

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

COMPÓSITO CIMENTÍCIO COM ARGILA CAULINÍTICA
PARA EXTRUSÃO DE BLOCOS PRISMÁTICOS DE
VEDAÇÃO E ESTRUTURAL

JOSÉ LUCINALDO FERREIRA DE SOUZA

MANAUS

2017

JOSÉ LUCINALDO FERREIRA DE SOUZA

**COMPÓSITO CIMENTÍCIO COM ARGILA CAULINÍTICA
PARA EXTRUSÃO DE BLOCOS PRISMÁTICOS DE
VEDAÇÃO E ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Materiais e Componentes de Construção.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

Manaus

2017

JOSÉ LUCINALDO FERREIRA DE SOUZA

**COMPÓSITO CIMENTÍCIO COM ARGILA CAULÍNÍCA PARA
EXTRUSÃO DE BLOCOS PRISMÁTICOS DE VEDAÇÃO E
ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Materiais e Componentes de Construção.

Aprovado em 28 de maio de 2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo - Presidente
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Genilson Pereira Santana - Membro
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade - Membro
Universidade Federal do Amazonas

A minha dedicada esposa e aos meus
amigos pelo incentivo para a
realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela sua proteção e por ter sempre me guiado no transcurso desse trabalho.

A minha amada esposa, Maria Francinetti Pereira Barros, que a todo instante me incentivava e estimulava para que eu não desanimasse no percurso deste projeto.

Aos meus avôs (*in memoriam*), que sempre me mostraram o caminho do bem a seguir sem jamais ter que desistir de uma caminhada em busca do conhecimento.

Ao meu filho Frederico José Ebling Souza, que sem o seu convite para acompanhá-lo nos estudos para o exame desse programa, não estaria concluindo este trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Nilton Campelo de Souza e ao meu co-orientador Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho por todo apoio dedicado a essa pesquisa.

Aos meus amigos mestrandos, por sempre terem estado próximos a mim, me dando forças, momentos de alegria e me ensinando a aprender, fatores determinantes e indispensáveis ao desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos funcionários do Laboratório de Pavimentação (LABPAV) por sempre terem me ajudado nas análises e me ensinado na utilização dos equipamentos.

Agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para o bom desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço a Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio fornecido através da bolsa de estudo.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo produzir um material compósito cimentício (tipo argamassa), tendo como aglomerante uma associação de cimento portland e cimento portland e cal hidratada, e como inerte uma argila caulínica e areia fina, que apresente as mesmas características, para extrusão de uma massa argilosa utilizada pela indústria de cerâmica vermelha, que quando umedecida possa ter uma plasticidade (características reológicas) necessária para ser extrudada em uma maromba para a produção de blocos prismáticos vazados (oito furos), mantendo, aproximadamente, após a secagem, as mesmas propriedades dos blocos prismáticos (blocos de vedação) feitos de cerâmica vermelha. A cal hidratada utilizada foi fabricada no próprio laboratório onde se realizaram os ensaios de caracterização dos materiais utilizados. Após definidos os materiais foi feito um planejamento experimental onde se definiu os traços a serem utilizados. Foram confeccionados os corpos de prova utilizando uma extrusora laboratorial, onde em cada traço foi observado a umidade de conformação, em que ocorreu uma extrusão aceitável. Foram feitos os testes mecânicos, para identificar os traços que apresentaram as maiores resistências à compressão e as maiores tensões de ruptura a flexão. Podendo assim, concluir que é possível produzir um material compósito cimentício, utilizando argila caulínica, cal hidratada e areia, que possa ser extrudado em marombas a vácuo, para a produção de blocos prismáticos, com furos prismáticos, com paredes e septos esbeltos. Esse tipo de processamento é de alta produção. Com isso não haverá mais a necessidade de desmatar a Floresta Amazônica para a produção de lenha necessária para a queima do tijolo de cerâmica vermelha, contribuindo, ainda, com a diminuição da emissão de dióxido de carbono para a atmosfera.

Palavra chave: Argilas. Extrusão. Tijolo ecológico. Tijolo de cimento. Compósito cimentício.

ABSTRACT

The objective this work is to produce a composite cement material (mortar), having as binder a mixture of portland cement and portland cement and hydrated lime, and as inert a kaolinite and fine sand clay, which presents the same characteristics, for extrusion of one clayey material used by the red ceramic industry, which when moistened may have a plasticity (rheological characteristics) necessary to be extruded in a brick extruder for the production of prismatic blocks (eight holes), maintaining approximately the same properties after drying of the prismatic blocks sealed) made of red ceramic. The hydrated lime used was manufactured in the laboratory where the characterization tests are performed. After the materials were defined, an experimental design was carried out, where the mixtures to be used were defined. The blends were prepared using a laboratory extruder, where the moisture of the conformation was observed in each blend, where an acceptable extrusion occurred. The mechanical tests were performed to identify the mixtures that presented higher compressive strength and higher flexural stresses. It can be concluded that it is possible to produce a composite material using kaolinite clay, hydrated lime and sand, which can be extruded in vacuum traps for the production of prismatic blocks with prismatic holes with thin walls and septa. This type of processing is of high production. With this, there will no longer be a need to deforest the Amazon Forest for the production of firewood necessary for the burning of the red ceramic brick, also contributing to the reduction of the emission of carbon dioxide in the atmosphere.

Keyword (s): Clays. Extrusion. Ecological brick. Cement brick. Composite cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Média percentual dos custos da indústria cerâmica da região	17
Figura 1.2	Bloco de vedação com dimensões de 09x19x19cm	18
Figura 2.1	Água que envolve a partícula de argila	22
Figura 2.2	Água livre entre as partículas de argila	22
Figura 2.3	Aumento da superfície específica com a diminuição do tamanho do grão	23
Figura 2.4	Corte de uma extrusora de dupla hélice, com o respectivo gráfico de pressões exercidas no seu interior e a identificação das diferentes zonas	25
Figura 2.5	Tipos clássicos de embudo. A) Mais cônica (argila mais plástica) e B) Menos cônica (argila menos plástica)	26
Figura 2.6	Trinca provocada por canto vivo (A) e canto ovalado sem trinca (B)	27
Figura 2.7	Velocidade periférica maior que a central	27
Figura 2.8	Trincas de secagem	28
Figura 2.9	Trincas de secagem e deformação após secagem	28
Figura 2.10	Maior fluxo na parte central trincas e deformações após secagem	28
Figura 2.11	Saída de material muito úmido	29
Figura 2.12	Fendilhamento na superfície indicando uma mistura pobre de plasticidade	29
Figura 2.13	O ciclo de transformação do calcário e da cal	37
Figura 3.1	Imagem de satélite da localização do ponto de coleta do material argiloso. Coord. UTM: -3.152337 s, - 60.078543W	45
Figura 3.2	Forno Mufla, marca Quimis, modelo Q318B21	48

Figura 3.3	Diagrama ternário com a posição dos traços básico de cimento:argila caulinítica:areia, com as respectivas siglas	54
Figura 3.4	Cal hidratada dissolvida em água	56
Figura 3.5	Conjunto misturador, laminador, extrusora e cortadeira	58
Figura 3.6	Foca com embudo cônico	58
Figura 3.7	Saída do misturador	58
Figura 3.8	Laminador de rolo	59
Figura 3.9	Misturador mecânico de eixo vertical	60
Figura 3.10	Prensa CBR/ISC, com anel dinamométrico de 500 kgf. e um relógio extensômetro (A), detalhe do rompimento do corpo de prova (B)	62
Figura 3.11	Prensa CBR/ISC, com anel dinamométrico de 100 kgf. e um relógio extensômetro. Com suporte em forma de cutelo	64
Figura 3.12	Detalhe da prensa, realizando teste de resistência a ruptura, com apoio em três pontos	64
Figura 4.1	Curvas de TG/DTG/DTA da rocha calcária	73
Figura 4.2	Difratograma de raios – X da cal hidratada	73
Figura 4.3	Curva de distribuição granulométrica de tamanho das partículas da amostra	76
Figura 4.4	Extrusão do traço TrC-7 (cimento, cal, argila e areia)	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Produção anual de blocos cerâmicos estruturais e de vedação por pólos (mil unidades).	16
Tabela 2.1	Composição química do cimento portland	32
Tabela 2.2	Distribuição do tamanho das partículas dos materiais argilosos e dos agregados	38
Tabela 3.1	Caracterização química e física do cimento Mizu CP-IV-32-RS	43
Tabela 3.2	Análise granulométrica das argilas <i>in natura</i>	46
Tabela 3.3	Análise física das argilas <i>in natura</i>	46
Tabela 3.4	Tabela das relações, em massa seca, dos traços básicos de cimento:argila:areia	55
Tabela 3.5	Quadro das relações, em massa seca, dos traços selecionados de cimento:cal:argila:areia	56
Tabela 4.1	Constituição química estimada do calcário e da cal hidratada, em óxidos	65
Tabela 4.2	Resultados das análises determinadas nas amostras da cal hidratada	67
Tabela 4.3	Resultado de análise granulométrica	69
Tabela 4.4	Índices de consistência da argila	70
Tabela 4.5	Composição química da argila caulínica	71
Tabela 4.6	Umidade de conformação dos traços. A) traço com cimento e B) traços com cimento e cal	72
Tabela 4.7	Resultado da resistência a compressão, dos corpos de prova sem cal, rompidos em 7, 14 e 28 dias	73
Tabela 4.8	Resultado das resistências a compressão, corpos de prova com cal, rompidos em 7, 14 e 28 dias	74

Tabela 4.9	Resultado das tensões de ruptura a flexão, corpos de prova sem cal, rompidos em 7, 14 e 28 dias	76
Tabela 4.10	Resultado das tensões de ruptura a flexão, corpos de prova com cal, rompidos em 7, 14 e 28 dias.	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.2	Justificativas	15
1.3	Estruturação da dissertação	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Extrusão	20
2.1.1	Processo de extrusão de produtos de cerâmica vermelha	20
2.1.2	Extrusora	24
2.2	Compósitos cimentícios	30
2.2.1	Considerações iniciais	30
2.2.2	Componentes da argamassa	31
2.2.2.1	Cimento portland	31
2.2.2.2	Cal hidratada	35
2.2.2.3	Agregado miúdo	38
2.2.2.4	Adições	38
2.2.2.5	Água	39
2.3	Extrusão de compósito cimentício	40
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	42
3.1	Materiais utilizados	42
3.1.1	Cimento Portland	42
3.1.2	Cal hidratada	43
3.1.3	Areia fina	44
3.1.4	Argila caulinítica	44

3.1.5	Água	46
3.2	Caracterização física e química dos materiais	46
3.2.1	Cimento Portland	46
3.2.2	Cal hidratada	46
3.2.2.1	Produção da cal hidratada	47
3.2.2.2	Determinação da finura	48
3.2.2.3	Determinação da massa unitária	48
3.2.2.4	Determinação da massa específica	49
3.2.2.5	Determinação da retenção de água	49
3.2.2.6	Determinação da quantidade de dióxido de carbono (CO ₂) por descarbonatação ácida	49
3.2.3	Areia fina	50
3.2.4	Argila caulínica	51
3.2.4.1	Determinação da granulometria	51
3.2.4.2	Determinação dos limites de consistência	51
3.2.4.3	Umidade higroscópica	51
3.2.4.4	Umidade de conformação por extrusão adotada pela indústria cerâmica	51
3.2.4.5	Determinação da massa específica	52
3.2.4.6	Ensaio de espectrometria por dispersão de energia de raios-X	52
3.3	Determinação das dosagens e produção de corpos de prova	53
3.3.1	Planejamento experimental	53
3.3.2	Preparação do compósito cimentício	54
3.3.3	Produção dos corpos de prova	57
3.3.4	Determinação da quantidade de água necessária para a extrusão do	60

	traço	
3.3.5	Cura dos corpos de prova	60
3.4	Ensaio de caracterização mecânica dos corpos de prova	61
3.4.1	Determinação da resistência à compressão – corpos cilíndricos	61
3.4.2	Determinação da tensão de ruptura à flexão – corpos prismáticos	63
4	RESULTADOS OBTIDOS	65
4.1	Cal hidratada	65
4.1.1	Produção da cal hidratada	65
4.2	Areia fina	68
4.3	Argila caulínica	68
4.3.1	Granulometria	68
4.3.2	Limites de consistência	69
4.3.3	Umidade higroscópica	70
4.3.4	Umidade de conformação por extrusão	70
4.3.5	Massa específica	70
4.3.6	Ensaio de espectrometria por dispersão de energia de raios-X	71
4.4	Demanda de água necessária para extrusão de cada traço	71
4.5	Resultados da caracterização mecânica dos corpos de prova	72
4.5.1	Resultados da resistência à compressão – corpos cilíndricos	72
4.5.2	Resultados da tensão de ruptura à flexão – corpos prismáticos	75
5	CONCLUSÃO	78
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	78
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

“A palavra “Cerâmica”, pela etimologia de origem grega *keramiké*, é utilizada para representar a arte e técnica de fabricar objetos variados de argila, submetendo-os a alta temperatura de cozedura” (MICHAELIS, 2017), compreendendo todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos a partir de um tratamento térmico em temperaturas elevadas.

O setor cerâmico é vasto e heterogêneo, o que induz a dividi-lo em sub-setores ou segmentos em função de diversos fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Mas o que interessa neste trabalho é o segmento da cerâmica vermelha.

A expressão “Cerâmica Vermelha” tem um significado bem amplo, compreendendo aqueles materiais empregados na construção civil (argila expandida, tijolos, blocos, elementos vazados, lajes, telhas e tubos cerâmicos) e alguns de uso doméstico e afins. Nos dois casos os produtos têm coloração, predominantemente, avermelhada adquirida pela queima. É pelo processo de sinterização (em torno de 850 °C) que a argila ganha resistência mecânica e resistência à água.

Remonta a milhares de anos, o conhecimento da cerâmica vermelha, devido, à trabalhabilidade da argila na modelagem dos elementos utilizados para a construção civil. Porém, com o advento das estruturas metálicas e do concreto armado, no início do século passado, o bloco deixou sua função estrutural para ter a função de componentes de alvenaria de vedação. Devido a esta utilização temos um bloco vazado que precisa suportar uma carga menor.

O processo utilizado na fabricação de blocos cerâmicos utiliza a matéria prima argilosa totalmente natural e nenhum componente agressivo ao meio ambiente na sua composição. Porém, a temperatura em torno de 900 °C é a grande vilã, já que é necessária para o processo de estabilização (sinterização) das argilas na indústria da cerâmica vermelha. Esse material (bloco cerâmico) tão tradicional é o favorito dos brasileiros devido às suas propriedades únicas, como seu alto isolamento termo-acústico, essencial para a salubridade e conforto de uma residência. O isolamento superior dos blocos cerâmicos ainda possibilita grandes economias em energia elétrica, destinada à refrigeração de ar, ao longo de toda a vida útil de um imóvel (Associação Nacional da Indústria Cerâmica - ANICER, 2016).

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é estudar um compósito cimentício que possa ser extrudado, para a produção de bloco prismático (09x19x19cm), com oito furos, paredes e septos esbeltos, constituído por uma matéria prima composta de argila caulínica, areia fina e cimento ou cimento e cal como aglomerante.

Nos objetivos específicos, pretende-se:

- Estudar a dosagem para estabilização, de uma mistura de argila caulínica e areia fina, com cimento ou com cimento e cal, que apresente característica físico-química para aplicação em blocos cerâmicos.
- Produzir corpos-de-prova laboratoriais, maciços, prismáticos por extrusão, e cilíndricos, com características que atendam as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT para blocos cerâmicos.
- Desenvolver uma tecnologia que seja uma alternativa inovadora para ser utilizada nos pólos ceramistas do Estado do Amazonas, gerando novos produtos, e minimizando a agressão ao meio ambiente.

1.2 Justificativa

No segmento da Cerâmica Vermelha estima-se a existência de mais de 6.903 indústrias cerâmicas e olarias (de micro, pequeno, médio e grande porte) espalhadas por todo o Brasil, segundo a ANICER (2013), em sua maioria (90%) sendo de micro e pequeno porte, operando em vários níveis tecnológicos. São responsáveis pela geração de, aproximadamente, 290.000 empregos diretos e 1.250.000 empregos indiretos, e um faturamento anual de R\$ 16,0 bilhões. Com uma produção mensal de 4,5 bilhões de blocos, consumindo 9 bilhões de toneladas de argila. Esse Setor Cerâmico Brasileiro, que representa 4,8% do macro setor da construção civil, de um modo geral, apresenta uma deficiência grande em dados estatísticos e indicadores de desempenho, ferramentas indispensáveis para acompanhar o seu desenvolvimento e melhorar a competitividade, entre outros fatores. Daí as dificuldades de se ter um panorama mais amplo e realista dessa importante área industrial, com diversos segmentos altamente geradores de empregos, e com forte apelo social (ANICER, 2010).

Em nível estadual, segundo Riker *et al.* (2016), as áreas de concentração da grande maioria das indústrias oleira-cerâmica vermelha, e as maiores produtoras, do estado do Amazonas, estão localizadas nas regiões dos municípios de Manacapuru,

Tabela 1.1 – Produção anual de blocos cerâmicos estruturais e de vedação por pólos (mil unidades).

Polos cerâmicos	Produção mensal	Produção anual
Manacapuru	4.350	52.200
Irاندuba	3.720	44.640
Itacoatiara	1.180	14.160
TOTAIS	9.250	111.000

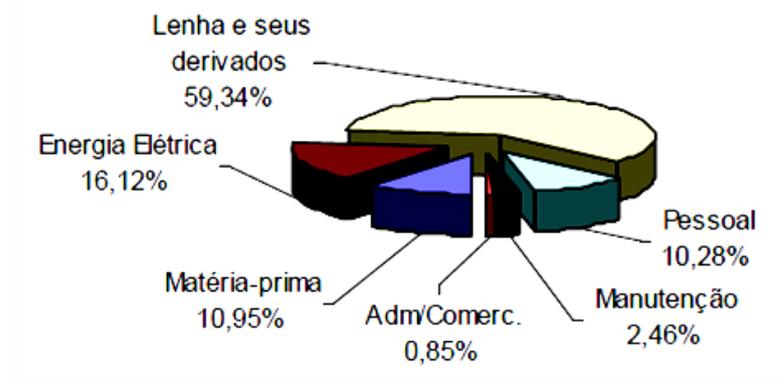
Fonte: Adaptado de Riker (2016).

Irاندuba e Itacoatiara. Onde estão inseridos os principais polos cerâmicos: de Manacapuru, Irاندuba e Itacoatiara. A Tabela 1.1 ilustra a produção por polos na região citada, onde se pode observar uma produção anual de 111.000.000 de peças cerâmicas.

Na fabricação, o processo que representa a etapa final da produção é a sinterização, que envolve a queima em fornos ou caieiras, onde o principal combustível utilizado é a biomassa de origem vegetal. Sendo no processo tradicional utilizado a lenha proveniente de floresta primária e/ou secundária, e no processo alternativo o uso de serragem, costaneiras e cavacos proveniente do subproduto de serrarias e dos materiais de madeira (restos de paletes), proveniente do Distrito Industrial de Manaus.

Na Figura 1.1, tem-se de forma detalhada o percentual do custo médio da indústria cerâmica da região e pode-se constatar que o consumo de lenha e seus derivados correspondem a 59,34% do custo operacional.

Figura 1.1 – Média percentual dos custos da indústria cerâmica da região



Fonte: D'Antona, 2007.

Como se pode inferir pelos dados obtidos de D'Antona (2007), o consumo médio de lenha necessário para a produção de 1.000 blocos era de 2,06 m³ de lenha. Após verificação *in loco*, constatou-se que até os dias atuais, essa média, pouco variou, já que são raras as olarias que investiram em melhorias tecnológicas para a sinterização dos produtos cerâmicos. Logo para as indústrias de cerâmica vermelha dos polos Manacapuru, Iranduba e Itacoatiara, que produz, em média, 111 milhões de peças anualmente, ter-se-á um consumo de 228.660 m³/ano de lenha (biomassa), onde é necessário destruir a floresta contida em uma área aproximada de 19.055.000 m² ou 1.905,5 hectares anualmente.

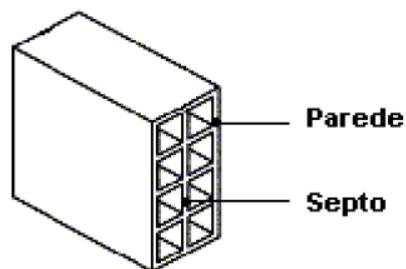
Com a utilização de um novo material compósito cimentício ter-se-ia uma massa para a modelagem de um produto similar sem a necessidade de queima, com isso estará sendo evitado o desmatamento em larga escala, como, por exemplo, o já ocorrido no município de Iranduba, um dos maiores polo de produção de cerâmica vermelha no estado do Amazonas. Onde quase toda a floresta ali existente já é terciária ou quaternária, devido à extração constante, por décadas, de lenha. Mesmo com as dificuldades impostas pelos órgãos de controle ambiental, não se consegue deter o avanço deste tipo de desmatamento. Com o aumento da produção, vem também o aumento do custo de aquisição da lenha ao longo dos anos, provocado pelo distanciamento dos locais de extração em relação à localização das indústrias cerâmicas, aumentando cada vez mais a área de desmatamento. Não são observadas políticas de reflorestamento nas atividades extrativas de lenha, nem

manejo adequado do corte e também não são verificadas atividades de educação ambiental na região.

Conforme Aldea *et al* (1998), a possibilidade de se produzir produtos extrudados à base de argila, a frio, representa uma perspectiva importante para a proteção do meio ambiente, pela diminuição da liberação de CO₂, um dos gases responsáveis pelo efeito estufa, liberados pela queima em alta temperatura na etapa da calcinação dos produtos cerâmicos. Segundo a ANICER (2017), a grande maioria da energia utilizada para a produção de blocos de cerâmica vermelha é oriunda da queima da lenha; como por exemplo, nas olarias fluminenses este percentual chega a 93,16% do total de olarias. Já a produção de bloco extrudado, estabilizado com cimento ira contribuir para a diminuição da emissão de dióxido de carbono, gerado por essa atividade, para a atmosfera.

A população de classe média e baixa, devido ao baixo potencial econômico, são as mais conservadoras em relação aos produtos novos colocados no mercado, segundo Turri (2011). E como o bloco cerâmico de oito furos é largamente utilizado no estado do Amazonas, para pequenas construções e ampliações das já existentes, buscou-se nesse projeto, produzir um material compósito com base cimentícia, que tenha boa extrusão, boa resistência a flexão e a compressão, e que no futuro possa ser utilizado para a produção de bloco ecológico extrudado, de oito furos, similares em forma, ao bloco cerâmico 09x19x19cm, figura 1.2.

Figura 1.2 - Bloco de vedação com dimensões de 09x19x19cm.



Fonte: Wieck, Duailibi 2014

1.3 Estrutura do trabalho

Esta dissertação apresenta-se dividida em cinco capítulos:

Capítulo 1 – Introdução ao trabalho, onde se ressalta, com generalidades, a relevância do tema e a motivação que levou a este estudo, os objetivos da pesquisa e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica, onde se buscou a fundamentação teórica para a pesquisa, onde são apresentadas e analisadas as bibliografias que abordam temas relacionado a esta pesquisa, com enfoque na extrusão de massas argilosas estabilizada com cimento e cal, e a interação entre elas.

Capítulo 3 – Descrição dos procedimentos experimentais, com o detalhamento adotado na pesquisa, como caracterizações dos materiais a ser empregado na produção da massa cimentícia, a metodologia empregada para realização dos ensaios, bem como os respectivos ensaios físicos e mecânicos realizados.

Capítulo 4 – Trata dos resultados obtidos, em que são apresentados e discutidos os resultados que contemplam os parâmetros analisados, propriedades físicas dos componentes utilizados e a propriedade da massa obtida.

Capítulo 5 - São apresentadas as conclusões parciais obtidas a partir de análise dos dados gerados no capítulo anterior.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Extrusão

2.1.1 Processo de extrusão de produtos da cerâmica vermelha

O processo de extrusão é definido como um processo de conformação plástica, para a produção de objetos de seção constante, muito utilizada na indústria cerâmica vermelha para a conformação de blocos. Existem vários fatores que afetam o rendimento do processo e a qualidade dos produtos finais, entre eles destacam-se: a composição e a preparação das massas cerâmicas, a plasticidade das massas, os moldes ou boquilhas usados, o tipo de extrusora e a qualidade do vácuo empregado (RIBEIRO, 2003).

Há mais de 150 anos a extrusão é usada para a conformação de produtos da cerâmica vermelha, sendo só a partir da década de 1950 que a tecnologia das extrusoras sofreu pequenas alterações até os dias atuais. No entanto, este processo de conformação industrial tem se revelado essencial nas indústrias da cerâmica vermelha (telhas e blocos). É uma técnica de produção associada à elevada produtividade, principalmente, para produtos de seção transversal constante (bloco) e muito importante em termos de homogeneização e retirada do ar da massa (REED, 1991, BLACKBURN e LAWSON, 1992).

Desde que o produto tenha uma simetria longitudinal, numa seção constante, a extrusão é o processo industrial que apresenta a melhor opção, por mais complexo que seja o formato a ser obtido. A facilidade em se conformar peças por extrusão esta relaciona com a plasticidade da matéria prima utilizada. O processo é contínuo e mais simples do que outros métodos convencionais, tornando-o mais adequado para a produção em larga escala. A vantagem da extrusão é ser um método de produção em massa mais econômico e capaz de produzir não só formas planas, mas também formas estruturais. A tecnologia da extrusão é candidata potencial para aplicações de baixo custo comercial segundo Aldea *et al* (1998). Para o processo de extrusão ser usado na produção de blocos de solo-cimento deve-se realizar um controle rigoroso da reologia da massa que vai ser utilizada, para que o processamento da cura do cimento possa progredir com sucesso.

Ainda que os custos de preparação e conformação da matéria prima em uma indústria cerâmica sejam relativamente baixos, em relação aos custos totais de elaboração do produto, a realização destas operações, para conformação, se não forem desenvolvidas corretamente, podem causar um incremento significativo dos custos da secagem e da queima, que são as etapas mais onerosas do processo. E no caso do tijolo de solo-cimento, o processo de cura será comprometido.

A conformação por extrusão permite produzir blocos com paredes externas e septos com espessuras mais esbeltas que o sistema produtivo solo-cimento por prensagem, com isso, há uma diminuição do peso específico do produto, possibilitando uma diminuição do custo de transporte, de estruturas e fundações. Uma das poucas limitações na diminuição da espessura das paredes é a resistência durante o transporte externo e interno na obra, Turri (2011).

Dentre as extrusoras, a mais utilizada nos polos cerâmico de Manacapuru, Iranduba e Itacoatiara, é a extrusora de eixo horizontal com bomba de vácuo, que apesar de um elevado investimento inicial, é muito eficiente e capaz de alcançar uma boa produção diária.

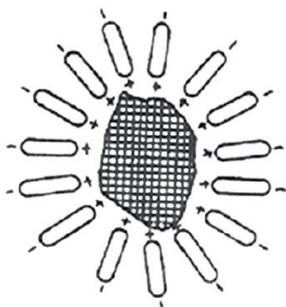
No processo de extrusão a principal propriedade é a plasticidade do material, que pode ser definida como sendo a deformação de uma massa, em função da quantidade de argilominerais presente no material argiloso e da umidade, até ela entrar em ruptura. A capacidade de adaptação de uma massa plástica a um determinado processo de conformação é freqüentemente denominada de “trabalhabilidade”, termo usado como sinônimo de plasticidade. Que é a capacidade de uma determinada argila ou massa argilosa em deformar-se sob a ação de uma força externa, mantendo a forma final após a remoção da força aplicada. De uma forma pratica pode-se dizer que a plasticidade é “boa” ou “ruim”. Quando a massa se adapta a um processo de conformação fluindo perfeitamente define-se a plasticidade como “boa” e quando a massa ao fluir pela boquilha apresentar defeitos na coluna ou apresentar resistência à conformação diz-se que a plasticidade é “ruim”. O teor de água adicionado é o que determina o limite de plasticidade (LP) a ser atingido, que é específico para cada tipo de material argiloso (GOMES, 1988).

É evidente que a adição de água tem um limite para cada tipo de material argiloso, o qual é definido como “limite de liquidez (LL)”. Como a plasticidade da massa interfere na qualidade final do produto extrusado, deve-se extrusar a massa próxima à zona de máxima plasticidade necessária, evitando situações

desvantajosas para a conformação do produto. Nas massas, com teores de umidade, próximo ao limite de liquidez (LL), facilmente ocorrerá o deslizamento entre as partículas, e a massa argilosa tenderá a agarrar-se às hélices da extrusora e fluir com maior velocidade pelo centro da foca (conjunto cone e boquilha), ficando o produto final sem rigidez para manter a forma. Algo idêntico ocorrerá ao se diminuir o teor de umidade e trabalhar próximo ao limite inferior da plasticidade, o atrito nas paredes da extrusora aumentará e a massa argilosa tenderá a fluir com maior velocidade no centro, enquanto que a força de compressão desenvolvida no interior da extrusora provocará o desgaste dos diversos componentes metálicos (FACINCANI, 1993).

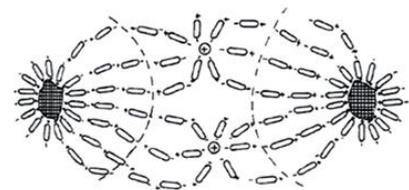
É de extrema importância entender o comportamento que as partículas argilosas apresentam e qual a influência da coesão entre elas durante o processo de extrusão. Uma porção de argila, completamente seca e desagregada, sem nenhum percentual de umidade higroscópica, será impossível de se conformar, porque será simplesmente um pó seco. Para que ocorra a união das partículas dos argilominerais é necessário que exista um meio úmido, constituído por partículas de argilominerais e água. Primeiramente, as moléculas de água envolvem cada partícula da argila, ficando fortemente ligada a mesma (Figura 2.1), mas as partículas ainda não estarão ligadas entre si, para que ocorra esta ligação será necessária a adição, na mínima quantidade de água livre (Figura 2.2), Wieck e Duailibi (2014).

Figura 2.1 – Água que envolve a partícula de argila.



Fonte: Wieck e Duailibi (2014).

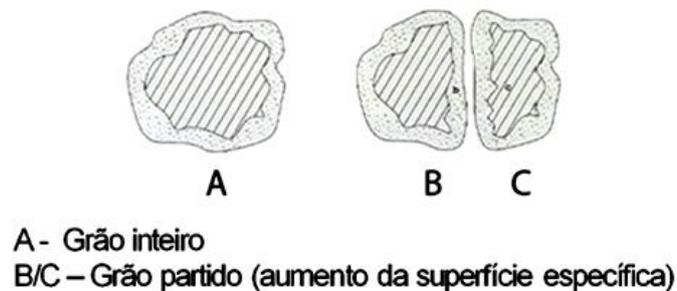
Figura 2.2 – Água livre entre as partículas de argila



Fonte: Wieck e Duailibi (2014).

Nas argilas para uso na indústria da cerâmica vermelha esta umidade, conforme Wieck e Duailibi (2014), fica geralmente entre 16% e 30%, sendo determinada em função das características de cada massa argilosa, como: composição mineralógica, quantidade e tamanho das partículas, que influencia a qualidade da preparação da massa. À medida que se diminui o tamanho das partículas dos argilominerais têm-se um aumento na superfície específica e será necessária mais água para se obter a máxima coesão (figura 2.3).

Figura 2.3 - Aumento da superfície específica com a diminuição do tamanho do grão.



Fonte: Wieck e Duailibi, (2014).

Para poder atingir a plasticidade ideal da massa, é necessário adicionar mais água, até ultrapassar o ponto máximo de coesão. Este acréscimo (água livre) terá um efeito lubrificante fazendo com que as partículas deslizem umas sobre as outras, possibilitando a extrusão. A quantidade de água adicionada que definirá a melhor plasticidade também depende de fatores intrínsecos à própria massa, tais como: os diferentes tipos de minerais argilosos existentes na massa, a própria granulometria das partículas envolvidas (fatores já referidos anteriormente) e o hábito ou forma dos cristais. As argilas com composições mineralógicas diferentes apresentam comportamentos plásticos diferentes, embora os seus teores de água possam ser iguais (GOMES, 1988).

Ainda sobre plasticidade, segundo SOUZA SANTOS, P.(1975), as faixas de variação da água de plasticidade dos grupos de argilominerais são: a) Caulinita de 8,9% a 56,3%; b) illita de 17,0% a 38,5%; e c) Montmorilonita de 82,9 a 250,0%.

2.1.2 Extrusora

A extrusora é o equipamento responsável pelo transporte, compactação e extrusão da massa cerâmica; durante este processo o fluxo deve ser o mais constante possível para garantir um produto uniforme.

No pólo cerâmico de Iranduba-Manacapuru as extrusoras utilizadas são as de eixo horizontal. São máquinas que utilizam vácuos, sendo que raramente encontram-se, ainda, as máquinas feitas em “fundo de quintal”, denominada regionalmente de máquina extrusora “pé duro”, que não operam com vácuo e precisam de uma massa mais plástica para poder produzir, e o seu produto apresenta-se com uma porosidade bem acentuada.

Segundo Mello e Oliveira (2004), um sistema de vácuo em perfeito funcionamento e com a pressão adequada, influência nas características físicas do produto extrusado, tais como: aumento da tensão de ruptura a flexão (tanto seco como queimado), aumenta a compactação dos grãos, com a eliminação do ar, reduzindo a quantidade de trincas e diminuindo a taxa de absorção de umidade.

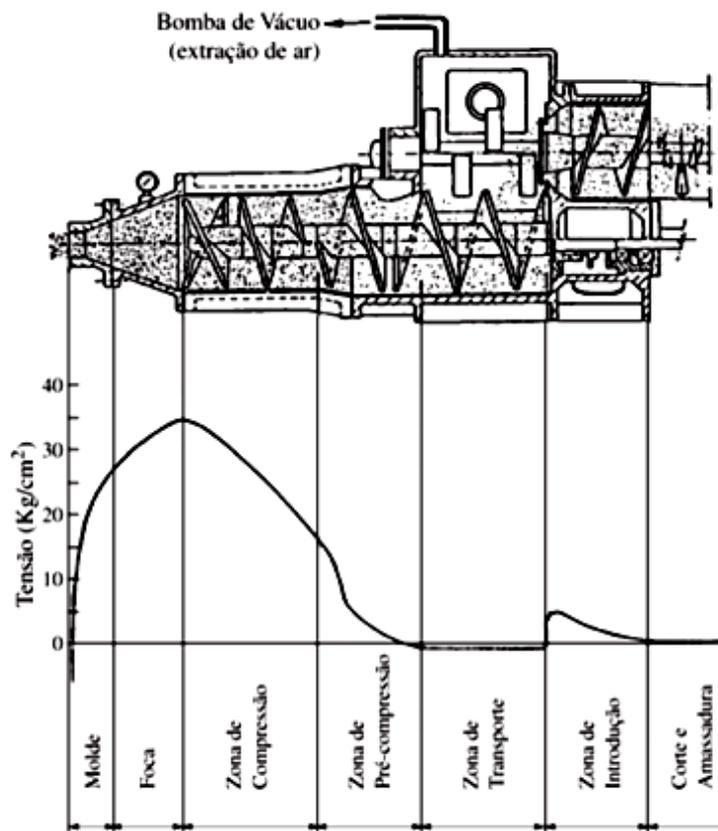
A extrusora desenvolve uma técnica de produção contínua associada a uma elevada produtividade, para produtos de seção transversal constante (blocos) e é muito importante em termos de homogeneização e retirada do ar da massa (RIBEIRO *et al.*, 2003).

As forças de compressão no interior de uma extrusora apresentam dois picos em zonas diferentes (Figura 2.4). O primeiro, de baixa intensidade, surge logo no fim da primeira hélice junto ao cortador interno na entrada da câmara de vácuo, onde surge a primeira restrição à passagem da massa. O outro pico, com início na zona de pré-compressão, tem seu máximo à entrada da foca ou câmara de compressão, atingi sua maior intensidade e define a zona onde se desenvolvem as forças de compressão do material e é a zona onde se desenvolvem os desgastes mais elevados dos componentes da extrusora. Quanto menos plástica for a massa

argilosa, maior sensibilidade terá a possíveis variações de umidade. Uma variação de 1, 2 ou 3% de umidade numa massa plástica poderá não se notar em termos de extrusão, mas numa massa pouco plástica provocará uma alteração total da plasticidade a das condições de fluxo através da boquilha, devido à menor força de coesão entre as partículas. (FACINCAN, 1993).

Na frente da zona de compressão temos a câmara de compressão que é denominada de acumulador ou embudo (Figura 2.5). Teoricamente o comprimento de um embudo varia de acordo com o tipo da massa argilosa e o formato da peça a ser produzida, portanto deverá ter dimensões compatíveis para cada aplicação. Isso não ocorre na prática já que as indústrias normalmente optam por um só tipo de produto.

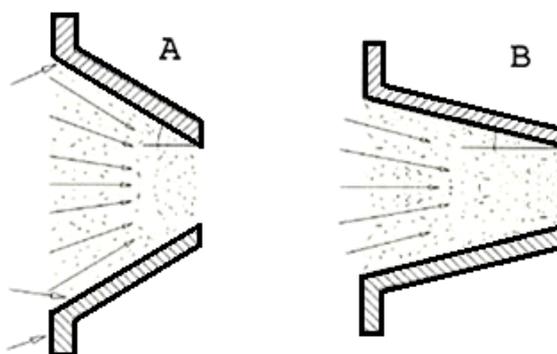
Figura 2.4- Corte de uma extrusora de dupla hélice, com o respectivo gráfico de pressões exercidas no seu interior e a identificação das diferentes zonas.



Fonte: Ribeiro *et al.* (2003).

Nas conformações tradicionais, o excesso de água, reduz a resistência mecânica dos produtos cimentício. Mas quando o teor de água é reduzido durante a mistura da massa e possibilita a compactação do material, ocorrerá um aumento do empacotamento porque as partículas são forçadas umas sobre as outras, podendo ocorrer, até mesmo, partição de partículas mais frágeis e conseqüentemente diminuindo os espaços intersticiais. Em razão da tensão gerada, na câmara de compactação, a água capilar que antes só revestia as partículas agora esta distribuída preenchendo os espaços entre elas, em razão da compactação da conformação, ocorre um alívio das tensões de extrusão. Ao término da conformação, quando ocorrerá o alívio das pressões de extrusão, a tendência será a peça retornar a um volume maior, fato que não ocorre devido as força internas de coesões geradas durante a compactação que mantém o volume extrusado constante. (HENKES, 1996 *apud* ROSSETTO, 2007).

Figura 2.5 - Tipos clássicos de embudo. A) Mais cônica (argila mais plástica) e B) Menos cônica (argila menos plástica).



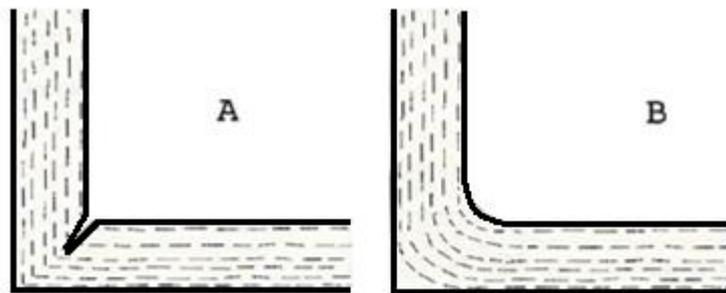
Fonte: Adaptado de Mello e Oliveira (2004).

As funções básicas do embudo são:

- Eliminar as diferenças de fluxo de massa;
- Diminuir as laminações formadas pelo alinhamento de partículas lamelares;
- Transformar o fluxo helicoidal da argila, gerado pela hélice, num fluxo retilíneo;
- Compensar as diferenças de velocidade entre a periferia e o eixo da hélice e igualar as velocidades ao longo da seção tornando o fluxo o mais uniforme possível.

O componente que é responsável pela conformação final do produto é a boquilha ou molde de extrusão. A forma do produto depende do desenho vazado na placa da moldura e na forma dos machos. A geometria vazada na boquilha que gera a seção transversal de uma peça é de relevante importância para o tipo seção e deve evitar cantos vivos que podem induzir ao aparecimento de trincas (Figura 2.6) devido às tensões geradas pela extrusão (WIECK, DUAILIBI, 2014).

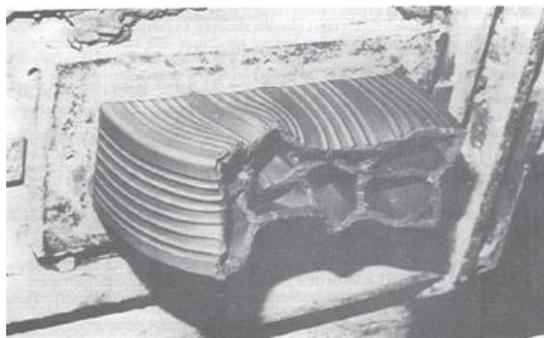
Figura 2.6 - Trinca provocada por canto vivo (A) e canto ovalado sem trinca (B).



Fonte: Adaptado de Mello e Oliveira (2004).

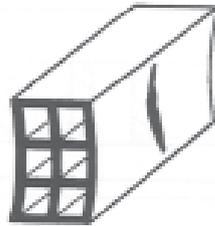
Em uma máquina com uma boquilha de uma só saída podem ocorrer dois tipos problemas mais frequentes, que são: maior fluxo na periferia (figura 2.7), e maior fluxo no centro (Figura 2.9) ambas provocam defeitos (trincas) que só serão visíveis durante a secagem da peça (Figuras 2.8 e 2.10).

Figura 2.7 - Velocidade periférica maior que a central.

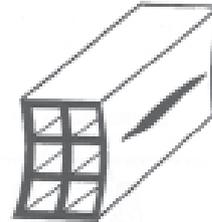


Fonte: Adaptado de Mello e Oliveira (2004).

Figura 2.8 - Trincas de secagem. A) Excesso de velocidade nas paredes superior e inferior e mais secagem na face, B) Excesso de velocidade nas paredes superior e inferior e mais secagem nos cantos.



(A)



(B)

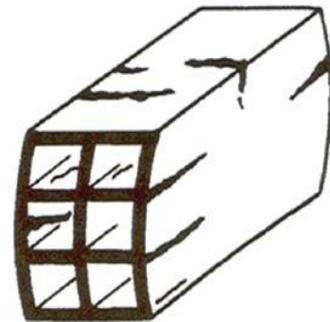
Fonte: Adaptado de Mello e Oliveira (2004).

Figura 2.9 - Maior fluxo na parte central, trincas e deformação após secagem.



Fonte: Adaptado de Mello e Oliveira (2004).

Figura 2.10 - Maior fluxo na parte central trincas e deformações após secagem.

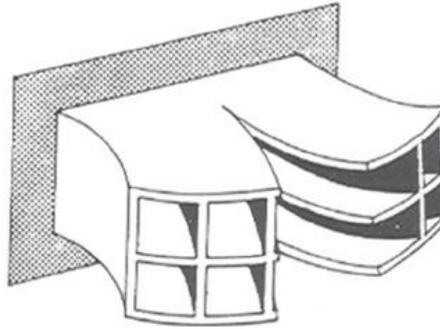


Fonte: Adaptado de Mello e Oliveira (2004).

Caso não haja um controle rigoroso no teor de umidade na extrusão, ocorrerão conseqüências gravíssimas em decorrência dessa falha, que ocasionarão variações na coesão da massa extrudada. Quando a massa estiver com variação de umidade, num momento muito baixa apresentará (Figura 2.11) uma maior velocidade de deslocamento na periferia e, em um momento seguinte, apresentar uma umidade alta, a velocidade passará a ser maior no centro da fita. Quando a umidade for excessivamente alta, as forças de coesão entre as partículas da massa ficam tão baixas que não serão suficientes para dar forma à peça. Este efeito também ocorrerá no caso de variações na mistura da massa, com mudanças nas

porcentagens de material mais plástico e material menos plástico, causando variações na plasticidade da massa produzida, Wieck e Duailibi (2014), (Figura 2.12).

Figura 2.11- Saída de material muito úmido.



Fonte: Adaptado de Wieck; Duailibi (2014).

Figura 2.12 - Fendilhamento na superfície indicando uma mistura pobre de plasticidade.



Fonte: Rossetto (2007).

2.2 Compósito cimentício

2.2.1 Considerações iniciais

As argamassas são definidas pela NBR-7200:1998, como uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedade de aderência e endurecimento. Adotar-se-á o termo argamassa para identificar a massa compósita cimentícia utilizada nesta pesquisa.

A argamassa é um material compósito cimentício aplicado na construção civil constituído por uma mistura homogênea de um ou mais aglomerantes (cimento ou cal), agregado miúdo (areia) e água. Podendo ainda ser adicionados alguns produtos especiais (aditivos ou adições) com a finalidade de melhorar ou conferir determinadas propriedades a massa. As argamassas podem ser formuladas como: as argamassas à base de cal, à base de cimento e argamassas mistas de cal e cimento. Dependendo das proporções entre os constituintes da mistura e sua aplicação, elas recebem diferentes nomes em seu emprego (NBR 13529:1995). Termos utilizados para denominar as argamassas relativas à natureza, tipo e número de aglomerantes:

I - Argamassa simples: argamassa preparada com um único aglomerante.

a) Argamassa aérea - argamassa preparada com aglomerante (s) aéreo(s), usualmente é utilizada a cal hidratada.

b) Argamassa hidráulica - argamassa preparada com aglomerante (s) hidráulico(s), normalmente se utiliza o cimento portland.

c) Argamassa de cal - argamassa preparada com cal, como único aglomerante.

d) Argamassa de cimento - argamassa preparada com cimento, como único aglomerante.

II - Argamassa mista: argamassa preparada com mais de um aglomerante.

a) Argamassa de cimento e cal - argamassa preparada com cimento e cal, como aglomerantes. Normalmente é utilizado um aglomerante aéreo e um hidráulico.

2.2.2 Componentes da argamassa

Os componentes das argamassas possuem características próprias (particulares) que irão se manifestar quando utilizadas em conjunto, formando as argamassas.

Os componentes das argamassas possuem características próprias (particulares) que irão se manifestar quando utilizadas em conjunto, formando as argamassas.

2.2.2.1 Cimento portland

Em termos gerais, cimento é todo material com propriedades adesivas e coesivas, capaz de ligar fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto (NEVILLE, 1982 *apud* FONSECA, 2010).

O cimento Portland é obtido a partir de uma mistura de calcário, argila (silicatos de alumínio e ferro) e, eventualmente, mais algumas substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro, que constituem as matérias-primas. Essa mistura é reduzida a um pó muito fino, e após controle da finura e da composição química, e homogeneizada, são colocados em forno rotativo, de temperaturas da ordem de 1450 °C, para sua sinterização.

À temperatura de 900 °C ocorre a descarbonatação, obtendo-se os óxidos. Em temperatura mais elevada, as matérias-primas reagem entre si, e com o apoio da fase líquida obtida pela fusão de cerca de 20% dessa mesma matéria-prima, origina-se os novos compostos. Através destes processos químicos e físicos, os produtos dessa reação, são esfriados de forma rápida (para que o silicato tricálcico formado se mantenha, sem se transformar em silicato bicálcico), e aglomeram-se em pelotas com dimensões variáveis, mas geralmente entre 2 e 20 mm de diâmetro, recebendo a designação de clínquer.

A mistura das matérias-primas é dosada, controlada e corrigida de modo que, depois de perder a água e o dióxido de carbono, por ação da temperatura, tenha uma composição dentro dos limites para a composição química exigida para o cimento, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição química do cimento portland.

COMPOSTO	%
CaO (C)	60 a 68
SiO ₂ (S)	17 a 25
Al ₂ O ₃ (A)	2 a 9
Fe ₂ O ₃ (F)	0,5 a 6
MgO	0 a 2
K ₂ O + Na ₂ O	0,5 a 1,5

Fonte: Coutinho (1997).

A alumina (Al₂O₃) e os óxidos de ferro (Fe₂O₃) são fundentes, pois os compostos em que intervêm fundem à temperatura mais elevada (temperatura de clinquerização), ajudando à melhor combinação de todos que participam das reações em que se formam os componentes do cimento.

O clínquer é composto por quatro componentes principais, que são: os silicatos bi e tricálcicos (C2S e C3S), o aluminato tricálcico (C3A) e o ferro-aluminato tetracálcico (C4AF). Os silicatos são compostos muito resistentes. O silicato tricálcico é o componente que confere maiores resistências iniciais, forma-se a temperatura próxima dos 1450 °C e, por ser metaestável, transforma-se em C2S se o esfriamento ocorrer de forma lenta. O silicato bicálcico forma-se entre os 900 °C e os 1200 °C ou por esfriamento lento do C3S. Apresenta relativamente baixas resistências iniciais, mas que aumentam a partir dos 28 dias e confere boa resistência química. Os aluminatos são os responsáveis pelas primeiras reações, porém atingem valores muito baixos de resistência aos esforços mecânicos. Os aluminatos constituem uma fase intersticial, que se insere no meio dos silicatos, funcionando como veículo de desenvolvimento do cozimento e promovendo a formação desses mesmos silicatos. O aluminato tricálcico é muito sensível quimicamente e é o constituinte com maior responsabilidade na libertação de calor

na hidratação do cimento. O ferro-aluminato tetracálcico é o mais resistente quimicamente. Se existir mais ferro forma-se mais C4AF em detrimento de C3A. O C3A é responsável pela pega do cimento, uma vez que é o componente mais reativo do clínquer. O C4AF tem papel importante na resistência química do cimento, em especial ao ataque de sulfatos às estruturas de concreto. É o ferro, juntamente com o tipo de matéria-prima, que confere a cor cinzenta ao cimento Portland.

Para a obtenção do cimento, o clínquer é moído junto com o gesso (como retardador de pega) e de adições. O gesso utilizado para combinação com os aluminatos é introduzido numa quantidade que aferida ao longo da produção, ficando em torno de 5%. As adições são colocadas de acordo com o tipo de cimento a ser produzido.

No caso do cimento Portland, a hidratação dos silicatos tricálcico e bicálcico conduz à formação da tobermorita (CSH) que, por combinação com a cal livre, constitui o hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – portlandita]. É o elemento mais fraco de pastas ou argamassas com cimento Portland, pois pode dissolver-se na água e carbonatar-se. Na presença da água e de sulfatos, o aluminato tricálcico forma a etringita que pode conduzir à desagregação da argamassa. Por outro lado, a reação do aluminato tricálcico com os sulfatos e a conseqüente formação da etringita, combinada com o aluminato tetracálcico, pode formar uma camada insolúvel sobre os grãos do material que retarda a hidratação. (RODRIGUES, 2004).

Segundo Coutinho (1997), pode-se modificar a composição da matéria-prima para se obter um cimento com determinada propriedade mais acentuada do que outras, de modo a satisfazer as exigências da construção. Disso derivam os cimentos com alta resistência inicial, endurecimento rápido, baixo calor de hidratação, resistência a sulfatos, etc. Assim, com o desenvolvimento do cimento Portland, outros materiais começaram a ser introduzidos em sua composição, constituindo os cimentos com adições. Além de trazerem melhorias na qualidade dos cimentos, as adições permitirão a obtenção de melhor desempenho e menor custo de produção. Dentre os principais materiais adicionados ao cimento destacam-se as escórias granuladas de alto-forno e os materiais pozolânicos naturais e artificiais.

De fato, as adições minerais modificam o equilíbrio químico no interior do cimento, pois promovem a fixação do hidróxido de cálcio dando origem a componentes menos ricos em cálcio do que os provenientes da hidratação do

cimento Portland, com propriedades ligantes tão importantes quanto às daqueles. Com isso, a concentração de hidróxido de cálcio é reduzida a limites capazes de inibir as reações expansivas entre sulfatos e aluminatos, o calor de hidratação é diminuído e o cimento apresenta resistências químicas e mecânicas em geral superiores às do cimento portland comum.

Na NBR 5736:1991, o cimento portland pozolânico é um aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer portland e materiais pozolânicos, moídos em conjunto ou em separado. O teor de materiais pozolânicos secos deve ficar entre 15% e 50% da massa total de aglomerante. Os materiais pozolânicos em geral são materiais silicosos ou silicoaluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias. São designados pela sigla CP IV, e são divididos em duas classes, 25 e 32 MPa, que representam os mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Segundo Cristelo (2001), as pozolanas podem ser materiais naturais ou artificiais que possuem constituintes muito finos passíveis de reagir quimicamente com o Ca(OH)_2 para formarem, em presença da água, novos compostos estáveis de poder aglomerante e endurecedor, tais como os aluminatos e os silicatos de cálcio hidratado.

Os componentes iniciais do cimento são desorganizados estruturalmente, ricos em energia, anidros, formados a alta temperatura e, portanto, instáveis. Uma vez em contato com a água, a hidrólise se instala pela ação dos íons H^+ e OH^- que rapidamente atacam suas estruturas rompendo numerosas ligações e aliviando tensões estruturais, permitindo assim a formação de compostos hidratados com um menor teor de cálcio. O excesso deste é liberado como hidróxido de cálcio (CASTRO, 1995).

Na reação pozolânica envolvendo os argilominerais, os minerais de partida são muito mais organizados estruturalmente, sua energia superficial é bem menor, são hidratados, e bem mais estáveis. A intensidade e a velocidade das reações químicas são necessariamente menores do que aquelas verificadas na hidratação do cimento. Exatamente por isso, o desenvolvimento da resistência mecânica ocorre gradualmente e estende-se por um período muito mais longo dos que no caso do cimento.

As argamassas produzidas com cimento apresentam normalmente resistências mecânicas bastante superiores, quando comparadas com as argamassas de cal produzidas com o mesmo traço. O tempo necessário para o endurecimento de uma argamassa de cimento é muito menor, e ocorre devido ao processo de cristalização dos produtos da hidratação do cimento, que formam os compostos de Aluminatos, Silicatos e Ferroaluminatos. Dos citados, o Silicato Tricálcico $[(CaO)_3SiO_2]$ contribui de uma forma muito significativa para as resistências mecânicas. Nas argamassas produzidas com a cal hidratada ($Ca(OH)_2$) o endurecimento dá-se essencialmente por recarbonatação do óxido de cálcio (CaO) produzindo $CaCO_3$ e liberando H_2O (COUTINHO, 2004 *apud* VIEIRA, 2013).

2.2.2.2 Cal hidratada

Até a invenção do cimento portland, ocorrido no século XIX, a cal hidratada era o aglomerante mais utilizado pela construção civil para a produção de argamassas. Atualmente, ela foi substituída pelo cimento portland.

A primeira etapa para a obtenção da cal hidratada é a transformação das rochas calcárias e dolomítica em cal virgem e CO_2 , que é alcançada em forno a uma temperatura de calcinação entre 900 e 1000 °C. A segunda etapa é provocar uma reação de hidratação, onde a cal virgem reage espontaneamente com a água, formando os hidróxidos cálcio e de magnésio (impurezas). Essa reação ocorre com a liberação de calor de hidratação (reação exotérmica) e provoca um aumento de volume (expansão) significativo. Essa expansão aumenta o volume inicial da cal virgem ao transformando-la em cal hidratada, Figura 2.13, que é um pó branco com elevada superfície específica, Cincotto *et al*, (2007).

A cal hidratada não apresenta mais uma reação exotérmica quando em contato com a água, e por ser constituída principalmente por óxido e hidróxido de cálcio ela endurece lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono atmosférico e libera água.

Numa argamassa onde há apenas a presença da cal, sua função principal é funcionar como aglomerante da mistura, e durante o endurecimento, as partículas muito finas de hidróxidos se unem formando cristais que aumentam de tamanho à medida que a água se evapora, liberando espaços, e se entrelaçam, formando uma

malha resistente de carbonato de cálcio que retém os agregados (GUIMARÃES, 1998).

Conforme Cincotto (1999), a cal hidratada cálcica apresenta uma maior viscosidade, pois incorpora mais água, na pasta, apresentando um maior rendimento e envolvendo melhor o agregado miúdo. Justificável pela ordem de grandeza dos resultados encontrada nos ensaios de determinação da área específica pelo método de Blaine. A cal hidratada é um material que apresenta uma área específica, em geral, superior à do cimento Portland, Quarcioni *et al* (2009). Em função do alto poder de retenção de água em torno de suas partículas, a cal deixada em repouso, por no mínimo 16 horas, em contato direto com a água sob forma de pasta ou em argamassa com areia, desenvolve uma melhora nas propriedades no estado fresco, e fornece um meio mais adequado para a hidratação do cimento a ser utilizado na argamassa mista.

Nesse tipo de argamassa, destacam-se as propriedades de trabalhabilidade e a capacidade de absorver deformações. Entretanto, são reduzidas as suas propriedades de resistência mecânica e aderência. Em argamassas mistas, de cal e cimento, devido à finura da cal há retenção de água em volta de suas partículas, e conseqüentemente maior retenção de água na argamassa. Assim, a cal pode contribuir para uma melhor hidratação do cimento, além de contribuir significativamente para a trabalhabilidade e capacidade de absorver deformações. Outra versatilidade da argamassa de cal é fechar muitas das fissuras que ocorrem durante o período de tempo em que ainda tenha os hidróxidos de cálcio e/ou magnésio livre, graças à sua atividade química. Esta reconstituição é autógena e a água que circula pelos espaços intergranulares provoca reações químicas, preenchendo as falhas (GUIMARÃES, 1998).

O uso da cal hidratada é normalizado pela NBR, Quadro 1. Vários Institutos de pesquisa apontam a cal como um bom plastificante para a preparação de argamassas, tanto argamassas simples quanto mistas.

Figura 2.13 - O ciclo de transformação do calcário e da cal.

Ciclo de transformação da cal



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2007).

Quadro 1 - Cal hidratada para construção – exigências químicas e físicas

Exigências Químicas

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxido não hidratado calculado		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não voláteis (CaO + MgO)		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Obs: os limites que foram alterados nesta revisão estão hachurados.

Exigências Físicas

Determinações		Limites		
		CH - I	CH - II	CH - III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm (nº 30)	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075mm (nº 200)	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2

Obs: os limites que foram alterados nesta revisão estão hachurados.

Fonte: NBR 7175/03: 2003.

2.2.2.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo ou areia fina é o constituinte inerte das argamassas, de origem mineral, de forma particulada, com diâmetros entre 0,06 e 0,20 mm (NBR 6502:1995). A granulometria do agregado miúdo, Tabela 2.2, tem influência nas proporções de aglomerantes e água da mistura. Desta forma, quando há deficiências na distribuição granulométrica ou excesso de finos, ocorre maior consumo de água de amassamento, reduzindo a resistência mecânica e causando maior retração por secagem na argamassa. Sua constituição mineralógica é composta, quase que essencialmente por grãos de quartzo (SiO_2).

Tabela 2.2 - Distribuição do tamanho das partículas dos materiais argilosos e dos agregados.



Fonte: adaptado de Gomes e Neves (2002).

A granulometria dos agregados miúdos deve ser contínua, levando a uma melhor plasticidade e diminuição da quantidade de pasta a ser usada. Influencia também nos efeitos da retração durante o processo de cura. (SELMO, 1986 *apud* SALVADOR, 2005).

2.2.2.4 Adições

São materiais inorgânicos naturais ou industriais finamente divididos, adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades e cuja quantidade

é levada em consideração no proporcionamento da dosagem, conforme a NBR 13.529:1995.

Dependendo do tipo de massa utilizada, se é pouca ou muito plástica, vai precisar de “adições” para alterar a plasticidade da massa. Tais adições são chamadas de “emagrecedores” ou de “plastificantes”, dependendo do que se quer conseguir, respectivamente, redução ou aumento da plasticidade da massa. Dentre os emagrecedores é comum o uso de areias (MACEDO, 2008), e como adição plástica é usualmente, por ser mais barata, a adição de argilas com mais plasticidade. Essas adições são utilizadas em teores que variam de 5 até 30%, podendo em alguns casos atingir 50% da massa, fazendo com que ele se comporte como um componente da massa formulada.

No caso de material argiloso muito fino, com mais de 50% de passante pela peneira de 63 μm , são claramente argilas aptas para reagir melhor com a cal. Se a porcentagem de finos é menor que 35%, são solos aptos para o cimento. E, como no caso anterior, os materiais argilosos cuja fração fina se encontre entre 35 e 50% serão solos para realizar uma estabilização mista cal e cimento. (TURRI, 2011)

O teor de finos deve ser adequado, uma vez que o excesso destes irá aumentar o consumo de água de amassamento e com isto, levar a uma maior retração de secagem da argamassa. A capacidade de absorção de água da argamassa, condições de cura e capacidade de coesão são fatores que podem regular a perda de água da argamassa durante seu endurecimento e o desenvolvimento inicial de resistência à tração. Quanto mais lentamente a argamassa perder água, melhor será o processo de cura, e tanto melhor será para a resistência mecânica.

Segundo Cristelo (2001), enquanto o cimento constitui um ligante hidráulico capaz, portanto, de aglutinar as partículas argilosas, a cal terá de reagir com essas partículas de modo a poder uni-las. O processo é relativamente lento, onde a cal disponível tem que se difundir através da estrutura da argamassa e atacar e remover a sílica das partículas argilosas, conduzindo, entretanto, a consideráveis ganhos de resistência.

2.2.2.5 Água

A água confere continuidade à mistura, permitindo a ocorrência das reações entre os diversos componentes, sobretudo as do cimento. A água, embora seja o recurso diretamente utilizado para regular a consistência da mistura, faz-se a sua adição até a obtenção da trabalhabilidade desejada, tendo o seu teor de atender ao traço pré-estabelecido e a necessidade de cada elemento de se hidratar para que atenda as reações de endurecimento da argamassa.

Considera-se a água potável como a melhor para elaboração de produtos à base de cimento Portland e cal hidratada. Não devem ser utilizadas águas contaminadas ou com excesso de sais solúveis. Em geral, a água que serve para o amassamento da argamassa é a mesma utilizada para o concreto e deve seguir a NBR NM 137.

A “água de plasticidade” é a quantidade de água necessária para tornar uma argila suficientemente plástica para ser moldada por um determinado método, geralmente por extrusão (neste caso é também chamada “água de extrusão”). Qualquer que seja o tipo de moldagem (plástica, semi-plástica, semi-seca, manual, colagem), quanto mais plástica é uma argila maior é a água de plasticidade e também o limite de plasticidade. A água de plasticidade para moldagem por extrusão é igual ou superior ao limite de plasticidade da mesma argila, porém é inferior ao limite de liquidez (SANTOS, 1989).

2.3 Extrusão de compósito cimentício

Temimi (1998), em seus experimentos utilizando misturas de cimento e argilas montmoriloníticas para serem extrudadas, observou que a melhor mistura é aquela em que a argila montmoriloníticas corresponde a 5%, no máximo, do volume de argila, sendo o restante substituído por argilas cauliniticas. Teores maiores de 5% necessitam de mais cimento para estabilizar o produto, fazendo com que se torne inviável economicamente.

Rossetto (2007), em sua pesquisa sobre extrusão de materiais cimentícios comprovou que a adesão das partículas ocorre em função da “água confinada” que fica entre as partículas nas fases de hidratação do cimento, reduzindo a plasticidade da massa. Acrescentando areia e fibras, bem como utilizando a cal, conseguiu extrusar perfis cimentícios com o formato de “H”.

Numa mistura de solo argiloso, Turri (2011), utilizando misturas com cimento, cal e cimento e cal, extrusou blocos maciços utilizando uma maromba a vácuo de laboratório. A plasticidade, nesse experimento, foi afetada quando se utilizaram, nas misturas, só os aglomerantes. Com a utilização de plastificantes obteve boas extrusões e bons resultados físico-químicos para as peças obtidas. A melhor mistura bem sucedida na extrusão foi a que utilizou 2,0% de plastificante em 18,6% de água e sua massa seca foi de 90,9% de solo e 9,1% de cimento.

Utilizando misturas ternárias de cimento, caulim e areia com a finalidade de extrusar produtos da construção civil com baixo impacto ambiental, Khelifi, *et al.* (2013), estudou várias dosagens de misturas composta pela variação da quantidade de cimento, caulim e areia, sendo um lote umedecido com uma mistura de água com o plastificante (HRWRA) e o outro lote sem o plastificante, foi obtido boas extrusões e valores bem significativos de resistências a compressão e a flexão desses compósitos cimentícios, que após extrudados passaram por uma cura úmida. Como este estudo concentrou-se apenas na escala de argamassa, a mistura contendo uma proporção de massa de 8,5% de cimento, 25,4% de caulim, 50,8% de areia e 18% de água (1:3:6 em massa seca) apresentou resistência a compressão de 9 MPa em cura úmida e 17 MPa em estado seco. Mostrando que esta mistura, com o limite mínimo de cimento, apresentou o melhor compromisso entre o desempenho endurecido e o conteúdo de cimento.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para atingir o objetivo da pesquisa foi previsto a confecção de várias dosagens para confecção de traços. Para a obtenção do material compósito cimentício (argamassa), utilizou-se um gráfico ternário (cimento/argila/areia), onde, variando a quantidade dos componentes secos e a quantidade ideal de água foi obtida varias matrizes, onde se verificava se a massa tinha uma boa extrusão.

3.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados para a produção da massa para ser extrudada (argamassa mista), foram: cimento portland, cal hidratada, argila caulínica, agregado miúdo (areia fina) e água, que serão apresentados a seguir.

3.1.1 Cimento Portland

Dos cimentos, existente no comércio local, optou-se pelo cimento portland CP-IV-32-RS, que é um cimento pozolânico, de baixo calor de hidratação, resistente a sulfato e com resistência aos 28 dias de 32 MPa. As características físico-química foram fornecido pelo fabricante, de acordo com a ABNT NBr 5736:1991, em seu portal com acesso realizado em 12 de setembro de 2017, os dados estão demonstrados na Tabela 3.1 (certificado.mizu.br/cert/mzmn/cp432rs.pdf).

Segundo Mattana Júnior e Costa (2009), em seus experimentos para o estudo do comportamento reológico de argamassa fresca em ensaios de Squeeze Flow, com vários tipos de cimento, constatou que o cimento CP-IV, por ser um cimento mais fino, apresenta uma maior viscosidade devido a sua granulometria e morfologia de suas partículas. Estas características interferem na consistência da pasta, pois intervém no arranjo entre os grãos (partículas) e na quantidade de água absorvida devido à diferença na superfície específica.

Tabela 3.1 - Caracterização química e física do cimento Mizu CP-IV-32-RS

Resultados de ensaios químicos e físicos			
Perda ao fogo	1,87%	ABNT	≤ 4,5
RI	20,42%	ABNT	N.A.
SO ₃	2,21	ABNT	≤ 4,0
CaO (livre)	1,50	ABNT	
<u>Resistência à compressão</u>			
3 dias	15,7 MPa	ABNT	≥10 MPa
7 dias	24,2 MPa	ABNT	≥20 MPa
28 dias	34,4 MPa	ABNT	≥32 MPa
<u>Finura</u>			
Massa específica	2,93 g/cm ³		
Superfície específica (Blaine)	5.164 m ² /kg		
Retido peneira # 200	0,38 %		
Retido peneira # 325	5,09 %		
<u>Pega</u>			
Início	154 min. (2hs e 53 min.)		
Fim	233 min. (3hs e 53 min.)		

Fonte: certificado.mizu.br/cert/mzmn/cp432rs.pdf

3.1.2 Cal hidratada

Como no comércio local não tem as cales hidratadas, do tipo CH-I, CH-II e CH-III, para utilização em argamassas, que são normatizadas pela ABNT, fabricou-se a própria cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a partir de amostras de rocha calcária obtidos no pátio da Fabrica de Cimento Nassau, de propriedade da Itautinga Agro-Industrial SA, situada no polo industrial da Zona Franca de Manaus, oriunda de sua mina situada no município de Urucará-AM. Utilizaram-se, para a obtenção da cal hidratada, os equipamentos do laboratório de pavimentação da UFAM.

3.1.3 Agregado miúdo (areia fina)

O agregado miúdo foi escolhido visualmente, nas lojas locais, onde se procurou uma areia de coloração branca, limpa de impurezas orgânicas, com granulometria não muito grossa, nem muito fina, de origem natural, com composição mineralógica composta, essencialmente, de grãos de quartzo (SiO_2) que são inertes e funcionará como um esqueleto na estrutura da argamassa. A areia não foi caracterizada, por só ser necessário a fração constituída entre o diâmetro maior que $75\mu\text{m}$ e menor que $250\mu\text{m}$, que irá compor a massa, como complemento de controle da plasticidade. Esta escolha se deve a espessura mínima dos septos dos blocos extrudados, definidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO pela Norma: NIE-DIMEL-87, em 6 mm. Sendo, o valor máximo adotado de 4% da espessura das paredes internas, a dimensão que melhor atendeu as necessidades dessa pesquisa

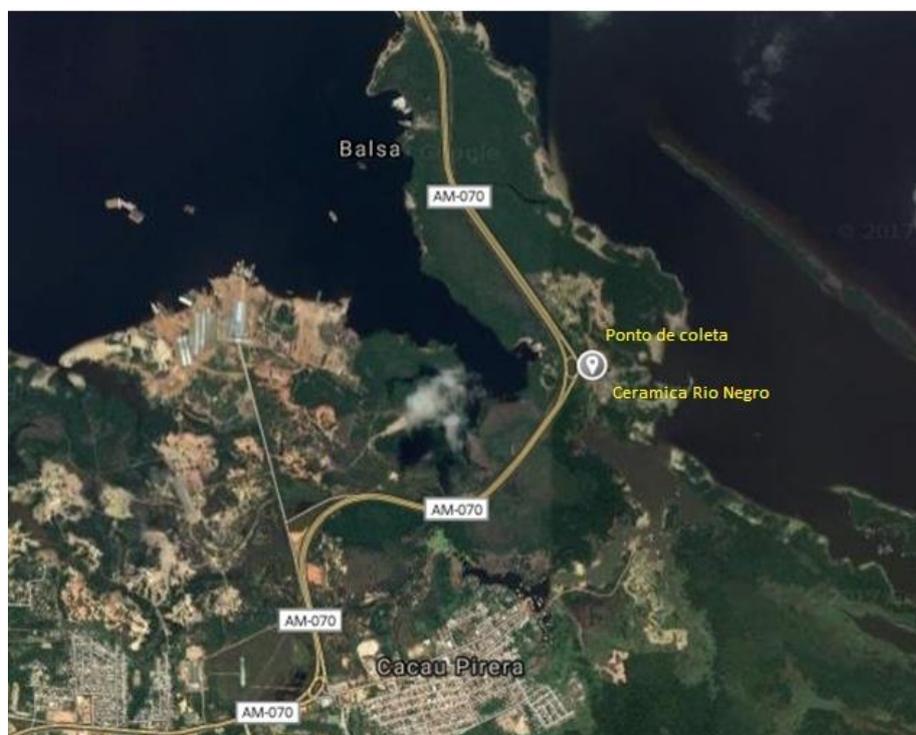
3.1.4 Argila Caulinítica

A amostra foi coletada no pátio de uma indústria cerâmica localizada no Pólo Cerâmico do Iranduba, Distrito do Cacau Pirera, a jazida encontra-se ao lado da indústria, conforme a Figura 3.1. A coleta ocorreu em pontos diferentes e variados, no estoque de matéria prima, próximo a entrada do caixão alimentador, para se obter uma amostra mais uniforme desse material e mais representativa da massa utilizada pela indústria cerâmica, para produzir os blocos cerâmicos. Já que o material na mina apresenta dois níveis bem distintos de material argiloso caulinítico e no pátio este material já se encontram bem misturados, pelo corte, pelo transporte para o estoque e pelo transporte para o caixão alimentador.

Esse material é proveniente da parte aflorante, e intemperizada (saprolizada), de uma camada de argilíto caulinítico da Formação Alter do Chão, como já referenciado no capítulo dois.

Essa amostra argilosa é composta por dois tipos de argila que foram denominadas, por Eleutério *et al*, (2010) como argila Rio Negro Vermelha (RNV) e argila Rio Negro Bege (RNB), uma situada na parte superior e a outra logo abaixo, respectivamente.

Figura 3.1 - Imagem de satélite da localização do ponto de coleta do material argiloso. Coord. UTM: 3.152337 S e 60.078543 W.



Fonte: Google maps/imagem capturada em 10/10/2017

Tendo a camada da argila RNV uma espessura média de 1,00m e a camada da argila RNB uma espessura de uso de, aproximadamente, 2,00m. Essas argilas foram classificadas pelos autores acima citado, como argilas silto-arenosa inorgânica, seguindo o SUCS-Sistema Unificado de Classificação dos Solos. Sendo que a argila RNB é mais plástica que a RNV por apresentar um teor maior de finos (silte + argila) e uma maior superfície específica, como pode ser comprovado pela Tabela 3.2 e 3.3.

Nos ensaios de difração de raios-X (DRX), Eleutério, *et al* (2010) observaram que as duas argilas utilizadas nas composições das massas argilosas são constituídas basicamente dos mesmos minerais, diferindo-se apenas na cristalinidade de cada mineral, esses minerais foram identificados como: caulinita, quartzo e illita.

De um modo geral, o argilomineral caulinita, apresenta as camadas tetraédrica e octaédrica, firmemente ligadas, não permitindo a substituição dos íons

alumínio (Al) e silício (Si) por outros íons e devido a essa capacidade reduzida de troca iônica e de adsorção de água, a caulinita se mostra como um dos argilominerais com menor plasticidade (SUGUIO, 2003).

Tabela 3.2 - Análise granulométrica das argilas *in natura*.

Amostra	Pedregulho %	Areia %	Silte %	Argila %	SUCS
RNV	0,0	22,27	38,60	39,13	CL
RNB	0,0	13,06	42,11	44,83	CL

Fonte: Eleutério, *et al* (2010).

Tabela 3.3 - Análise física das argilas *in natura*.

Amostra	LL %	LP %	IP %	ps (g/cm ²)
RNV	45,00 %	24,80 %	20,20 %	2,707
RNB	47,50 %	21,08 %	26,42 %	2,669

Fonte: Eleutério, *et al* (2010).

3.1.5 Água

A água utilizada foi a fornecida pelo Campus da Universidade federal do Amazonas, coletada no laboratório de pavimentação.

3.2 - Caracterizações físicas e químicas dos materiais

3.2.1 - Cimento Portland

Não foi caracterizado para essa pesquisa. Os dados utilizados foram fornecidos pelo fabricante (certificado.mizu.br/cert/mzmn/cp432rs.pdf) como uma certificação do controle de qualidade do produto, no site da fabrica, filial Manaus, como já citado anteriormente na Tabela 3.1.

3.2.2 Cal hidratada

3.2.2.1 Produção da cal hidratada

A qualidade da cal hidratada é reflexo do processo de fabricação, que compreende a qualidade do minério, a calcinação e a hidratação.

Inicialmente foi feita uma caracterização química das amostras da rocha calcária. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Físico-Químicos (LEM), da Universidade Federal do Amazonas, em um espectrômetro de dispersão de energia de raios-X, modelo Epsilon 3XL, da marca PANALYTICAL, com os seguintes parâmetros:

- . Elemento do anodo do tubo: Ródio;
- . Espessura da janela do tubo: 50 μm ;
- . Potência máxima do tubo de raios-x: 1.500 mW;
- . Tensão máxima: 50 kV
- . Corrente máxima: 3.000 μA .

Em seguida, foi feito o ensaio Termogravimétrico para conhecer o comportamento térmico e definir a temperatura ideal de calcinação dessa amostra de rocha calcária. A análise foi realizada em um equipamento marca TA Instruments, modelo SDT Q600, do LEM.

Para a produção da cal hidratada que foi utilizada nessa pesquisa, as amostras de rocha calcária foram reduzidas a tamanhos menores, aproximadamente 4,0 cm de comprimento, maior medida, e foram acondicionadas no interior da câmara de aquecimento do Forno Mufla, figura 3.2, modelo Q318B21, com 1.700 W de potência e atingindo uma temperatura de serviço de 1.200 °C. No primeiro instante a câmara foi sendo aquecida, gradualmente, a uma taxa de 50 °C/30min, até atingir a temperatura de 800 °C, onde se manteve nesse patamar por 60 horas. Após o desligamento aguardou-se um período de 6 horas, para o esfriamento, para posteriormente, ser aberta a porta da câmara.

Após esfriar, a cal virgem foi colocada em recipiente metálico onde foi sendo acrescida a água, lentamente, e revolvendo até a transformação da cal virgem em cal hidratada. Após a completa transformação, acrescentou-se mais água na cal hidratada para poder peneirá-la na peneira #200 (75 μm), processo por via úmida, para eliminar as partículas de areia e de calcário que não atingiu a calcinação total. Após o processo de peneiramento, o material passante, ficou em decantação por um

período de 24 horas, e em seguida foi drenado o líquido, e o material decantado foi colocado na estufa para secar e após seco foi colocados em sacos plásticos, e hermeticamente fechados.

Figura 3.2: Forno Mufla, marca Quimis, modelo Q318B21.



Foto do autor.

Foram retiradas amostras para a realização de ensaios no espectrômetro de dispersão de energia de raios-X e de ensaios de difratometria de raios-X, para a verificação da eficiência do processo produtivo e da qualidade da cal hidratada produzida.

3.2.2.2 Determinação da finura.

Não foi necessário realizar a determinação da finura, como determina a NBR 9289:2000, já que toda a cal que será utilizada passou pelo peneiramento na peneira #200. Romano, *et al* (2014), demonstra que a cal fina, apresenta taxas de aglomeração mais rápidas. Quanto mais hidróxido de cálcio, maior é a superfície específica do aglomerante e maior teor de ligante na composição.

3.2.2.3 Determinação da massa unitária

Foram pesadas três amostras, de 50 gramas cada, sendo cada colocada dentro de uma proveta de 100 mililitros e medido o volume que ocupa cada amostra. Depois se calculou a relação entre massa e volume, e calculada a média entre as medidas obtidas.

3.2.2.4 Determinação da massa específica

Foi utilizada a NM 23:2.000 para a determinação da massa específica da cal hidratada produzida.

3.2.2.5 Determinação da retenção de água

Para a realização desse ensaio foi utilizado um procedimento não normatizado, adotado por Paiva *et al.* (2007), para prever a quantidade de água que é incorporada pela cal hidratada. Propriedade essencial para a utilização em argamassas. Foram pesadas duas amostras, de 50 gramas cada, de cal hidratada e transferida para uma proveta de 250 mililitros cada, em seguida foram adicionados 100 mililitros de água destilada em cada amostra e homogeneizada com o auxílio de um bastão de vidro. Foi lido e anotado o volume inicial ocupado pela mistura e deixado em repouso para decantação. Ao atingir o tempo de 25 minutos de repouso foi feita a primeira medida da parte líquida que deixava de se incorporar a cal, outras medidas foram realizadas para o tempo de 60, 90 e 150 minutos.

3.2.2.6 Determinação da quantidade de dióxido de carbono (CO₂) por descarbonatação ácida

Para esse ensaio, também foi utilizado, uma metodologia alternativa mais simples e com a mesma precisão da NBR 6473:2003, idealizada e testada por Paiva *et al.* (2007). Essa determinação serve para mostrar se a cal foi bem calcinada, durante sua produção, ou se houve algum processo de carbonatação pelo contato com o dióxido de carbono do meio ambiente, que ocorre de uma forma mais lenta.

Foi pesado 20 gramas de uma amostra de cal hidratada e colocado em um frasco de Erlenmeyer, em seguida, pesou-se um volume de 25 mililitros de ácido

clorídrico (HCl), de concentração 50%, em um Becker. Pesou-se, novamente, todo o conjunto junto com um bastão de vidro. Em seguida o ácido é, lentamente, adicionado à cal, e com o auxílio do bastão de vidro a mistura é homogeneizada. É preciso aguardar o tempo necessário para que a reação (exotérmica) se processe e a temperatura retorne à ambiente. Esse tempo dura aproximadamente 10 minutos. Após essa etapa, é pesado todo o conjunto e a massa de CO₂ é determinada pela diferença existente entre as pesagens inicial e final (PAIVA *et al.*, 2007).

3.2.3 – Agregado miúdo (areia fina)

A areia coletada foi seca na estufa a uma temperatura de 110 °C e peneirada utilizando as peneiras de #60 (0,25mm) e a de #200 (0,075mm) , sendo descartado o material, retido na primeira peneira e o passante na segunda peneira, respectivamente. Isolando a fração de areia fina. Após esse peneiramento, foi realizado outro peneiramento seletivo, com as peneiras, #100 e #140, e reservado separadamente.

Foram feitas misturas entre as frações separas e foram bem homogeneizadas no misturador mecânico. Para cada mistura das frações, foram feitos os cálculos do volume de vazios, para determinar a de menor valor, que será utilizada na composição do material compósito.

Para a determinação dos vazios foi utilizado o frasco de Le Chatelier. As frações de areia foram pesadas conforme cada mistura, e colocadas em uma proveta para medir-se o volume da massa. No frasco de Le Chatelier colocou-se água destilada, e leu-se o volume. Adicionou-se lentamente a areia no frasco e anotou-se a segunda leitura, que corresponde ao volume deslocado pelas partículas solidas. O volume de vazios foi definido como a diferença entre o volume seco e o volume do liquido deslocado no frasco, demonstrado pela equação 3.1, abaixo:

$$Vv = \frac{V_s - V_{ld}}{V_s} * 100 \quad \text{Equação (3.1)}$$

Onde:

Vv = volume de vazios, em %;

V_s = volume da mistura das parcelas da areia, em cm^3 ;

V_{ld} = volume líquido deslocado, em cm^3 .

3.2.4 Argila caulínica

3.2.4.1 Determinação da granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado conforme a norma NBR-07181:1984. Utilizou-se também o manual da M-CIENTEC C-019.

- I) Preparação da Amostra
- II) Execução do ensaio de granulometria
 - a) Peneiramento Grosso (material retido na peneira #10);
 - b) Peneiramento Fino (material que passa na peneira #10) e
 - c) Sedimentação

3.2.4.2 Determinação dos limites de consistência

Limite de liquidez

A execução do ensaio seguiu as determinações da NBR 6459:1984.

Limite de plasticidade

A execução do ensaio foi efetivada conforme a NBR 7180:1984.

Índice de plasticidade

Determinado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

3.2.4.3 Umidade higroscópica

O ensaio para determinação da umidade higroscópica foi realizado conforme a norma NBR-6457:1986.

3.2.4.4 Umidade de conformação por extrusão adotada pela indústria cerâmica

Foram coletados cinco blocos verdes, saindo da boquilha da maromba e cortados pela cortadeira, e colocados em sacos plásticos. Nesse processo de

acondicionamento, foi diminuída a quantidade de ar, dentro da embalagem para que as amostras sofressem o mínimo possível a perda de água de amassamento da massa extrudada, durante o transporte.

No Laboratório da Pavimentação, da Ufam, foram retiradas pequenas amostras e calculado a umidade de conformação adotada pela empresa. As amostras foram pesadas numa balança de precisão (0,0001g), depois secas em estufa a 110 °C por um período de 24 horas. Posteriormente foram retiradas e secas no desumidificador e ao atingir a temperatura ambiente foram pesadas. Para a determinação da umidade de conformação adotou-se o procedimento da M-CIENTEC C-020, oriundo da NBR 6457:1986, que foi determinada usando a equação 3.2, abaixo:

$$U_c = \frac{(M_u - M_s)}{M_u} \times 100 \text{ (\%)} \quad \text{Equação (3.2)}$$

Onde:

U_c – umidade de conformação (%);

M_u – massa úmida (g);

M_s – massa seca (g).

3.2.4.5 Determinação da massa específica

Foi utilizado a NBR 6508:1984 e o método de ensaio do DNER – ME 93/94, para a determinação da massa específica.

3.2.4.6 Ensaio de espectrometria por dispersão de energia de raios-X

A determinação da composição química da amostra foi realizada pelo Laboratório de Ensaio Físico-Químicos (LEM), em um espectrômetro de dispersão de energia de raios-X, modelo Epsilon 3XL, da marca PANALYTICAL. Inicialmente a amostra foi seca, desagregada e passada pela peneira #100, para a eliminação dos grãos maiores, pertencentes às classes de areia média e grossa.

3.3 Estabelecimento das dosagens e produção de corpos de provas

3.3.1 Planejamento experimental

O teor mínimo de cimento para utilização nessa pesquisa foi coletado na literatura, em torno de 10% (KHELIFI, 2013), e para o teor máximo de cimento, foi estabelecido um teor de 20%, baseado no fator econômico, onde se procurou encontrar nessa faixa, uma boa resistência mecânica e viabilidade econômica para a produção de blocos prismáticos de vedação extrudados, com paredes e septos esbeltos.

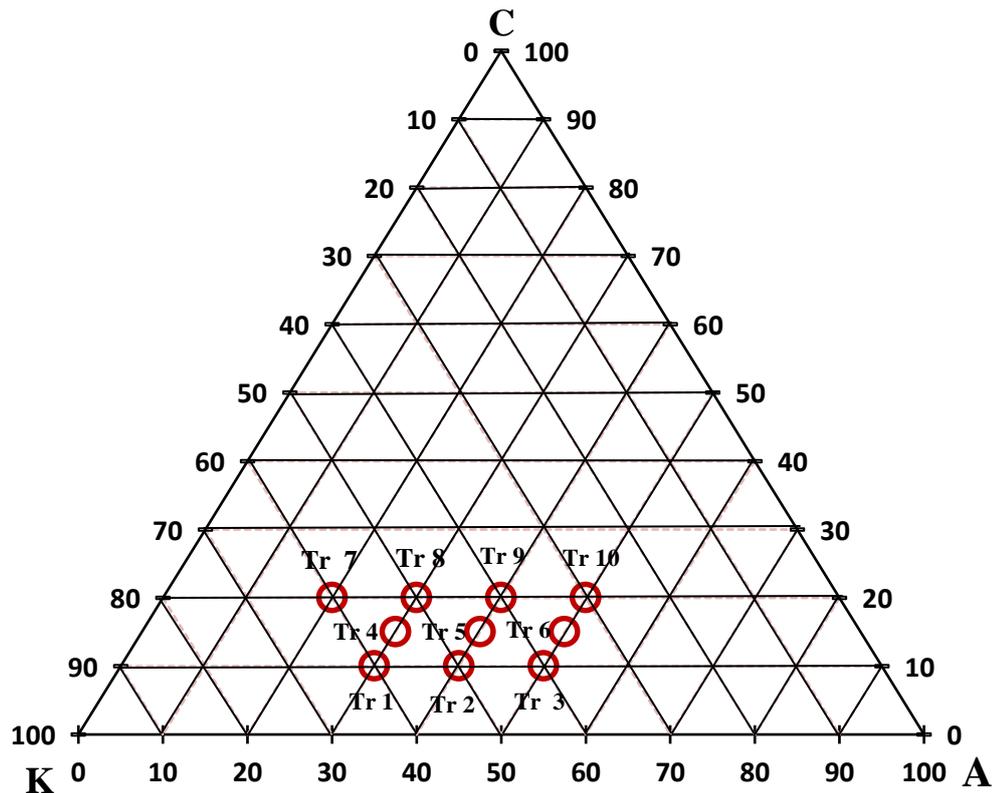
A quantidade de areia fina foi definida pela observação do produto extrudado que apresentou a melhor característica, sendo delimitado o valor máximo de 50% de areia fina, composta por 60% de areia retida na peneira #140 (110 μm) e 40% de areia retida na peneira #200 (75 μm), que apresentou boa extrusão e boa coesão, e com este valor máximo do teor de areia evitar-se-á, também, o desgaste por abrasão, das máquinas utilizadas para a extrusão. Foi nessa faixa granulométrica que se obteve a menor quantidade de vazios.

Quanto ao material argiloso foi definida a quantidade máxima de 60%, já que quanto maior a presença de material argiloso no cimento, menor será a sua resistência a compressão, sendo necessário um acréscimo na quantidade de cimento para se obter uma melhor resistência. A presença da caulinita aumenta as reações entre os componentes anidros do cimento e água no estágio de hidratação, formando vários minerais, tais como: calcita, etringita e portlandita (DAO *et al.* 2018).

Dê posse desses dados, foram plotadas os pontos no gráfico ternário na Figura 3.3, onde foram definidos 10 traços básico utilizando só cimento como aglomerante e mais 10 traços com cimento e cal hidratada como aglomerantes. Nesse segundo grupo de traços, se fixou a quantidade da massa da cal hidratada em 50% do valor da massa do cimento, sendo sua presença necessária para melhorar a plasticidade do material compósito. Para os traços básico, utilizando o cimento como aglomerante, foi dado a sigla "Tr" e para identificação dos traços que utilizam cimento e cal hidratada, como aglomerantes, foi designada a sigla "TrC".

Os pontos correspondentes as relações, em massa seca, de cimento/argila caulínica/areia, foram plotados no gráfico ternário, constituindo assim as dosagens planejadas para esse trabalho, que estão discriminados nas Tabelas 3.3 e 3.4.

Figura 3.3 - Diagrama ternário com a posição dos traços básico de cimento (C): argila caulínica (K): areia (A), com as respectivas siglas. Baseado em Khelifi *et al*, 2013.



3.3.2 Preparação do compósito cimentício

O cimento CPIV-32-RS foi pesado conforme cada traço.

Para aumentar a plasticidade foi utilizada a cal hidratada, que também atua como um veículo de umidade, auxiliando na hidratação dos grãos de cimento, já que não utiliza a água para o seu endurecimento. Porém, para a sua utilização teve-se que pesar o necessário para cada traço, e deixá-la dissolvida em água, por um período de 24hs (Figura 3.4). Inicialmente foi utilizada a quantidade de água do traço similar, anteriormente realizado (só com cimento), para por a cal imersa em água; após utilizar essa mistura (água/cal hidratada) no traço, foi sendo acrescida mais

água, de acordo a necessidade, para poder-se atingir a plasticidade de conformação.

Tabela 3.4 Tabela das relações, em massa seca, dos traços básicos de cimento:argila:areia

Ident. Traço	Cimento (%)	Material argiloso (%)	Areia (%)
Tr - 1	10	60	30
Tr - 2	10	50	40
Tr - 3	10	40	50
Tr - 4	15	55	30
Tr - 5	15	45	40
Tr - 6	15	35	50
Tr - 7	20	60	20
Tr - 8	20	50	30
Tr - 9	20	40	40
Tr - 10	20	30	50

A argila caulínica foi seca ao tempo, desagregada e passada pela peneira #100, buscando desagregar o máximo possível as lamelas dos argilominerais e eliminando as partículas grosseiras retidas na peneira.

A areia fina, já preparada, foi adicionada como elemento inerte para a constituição do esqueleto da argamassa. Melhorando o fluxo do material extrudado.

Não foi necessário pesar a água, já que ela foi sendo utilizada conforme a necessidade de umedecimento da massa ate atingir a plasticidade de conformação.

Tabela 3.5 Quadro das relações, em massa seca, dos traços selecionados de cimento:cal:argila:areia

Ident. Traço	Cimento (%)	Cal Hidr.(%)	Material argiloso (%)	Areia (%)
TrC – 1	9,52	4,76	57,14	28,57
TrC – 2	9,52	4,76	47,62	38,09
TrC – 3	9,52	4,76	38,09	47,62
TrC – 4	13,95	6,98	51,16	27,91
TrC – 5	13,95	6,98	41,86	37,21
TrC – 6	13,95	6,98	32,56	46,51
TrC – 7	18,18	9,09	54,54	18,18
TrC – 8	18,18	9,09	45,45	27,27
TrC – 9	18,18	9,09	36,36	36,36
TrC – 10	18,18	9,09	27,27	45,45

Figura 3.4 – Cal hidratada dissolvida em água.



Foto do autor

3.3.3 Produção dos corpos de prova

Para a produção dos corpos prismáticos extrudados, foi utilizada uma maromba laboratorial de fabricação da MAQUINAS MAN – Um conjugado com misturador, laminador, extrusora e cortador manual, tudo em um só conjunto acionado com um só motor de 1,0 HP. O diâmetro do caracol mede 40 mm. Acompanha sistema de vácuo de ½ HP. Representando, desta forma, todo o processo de uma indústria cerâmica, conforme as Figuras de 3.5 a 3.8. Esse conjunto está instalado no LabPav da UFAM.

Após terem sido definidos os traços deram-se início a produção de corpos de provas prismáticos extrudados e cilíndricos.

Para a produção da argamassa, fez-se uma proporção do traço escolhido, em massa seca, adequando-o a capacidade da cuba do misturador mecânico de eixo vertical, Figura 3.9, que é de 2.000 gr. Em seguida, mede-se a massa de cada componente em uma balança de precisão e vão sendo colocados na cuba. Aciona-se o misturador mecânico para homogeneizar a massa seca durante 3 minutos, em seguida foi desligada, a massa foi revolvida com uma espátula, e retorna-se ao funcionamento do misturador mecânico por mais 2 minutos. Após esse processo, adiciona-se lentamente a água e/ou água de cal hidratada, com o misturador mecânico em funcionamento, até atingir a consistência de “massa de modelar”, que leva em media 5 minutos.

Para cada mistura já umedecida, procura-se identificar, por processo visual e tátil, a consistência e a plasticidade ideal para a extrusão da massa. No processo visual, é verificado se a massa tem uma consistência próxima a de uma “massa de modelar”. Esta consistência é confirmada pelo processo tátil, que consiste em separar um pedaço da massa produzida em uma mão e pressionar o centro desta com o polegar da outra mão em movimento rápido e verificar se a superfície gerada pelo deslizamento abrupto do dedo é lisa e sem rachaduras, caso isso ocorra a massa esta apta para a extrusão (TURRI, 2011).

Figura 3.5 - Conjunto misturador, laminador, extrusora e cortadeira.



Foto do autor.

Figura 3.6 - Foca com embudo cônico.



Foto do autor.

Figura 3.7 - Saída do misturador.



Foto do autor.

Figura 3.8 - Laminador de rolo.



Foto do autor.

Ao se iniciar o umedecimento da massa foi apontada a hora, para controle do tempo de pega do cimento, ficando o tempo de manuseio de cada traço em torno de uma hora, entre o início do umedecimento e a extrusão final dos corpos de prova.

Em seguida a massa foi transportada para o laminador, onde após passar 5 vezes, é observada a necessidade de acrescentar, ou não, mais água na massa. Nesse processo também ocorre uma melhoria na homogeneização, já que as partículas são comprimidas umas sobre as outras. Fazendo com que ocorra uma melhor distribuição da umidade entre as partículas.

Com a massa apresentando uma boa plasticidade, ela é colocada na extrusora já em funcionamento e é ligada a bomba de vácuo. Caso o material não apresente uma extrusão adequada, por falta ou por um excesso de umidade, o material retorna ao laminador para ser novamente umedecido ou retirado o excesso de umidade e homogeneizado, mais uma vez. Retornando a extrusora, ele é extrudado através de um orifício retangular, molde, com 11,5 mm de altura e 16,1 mm de largura e cortado na cortadeira, formando os corpos prismáticos de 60 mm de comprimento. Os corpos cilíndricos, com 16 mm de diâmetro e 32 mm de altura, conforme determina a NBR 5738:2003, que a altura deve ser igual a duas vezes o diâmetro, e foram moldados pelo preenchimento, em formas de PVC, com a massa extrudada, em três camadas, com a mesma espessura, e compactada com um bastão, com cinco golpes cada. Foram adotadas essas dimensões para os corpos

de provas cilíndricos em virtude da dimensão da prensa existente no laboratório de pavimentação.

Figura 3.9: Misturador mecânico de eixo vertical.



Foto do autor

Para cada traço foram preparados 15 corpos de prova prismáticos e 9 corpos de prova cilíndricos.

3.3.4 Determinação da quantidade de água necessária para a extrusão dos traços

Após a extrusão de cada traço, e que apresentou uma extrusão aceitável, foram coletadas três amostras para determinar a umidade de plasticidade (conformação) necessária para a extrusão do referido traço.

As amostras foram coletadas, colocadas em cápsulas de alumínio, pesadas e colocadas na estufa a 110°C. Após 24 horas, foram retiradas, colocadas no dessecador para esfriar, por 30 minutos, e pesadas. A diferença é a umidade de conformação.

3.3.5 Cura dos corpos de provas

Para todos os traços, o processo de cura úmida teve início logo após a sua produção. Para os corpos de prova produzidos com o cimento, como aglomerante, foram acondicionados em bandeja forrados e cobertos com tecidos de algodão, e umedecidos por um período de 24 horas. Os corpos cilíndricos foram desenformados e, junto com os prismáticos foram imersos em água, em temperatura ambiente, por períodos de 7, 14 e 28 dias.

Para os corpos de provas que tiveram como aglomerante o cimento e a cal hidratada, adotou-se o mesmo processo inicial de cura, porém esses corpos não ficaram submersos em água, continuaram nas bandejas, no ambiente do laboratório, sendo diariamente umedecidos, até completar os períodos pré-estabelecidos para a cura.

3.4 Ensaios de caracterização das resistências mecânica dos corpos de prova

3.4.1 Determinação da resistência à compressão – corpos cilíndricos

Para esse ensaio foi utilizado a Prensa CBR/ISC, elétrica, com anel dinamométrico com capacidade de 500 kgf. e um relógio extensômetro analógico com capacidade para leituras até 10 mm/0,01mm, figura 3.10/A, com velocidade de avanço de 1,92 mm/min., do laboratório de pavimentação da UFAM, onde foram realizados os teste de resistência à compressão dos corpos de prova.

Após serem retirados do ambiente de cura, os corpos de prova foram secos e medidos utilizando um paquímetro analógico.

Foram centralizados na prensa e aplicada a força necessária até ocorrer a ruptura do corpo de prova, figura 3.10/B. Para se conhecer a força de ruptura, foi utilizada a equação 3.3 de transformação, com as constantes de deformação do anel, em milímetros, para força aplicada em kgf.

$$Fac = 223,8 * d - 0,137 \quad \text{Equação (3.3)}$$

Onde:

Fac = Força aplicada, kgf.;

d = deformação do anel, mm.

O módulo da tensão de ruptura a compressão foi dado pela equação 3.4:

$$\sigma = \frac{F_{ac}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad \text{Equação (3.4)}$$

Onde:

σ = tensão de ruptura a compressão, MPa;

F_{ac} = Força de compressão aplicada, N;

d = deformação do anel, mm.

Figura 3.10 Prensa CBR/ISC, com anel dinamométrico de 500 kgf. e um relógio extensômetro (A), detalhe do rompimento do corpo de prova (B).



(A)



(B)

Fotos do autor.

3.4.2 Determinação da tensão de ruptura à flexão – corpos prismáticos

Para esse ensaio foi utilizado o método do M. CIENTEC C – 027:1995 que determina o módulo de ruptura de materiais cerâmicos.

Para esse ensaio foi utilizado uma prensa CBR/ISC, já citada anteriormente, porém com anel dinamométrico com capacidade de 50 kgf. e um relógio extensômetro analógico com capacidade para leituras até 10 mm/0,01mm onde foram realizados os teste da tensão de ruptura à flexão, Figura 3.11.

Utilizou-se um suporte com dois apoios, nos extremos, em forma de cutelo, distantes entre si de 40 milímetros, e um cutelo preso ao anel dinamométrico para aplicação da força no centro da peça prismática, detalhes na Figura 3.12. Para se conhecer a força de ruptura, foi utilizada a equação 3.5 de transformação, com as constantes de deformação do anel, em milímetros, para força aplicada em kgf.

$$Faf = 11,21 * d + 0,884 \quad \text{Equação (3.5)}$$

Onde:

Faf = Força aplicada, kgf.;

d = deformação do anel, mm.

O módulo da tensão de ruptura a flexão é dado pela equação 3.6:

$$TR = \frac{3 * P * L}{2 * a^2 * b} \quad \text{Equação (3.6)}$$

Onde:

TR = tensão de ruptura, MPa;

P = Carga atingida no momento da ruptura, em Newton, N;

L = distância entre os dois apoios, cm;

a = altura do corpo de prova, cm;

b = largura do corpo de prova, cm.

Figura 3.11 Prensa CBR/ISC, com anel dinamométrico de 100 kgf. e um relógio extensômetro. Com suporte em forma de cutelo.



Foto do autor.

Figura 3.12 – Detalhe da prensa, realizando teste de resistência a ruptura, com apoio em três pontos.



Fotos do autor.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Cal hidratada

4.1.1 Produção da cal hidratada

Com os resultados da caracterização química da amostra da rocha calcária pode-se verificar que sua composição é essencialmente calcítica. Na Tabela 4.1, observa-se um valor muito alto de CaO (89,52%) e um valor muito baixo de MgO (0,97%).

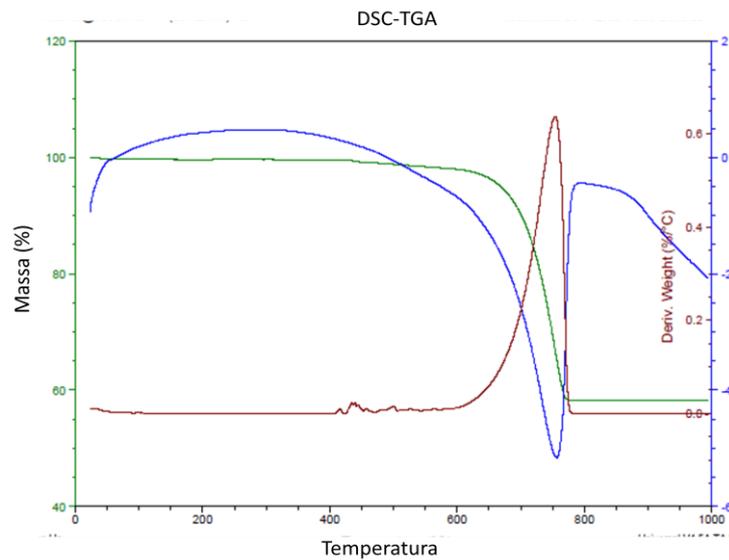
Tabela 4.1 - Constituição química estimada do calcário e da cal hidratada, em óxidos

Óxidos (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	F ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅
Calcário Jatapu	89,52	5,29	1,65	0,97	0,92	0,53	0,49	0,27
Cal hidratada	89,40	5,52	1,88	1,33	0,75	0,53	0,06	0,26

Observando o gráfico de DSC-TGA, Figura 4.1, constata-se que a temperatura ideal para a descarbonatação desta rocha calcária inicia-se em torno de 650 °C e termina em 770 °C. Pelo patamar inicial da curva da TGA pode-se concluir que não existe nenhum teor de dolomita [Ca.Mg(CaCO₃)], fato verificado por não apresentar perda de massa na temperatura em torno de 400 °C, bem como, nenhuma manifestação térmica com picos endógenos relevante nessa temperatura, mostrada na curva de DSC. Confirmando que a presença do óxido de magnésio é uma impureza nessa rocha.

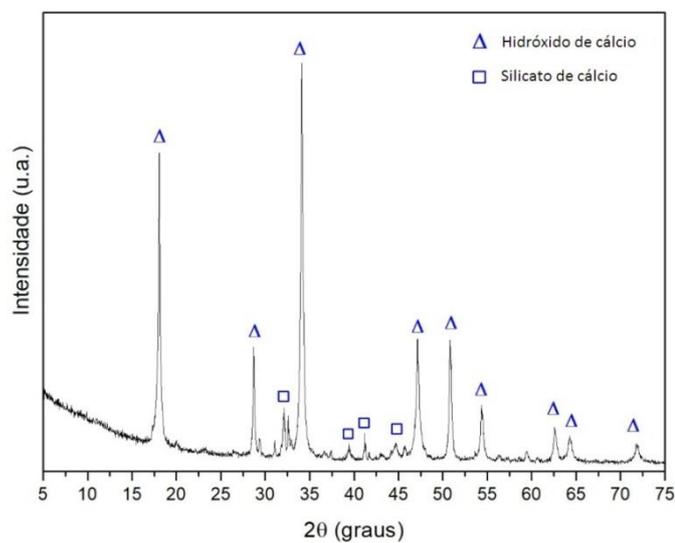
Após o processo de calcinação e de hidratação, constatou-se que o teor de CaO continuou, praticamente, o mesmo (89,40%) e o teor de MgO (1,33%) teve um aumento insignificante (Tabela 4.1). Estes valores foram confirmados pelo ensaio de DRX, Figura 4.2, que mostrou que a cal hidratada é quase que completamente constituída de cristais de hidróxido de cálcio (portlandita) e de poucos cristais amorfos de silicato de cálcio.

Figura 4.1 – Curvas de TG/DTG/DTA da rocha calcária



Legenda: Verde TG, azul DTG e vermelha DTA

Figura 4.2 – Difratoograma de raios – X da cal hidratada.



Para a avaliação da cal hidratada usada nessa pesquisa, foi adotado, o que prescreve a NBR 7175:2003, onde estão definidos os valores limites especificado, para cada tipo de ensaio necessário para a utilização da cal hidratada. Os resultados obtidos na caracterização da cal hidratada estão mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados das análises determinadas nas amostras da cal hidratada.

Ensaio	Unidade	Resultado obtido
Finura P (#200)	%	0,00
Massa unitária	g/cm ³	0,37
Massa específica	g/cm ³	2,39
Retenção de água	%	94,35
CO ₂	%	6,60

A finura da cal utilizada esta dentro das especificações normatizada pela NBR, acima citada, já que o material beneficiado foi peneirado na peneira P#200, e o material passante é o que foi usado na pesquisa.

A massa unitária foi calculada pela divisão da massa da amostra pelo volume ocupado na proveta, pela Equação 4.1.

$$\text{Mu} = (\text{Ma}/\text{Va}) \times 100 \quad (\text{g}/\text{cm}^3) \quad \text{Equação (4.1)}$$

$$\text{Mu} = (50/134) \times 100 = 0,37 \text{ g}/\text{cm}^3.$$

Onde:

Mu = massa unitária;

Ma = massa da amostra e

Va = volume da amostra

A massa específica encontrada para a cal hidratada, após os ensaios utilizando o frasco de Le Chatelier e o querosene como veículo líquido, foi de 2,393g/cm³. Vale ressaltar que foram necessários apenas 45,95g da cal hidratada para atingir o nível ideal dentro do frasco de Le Chatelier.

A cal produzida, por ter uma granulometria muito fina, faz com que ocorra uma homogeneização mais eficaz da água, apresentado uma alta retenção de água. Para o período de 25 minutos apresentou uma redução de 1,21% (retendo 98,79%) e no período de 150 minutos apresentou uma redução de 5,64% (retendo 94,36%). Para a cal hidratada, do tipo CH-I, o valor para a retenção de água tem que ser maior ou igual a 70% e o valor encontrado nessa pesquisa foi de 94,36%, se situado bem acima do limite da norma.

O resultado da quantidade do teor de CO₂ existente na cal hidratada produzida foi de 6,60%, tal valor mostra que ela esta dentro dos limites para a utilização, conforme o estabelecido pela norma, que é menor ou igual a 15%.

(Com esses dados pode-se afirmar que o intento de produzir cal hidratada na Amazônia é viável, principalmente com as rochas calcária oriunda da Formação Itaituba, situada na borda norte da Bacia Amazônica, no município de Urucará, no estado do Amazonas.)

4.2 Agregado miúdo (areia fina)

A mistura de areia que apresentou o menor volume de vazios foi a constituída por 60% de areia retida na peneira #140 (110 µm) e 40% de areia retida na peneira #200 (75 µm). Para esta mistura foi encontrado o volume de vazios correspondente a 35,13%. Com esse valor teremos uma menor quantidade de massa entre os grãos de areia e não comprometera a extrusão.

4.3 Argila Caulinítica

4.3.1 Granulometria

Na Tabela 4.3 estão indicados os resultados da granulometria da amostra.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos, a amostra se enquadra no grupo dos materiais finos, onde a maioria dos grãos possuem diâmetros inferiores a 0,074 mm, denominado de Argilas silto-arenosa inorgânica de baixa plasticidade, ratificando, assim, os resultados obtidos por Eleutério *et al* (2010).

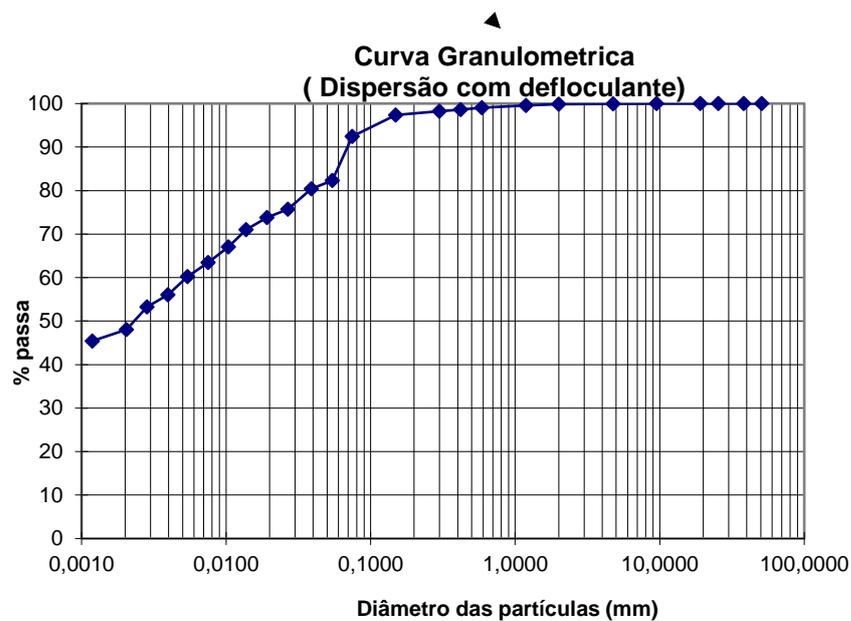
De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos, a amostra se enquadra no grupo dos materiais finos, onde a maioria absoluta dos grãos possuem diâmetros inferiores a 0,074 mm, denominado de Argilas silto-arenosa inorgânica de baixa plasticidade, ratificando, assim, os resultados obtidos por Eleutério *et al* (2010).

Tabela 4.3 - Resultado de análise granulométrica

Análise granulométrica da amostra (%)						
Argila	Silte	Areia			Pedregulho	
		Fina	Média	Grossa		
47,17	38,77	11,90	1,36	0,65	0,17	
		0,002mm	0,06mm	0,2mm	0,6mm	2,0mm

No gráfico da Figura 4.3, onde se tem a curva granulométrica, pode-se constatar que a massa argilosa, nos intervalos correspondentes as frações argila e silte, têm uma distribuição contínua.

Figura 4.3 - Curva de distribuição granulométrica de tamanho das partículas da amostra.



4.3.2 - Limites de consistência

Os resultados obtidos com os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, para a amostra em estudo, estão indicados na Tabela 4.4.

O índice de plasticidade obtido está dentro da classificação de argilas plásticas com características aceitáveis para serem extrudadas. Os limites do índice de plasticidade para uma extrusão aceitável ficam entre 10 e 34%, já o limite de

plasticidade ficam entre os valores de 18 e 31%. Esse índice indica a maior ou menor plasticidade, que uma argila apresenta conforme a sua umidade.

Tabela 4.4 – Índices de consistência da argila caulínica

Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
52,25	32,93	19,32

4.3.3 Umidade higroscópica

O valor encontrado para a umidade higroscópica é de 11,75%. Esse ensaio foi realizado para poder avaliar a quantidade de água, servindo como parâmetro para delinear a quantidade de água necessária para extrudar essa massa argilosa.

4.3.4 Umidade de conformação por extrusão

Corresponde a umidade adotada pela olaria para a conformação por extrusão da massa argilosa. O valor encontrado corresponde a 33,2% de umidade. Com esse valor pode-se inferir a quantidade mínima de água que foi necessária para a conformação do compósito cimentício. Podendo, assim, estimar a quantidade de água necessária para que o sistema possa atingir uma boa plasticidade e coesão.

4.3.5 Massa específica

O resultado obtido para massa específica da amostra foi de $\rho = 2,63 \text{ g/cm}^3$.

4.3.6 Ensaio de espectrometria por dispersão de energia de raios-X

A determinação da composição química das amostras foi realizada por espectrometria por dispersão de energia de raios-X, do LEM – UFAM, e os resultados estão listados da tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Composição química da argila caulinítica

Composto	Concentração (%)
SiO ₂	61,78
Al ₂ O ₃	28,30
Fe ₂ O ₃	6,55
K ₂ O	1,50
TiO ₂	0,89
MgO	0,34

Como se pode observar, na Tabela 4.5, a somatória dos teores dos óxidos SiO₂ e Al₂O₃ atingem um total de 90,08%, justificando que esses valores são possivelmente originados dos argilominerais e sílica livre presente na amostra. O que justifica sua utilização na fabricação de cerâmica vermelha, onde o teor de SiO₂ é menor que 62% e o teor de Al₂O₃ é maior que 20%, segundo Riker e Horbe (2007).

Esse resultado mostra que os constituintes mineralógicos dominante na amostra coletada são caulinita e grãos de quartzo. Fato esse confirmado por Eleutério *et al.* (2010), que analisando uma amostra coletada na mesma região, e realizando ensaio de difração de raios-X (DRX), constatou-se que essa argila é constituída de caulinita, quartzo e traços de illita. Sendo, portanto, ideal para aplicação nessa pesquisa, já que a caulinita é um dos argilomineral que pouco se expandi, quando umedecida, mas adquire plasticidade suficiente para ser utilizada pelo processo de extrusão.

4.4 A demanda de água necessária para a extrusão de cada traço

A quantidade de água para que cada traço flua de maneira plástica e coesa, pela boquilha da extrusora, está demonstrada na Tabela 4.6/A, e depende basicamente de sua relação. Observa-se que à medida que se aumenta a quantidade de areia nos traços diminui a necessidade de água, numa relação inversa. Enquanto que a relação com a argila é diretamente proporcional, à medida que se aumenta a quantidade de material argiloso, aumentando a superfície específica, aumenta-se a exigência de água para atingir a plasticidade de conformação por extrusão.

Quando se incluiu a cal hidratada, observou-se que ocorre um acréscimo na quantidade de água necessária para a amostra ser extrudada, está demonstrada na Tabela 4.6/B. Com a cal hidratada ocorreu as melhores extrusões, como exemplo, pode-se observa na Figura 4.4 correspondente ao traço TrC – 7.

Tabela 4.6: Umidade de conformação dos traços. A) traço com cimento e B) traços com cimento e cal

Traço (%)		Traço com cal (%)	
Tr - 1	22,27	TrC - 1	24,55
Tr - 2	20,24	TrC - 2	23,14
Tr - 3	18,22	TrC - 3	17,93
Tr - 4	22,02	TrC - 4	23,19
Tr - 5	19,00	TrC - 5	20,19
Tr - 6	16,12	TrC - 6	16,83
Tr - 7	23,50	TrC - 7	24,88
Tr - 8	21,06	TrC - 8	22,23
Tr - 9	18,62	TrC - 9	19,92
Tr - 10	N	TrC - 10	19,01

(A) (B)

Figura 4.4 – Extrusão do traço TrC-7 (cimento, cal, argila e areia).



Foto do autor.

4.5 Resultados de caracterização mecânica dos corpos de provas

4.5.1 Resultados da resistência à compressão – corpos cilíndricos

As variações de resistência à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos, confeccionado com as variações ternárias de cimento:argila:areia ou com cimento:cal:argila:areia, que passaram por cura imersa (cimento:argila:areia) e úmida (cimento:cal:argila:areia), podem ser vistas nas Tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7 - Resultado da resistência a compressão, dos corpos de prova sem cal, rompidos em 7, 14 e 28 dias.

Esforço	CP	Traço (%) (C:K:A)	7 dias (MPa)	DP	14 dias (MPa)	DP	28 dias (MPa)	DP
Compressão	Tr - 1	10:60:30	2,34	0,11	3,29	0,38	3,72	0,77
	Tr - 2	10:50:40	2,69	0,50	4,08	0,06	4,82	0,44
	Tr - 3	10:40:50	2,69	0,53	3,47	0,37	3,79	0,55
	Tr - 4	15:55:30	2,76	0,11	3,97	0,59	4,93	0,54
	Tr - 5	15:45:40	3,83	1,03	5,21	0,18	5,43	0,64
	Tr - 6	15:35:50	2,58	0,40	3,54	0,65	5,21	0,18
	Tr - 7	20:60:20	4,04	0,28	6,21	0,62	6,53	0,46
	Tr - 8	20:50:30	5,46	0,96	6,92	1,44	10,08	0,81
	Tr - 9	20:40:40	8,73	0,37	11,78	0,95	12,49	0,44
	Tr - 10	20:30:50	N		N		N	

Legenda:

CP – corpo de prova
C – cimento

DP – desvio padrão
K – argila

Tr – traço
A – areia fina

N – não realizado

Para os traços contendo 10% de cimento, em massa seca, representado pelos corpos de provas Tr-1, Tr-2 e Tr-3 observou-se que os valores variaram entre 2,34MPa (Tr-1), no período de 7 dias de cura como sendo o menor valor, e 4,82MPa (Tr-2), no período de 28 dias de cura, como máximo valor para a faixa. No traço Tr-3, constatou-se que com o aumento da porcentagem de areia no traço ocorre uma diminuição na resistência a compressão axial.

A faixa com teor de 15% de cimento, está representada pelos traços Tr-4, Tr-5 e Tr-6, onde verificou-se que o traço Tr-6, com período de cura de 7 dias, apresentou uma resistência a compressão de 2,58MPa, menor valor, e o traço Tr-5, com um período de cura de 28 dias, apresentou uma resistência de 5,42MPa, sendo

a maior resistência para essa faixa. Como observado na faixa anterior, no traço com maior teor de areia (Tr-7) também ocorreu uma diminuição da resistência.

Para a faixa de 20% de cimento (Tr-7, Tr-8, e Tr-9), teve-se os melhores resultados que variaram de 4,04MPa (Tr-7), aos sete dias, menor valor, e 12,49MPa (Tr-9) aos 28 dias, maior valor. Vale ressaltar que para o Tr-10 não se conseguiu uma extrusão boa. Sempre que a quantidade de areia chega próxima a 50%, e o teor de argila próximo a 30%, não ocorre uma extrusão razoável com o equipamento utilizado.

Tabela 4.8 - Resultado das resistências a compressão, corpos de prova com cal, rompidos em 7, 14 e 28 dias.

Esforço	CP	Traço (%) (C:Ca:K:A)	7 dias (MPa)	DP	14 dias (MPa)	DP	28 dias (MPa)	DP
Compressão	TrC - 1	9,52:4,76:57,14:28,27	1,41	0,31	2,90	0,59	2,97	0,32
	TrC - 2	9,52:4,76:47,62:38,09	2,05	0,44	2,90	0,40	3,22	0,34
	TrC - 3	9,52:4,76:38,09:47,62	1,80	0,18	2,60	0,23	2,87	0,11
	TrC - 4	13,95:6,98:51,16:27,91	4,47	0,85	5,03	0,55	8,35	0,53
	TrC - 5	13,95:6,98:41,86:37,21	5,32	0,43	8,37	1,13	12,06	0,43
	TrC - 6	13,95:6,98:32,56:46,51	5,67	0,44	8,44	1,45	14,59	2,34
	TrC - 7	18,18:9,09:54,54:18,18	6,38	0,75	7,73	0,44	9,31	0,63
	TrC - 8	18,18:9,09:45,45:27,27	8,23	0,65	9,90	1,13	17,14	2,38
	TrC - 9	18,18:9,09:36,36:36,36	9,05	1,05	10,54	0,11	14,18	3,78
	TrC - 10	18,18:9,09:27,27:45,45	11,78	1,73	15,24	1,20	16,53	1,30

Legenda:

CP – corpo de prova
C – cimento

DP – desvio padrão
Ca – cal hidratada

TrC – traço com cal
K – argila

A – areia fina

Para os traços contendo 10% de cimento, acrescido de cal hidratada cuja massa, corresponde a metade do valor da massa do cimento, representado pelos traços TrC-1, TrC-2 e TrC-3 observou-se que os valores variaram entre 1,41MPa (Tr-1), menor valor, no período de 7 dias de cura, e 3,22MPa (Tr-2), correspondente ao maior valor no período de 28 dias. No traço TrC-3, constatou-se que com o aumento da areia, no traço, ocorreu uma diminuição na resistência a compressão axial. Para esta primeira faixa com cal hidratada nos traços, todos os valores ficaram abaixo dos encontrados nos traços sem a cal.

Nos traços com teor de 15% de cimento, mais a cal hidratada cuja massa, corresponde a metade da massa do cimento, que são representados pelos traços TrC-4, TrC-5 e TrC-6, verificou-se que o traço TrC-4, com período de cura de 7 dias, apresentou uma resistência a compressão de 4,47MPa, menor para essa faixa, e o traço TrC-6, com um período de cura de 28 dias, apresentou uma resistência de 14,59MPa, sendo a maior resistência para essa faixa. Nessa faixa ocorreu um aumento da resistência próximo a faixa de 50% de areia. Para o traço TrC-7, observou-se que os valores das resistências a compressão nos períodos de 7, 14 e 28 dias apresentaram valores maiores.

Para a faixa de 20% de cimento (TrC-7, TrC-8, TrC-9 e TrC-10), teve-se os melhores resultados que variaram de 6,38MPa (TrC-7), menor valor aos sete dias, e 17,14MPa, maior valor aos 28 dias. Vale ressaltar que para o TrC-10 se conseguiu uma extrusão boa. A presença da cal hidratada aumentou a plasticidade do traço, fazendo com que o material extrudado apresentasse uma boa conformação. Mesmo com a quantidade de areia próxima a 50%, e o teor de argila próximo a 30%, ocorreu uma boa extrusão com o equipamento utilizado, fato esse, que vem demonstrar que a cal hidratada melhora a plasticidade e a coesão que são as condições essenciais para a extrusão de compósito cimentício.

Em todos os traços observou-se um acréscimo na resistência a compressão entre as datas de rompimento.

4.5.2 Resultados da tensão de ruptura à flexão – corpos prismáticos

Os resultados da tensão de ruptura à flexão dos corpos de prova prismáticos extrudados, confeccionados com as variações ternárias de cimento:argila:areia ou com cimento:cal:argila:areia, que foram submetidos a cura imersa e úmida, respectivamente, podem ser observadas nas tabelas 4.9 e 4.10.

Para os traços contendo 10% de cimento como aglomerante, representado pelos traços Tr-1, Tr-2 e Tr-3 observou-se que os valores variaram entre 1,13MPa (Tr-3), no período de 7 dias de cura, e 2,55MPa (Tr-2), no período de 28 dias de cura. No traço Tr-3, constatou-se que com o aumento da areia no traço ocorreu uma diminuição na tensão de ruptura à flexão.

Nos traços com um teor de 15% de cimento como aglomerante, que são representados pelos traços Tr-4, Tr-5 e Tr-6, verificou-se que o traço Tr-4, com

período de cura de 7 dias , apresentou uma tensão de ruptura à flexão de 1,22MPa, e o mesmo traço, com um período de cura de 28 dias, apresentou uma resistência de 2,04MPa, sendo a maior tensão de ruptura à flexão para essa faixa. Como observado na faixa anterior, os traços com maiores teores de areia (Tr-7) também ocorreu uma diminuição da tensão de ruptura à flexão.

Para a faixa de 20% de cimento (Tr-7, Tr-8, e Tr-9), o menor resultados para a tensão de ruptura à flexão foi de 1,03MPa (Tr-9), aos sete dias, e 4,17MPa aos 28 dias. Vale ressaltar que para o Tr-10 não se conseguiu uma extrusão aceitável. Sempre que a quantidade de areia chega próxima a 50%, e o teor de argila próximo a 30%, não ocorreu uma extrusão razoável com o equipamento utilizado.

Tabela 4.9 – Resultado das tensões de ruptura a flexão, corpos de prova sem cal, rompidos em 7, 14 e 28 dias.

Esforço	CP	Traço (%) (C:K:A)	7 dias (MPa)	DP	14 dias (MPa)	DP	28 dias (MPa)	DP
Flexão	Tr - 1	10:60:30	1,82	0,22	1,98	0,09	2,14	0,09
	Tr - 2	10:50:40	1,17	0,20	1,95	0,06	2,55	0,15
	Tr - 3	10:40:50	1,13	0,10	1,91	0,20	2,49	0,20
	Tr - 4	15:55:30	1,22	0,17	1,75	0,07	2,05	0,23
	Tr - 5	15:45:40	1,40	0,10	1,58	0,15	1,99	0,22
	Tr - 6	15:35:50	1,44	0,07	1,62	0,18	1,89	0,40
	Tr - 7	20:60:20	3,13	0,06	3,29	0,14	4,17	0,58
	Tr - 8	20:50:30	2,72	0,26	2,97	0,57	4,17	0,35
	Tr - 9	20:40:40	1,03	0,05	1,25	0,21	2,87	0,22
	Tr - 10	20:30:50	N	N	N	N	N	N

Legenda:

CP – corpo de prova
C – cimento

DP – desvio padrão
K – argila

Tr – traço
A – areia fina

N – não realizado

Para os traços contendo 10 % cimento, em massa seca, representado pelos traços TrC-1, TrC-2 e TrC-3 observou-se que os valores variaram entre 1,13MPa (TrC-2), no período de 7 dias de cura úmida, e 2,14MPa (TrC-2), no período de 28 dias de cura úmida. No traço TrC-3, constatou-se que com o aumento da areia no traço ocorreu uma diminuição na tensão de ruptura à flexão.

Nos traços com um teor de 15% de cimento, que são representados pelos traços TrC-4, TrC-5 e TrC-6, verificou-se que o traço TrC-6, com período de cura de 7 dias, apresentou uma tensão de ruptura à flexão de 1,63MPa, e o traço TrC-4, com um período de cura de 28 dias, apresentou uma resistência de 3,78MPa, sendo a maior tensão de ruptura à flexão para faixa. Como observado na faixa anterior, os traços com maiores teores de areia (TrC-7) também ocorreu uma diminuição da tensão de ruptura à flexão.

Para a faixa de 20% de cimento (TrC-7, TrC-8, TrC-9 e TrC-10), o menor resultados para a tensão de ruptura à flexão foi de 2,32MPa (TrC-10), aos sete dias, e 4,34MPa aos 28 dias. Para o TrC-10 se conseguiu uma extrusão aceitável. Mesmo com a quantidade de areia próxima a 50%, e o teor de argila próximo a 30%, ocorreu uma extrusão razoável com o equipamento utilizado, devido a presença da cal hidratada que forneceu ao sistema uma maior plasticidade.

De uma maneira geral, observa-se que à medida que se aumenta a quantidade de areia, diminui-se a tensão de ruptura a flexão. Observa-se, ainda, que a tensão de ruptura a flexão vai ao sentido inverso da resistência à compressão fornecida pelos traços de cimento (Tr) e de cimento e cal hidratada (TrC).

Tabela 4.10 – Resultado das tensões de ruptura a flexão, corpos de prova com cal, rompidos em 7, 14 e 28 dias.

Esforço	CP	Traço (%) (C:Ca:K:A)	7 dias (MPa)	DP	14 dias (MPa)	DP	28 dias (MPa)	DP
Flexão	TrC - 1	9,52:4,76:57,14:28,27	1,31	0,16	1,32	0,05	2,02	0,61
	TrC - 2	9,52:4,76:47,62:38,09	1,13	0,23	1,26	0,73	2,14	0,25
	TrC - 3	9,52:4,76:38,09:47,62	1,16	0,19	1,52	0,13	1,49	0,13
	TrC - 4	13,95:6,98:51,16:27,91	2,59	0,11	2,72	0,05	3,78	0,65
	TrC - 5	13,95:6,98:41,86:37,21	2,64	0,22	2,79	0,10	3,19	0,14
	TrC - 6	13,95:6,98:32,56:46,51	1,63	0,16	2,48	0,14	3,49	0,61
	TrC - 7	18,18:9,09:54,54:18,18	2,70	0,03	3,22	0,10	4,34	0,14
	TrC - 8	18,18:9,09:45,45:27,27	2,89	0,74	3,37	0,28	3,59	0,51
	TrC - 9	18,18:9,09:36,36:36,36	2,59	0,42	2,44	0,28	3,20	0,51
	TrC - 10	18,18:9,09:27,27:45,45	2,33	0,19	2,95	0,21	3,21	0,27

Legenda:

CP – corpo de prova
C – cimento

DP – desvio padrão
Ca – cal hidratada

TrC – traço com cal
K – argila

A – areia fin

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a extrusão de compósitos cimentícios, com argila caulínica, areia fina e cal é viável, conforme os resultados obtidos demonstrados no capítulo anterior, para a extrusão de blocos prismáticos, com furos prismáticos na horizontal, paredes e septos esbeltos, conforme a NBR 15.270-3:2005. O melhor desempenho na extrusão ocorreu nos traços que tiveram o acréscimo da cal hidratada, correspondente a 50% da massa do cimento. Vale destacar que a cal hidratada foi produzida em laboratório e apresentou uma boa qualidade, mostrando que existe a possibilidade de se produzir cal no Amazonas, a partir dos calcários existentes nas bordas da bacia Amazônica.

Quanto ao desempenho geral dos compósitos cimentícios desenvolvidos nessa pesquisa com os traços Tr e TrC, foi o traço TrC-8 que apresentou o melhor conjunto dos resultados obtidos que são: 8,23MPa (7 dias), 11,28MPa (14dias) e 17,14MPa (28 dias) para compressão e 2,89MPa (7 dias), 3,37MPa (14 dias) e 3,59MPa (28 dias) para tensão de ruptura a flexão. Possuindo características adequadas para atender as normas para blocos de vedação e estrutural.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Continuar a pesquisa com a extrusão do compósito cimentício, produzindo blocos prismáticos 9x19x19cm, de vedação e estrutural, para cálculos de resistência conforme as determinações do INMETRO e das NBR.
- Desenvolver estudos utilizando novos aditivos para melhorar a plasticidade e facilitar, assim, a extrusão de compósito cimentício.
- Desenvolver estudos para determinar a menor quantidade de argila a ser utilizada para manter uma resistência dentro das normas.
- Desenvolver estudos para melhor entender o comportamento químico dos componentes e as suas reações ao longo do tempo, bem como esta interação reflete na resistência e na durabilidade do produto.
- Desenvolver um *design* para a produção em larga escala aplicada a indústria ceramista, para produção de blocos prismáticos.
- Desenvolver estudos de viabilidade para a produção da cal virgem e da cal hidratada no estado do Amazonas.

REFERÊNCIAS

ALDEA, C. *et all.* Extruded Fiber Reinforced Cement Pressure Pipe. *Advanced cement Bas Materials*, vol 8, p. 47, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - Determinação do limite de liquidez. NBR 659. Rio de Janeiro, 1984. 3p.

_____. Cimento portland pozolânico. NBR 5736. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

_____. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. NBR 5738. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

_____. Amostras de Solos - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização (anexos). NBR 6457. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

_____. Solo – Determinação do limite de liquidez. NBR 6459. Rio de Janeiro, 2017. 5p.

_____. Cal virgem e cal hidratada. Análise química. NBR 6473. Rio de Janeiro, 2003. 31p.

_____. Rochas e solo. NBR 6502. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

_____. Grãos de solos que passam na peneira 4,8mm – Determinação da massa específica. NBR 6508. Rio de Janeiro, 1984. 8p.

_____. Cal hidratada para argamassas. NBR 7175. Rio de Janeiro, 2003. 4p

_____. Solo - Determinação do limite de plasticidade. NBR-07180. Rio de Janeiro, 1984. 1p.

_____. Solo - análise granulométrica. NBR-7181. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

_____. Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimentos. NBR-7200. Rio de Janeiro, 1998. 13p.

_____. Cal hidratada para argamassas determinação de finura, NBR 9289. Rio de Janeiro, 2000. 4p.

_____. Cal hidratada para argamassas determinação de retenção de água. NBR 9290. Rio de Janeiro, 1996. 4p.

_____. Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. NBR-13.529. Rio de Janeiro, 2013. 13p.

_____. Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – terminologia e requisitos. NBR-15270-1. Rio de Janeiro, 2005.11p.

_____. Componentes cerâmicos. Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – métodos de ensaios. NBR-15270-3. Rio de Janeiro, 2005.27p.

_____. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. NBR-16.605. Rio de Janeiro, 2017. 4p.

_____. Argamassa e concreto – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland. NBR-NM 137. Rio de Janeiro, 1997. 15p.

Associação Nacional de Indústria Cerâmica – ANICER: disponível em <http://www.anicer.com.br>. Acesso em: 01 ago. 2017.

_____. Diagnostico da Indústria de cerâmica Vermelha no Estado do Rio de Janeiro, (Sindicar/RJ, Sindicar Campos/RJ e Sindicar Médio Paraíba/RJ), SEBRAE/RJ, SENAI/RJ e IBMEC Jr, Rio de Janeiro, 2010.

_____. Relatório Anual 2010.

_____. Cartilha Ambiental cerâmica Vermelha. Parceria ANICER/SEBRAE, 2016.

BLACKBURN, S.; LAWSON, T.A. “Mullite-Alumina Composites by Extrusion”, J. Am. Ceram. Soc., n. 75, v. 4, p. 953-57, 1992.

CASTRO, F. J. C. de Oliveira. Contribuição ao conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquioxídicos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação ao processo de Geopolimerização (Estabilização), Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.

CINCOTTO, M. A.; RAGO, F. Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas. Boletim Técnico BT/PCC/233. Escola Politécnica da USP, São Paulo. 1999.24p.

CINCOTTO, M. A. *et al.* Cal na construção Civil. Cap 22.1 – Materiais de Construção Civil e princípios de Ciências e Engenharia de Materiais. Org/Editor Geraldo Cechella Isaia, IBRACON, 2007. 695p a 759p.

COELHO, A. Z. G.; TORGAL, F. P.; JALALI, S. A cal na construção – Universidade de Minho – Portugal, 2009.

COUTINHO, A. S. Fabrico e Propriedades do Betão. Vol. I. ed. LNEC. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 1997. 401 p.

CRISTELO, N. M. Cordeiro. Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal, Universidade do Minho, Portugal, 2001.

D'ANTONA, R. J. G. *et al.* Projeto Materiais de Construção na área Manacapuru – Iranduba – Manaus – Careiro (Domínio Baixo Solimões). CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Manaus. 2007. 185p.

DAO, Kalifaila *et al.* – Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes

stabilized with cement. *Construction and Building Materials*. V. 158, 2018, p. 84-86.

ELEUTÉRIO, *et al.* . Determinação da formulação de massas argilosas para emprego em cerâmica vermelha, oriundas do pólo oleiro de Iranduba. In: 54º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2010, Foz do Iguaçu. 54º Congresso Brasileiro de Cerâmica. São Paulo: ABCERAM, 2010.

FACINCANI, E. “Tecnología Cerámica - Los Ladrillos”, Faenza Editrice Iberica S.L., Castellón, 1993.

FONSECA, G.C; Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção do concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica. Dissertação de mestrado. DEMC - UFMG. Belo Horizonte, 2010.

GOMES, A., Pinto, A. P. F. e Pinto, J. B. 2013. *Materiais de Construção. Gesso e Cal de Construção*. s.l. : Instituto Superior Técnico, 2013.

GOMES, A. de O; NEVES, C.M.M; Proposta de método de dosagem racional de argamassas contendo argilominerais. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 19-30, abr./jun. 2002.

GOMES, C.F. “Argilas - O que são e para que servem”, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1988.

GONÇALVES, B. J. Simões – Formulações de argamassas controladoras de humidade – Dissertação de Mestrado – Dep. de Eng. Cerâmica e do vidro. Universidade de Aveiro, Portugal. 2011. 99p.

GOOGLE MAPS, WWW.google.com.br/maps /imagem capturada em 10/10/2017.

GUIMARÃES, J. E. P.; *A cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil*. São Paulo: PINI. 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. Norma nº NIE-DIMEL-087 – Determinação das dimensões efetivas do produto componente cerâmico: blocos, tijolos, elementos vazados, canaletas e componente cerâmico que não possuam forma de paralelepípedo. (2011) p.9

KHELIFI, H *et al.* Design of clay/cement mixtures for extruded building products. *Materials and Structures*, v. 46, p 999-1010, 2013.

M. CIENTEC 1/C – 019 ARGILAS: Análise Granulométrica por peneiramento. RS.1977. 2p

M. CIENTEC 1/C – 020 ARGILAS: Determinação da Umidade de Conformação. RS.1995. 2p.

M. CIENTEC 1/C – 024 MATERIAIS CERÂMICOS: Determinação da massa Específica Aparente após Queima, RS. 1995. 2p.

M. CIENTEC 1/C – 025 MATERIAIS CERÂMICOS: Determinações do módulo de ruptura, RS. 1976. 2p.

M. CIENTEC 1/C – 027 MATERIAIS CERÂMICOS: Determinações do módulo de ruptura, RS. 1995. 2p

MACEDO, R. S. et all. Influência de aditivos na produção de blocos cerâmicos. Universidade Federal de Campina Grande, Bodocongó, Campina Grande, PB.

MATTANA JÚNIOR, A.; COSTA, M. R. M. M. Estudo da influência do tipo de cimento no comportamento reológico de argamassas de revestimento. VIII Simpósio de tecnologia das argamassas. 19 a 22 de maio de 2009. Curitiba/PR. (2009).

MELLO, R. M. E OLIVEIRA, A. A. Influência do sistema de vácuo nas propriedades de cerâmica vermelha. 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Curitiba-PR, 2004

MICHAELIS, Dicionário da Língua portuguesa. Disponível em <http://michaelis.uol.com.br>. Acesso em 01 agosto 2017.

MIZU. certificado. mizu.br/cert/mzmn/cp432rs.pdf. Acesso em 12 de setembro de 2017.

PAIVA, S. C. *et al*, Contribuição de qualidade da cal para argamassas – metodologias alternativas. Revista Ciências & Tecnologia nº 1, Ano 1, jul-dezembro, 2007. 11p

QUARCIONI, *et al* – Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volume. Ambiente Construído, Porto Alegre-RS, v 9, nº 4, out/dez, 2009. p 175-187.

RAGO, F; CINCOTTO, M. A.; Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas. Boletim Técnico da escola politécnica da USP - São Paulo: IPT, 1999. 29p.

REED, J.S.; MARTIN, T.J.; CARLSON, W.G. “Mechanics of Extrusion”, Science of Whitewares, Published by the American Ceramic Society, p. 157-168, USA, 1996.

RIBEIRO, Manuel J. *et al*. Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas. Revista Cerâmica Industrial Vol. 8, nº 1, jan./fev. 2005.

RIKER, S. R. L.; HORBE, A. M. C. Sedimentos holocênicos da região de Boa Vista, Roraima, para indústria de cerâmica vermelha. Contribuições à Geologia da Amazônia, v. 5, 101-112 p. 2007.

RIKER, S. R. L. *et al*. Geologia e recursos minerais da Região Metropolitana de Manaus, estado do Amazonas, escala de integração 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. CPRM. Manaus. 238p. 2016.

RODRIGUES, P. – Argamassas de revestimento para alvenarias antigas - contribuição para o estudo da influência dos ligantes. Dissertação de Doutorado

em Engenharia Civil apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2004.

RODRIGUES, V. O. *et al* – Caracterização das matérias prima empregadas na fabricação de produtos do Polo Ceramico de Iranduba – AM . *Ceramica Industrial*, 20.1 Jan/Fev 2015.

ROMANO, *et al* – Características reológicas de suspensões cimentícias mista com cal e filitos. *Ambiente Construido*, Porto Alegre, v. 14, n. 1, 2014. p. 75-84.

ROSSETTO, Herbert Luis. Contribuições para a ciência e engenharia dos materiais cimentícios: processamento, durabilidade e resistência mecânica. Tese D.Sc, USP, São Carlos, 2007.

SALVADOR, G. A. B. – Otimização da distribuição granulometrica do agregado miúdo para o uso da cidade de Sant'ana do Livramento, RS. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia, UFRS. 2005 130p.

SANTOS, V. P. *et al*. Índice de Plasticidade e Análise Racional de Argilas de Marabá (PA) para Avaliação das Zonas de Extrusão. *Cerâmica Industrial*, v. 17, n. 2, 2012, p. 37-42.

SILVA, N. G. e CAMPITELI, V. C. Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas. ENTEC 2006. Florianópolis. 4349-4358p

SUGUIO, Kenitiro – Geologia sedimentar – São Paulo: Editora Blücher Ltda, 2003. 400p.

SOUZA SANTOS, P. Tecnologia de Argilas. São Paulo: Edgard Blucher, Ed. da Universidade de São Paulo, 1975. v. 1. 340 p.

TEMIMI, *et al*. - Making building products by extrusion and cement stabilization: limits of the process with montmorillonite clay. *Applied Clay Science*, v. 13 (1998) p. 245-253.

TURRI, D. F. G. Estudo exploratório de blocos estabilizado conformado por extrusão. 2011. 196f. Dissertação de mestrado. Engenharia Civil. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

VIEIRA, R. J. M., Argamassas de cal aérea com um ano - influência das condições de cura e composição. 188p. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. 2013.

WIECK, R. e DUAİLÍBI, J. Extrusão em Cerâmica Vermelha: Princípios básicos, Problemas e Soluções. *Cerâmica Industrial*, ano 18, n 3, maio/junho, 2014.