, pode-se observar nesses dois solos, a ocorrência de um teor superior a 5% de óxido de ferro (Fe_2O_3), responsável pela cor avermelhada das peças cerâmicas antes e após a queima. Já os teores de sílica, alumínio e ferro são característicos das massas usadas na produção de cerâmica vermelha, o que corrobora o uso industrial desse tipo de solo, sendo assim viabilizado a fabricação do agregado sintético, pois este nada mais é que um produto da cerâmica vermelha.

Tabela 4.3 – Composição dos elementos químicos das amostras.

Amostras	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	CaO	TiO_2	Na_2O	K_2O	MnO	PF
Solo 1	66,0	6,2	16,11	1,5	1,1	0,9	1,4	2,0	0,1	4,7
Solo 2	59,56	7,3	14,55	1,21	0,92	1,2	1,5	2,19	0,11	11,42

Nota: P.F. – perda ao fogo.

A gresificação de massas cerâmicas é a medida da evolução da microestrutura do material durante a queima. A curva de gresificação utilizada em revestimentos cerâmicos ilustra o comportamento térmico do material em função da temperatura (SÁNCHEZ-MUÑOZ, 2002). Estas curvas apresentam graficamente as variações de absorção de água (AA) e retração linear (RL) em função da temperatura de queima. Esse tipo de curva indica a temperatura onde o material começa a gresificar, correspondendo ao ponto de interseção entre a curva de absorção e retração.

O ponto de interseção é chamado "ponto de grés", sendo este o ponto de início da gresificação do material, dado por reações químicas entre as interfaces dos grãos, onde ocorre gradativamente a união de dois grãos tornando-se um só. Conforme as Figura 4.5 e 4.6 os solos 1 e 2 começam a gresificar a partir de 1125 °C. Nas temperaturas de 850 °C até 950 °C, é observado pouca variação no percentual de absorção de água e uma certa estabilidade

dimensional das peças devida baixa retração linear. Já a partir de 1000 °C, ocorre um aumento da retração passando de um pouco mais de 1% e chegando a próximo de 7%, indicando um aumento da quantidade de fase líquida, oriunda da reação dos elementos fundentes, reduzindo a absorção de água de 15% para próximo de 6%.

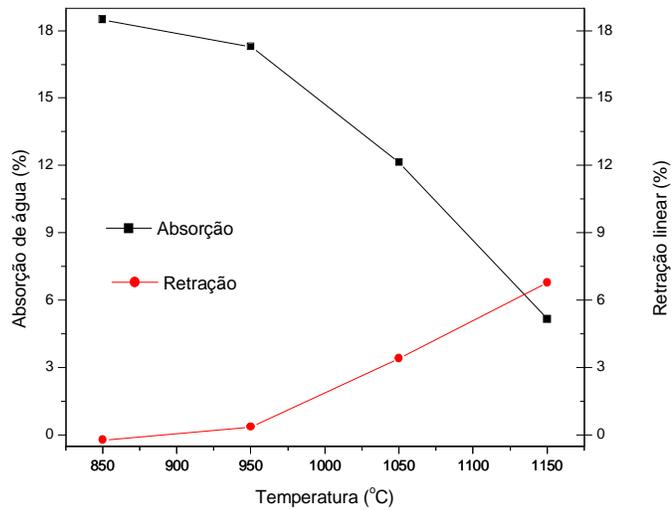


Figura 4.5 – Gráfico de gresificação do solo 1.

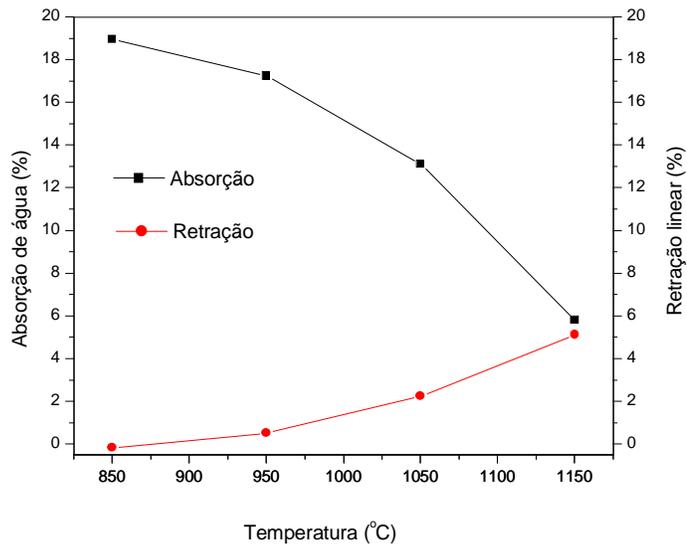


Figura 4.6 – Gráfico de gresificação do solo 2.

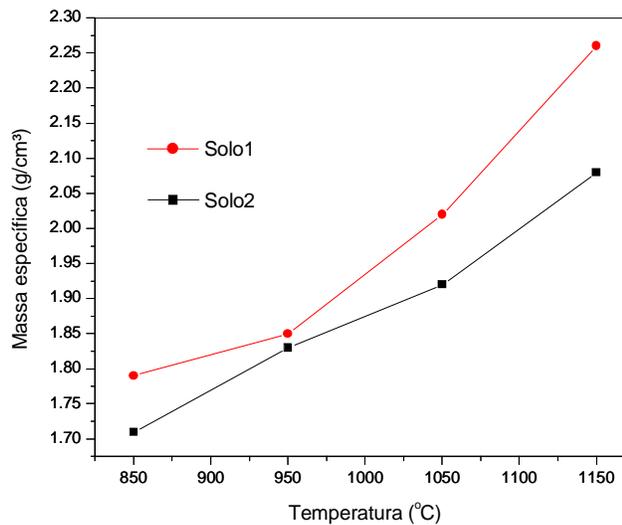


Figura 4.7 – Gráfico da massa específica versus temperatura.

A figura 4.7 apresenta os resultados da massa específica aparente dos corpos-de-prova queimados. Observa-se que, até 950 °C, a massa específica dos solos 1 e 2 é inferior a 2 g/cm³, e em 1150 °C, a massa específica atinge os valores de 2,26 e 2,08 g/cm³ respectivamente. Além disso, o solo 1 apresenta teor de fundente (Fe₂O₃ + MgO + CaO + Na₂O + K₂O) em torno de 12,20 %, enquanto no solo 2, é da ordem de 13,12 %, que em tese, significaria que este último deveria ser mais denso. Por outro lado, considerando que a densificação está diretamente ligada a redução da porosidade, uma elevada perda ao fogo de 11,42 % contribui de forma significativa para elevar a porosidade e desse modo reduzir a densificação.

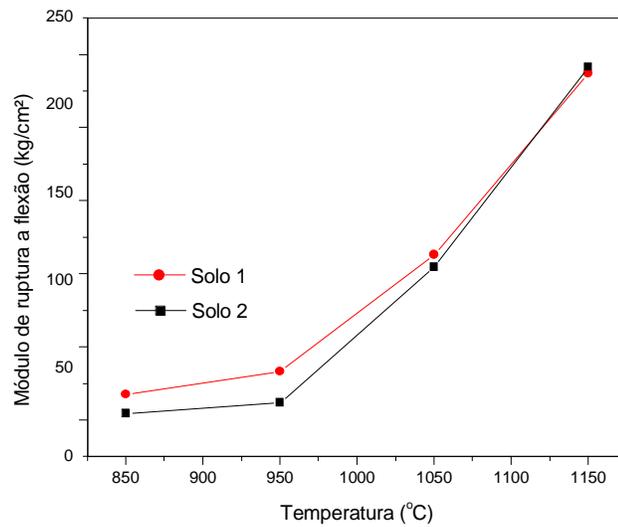


Figura 4.8 – Gráfico do módulo de ruptura a flexão versus temperatura.

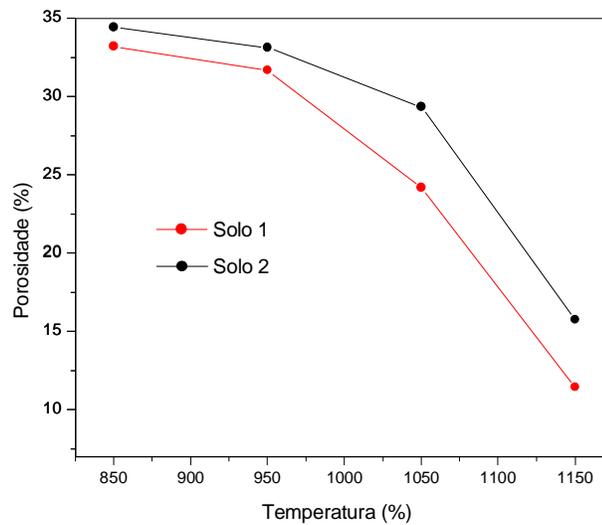


Figura 4.9 – Gráfico da Porosidade versus Temperatura.

Já o módulo de ruptura a flexão, Figura 4.8, apresenta um aumento nos valores da resistência em função do aumento da temperatura de queima. Observa-se também que o solo 1 apresenta os maiores valores de módulo de ruptura a flexão das massas cerâmicas avaliadas em quase todas as temperaturas de queima. A redução da porosidade (Figura 4.9) das amostras explica este comportamento, pois o solo 1 para as temperaturas de 850 °C e 1150 °C

sua porosidade é 33,2% e 11,4% respectivamente, enquanto que o solo 2, apresenta para as mesmas temperaturas valores de 34,4 e 15,75.

O solo 1 apresenta elevada plasticidade, comprovando a existência de argilas de granulometria muito fina que na moldagem elevam o grau de compactação (empacotamento) a verde, resultando dessa forma em peças cerâmicas mais densas.

O solo 2 apresentou a menor massa específica aparente e o menor teor de umidade de moldagem, por isso esta foi utilizada como matéria-prima para a produção agregado graúdo de argila calcinada na temperatura de 850 °C e 1125 °C.

5 FABRICAÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO DE ARGILA CALCINADA

5.1 A indústria da cerâmica

A palavra cerâmica é derivada da palavra grega *kerameikos* que significa feito de terra ou terroso. A fabricação de produtos cerâmicos já existe de longas datas, devida à facilidade de sua fabricação e abundância da matéria-prima - barro (vulgarmente conhecido). Desde o período neolítico o homem pré-histórico calafetava as cestas de vime com barro. Mais tarde verificou que poderia dispensar o vime, e fez potes e utensílios de barro. No decorrer de seu uso, constatou que o calor endurecia esse barro, e surgiram os produtos cerâmicos, que nesta fase vivida pela a humanidade, foi largamente empregada para os mais diversos fins. Posteriormente, com o uso de diversas argilas, com menor ponto de fusão surgiram os vidrados e vitrificados. Já no ano 4000 a.C. os assírios obtinham cerâmica vidrada de melhor qualidade.

Na própria Bíblia encontram-se registros do uso de materiais cerâmicos na construção da Torre de Babel no livro de Gênesis, capítulo 11, versículo 3 e 4. “E disseram uns aos outros: ‘Vamos fazer tijolos e cozê-los ao fogo!’ Utilizaram tijolos em vez de pedras, e piche no lugar de argamassa”. No Egito onde foram construídas as pirâmides de pedra, os operários moravam em casas erguidas com tijolos como relata o livro do Êxodo, capítulo 1, versículos 14, “Preparação de argila e fabricação de tijolos”.

Um novo período na fabricação da cerâmica começou quando os semitas inventaram o torno oleiro, que proporcionou melhor qualidade, rapidez e acabamento.

Os chineses por volta do século VII já fabricavam a porcelana, enquanto que na Europa só se fabricava a cerâmica vermelha, até que na Inglaterra no século XVIII, surgiu a louça branca. A partir daí houve um grande desenvolvimento dessa indústria, baseada nas

inovações tecnológicas e nos estudos de laboratórios especializados, como o de Sevres (França), Stokes-on-Trent (Grã-Bretânia), Instituto Max-Planck (Alemanha) e os institutos de pesquisa cerâmicas das universidades da Pensilvânia, Alfred e Ohio. Surgiram então, tipos especiais de fornos, que possibilitou a fabricação em dimensões padronizadas, moldagem a seco e materiais com alta resistência mecânica.

A cerâmica é conhecida como a pedra artificial obtida pela moldagem, secagem e a calcinação de argilas ou de misturas contendo argilas. Nos materiais cerâmicos a argila fica aglutinada por uma quantidade de vidro, que surge pelo calor de cozimento sobre os componentes da argila (BAUER, 1992).

Há mais de duzentos anos Josiah Wedgwood comunicou à Rooyal Society da Inglaterra os primeiros resultados de seus trabalhos sistemáticos de pesquisa sobre cerâmica, os quais compreenderam perto de 7 000 experimentos de queima de sistemas cerâmicos que serviram de base à grande indústria cerâmica inglesa atual (SANTOS, 1975). A louça de mesa inglesa, hoje famosa mundialmente, foi resultado dos trabalhos de Wedgwood que na sua fórmula utiliza ossos de animais calcinados para a fabricação de um dos materiais cerâmicos mais resistentes.

Além do ramo da cerâmica branca, tão antigo quanto, é o uso de argilas na fabricação de materiais para construção civil, tais como tijolos, telhas, ladrilhos de piso, manilhas, elementos vazados, cerâmica utilitária e outros de menor importância ou de materiais mais modernos, como os agregados leves de argila expandida piroplastica e de argila calcinada (BODIN, 1956; CLEWS, 1968 apud SANTOS 1975).

As propriedades refratárias de certas argilas, ou seja, a capacidade para suportar altas temperaturas sem se amolecer tem sido explorada pelos ceramistas e pelos metalurgistas desde os antigos fogões. Os tijolos refratários feitos com argilas sílico-aluminosa depende da composição química, geralmente o teor de óxido de alumínio varia de 30 a 45%.

A cerâmica vermelha ou produtos cerâmicos estruturais são produzidos com argilas plásticas, tendo como argilominerais predominantes a caulinita e a ilita, com certo percentual de matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. Essa matéria-prima é geralmente retirada das margens de rios, lagos ou de várzeas, sendo queimado entre 850 a 1000 °C.

Já a produção de agregados leves é comum utilizar folhelhos ilíticos, mais elementos fundentes e óleo combustível. Esse material é expandido piroplasticamente entre 1050 a 1125 °C.

Portanto, a cerâmica é atualmente um campo especial da ciência dos materiais, podendo ser definida de várias maneiras, conforme a aplicação de quem a define. Por outro lado, cerâmica é definida como sendo o ramo da indústria em que “minerais de composição inconstante e pureza duvidosa que são expostos à temperatura mal definida, durante períodos de tempo que fazem reações desconhecidas ocorrerem de forma incompleta, formando produtos heterogêneos e não estequiométricos, conhecidos com o nome de materiais cerâmicos” (BRADSTREET apud SANTOS, 1975).

5.2 Fabricação da cerâmica

Na fabricação de tijolos as argilas devem ser plástica, moldáveis facilmente e devem apresentar elevado módulo de ruptura flexão, com um mínimo de trincas, fissuras e empenamentos. A presença de elevados teores de elementos alcalinos e alcalino-terrosos são prejudiciais pelo fato de causa distorções, retrações excessivas e ainda reduzir a temperatura de vitrificação.

Já as argilas usadas para a fabricação de telhas, devem possuir elevada plasticidade para a moldagem; ter módulo de ruptura a flexão elevado quando ainda secas, para permitir o

manuseio durante a fabricação. Os valores referentes à porosidade e absorção de água após a queima devem ser baixos, para impedir que a água da chuva infiltre.

Conforme Santos (1975) as argilas usadas para fabricação de cerâmica vermelha ou estrutural podem ser usadas para fabricação de agregados leves dependendo das suas características de expansão com a temperatura. Este estudo com a avaliação de matérias-primas para agregados leves, baseou-se nas propriedades de absorção da água e massa específica aparente após o aquecimento em alta temperatura, considerando como expandidas as amostras que flutuaram na água e aumentaram de diâmetro.

A fabricação dos materiais cerâmicos compreende uma seqüência de etapas de manufatura para o processamento do solo, sendo que pelo menos uma vez deve ocorrer a queima em temperatura elevada para promover as reações físicas e químicas. De uma forma geral, segue os seguintes procedimentos:

- i) Extração das argilas;
- ii) Estocagem e mistura da matéria-prima;
- iii) Moldagem;
- iv) Secagem;
- v) Queima.

5.2.1 Extração das argilas

Antes de se proceder a fabricação de tijolos, telhas ou outro produto cerâmico é necessário conhecer a matéria-prima, pois como foi visto no capítulo anterior, a composição granulométrica, relativo ao percentual de argila, silte e areia, afetam diretamente no resultado do produto que se deseja produzir.

A qualidade da cerâmica está relacionada também, a composição química. Caso a argila apresente elevado percentual de compostos sulfurosos e muito carbonato de cálcio,

acarretará fissuras e trincas na cerâmica. Se por outro lado, for suja, com a presença de matérias orgânicas, tais como folhas e raízes o produto final será muito poroso e a absorção de água poderá ser maior que o recomendado pelas especificações.

No pólo oleiro de Iranduba e Manacapuru a exploração é feita nas camadas superficiais até 3 metros de profundidade. A extração da argila é realizada a céu aberto, durante os períodos de seca dos rios e igarapés, com a utilização de pá carregadeira e caminhão basculante.

5.2.2 Estocagem e mistura da matéria-prima

Os vários solos depois de extraídos podem ser estocados de várias formas. Na própria jazida, por exemplo, pode ser feita a seleção pela composição granulométrica, plasticidade e coloração.

Normalmente é deixada em depósitos ao ar livre, onde são misturadas anteriormente e passam por um período de descanso, ou o apodrecimento da argila, como se denomina. Esse procedimento tem por finalidade fermentar e tornar a matéria orgânica coloidal aumentando desta forma a plasticidade.

Muitas vezes é feito à eliminação dos grãos maiores que são os pedregulhos, a fim de se obter menores partículas e conseqüentemente, maior plasticidade, melhor contato superficial entre os componentes do solo. A argila é colocada em depósitos onde é misturada manualmente ou mecanicamente, dependendo do nível tecnológico da indústria, sendo que nesta fase são retirados galhos pedregulhos e outras impurezas. A mistura é normalmente feita com duas qualidades de argila: uma gorda com coloração branca, rica em óxidos de alumínio e outra magra com coloração amarela ou vermelha, rica em óxidos de ferro.

Após o processo de seleção começa o de amassamento que serve para preparar a matéria-prima para moldagem, com a adição ou não de água.

5.2.3 Moldagem

A operação de moldagem tem por objetivo dar forma desejada a massa cerâmica, empregando os processos de moldagem a seco por prensagem (com umidade de até 10%), com pasta plástica consistente (com 20 a 35% de umidade), com pasta plástica mole (com 25 a 40% de umidade) e com pasta fluída (com umidade de 30 a 50%) de acordo com BAUER (1982). Esses valores de teor de umidade do solo variam conforme o percentual de argila da massa cerâmica.

A moldagem com pasta plástica fluída, é o processo mais antigo, a massa cerâmica com umidade acima de 20%, muitas vezes superior ao limite de plasticidade, é moldada em moldes de madeira ou em torno oleiro. Este processo é usado para fabricação de vasos, tijolos brutos, pratos e outros utensílios.

Quando a massa cerâmica encontra-se em estado plástico consistente, é usada uma extrusora, movida por força mecânica, que tende a empurrar esta massa a passar, sob pressão, através de boquilhas apropriadas, formando objetos com dimensões e tamanhos estabelecidos. Usa-se geralmente para as peças um arame preso a um esquadro que funciona como se fosse uma guilhotina. Segundo BAUER (1982) este processo incorpora muito ar, que tende a dilatar no processo de cozimento, causando o fendilhamento ou até a desagregação da peça.

Já no processo de moldagem a seco, é usada uma prensa com capacidade de 5 a 700 MPa, onde a argila é colocada quase que seca com umidade próxima a higroscópica. Se caso a umidade estiver elevada, as peças ficaram grudadas no moldes dificultando sua retirada. Essa moldagem é utilizada para produzir ladrilhos, azulejos, refratários, isoladores elétricos e para tijolos e telhas de qualidade superior. Apesar da facilidade e simplicidade da operação, da produção em grande escala e redução no tempo de secagem e nas deformações, esse processo exige um capital elevado e renovação dos moldes de prensagem. Os produtos são de boa qualidade, pois não há bolhas de ar incorporado, nem tampouco excesso de umidade. Como

foi visto no capítulo anterior, as propriedades mecânicas da cerâmica é inversamente proporcionais a quantidade de água no processo de moldagem.

5.2.6 Secagem

Em todos os processos de moldagem a umidade atua como agente aglutinador nesse processo. Porém é preciso ter cuidado com a secagem, pois ela tão importante quanto à queima, porque, após a moldagem fica inserido na massa total do solo cerca de 5 a 45% de umidade.

Caso a queima seja feita após a moldagem sem a devida secagem, à umidade existente no interior das peças tenderá a se deslocar rapidamente para a superfície externa, aparecendo tensões internas e conseqüentemente o surgimento trincas e fissuras. Portanto, a secagem prévia é de fundamental importância para os produtos cerâmicos.

Por outro lado, no processo de secagem deve-se tomar cuidado com a secagem rápida desuniforme, que elevando o gradiente de umidade no interior da peça compromete a linearidade, devido às fortes retrações diferenciais e deformações, aumentando as perdas no processo. Já a secagem lenta é onerosa, pelo fato de retardar a queima.

A secagem provoca retração em todas as dimensões das peças e deformações se não for controlada. Essa retração ocorre quando a água absorvida na moldagem começa a evaporar.

5.2.5 Queima

Com a queima a argila adquire estabilidade e resistência mecânica surgindo algumas alterações físicas e químicas. Os principais fenômenos que podem ocorrer na queima de um corpo cerâmico são os seguintes (NASCIMENTO, 2005; BAUER, 1982):

- Aquecendo-se a argila até 150 °C, ela perde a água de capilaridade, de moldagem e a água proveniente da matéria orgânica;
- Entre 350 °C até 450 °C, ela perde água adsorvida e vai enrijecendo.
- Nas temperaturas de 450 °C à 550 °C ocorre a combustão de substâncias orgânicas contidas na argila e a dissociação de compostos sulfurosos;
- A partir da temperatura de 570 °C começa a transformação de quartzo de sua forma cristalina alfa para beta, acompanhada de uma violenta expansão durante o aquecimento e de beta para alfa durante o resfriamento acompanhado de fortes retrações;
- Acima de 700 °C, começam a se desenvolver reações químicas da sílica e da alumina com elementos fundentes, formando sílico-aluminatos complexos que dão a massa cerâmica características como dureza, estabilidade, resistência mecânica dando início a sinterização;
- Entre 850 °C a 950 °C os carbonatos se decompõem e liberam CO₂ e transformam-se em óxidos;
- Acima de 1000 °C os silico-aluminatos formam uma quantidade de vidro, que aglutina os demais elementos, proporcionando mais resistência, dureza, compacidade e impermeabilidade às peças cerâmicas.

Ocorrem diversas reações no cozimento, dependendo de alguns fatores como a temperatura alcançada, da velocidade de aquecimento, de esfriamento, tipo de forno e do

combustível usado. O cozimento da argila é feito em fornos contínuos e em fornos intermitentes. Nos primeiros a produção é contínua; já no segundo os lotes devem ser queimados um de cada vez.

O forno intermitente comum é o mais fácil e de menor custo para se construir. Normalmente sua forma é retangular ou circular, com lados de até 10 metros e altura de 6 metros aproximadamente. Nesse tipo de forno são colocados mais de 50 milheiro de tijolos, através de uma porta que é lacrada com barro e tijolo, após ter sido acesa a fornalha. O tempo de cozimento é aproximadamente de uma semana e mais 5 dias para esfriar (Figura 5.1).



Figura 5.1 – Forno usado para queima dos produtos tijolos.

O forno túnel, inventado em 1877, é um forno contínuo com rendimento superior a mais de 50% que o anterior, aproveitando da melhor forma a mão-de-obra e o aquecimento. Seu funcionamento se assemelha a um túnel extenso, em que a fornalha encontra-se no centro, e as peças cerâmicas são colocadas em vagonetas móveis em um lado da extremidade. Esta vagoneta vai se movimentando lentamente sofrendo um pré-aquecimento, passa pelo centro, onde a queima é direta e após vai esfriando até sair do túnel.

Quando não se deseja o contato da chama com as peças, usa-se, então o forno mufla. Esse tipo de forno utiliza uma caixa interna que ao redor da qual circula o calor.

5.3 Fabricação do agregado de argila calcinada.

Os agregados fabricados nesta pesquisa basearam nos procedimentos de fabricação adotados nas olarias da região, conforme descrito no item anterior e no processo adotado pela cinasita.

Entende-se por agregado artificial de argila calcinada, como aquele produto proveniente da transformação de um solo ou folhelho argiloso previamente processado, em um material inerte e com resistência mecânica satisfatória para uma determinada finalidade. Essas características são normalmente obtidas através do aquecimento da massa cerâmica em elevadas temperaturas, superior a 760 °C. A qualidade do produto cerâmico depende fundamentalmente da matéria-prima utilizada, da temperatura de queima e da conformação.

O agregado de argila calcinada produzido nessa pesquisa, nada mais é do que um produto da cerâmica vermelha, pois este é moldado com a mesma matéria-prima, mesmo processamento (secagem e queima) e apresenta fenômenos físico-químicos durante a queima, semelhante ao que ocorre com os tijolos e com as telhas.

Ressalte-se que através do estudo das massas cerâmicas apresentado no capítulo anterior, optou-se pelo solo 2, para a fabricação do agregado sintético de argila calcinada. Este solo que apresentou a menor massa específica aparente e o menor teor de umidade de moldagem, foi utilizado como matéria-prima para a produção agregado graúdo de argila calcinada nas temperaturas de 850 °C e 1125 °C. A escolha da primeira temperatura fez-se em decorrência dos fornos da região atingirem temperaturas que variam de 850 °C a 950 °C. Já a escolha da segunda temperatura foi devido ao valor encontrado pela interseção nas curvas de retração linear e absorção de água indicando o ponto onde o solo começa a gresificar.

Deve-se salientar que uma das maneiras de melhorar a qualidade do produto cerâmico é a inserção de elementos fundentes na massa, pois estes têm a capacidade de reduzir à temperatura da formação da fase líquida, assim como o ponto de gresificação durante o

processo de queima. Este líquido formado é proveniente da fusão de alguns elementos químicos que tende a preencher os poros das peças cerâmicas, e dependendo da viscosidade reduz a porosidade.

As características levadas em consideração no critério de escolha da matéria-prima fizeram-se em decorrência, primeiro, do menor percentual de umidade para tornar plástico o solo, pois uma secagem mais rápida e uma menor quantidade de água nos poros, reduzirá a absorção do agregado; e a segunda característica é a capacidade de fabricação de agregado com menor massa específica, propriedade desejável em concreto leve, para diminuir o peso próprio da estrutura. O peso próprio dos elementos de concreto pode representar uma grande proporção da carga de uma estrutura, e o uso de concretos com baixa massa específica pode resultar em vantagens significativas quanto a elementos estruturais com menor seção transversal e uma correspondente redução das dimensões das fundações (NEVILLE, 1923).

O procedimento metodológico adotado obedeceu rigorosamente à seqüência descrita logo abaixo:

I – A matéria-prima foi colocada para secar a sombra. Depois de retirada a umidade em excesso foi destorroada manualmente com um almofariz.

II – Após o destorroamento e a retirada da matéria orgânica, o solo foi umedecido na umidade de 28%, que é o valor encontrado através do ensaio do limite de plasticidade, que tende a tornar plástico o solo e facilita a moldagem. Testou-se utilizar o solo com umidade em torno do limite de liquidez, porém o solo apresentou-se muito líquido e produzia um agregado mais poroso e com maior absorção de água.

III – Em seguida a massa cerâmica foi submetida à extrusão em um moinho adaptado, que na sua saída eram colocadas boquillas retangulares com as dimensões variando de 4,8 mm a 12,5 mm, conforme pode ser visto pela Figura 5.2. Nas olarias são usados equipamentos com a finalidade de extrudar a matéria-prima, ou seja, conduzir o solo até a saída dos moldes

dos tijolos, definindo assim a forma geométrica desejada. Considerando a dificuldade de aquisição de um equipamento específico para a moldagem dos agregados sintéticos, foi necessária a adaptação de um moinho, ao qual foram acopladas, na sua saída, boquilhas (molde dos agregados) de diferentes dimensões confeccionadas na Universidade Federal do Amazonas (Figura 5.3).



Figura 5.2 – Boquilhas de moldagem.



Figura 5.3 – Moinho para extrusão da matéria-prima.

IV – Depois da moldagem de barras de argila com diferentes tamanhos de secção transversal, estas foram cortadas em mais ou menos 10 cm e colocadas para secar a sombra de

modo a retirar parte da água de conformação (Figura 5.4). A água de conformação pode ser dividida em dois tipos: o primeiro é denominado de água intersticial. O segundo é denominado de água livre ou água de plasticidade. A água intersticial está relacionada com a água necessária para preencher os poros das partículas. Já a água de plasticidade localiza-se entre as partículas argilosas, separando-as e facilitando a trabalhabilidade da massa cerâmica no processo de conformação. Esta última água é responsável pela retração das peças cerâmicas (VIEIRA, 2004).



Figura 5.4 – Corte das barras moldados para a secagem.

Mesmo para a matéria-prima conformada no limite de plasticidade, observou-se ainda muita água que dificultava o corte e fazia-se necessário uma secagem prévia para retirada de parte da umidade. Após a secagem prévia, as barras eram cortadas nos tamanhos de 10 mm, que foi o tamanho estabelecido para os agregados de argila calcinada.

V – Os agregados úmidos foram colocados para secar ao ar por 24 horas (Figura 5.5) e em seguida levados para estufa para mais 24 horas (Figura 5.6), para perder a água livre, tornando-se apto para queima e eliminando os riscos de surgimento trincas. Nascimento (2005) relata que uma peça moldada com teor excessivo de água está sujeita as trincas provocadas pela explosão de bolhas ou contrações intensas. Foi observado que os agregados

de maior dimensão levavam mais tempo para secar. Nos trabalhos de Norton (1973) apud Batista (2004) é descrito que para vários objetos feitos da mesma massa cerâmica, porém de tamanhos diferentes, os maiores não apenas secaram lentamente em igualdade de condições, mas também apresentaram a maior tendência para o surgimento de trincas.



Figura 5.5 – Secagem ao dos agregados.



Figura 5.6 – Secagem em estufa dos agregados

VI – O tempo de queima do agregado sintético de argila calcinada foi de uma hora no patamar da temperatura estabelecida no forno. Segundo Cabral (2005), o aumento do tempo de queima na temperatura patamar promove o aumento no percentual da absorção de água, o que não é benéfico para o agregado. No tempo de duas horas de queima o agregado ficou com

absorção de água acima de 16%, enquanto que no tempo de uma hora foi inferior a 15%, conforme observado na Figura 5.7. Por isso o tempo de calcinação dos agregados desta pesquisa foi de uma hora.

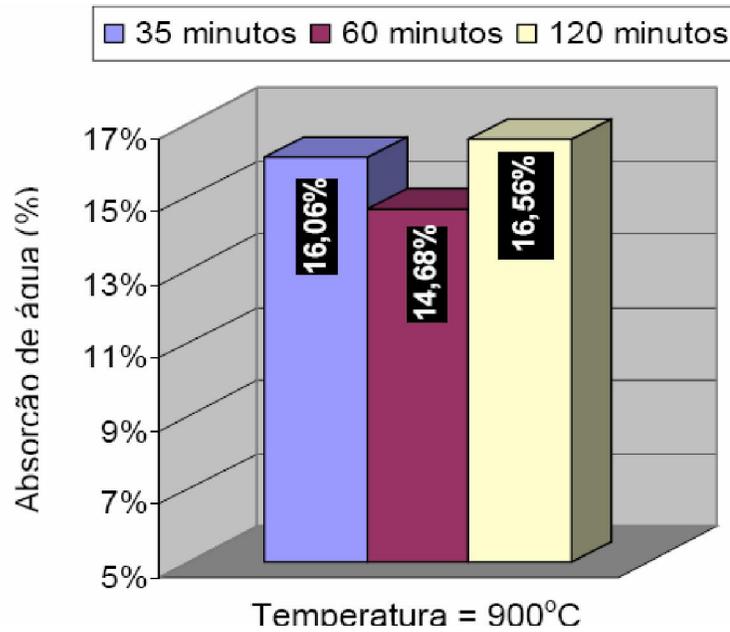


Figura 5.7 – Variação da absorção de água com o tempo de queima.
Fonte: Cabral, 2005.



Figura 5.8 – Queima dos agregados de argila

Na Figura 5.8 é visualizado o forno utilizado para a queima dos agregados por uma hora após ter atingido a temperatura patamar programada no forno mufla.

O processo de queima foi o que apresentou maior dificuldade, pois o forno utilizado era antigo que para cada fornada era obtido somente cerca de 4 kg de agregado calcinado. Logo, foram despendidos mais de noventa dias para finalizar toda queima dos agregados.

6 APLICAÇÃO DO AGREGADO DE ARGILA CALCINADA EM CONCRETO

6.1 Características do concreto

O concreto é um material compósito, formado de agregados graúdo e miúdo, cimento e água. O emprego de concreto na construção civil em geral é associado ao do aço. Muitas vezes, esses materiais atuam como concorrentes. No entanto, ocorre o uso crescente do concreto armado em grandes e médias estruturas, onde o aço não consegue competir com o concreto. Nessa concorrência, o critério que norteia a escolha é o fator econômico.

Por outro lado, o aço é fabricado sob um controle rigoroso de qualidade, apresentando inclusive certificado do fabricante. O concreto por sua vez, deve ser produzido antes da sua aplicação, salvo nos casos em que é pré-moldado.

O cimento é fabricado através de um processo rigoroso, sendo semelhante ao do aço, porém, muitas vezes é preciso fazer alguns ensaios de verificação, em decorrência de sua perecibilidade, tendo em vista que esse material tem validade de apenas três meses.

Os agregados por sua vez, merecem um tratamento mais detalhado, a partir da escolha, em função da frequência de variação de seus índices físicos. As diferenças nos processos de fabricação de concreto e aço exigem procedimentos diferentes de avaliação das propriedades, necessitando o concreto de um controle tecnológico baseado em critérios estatísticos padronizados por norma.

Um concreto de qualidade deve atender as especificações, e ainda quando se encontra no estado fluido, logo após a sua produção, deve apresentar um nível de trabalhabilidade que varia de acordo com as exigências da obra.

O concreto é dito trabalhável quando pode ser adensado com facilidade, necessitando em cada caso dos meios de adensamento disponível; dessa forma, a trabalhabilidade adequada

deve ser entendida como a facilidade de adensá-lo em seções transversais pequenas, de difícil acesso e em elementos estruturais de armadura densa. Por essas razões, a trabalhabilidade deve ser definida como uma propriedade física inerente ao concreto sem referência às circunstâncias de um tipo particular de construção, relacionada com a mobilidade da massa e a coesão dos elementos componentes (NEVILLE, 1927, BAUER, 1995). Segundo a ASTM C125, a trabalhabilidade expressa a facilidade necessária para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade (MEHTA, 1994 e MONTEIRO, 1994).

Quando endurecido o concreto deve alcançar metas de qualidade como resistência mecânica a flexão e a compressão superior ou igual ao exigido pela obra. Além da resistência mecânica e da trabalhabilidade deve-se levar em consideração a durabilidade, que é compreendida como a capacidade do material em manter suas propriedades durante um longo tempo de uso.

É indispensável que às estruturas de concreto desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, que mantenham a resistência mecânica e a utilidade que delas se espera, durante um período de vida previsto ou, pelo menos, um período razoável de tempo. Portanto, deve suportar o processo de deterioração que ocorre com o passar dos anos. Suportando essas condições, garantido segurança e conforto aos usuários, pode ser considerado durável.

Durabilidade do concreto não significa vida eterna, nem tampouco significa que a estrutura está disponível a qualquer tipo de carga e ação. Hoje em dia considera-se, muito embora no passado não fosse bem assim, que seja necessário uma manutenção de rotina das estruturas de concreto.

Pode-se ainda, definir concreto como um material resultante da mistura de cimento e água com agregados quimicamente inertes que têm uma função estrutural importante. A resistência mecânica depende da resistência da pasta, da resistência dos agregados e da

resistência das ligações entre a pasta e os agregados. Aproximadamente os volumes ocupados pelos os componentes no concreto são os seguintes:

- Cimento de 0,5 a 15 %;
- Água de 15 a 25 %;
- Agregados de 62 a 75 %.

Conhecendo esses elementos constituintes, o passo seguinte para a obtenção de um bom concreto, é a determinação das proporções e seus comportamentos na mistura, através de métodos analíticos, gráficos e outros.

Além dos ingredientes essenciais do concreto: cimento e agregado. O terceiro componente essencial é a água que é utilizada para amassamento e cura. A água de amassamento não deve conter matérias orgânicas indesejáveis nem substâncias inorgânicas em teores elevados. Porém, não existem normas muito explícitas sobre a qualidade da água, em parte porque ainda não se conhecem os limites de impurezas prejudiciais e principalmente porque restrições desnecessárias poderia ser anti-econômica.

Algumas normas especificam que a água a ser utilizada para amassamento do concreto deve ser potável. Embora seja satisfatório o uso de água potável, existem algumas exceções, como é o caso das regiões áridas, onde a água é salobra e pode conter excessivos teores de cloretos. Além disso, algumas águas minerais podem conter teores indesejáveis de carbonatos alcalinos que podem contribuir para a reação-sílica (NEVILLE, 1927).

Por outro lado, algumas águas inadequadas para o consumo podem, muitas vezes, ser usadas satisfatoriamente para o preparo do concreto. Por via de regra, águas com pH de 6,0 a 8,0 ou, possivelmente, até 9,0 sem o sabor de salobra podem ser utilizadas (NEVILLE, 1927).

O cimento Portland, por sua vez, é um produto obtido pela pulverização do clinker, sendo constituído por silicatos hidráulicos de cálcio, com certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, adições de algumas substâncias que melhoram suas propriedades e

facilitam seu emprego na construção. Os constituintes fundamentais do cimento são a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), magnésia (MgO) e uma pequena quantidade de anidrido sulfúrico (SO₃), que é adicionado após a calcinação, para retardar o tempo de pega do concreto.

A relação entre a composição do concreto e as propriedades mecânicas é um assunto de grande interesse para a engenharia. A resistência do concreto pode ser alterada quando se utiliza vários tipos de agregado graúdo com formas, textura e mineralogia diferentes. Porém, com a limitação da relação água/cimento para os concretos produzidos com alto desempenho, torna-se evidente a importância do agregado graúdo dentre os constituintes (OZTURAN, 1997).

Para a alta resistência do concreto produzido usualmente com a relação água/cimento inferior a 0,4, a resistência da argamassa e da zona de transição, pode ser similar a resistência do agregado graúdo. Ao mesmo tempo, com a melhoria da resistência, a fragilidade do concreto é também aumentada, o que limita o uso do concreto. Dessa forma, usando agregado graúdo de alta resistência e baixa fragilidade, textura e mineralogia características, podem melhorar as propriedades mecânicas do concreto (ZHANG, 1992).

O agregado com algumas propriedades indesejáveis também pode comprometer a resistência, a durabilidade e desempenho da estrutura. No passado era considerado um material inerte disperso por entre a pasta de cimento. No entanto, é necessário observá-lo de uma outra forma, considerando-o como material importante na construção, pois encontra-se ligado com um meio coesivo, através de uma pasta de cimento.

O custo do agregado é inferior ao do cimento, logo é interessante produzir concreto com a maior quantidade possível de agregado e reduzir o consumo de cimento. Essa premissa só é válida quando o custo de transporte não é elevado. Mas a economia não é a única razão de se usar agregado: ele confere vantagens técnicas consideráveis ao concreto, que passa a ter

estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta de cimento pura (NEVILLE, 1927).

Os agregados podem ser classificados quanto à origem, dimensões e massa específica aparente.

Quanto à origem podem ser:

- i) Os naturais que são retirados das jazidas ou rios: seixo rolado, areia;
- ii) Artificiais ou industrializados que têm sua composição obtida através de processos mecânicos.

Quanto às dimensões são divididos em:

- i) Miúdos: Areia
- ii) Graúdos: Brita e seixo rolado

Quanto à massa específica aparente estão divididos em:

- i) Leves com massa de até 1 g/cm^3 : Vermiculita e argila expandida;
- i) Intermediários com massa de 1 até 2 g/cm^3 : Calcário, arenito e outros;
- iii) Pesados com massa de 2 g/cm^3 .

6.2 Caracterização dos componentes do concreto

6.2.1 Agregado graúdo

Os agregados sintéticos calcinados nas temperaturas de $850 \text{ }^\circ\text{C}$ e $1125 \text{ }^\circ\text{C}$ foram caracterizados fisicamente conforme a Tabela 6.1. O desgaste por abrasão para o agregado calcinado de $850 \text{ }^\circ\text{C}$, foi superior ao limite estabelecido pela norma DNER-ME 035/98 que é de 50%, porém para o agregado calcinado a $1125 \text{ }^\circ\text{C}$, este foi inferior. O desgaste abrasão apresenta sua importância quando o concreto for aplicado na pavimentação, de modo que não é um fator determinante quando utilizado em concreto estrutural.

A perda de massa após fervura atingiu níveis inferiores a 1 %, sendo que a norma recomenda valores não superiores a 6%.

Com relação à absorção de água os agregados calcinados a 850 °C, apresentaram valor acima de 18 %, enquanto que para os agregados queimados a 1125 °C foi de 12,5 %. Embora a temperatura tenha sido elevada até 1125 °C, no ponto de gresificação ainda assim apresentaram porosidade muito alta se comparado com o seixo rolado que é 1,22 %. Acredita-se que a elevada absorção de água deve-se ao uso do moinho, que por ser manual exigiu que a massa cerâmica estivesse com teor de umidade próximo de 28 %, e ainda, devido ao uso de um óleo lubrificante aplicado ao mecanismo com a finalidade de reduzir o atrito de modo a facilitar a moldagem. Considerando que a água de moldagem durante a queima foi eliminada e que seus poros ficaram vazios, então, supõe-se que devido a essa umidade de moldagem, os agregados no final do processo apresentavam elevada porosidade.

Para o agregado convencional empregado na pesquisa, o seixo rolado, observou-se que este apresentava dimensão máxima de 19 mm com mais de 37 % de material inferior a 4,8 mm (Figura 6.1). O agregado sintético de argila calcinada, por outro lado, foi fabricado com a dimensão máxima de 12,5 mm para que fosse possível obter um comportamento semelhante ao do agregado convencional, e sua dimensão inferior de 4,8 mm foi estabelecida devido à restrição dos moldes de produção.

Deve-se salientar que o seixo rolado apresenta um grande percentual de finos, enquanto que o agregado sintético apresentou um menor índice de vazios quando misturado com um percentual de 55%, 20% e 25% dos agregados nas dimensões de 4,8 mm, 9,5 mm e 12,5 mm, respectivamente. Nestes percentuais de misturas dos agregados, obteve-se uma massa unitária mais próxima possível da massa encontrada para o seixo rolado.

Tabela 6.1 – Caracterização física dos agregados graúdos.

Caracterização	Agregados		
	Calcinados a 850 °C	Calcinados a 1125 °C	Seixo rolado
Desgaste por abrasão	52 %	48 %	22 %
Perda de massa após fervura	0,1%	Inferior a 0,1%	--
Massa específica aparente	1,70 g/cm ³	1,94 g/cm ³	2,63 g/cm ³
Massa unitária no estado solto	1,08 kg/dm ³	1,16 kg/dm ³	1,86 kg/dm ³
Absorção de água	18,94%	12,5%	1,22%

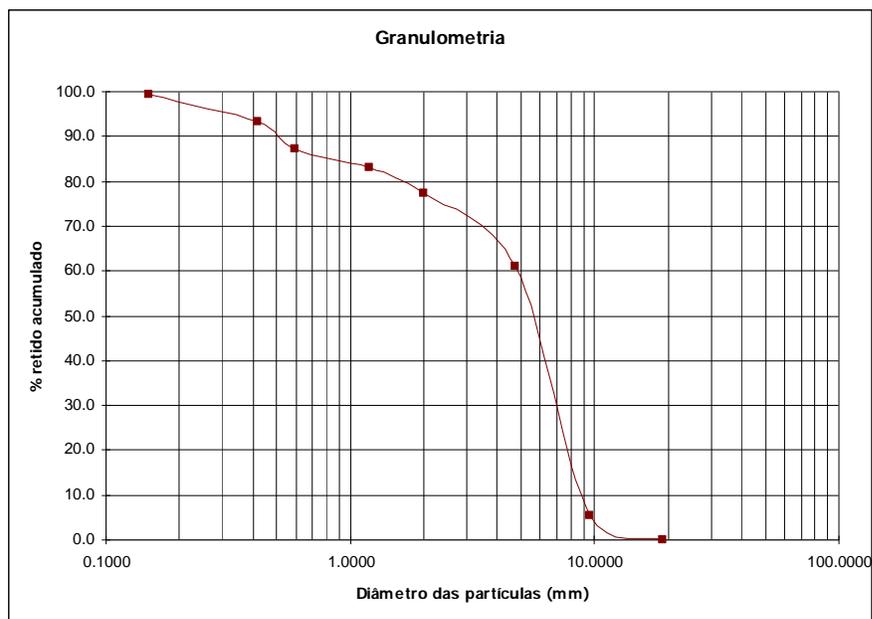


Figura 6.1 – Curva granulométrica do seixo rolado

6.2.2 Agregado miúdo

A areia foi caracterizada considerando a sua granulometria, verificando o módulo de finura e o diâmetro máximo. Na Figura 6.2 encontra-se a curva granulométrica da areia, de onde se pode retirar o seu módulo de finura que é igual a 2,2 sendo considerada como areia fina. O diâmetro máximo desse agregado é igual a 2,4 mm.

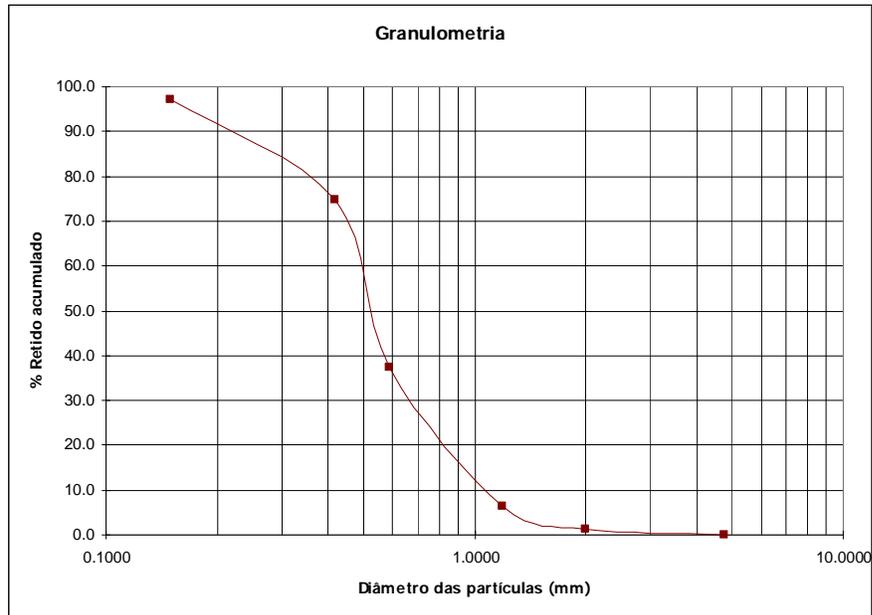


Figura 6.2 – Curva granulométrica da areia

6.2.3 Água

A água utilizada nas dosagens apresentou pH de 5,8.

6.2.4 Plastificante

O aditivo multifuncional Tec-mult 400 é utilizado na proporção de 3 a 10 ml para cada 1 kg de cimento (RHEOTEC, 2008). O consumo de aditivo que apresentou melhor eficiência foi de 8 ml para cada quilograma de cimento.

Segundo o fabricante, esse aditivo apresenta as seguintes características técnicas conforme a Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Características técnicas do aditivo.

Função principal	Plastificante
Aspecto	Líquido de cor castanho escuro
Ph	9,5 ± 1,0
Massa específica	1,205 ± 0,02 g/cm ³
Teor de sólidos	40 % ± 2,0

Fonte: Rheotec, 2008.

6.3 Produção de concretos

Foram analisadas as características do concreto quando utilizado como agregado graúdo o seixo rolado (agregado convencional) e os agregados sintéticos de argila, calcinados nas temperaturas de 850 °C e 1125 °C.

O concreto com seixo rolado serviu de parâmetro, pois este é o mais utilizado na região. Produziu-se concreto com seixo rolado, observando-se as características físicas e mecânicas quando utilizado com e sem o uso de aditivo.

Os agregados sintéticos de argila calcinada foram utilizados em traços de concreto para a obtenção de dosagens econômicas. Para algumas dosagens experimentais saturou-se o agregado, deixando sua superfície lisa, pois sua elevada absorção de água superior a 15%, retirava a água de amassamento do concreto e reduzia a resistência mecânica.

Desta forma, foram testadas as seguintes situações para as duas temperaturas:

- i) Sem imersão do agregado, com e sem o uso de aditivo em três diferentes consumos de cimento;
- ii) Com imersão do agregado, com e sem aditivo, em três diferentes consumos de cimento.

6.3.1 Concretos com agregado calcinado a 850 °C

Os resultados das dosagens com o agregado calcinado a 850 °C, são descritos neste item.

6.3.1.1 Sem imersão do agregado

Sem o uso do aditivo

As dosagens aqui descrita são identificadas pelas siglas AC8N, que indica argila calcinada na temperatura de 850 °C, sem imersão em água.

Na tabela 6.3 está indicado nas colunas o traço e a quantificação dos componentes do concreto, bem como a relação água/cimento.

Pode-se observar o quanto é elevada a relação água cimento, comprovando que a elevada porosidade retira a água de amassamento do concreto. Na Tabela 6.4 pode-se observar o efeito do uso desse agregado na massa específica do concreto que ficou em torno de 2100 kg/m³. A resistência do concreto para os diferentes consumos de cimento ficou próximo de 17 MPa aos 7 dias e aos 28 dias atingiu pouco mais de 22 MPa, acima do limite de 20 MPa estabelecido pela norma NBR 6118 para concreto definido como estrutural (Figura 6.3). Destaca-se que o concreto obtido com o consumo de 335 kg/m³ apresentou a melhor relação resistência/consumo de cimento.

Tabela 6.3 – Dosagem dos componentes do concreto AC8N

Traço	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Relação água/cimento
AC8N – I	1,82	1,98	0,85
AC8N – II	1,70	1,80	0,81
AC8N – III	1,58	1,68	0,75

Tabela 6.4 – Resultado das dosagens do AC8N.

Traço	Consumo de cimento (kg/m ³)	Slump (cm)	Massa do concreto (kg/m ³)	Resistência (MPa)	
				7 dias	28 dias
AC8N – I	335	7,8	2114	17,73	22,79
AC8N – II	352	8,2	2108	17,23	22,41
AC8N – III	385	9,0	2103	17,85	22,55

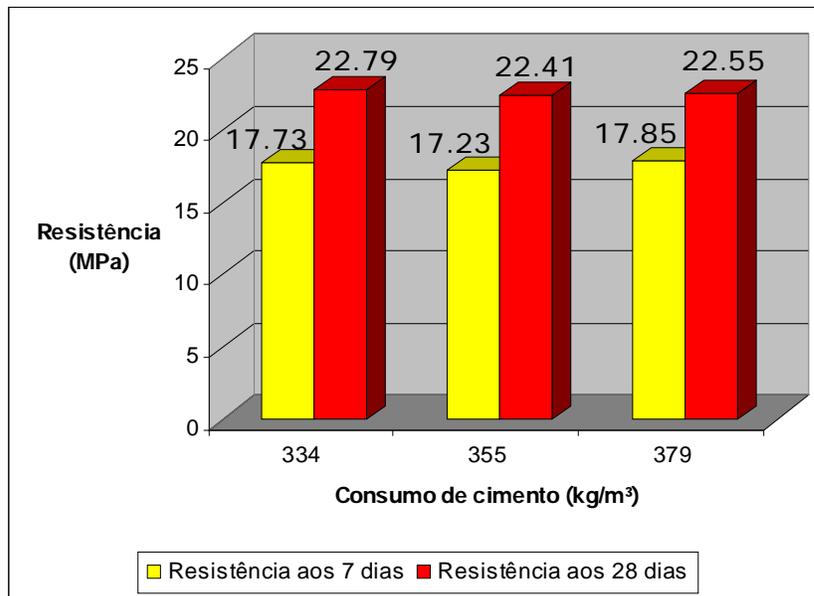


Figura 6.3 – Gráfico da resistência do concreto AC8N.

Com o uso do aditivo

As dosagens aqui descritas são identificadas pelas siglas AC8NA, que indica argila calcinada na temperatura de 850 °C, sem imersão em água com o uso de aditivo plastificante.

Na Tabela 6.5 pode-se observar que com o aditivo a relação água/cimento pôde ser reduzida para próximo de 0,68, reduzindo os efeitos da porosidade. Observa-se um acréscimo da resistência do concreto proporcionado pela redução da quantidade de água (Tabela 6.6). A resistência do concreto para os diferentes consumos de cimento ficou acima de 26 MPa aos 28 dias (Figura 6.4).

Tabela 6.5 – Dosagem dos componentes do concreto AC8NA.

Traço	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Relação água/cimento
AC8NA – I	1,90	2,00	0,77
AC8NA – II	1,76	1,86	0,75
AC8NA – III	1,70	1,80	0,68

Tabela 6.6 – Resultado das dosagens do AC8NA.

Traço	Consumo de cimento (kg/m ³)	Slump (cm)	Massa do concreto (kg/m ³)	Resistência (MPa)	
				7 dias	28 dias
AC8NA – I	334	6,9	2099	20,66	26,58
AC8NA – II	352	7,5	2117	18,53	27,01
AC8NA - III	370	7,2	2107	22,83	27,19

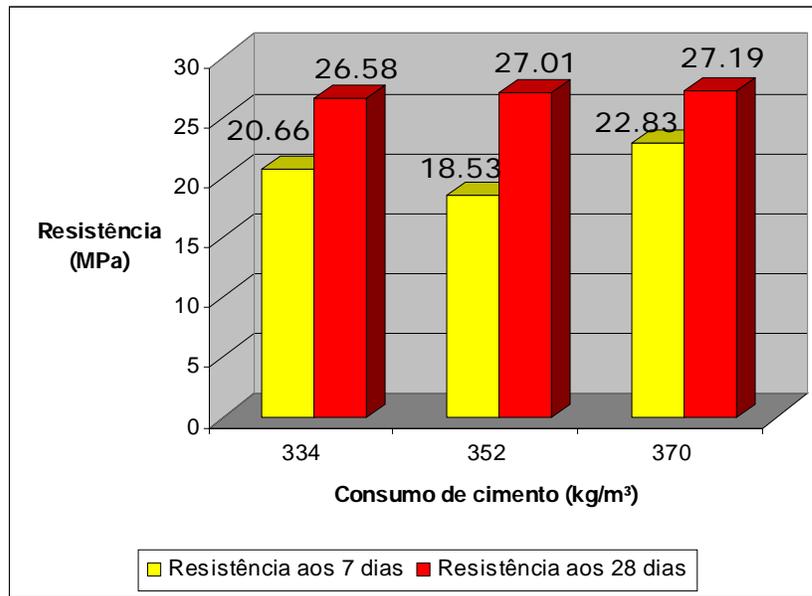


Figura 6.4 – Gráfico da resistência do concreto AC8NA.

6.3.1.2 Com imersão do agregado.

Sem aditivo

As siglas AC8I, indica argila calcinada na temperatura de 850 °C, com imersão em água por 24 horas.

O efeito da imersão do agregado em água por 24 horas é notadamente sentido na dosagem, porque a relação água/cimento pôde ser reduzida a valores inferiores a 0,5, o que não era possível obter anteriormente, quando a menor relação estava acima de 0,70 para atingir trabalhabilidade de 7 cm de abatimento do tronco de cone (slump), conforme Tabela 6.7. A massa específica desse concreto não modificou de forma considerável pelo efeito da imersão e seus valores encontram-se próximo de 2100 kg/m³ (Tabela 6.8).

Wasserman (1996) descreve que a alta porosidade dos agregados leves de argila expandida proporciona uma redução da resistência do concreto. Com a imersão desse agregado foi possível obter resistência à compressão superior a 28 MPa aos 28 dias, logo, muito acima do obtido com o agregado não imerso (Figura 6.5).

Uma característica importante do agregado leve é a aderência entre este e a pasta de argamassa hidratada que o envolve (MORAIVA, 2006). A textura áspera da superfície do agregado proporciona a aderência, resultando em um intertravamento mecânico entre o agregado e a pasta (ZHANG, 1992). A aderência também pode ser melhorada pela água absorvida pelo agregado antes da mistura do concreto, que com o tempo, torna-se disponível para a hidratação do cimento anidro. (Weber, 1997; Gesoglu, 2004). Desta forma, a imersão do agregado além de melhorar a trabalhabilidade sem afetar a resistência, promove a hidratação da zona de transição tornando-a mais resistente.

Tabela 6.7 – Dosagem dos componentes do concreto AC8I.

Traço	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Relação água/cimento
AC8I – I	1,90	2,35	0,47
AC8I – II	1,80	2,15	0,45
AC8I – III	1,70	2,00	0,43

Tabela 6.8 – Resultado das dosagens do AC8I

Traço	Consumo de cimento (kg/m ³)	Slump (cm)	Massa do concreto (kg/m ³)	Resistência (MPa)	
				7 dias	28 dias
AC8I – I	345	7,0	2096	18,50	27,24
AC8I – II	368	6,0	2110	19,10	27,95
AC8I – III	388	8,0	2120	22,10	28,85

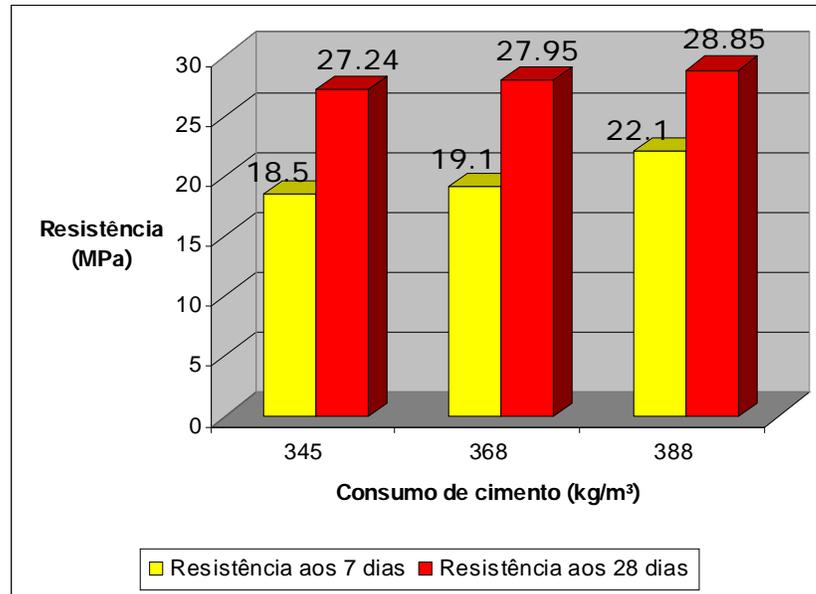


Figura 6.5 – Gráfico da resistência do concreto AC8I.

Com aditivo

As siglas AC8IA, indica argila calcinada na temperatura de 850 °C, com imersão em água por 24 horas e com o uso de aditivo.

A imersão do agregado promoveu uma considerável melhoria nas propriedades físicas do concreto fresco e com o uso do aditivo foi possível reduzir a quantidade de água no concreto (Tabela 6.9). Já na Tabela 6.10 identifica-se o reflexo da adição do aditivo, pois a resistência mecânica superou a 30 MPa quando utilizado um consumo de cimento de 375 kg/m³. Na Figura 6.6 é observado o comportamento do crescimento da resistência ao longo dos dias de cura, onde para o menor consumo de cimento, o valor da resistência obtida no concreto supera o valor da resistência obtida para um consumo intermediário de 350 kg/m³. Uma possível explicação para esse comportamento é proveniente do processo de adensamento dos corpos-de-prova, onde em algumas amostras pode ter ocorrido uma melhor acomodação das partículas dos componentes do concreto, ou ainda a possibilidade de fuga da água de hidratação do cimento.

Tabela 6.9 – Dosagem dos componentes do concreto AC8IA.

Traço	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Relação água/cimento
AC8IA – I	2,28	2,44	0,46
AC8IA – II	2,06	2,21	0,44
AC8IA – III	1,84	2,04	0,44

Tabela 6.10 – Resultado das dosagens do AC8IA

Traço	Consumo de cimento (kg/m ³)	Slump (cm)	Massa do concreto (kg/m ³)	Resistência (MPa)	
				7 dias	28 dias
AC8IA – I	326	8,0	2109	22,10	29,96
AC8IA - II	351	9,0	2116	25,01	28,55
AC8IA - III	375	9,5	2105	25,39	31,27

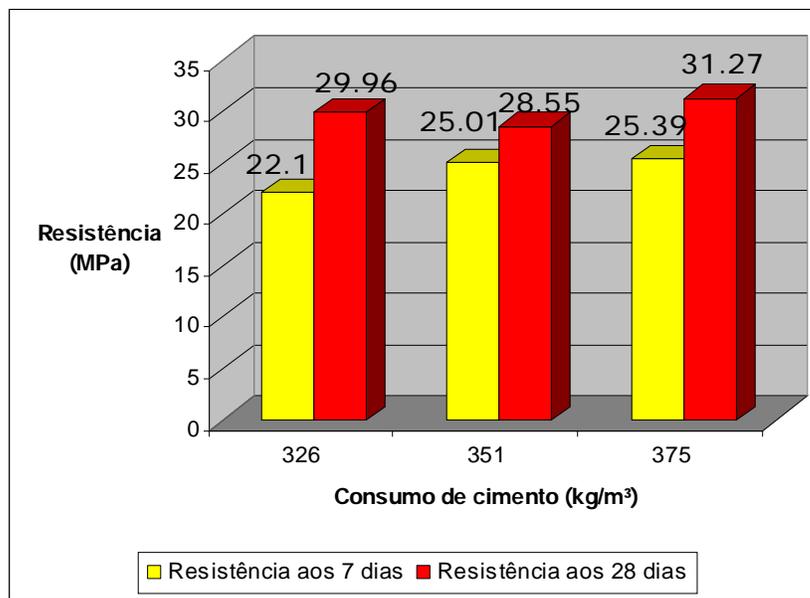


Figura 6.6 – Gráfico da resistência do concreto AC8IA.

6.3.2 Concretos com agregado calcinado a 1125 °C

A seguir são apresentados os resultados obtidos com o concreto utilizando os agregados calcinados na temperatura de 1125 °C.

6.3.2.1 Sem imersão do agregado

Sem o uso do aditivo.

Para a identificação dessas dosagens utilizou-se as siglas AC1N, que significa o concreto com argila calcinada a 1125 °C, sem imersão em água.

A relação água/cimento do concreto com esse agregado foi inferior a do agregado calcinado a 850 °C conforme a Tabela 6.11. A redução da porosidade 18% para 12,5% proporcionada pela queima explica a redução dessa relação. Na Tabela 6.12 é possível observar uma pequena variação na massa específica desse concreto, pois este atinge valores acima 2130 kg/m³, porém, não é tão significativo. A resistência desse concreto é semelhante ao do agregado calcinado a 850 °C que ficou imerso em água. Na Figura 6.7 é possível identificar a evolução das resistências ao longo dos dias de cura.

Tabela 6.11 – Dosagem dos componentes do concreto AC1N.

Traço	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Relação água/cimento
AC1N – I	2,00	2,10	0,70
AC1N – II	1,85	1,95	0,73
AC1N – III	1,71	1,81	0,68

Tabela 6.12 – Resultado das dosagens do AC1N.

Traço	Consumo de cimento (kg/m ³)	Slump (cm)	Massa do concreto (kg/m ³)	Resistência (MPa)	
				7 dias	28 dias
AC1N – I	336	7,5	2113	19,90	26,44
AC1N – II	361	10,0	2130	19,74	26,62
AC1N – III	386	9,2	2132	22,06	27,86

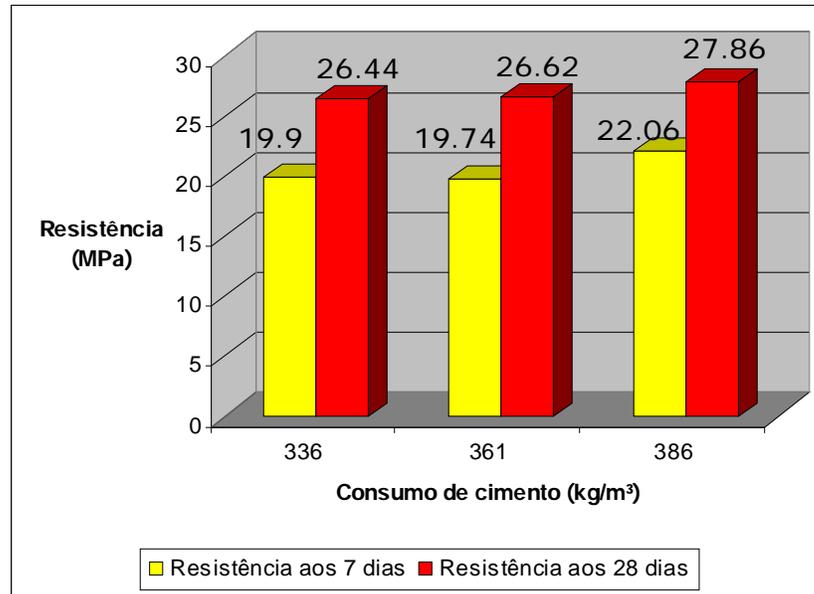


Figura 6.7 – Gráfico da resistência do concreto AC1N.

Com o uso do aditivo

Neste item é descrito o comportamento físico e mecânico do concreto AC1NA, que significa argila calcinada a 1125 °C, sem imersão em água, com o uso de aditivo.

Com o aditivo foi possível reduzir a relação água cimento para menos de 0,7 e ainda obter slump de 8 ± 1 cm, conforme se observa nas Tabelas 6.13 e 6.14. Na Figura 6.8 é identificada a variação das resistências, atingindo valores acima de 25 MPa já aos 7 dias e aos 28 dias superando os 32 MPa.

Tabela 6.13 – Dosagem dos componentes do concreto AC1NA.

Traço	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Relação água/cimento
AC1NA – I	2,20	2,25	0,69
AC1NA – II	2,10	2,15	0,67
AC1NA – III	1,80	1,90	0,61

Tabela 6.14 – Resultado das dosagens do AC1NA.

Traço	Consumo de cimento (kg/m³)	Slump (cm)	Massa do concreto (kg/m³)	Resistência (MPa)	
				7 dias	28 dias
AC1NA – I	332	6,8	2112	25,03	31,12
AC1NA – II	345	7,0	2115	26,49	32,65
AC1NA – III	382	9,0	2090	25,81	33,07

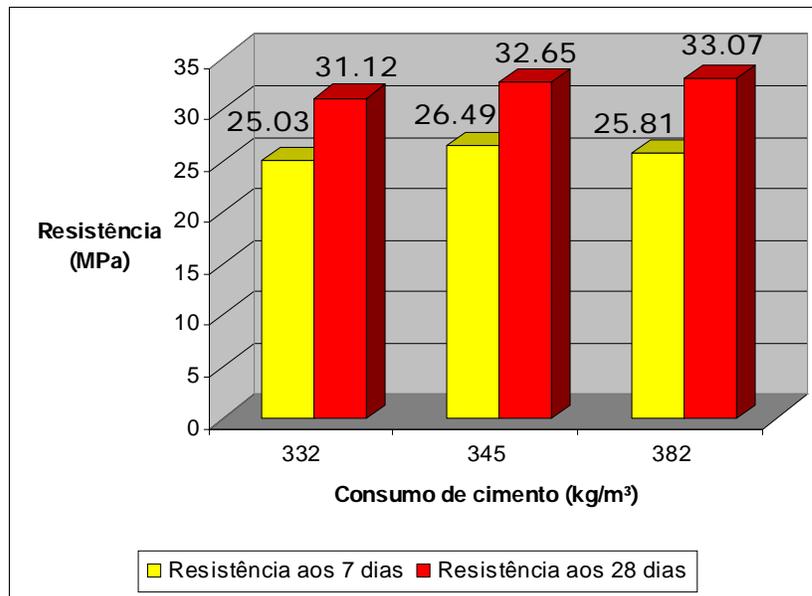


Figura 6.8 – Gráfico da resistência do concreto ACINA.

6.3.2.2 Com imersão do agregado

Sem aditivo

O concreto ACII foi produzido com argila calcinada 1125 °C, com imersão do agregado em água por 24 horas.

Nas Tabelas 6.15 e 6.16 é observado o quanto foi reduzida relação água/cimento devido ao processo de imersão. A maior relação obtida foi de 0,54 que proporcionou maior slump de 9,2 cm. As resistências foram acima de 30 MPa, exceto aquela de menor consumo que apresentou-se inferior, ficando em torno de 28 MPa.

Tabela 6.15 – Dosagem dos componentes do concreto ACII.

Traço	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Relação água/cimento
ACII – I	2,30	2,40	0,54
ACII – II	2,15	2,40	0,51
ACII – III	1,95	2,05	0,48

Tabela 6.16 – Resultado das dosagens do ACII.

Traço	Consumo de cimento (kg/m ³)	Slump (cm)	Massa do concreto (kg/m ³)	Resistência (MPa)	
				7 dias	28 dias
ACII – I	334	9,2	2119	17,56	28,93
ACII – II	355	8,5	2096	18,87	30,24
ACII – III	379	7,5	2110	23,41	31,15

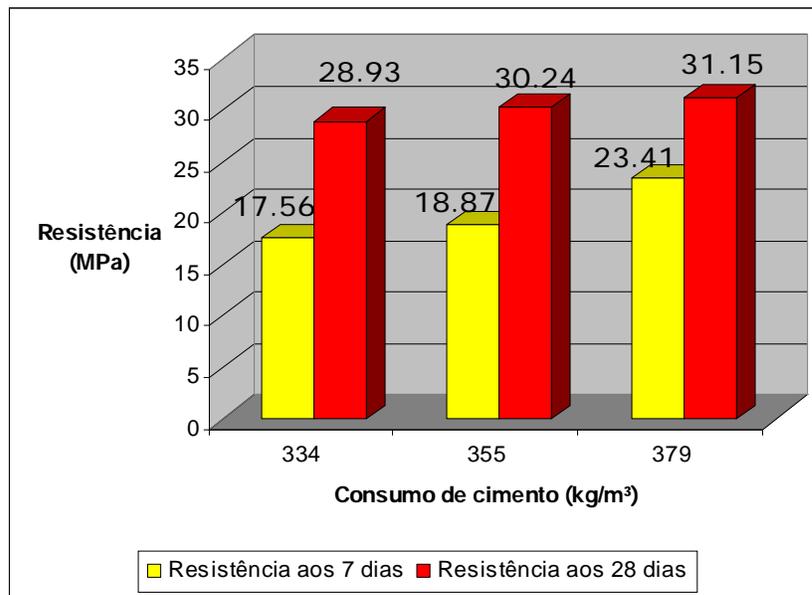


Figura 6.9 – Gráfico da resistência do concreto ACII.

Com aditivo

O concreto com argila calcinada a 1125 °C, com imersão em água por 24 horas e com o uso de aditivo é identificado como ACIIA.

Conforme as Tabelas 6.17 e 6.18 encontram-se respectivamente o menor valor da relação água cimento, que foi de 0,39 e os valores da massa específica do concreto que não apresentou variação significativa com relação ao agregado calcinado a 850 °C. Na Figura 6.10 observa-se que a resistência ficou em torno de 30 MPa de forma semelhante ao concreto produzido sem o uso do aditivo.

Tabela 6.17 – Dosagem dos componentes do concreto AC11A.

Traço	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Relação água/cimento
AC11A – I	2,35	2,46	0,47
AC11A – II	2,26	2,42	0,43
AC11A – III	2,05	2,15	0,39

Tabela 6.18 – Resultado das dosagens do AC11A.

Traço	Consumo de cimento (kg/m ³)	Slump (cm)	Massa do concreto (kg/m ³)	Resistência (MPa)	
				7 dias	28 dias
AC11A – I	326	7,5	2095	22,50	29,11
AC11A – II	348	6,2	2111	24,36	29,84
AC11A – III	383	7,0	2121	23,63	30,01

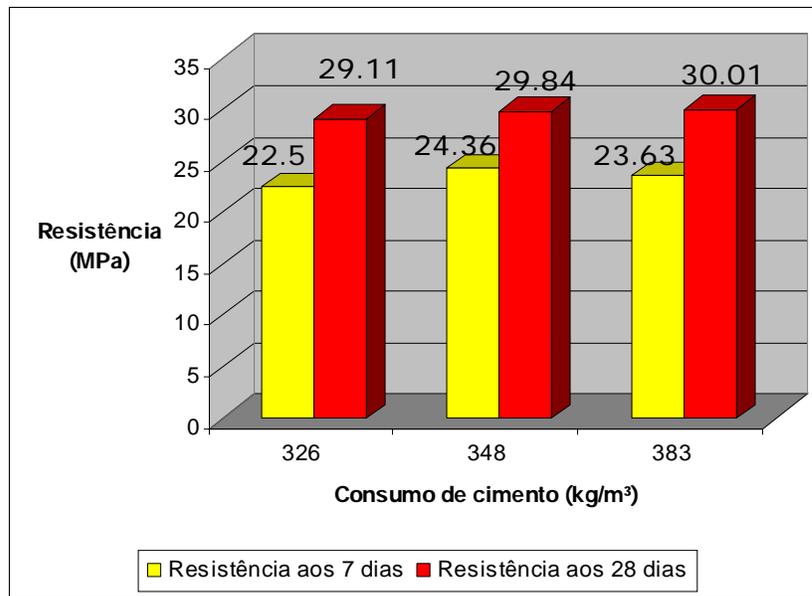


Figura 6.10 – Gráfico da resistência do concreto AC11A.

6.3.3 Concretos com seixo rolado

O seixo é o agregado graúdo mais utilizado na região, e devido a isto foi utilizado como concreto referência. Desta forma foi verificado seu comportamento com e sem o uso de aditivo. A dosagem sem aditivo é identificada como S – I, e a dosagem que se utilizou aditivo é identificada por SA – II.

Nas Tabelas 6.20 pode-se identificar a diferença entre as quantidades de agregado miúdo e graúdo na mistura, sendo esta muito superior a do agregado sintético de argila

calcinada. A explicação para esse fato é que o seixo empregado apresenta uma considerável porção de finos com dimensão inferior a 4,8 mm. Portanto, devido a esses finos do seixo, foi possível obter um concreto trabalhável com teor de argamassa em torno 50 %.

A resistência do seixo com aditivo foi superior a do agregado sintético, como já era esperado, porque é um material pouco poroso, conseqüentemente não retira, de forma significativa a água de amassamento do concreto. Devido a isso, o aditivo foi mais eficiente no seixo, que modificou a relação água cimento reduzindo de 0,55 para 0,46, melhorando a resistência.

Com relação ao consumo de cimento

Tabela 6.19 – Dosagem dos componentes do concreto com seixo.

Traço	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Relação água/cimento
S – I	2,06	3,12	0,55
SA – I	2,12	3,22	0,46

Tabela 6.20 – Resultado das dosagens do seixo.

Traço	Consumo de cimento (kg/m ³)	Slump (cm)	Massa do concreto (kg/m ³)	Resistência (MPa)	
				7 dias	28 dias
S – I	351	8,0	2324	19,59	28,12
AS – I	354	7,3	2302	29,	34,20

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 Conclusões

Os solos utilizados na fabricação de tijolos e telhas do pólo oleiro de Iranduba – AM e Manacapuru – AM, apresentam as características técnicas necessárias à sua utilização como matéria-prima para fabricação do agregado sintético de argila calcinada. Os solos estudados apresentam composição mineralógica semelhante, e a composição química de cada um distingue-se no percentual de sílica e na quantidade de alumina. Os limites de consistência demonstram que o solo 1 apresenta elevado percentual de fração argila, com a predominância de argilominerais cauliniticos. O solo 2 apresenta baixa plasticidade, que proporcionará uma massa cerâmica com menor quantidade de água na sua conformação. Isso reflete diretamente no tempo de secagem e na redução dos defeitos provocados pela retração. Embora o solo 2 apresente uma plasticidade elevada, os produtos cerâmicos produzidos apresentaram a menor porosidade e um maior módulo de ruptura à flexão. O efeito do maior teor de argila contribui para melhoria dessas propriedades físicas das peças cerâmicas;

No comportamento de queima, os solos apresentaram valores de absorção elevados até 1000 °C, e certa estabilidade dimensional com pequenas contrações volumétricas. Isso comprova que os produtos cerâmicos oriundos do pólo oleiro de Iranduba – AM e Manacapuru – AM merecem um pouco mais de atenção quanto à porosidade. Já a temperatura de gresificação dos solos foi observada como tendo um valor próximo de 1125 °C;

O agregado fabricado com a argila de menor plasticidade, ainda apresentou elevada absorção de água, comprovando que o moinho só atendeu a necessidade da moldagem, porém, espera-se que um equipamento mecânico a vácuo produz um material cerâmico com menor porosidade e muito mais resistente. Como as olarias da região dispõem de equipamentos

mecânicos a vácuo para moldagem dos tijolos, é possível aplicar esta tecnologia existente na fabricação do agregado sintético;

Os agregados calcinados na temperatura de 850 °C apresentaram uma absorção de água de 18%, enquanto que a 1125 °C este percentual reduziu para 12,5%. Entretanto, esta redução é considerada de pouca significância, pois, para atingir esta temperatura é despendida muita energia e para fabricar o agregado a essa temperatura em uma indústria cerâmica do pólo oleiro será necessário uma mudança na matriz energética, pois atualmente o material empregado para alimentação dos fornos é a madeira que proporciona temperaturas de no máximo 950 °C.

A massa específica dos agregados sintéticos foi inferior ao do seixo, mesmo quando a temperatura de queima foi aumentada com conseqüente aumento da massa específica, fato esse que contribui de forma significativa para a redução do peso próprio das estruturas de concreto.

Considerando que o percentual de absorção de água do agregado superior a 18%, retirava a água de hidratação do cimento e desta forma, modificava a relação água/cimento comprometendo a resistência mecânica do concreto, optou-se pela análise do concreto utilizando também o agregado saturado em água por 24 horas.

O concreto produzido com agregado graúdo sem imersão e com imersão, apresentou resistência mecânica superior ao recomendado pelas especificações da NBR 6118. Com os resultados obtidos das dosagens, observa-se que o agregado sintético calcinado a 850 °C apresenta-se como uma promissora alternativa de substituição do seixo rolado na produção de concreto, tendo em vista que os resultados em termos de resistência a compressão em corpos-de-prova superam os 20 MPa exigidos pela norma, para o concreto dito estrutural. O concreto produzido com o agregado sintético produzido a uma temperatura menor, mesmo sem a imersão.

Para o mesmo consumo de cimento o agregado sintético apresentou resistência semelhante a do seixo rolado sem o uso de aditivo, portanto seu comportamento mecânico no concreto é tão eficiente quanto o do seixo rolado, demonstrando assim, a viabilidade técnica da utilização da argila calcinada como agregado graúdo.

7.2 Sugestões para futuras pesquisas

Para desenvolvimento de novas pesquisas com o agregado sintético de argila calcinada recomenda-se:

Utilizar um solo com uma plasticidade mais elevada, porém, evitando-se adicionar muita água na moldagem de modo a não provocar aumento na porosidade e risco de trincamento nas peças.

Estudar o efeito de plastificantes na moldagem do agregado, reduzindo o teor umidade.

Estudar a adição de elementos fundentes na massa cerâmica a fim de reduzir a temperatura de gresificação, minimizando os gastos com energia e obtendo agregados com menor massa específica.

Estudar um processo produtivo que consiga conciliar a tecnologia existente neste pólo oleiro para fabricação desse tipo de agregado.

Aprofundar o estudo das dosagens com a inserção de agregados com dimensão inferior a 4,8 mm, pois isso poderá proporcionar concretos com menor teor de argamassa.

Realizar ensaios de microscopia eletrônica de varredura nos agregados de argila calcinada e no concreto produzido, para observar as mudanças que ocorrem na zona transição da argamassa com o agregado.

Avaliar a durabilidade do concreto produzido com o agregado sintético de argila calcinada.

Referência bibliográfica

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado: determinação da massa unitária. NBR – 7251, Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado: determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. NBR – 9937, Rio de Janeiro 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR - 7251, Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto: projeto de estruturas de concreto. NBR – 6118, Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo: determinação do limite de liquidez. NBR – 6459, Rio de Janeiro 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo: determinação do limite de plasticidade. NBR – 7180, Rio de Janeiro 1984.

BATISTA, F. G. S. Caracterização física e mecânica dos agregados de argila calcinada produzidos com solos finos da BR-163/PA. 2004. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção. 5ª ed., Vol. 1, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1995.

BÍBLIA. Português. Bíblia sagrada. Tradução Jorge Luiz Gonzaga do Prado. São Paulo: Paulus, 1997.

BLEICHER, Disponível, <<http://www.fisica.ufc.br/raiosx>>, capturado em janeiro de 2007. Cabral, 2005.

CABRAL, E. M. REBELO, E. P. CAMPELO, N. S. TAVEIRA, A. F. MORAIS, M. R. Comparação das características físicas da argila calcinada em diferentes temperaturas com o seixo rolado. In: Reunião Anual de pavimentação, 38ª RAPv, 2007, Manaus.

CABRAL, G. L. L. Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

CINASITA, Disponível, < <ftp://www.cinasita.com.br>>, capturado em Novembro 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM – DNER. Pesquisa de Viabilidade de Implantação da Fábrica de Argila Expandida na Região Amaônica. Relatório Final. Rio de Janeiro, 1981.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Agregados sintéticos graúdos de argila calcinada: desgaste por abrasão, ME – 222. Rio de Janeiro, 1989.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Agregados sintéticos de argila calcinada: determinação da perda de massa após fervura, ME – 225. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Agregados: determinação da abrasão Los Angeles, ME – 035. Rio de Janeiro, 1998.

FILHO, F. R. Revista Cerâmica, 43, 1997.

ECL Engenharia Ltda. Pesquisa de viabilidade de implantação da fábrica de argila expandida na região amazônica. Rio de Janeiro: 1980.

FROTA, C. A. SANTOS, C. L. M. SILVA, G.R. PEREIRA, R. V. Caracterização de solos para a obtenção de agregado sintético de argila calcinada. In: Reunião Anual de pavimentação, 35ª RAPv, 2004, Rio de Janeiro.

FROTA, C. A. SILVA, F. R. G. SANTOS, C. L. Estudo da substituição do seixo por agregados sintéticos de argila calcinada em misturas asfálticas. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 12 RPU, 2003, Aracaju.

HAYDITE, Disponível, <[http:// www.hphaydite.com/hayditeproperties.htm](http://www.hphaydite.com/hayditeproperties.htm)> , capturado em outubro de 2008.

KINGERY, W. D. BOWEN, H. K. UHLMANN, D. R. Introduction to Ceramic, Ed. A. Wiley Interscience Publication, New York, 1976.

LAYTAG. Disponível, <<http://www.lytag.co.uk/pages/lytag.asp>>, capturado em dezembro de 2006.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. 1ª ed. São Paulo. Ed. PINI, 1994.

MORAVIA, W. G. OLIVEIRA, C. A. S. GUMIERI, A. G. VASCONCELOS, W. L. Revista Cerâmica 52. 2006.

MOTTA, J. F. M. ZARNARDO, A. JUNIOR, M. C. Cerâmica Industrial, 6, 2001.

NASCIMENTO, R. R. Utilização de agregados de argila calcina em pavimentação; uma alternativa para o estado do Acre. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 1ª. ed. Editora PINI, S. Paulo, 1997.

NOGUEIRA, J. B. Mecânica dos solos: ensaios de laboratório. 1. ed. São Carlos .EESC-USP, 2001.

OZTURAN, T. CECEN, C. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strength. Cement & Concrete. 27. 1997.

PASCHOAL, J. A. A. Estudos de parâmetros de qualidade para a cerâmica estrutural vermelha. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.

PRACIDELLI, S. MELCHIADES, G. F. Importância da composição granulométrica de massas cerâmicas vermelha. Cerâmica industrial. São Paulo, volume 2, numero 1/2 - Jan/Abr. 1997.

RHEOTEC, Disponível, <<http://www.rheotec.com.br>> , capturado em fevereiro de 2008.

RIPOLI, F. F. Revista Cerâmica. 43. 1997.

SÁNCHEZ-MUÑOZ, L. Cava S. da S. PASKOCIMAS, C. A. CERISUELO, E. L. E. CARDA, J. B. Revista Cerâmica, 48, 2002.

SANTOS, P.S. Tecnologia de Argilas. 1 ed., Vol 2, Editora Edgarg Blüncher, S. Paulo, Brasil 1975.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Geologia e recursos minerais do Estado do Amazonas. Manaus: CPRM, n. 1, 2006. CD-ROM.

SEYE, O.; CAMPELO, N. S.; SANTOS, E. C. S.; AZEVEDO, C. P. Melhoria do processo produtivo de cerâmica estrutural como ação mitigadora para estabilização ou redução adicional nas emissões de gases do efeito estufa. Manaus. NEFEN/UFAM. 2003.

SILVA, A. V. Comportamento de misturas asfálticas a quente utilizando agregado de argila calcinada. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

VENTORINI, L. A. CARNEIRO, L.A.V. JÚNIOR, E.M. SANTOS, L. R. FONSECA, R. F. BARBOZA, R. P. Dosagem e propriedades de concretos com agregado graúdo de argila calcinada. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 48, 2006, Rio de Janeiro.

VIEIRA, C. M. F. SOUZA, E. T. A. MONTEIRO, S. N. Revista Cerâmica 49, 2003.

VIEIRA, C. M. F. SOARES, T. M. MONTEIRO, S. N. Revista Cerâmica 50, 2004.

WASSERMAN, R. BENTUR, A. Cement & Concrete Composites 18. 1996.

WEBER, S. REINNARDT, H. W. Advanced Cement Based Materials 6. 1997.

WENDER, A. A. BALDO. J. B. Cerâmica Industrial, 2, 1997.

ZHANG, M. H. GJORV O. E. Cement & Concrete. 22. 1992.