



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

TESE DE DOUTORADO

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA COLANTE UTILIZANDO
RESÍDUO DE CAULIM**

GUILHERME COSTA DE OLIVEIRA

**Campina Grande - PB
2016**

GUILHERME COSTA DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA COLANTE UTILIZANDO
RESÍDUO DE CAULIM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito final para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Trindade de Araújo

Campina Grande - PB
2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

O48d

Oliveira, Guilherme Costa de.

Desenvolvimento de argamassa colante utilizando resíduo de caulim / Guilherme Costa de Oliveira. – Campina Grande, 2016.

69 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Gilmar Trindade de Araújo".

Referências.

1. Argamassa Colante. 2. Resíduo de Caulim. 3. Agregado Miúdo. I. Araújo, Gilmar Trindade. II. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (PB). III. Título.

CDU 666.971(043)

GUILHERME COSTA DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA COLANTE UTILIZANDO RESÍDUO DE
CAULIM**

Tese apresentada e aprovada no dia 31 de agosto de 2016 ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito final para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gilmar Trindade de Araújo
Orientador (UAEQ/CCT/UFCG)

Prof. Dr. José Nilton Silva
Examinador Interno (UAEQ/CCT/UFCG)

Prof. Dr. Romildo Pereira Brito
Examinador Interno (UAEQ/CCT/UFCG)

Prof^a. Dr^a. Djane de Fátima Oliveira
Examinadora Externa (DQ/CCT/UEPB)

Prof. Dr. Romualdo Rodrigo Menezes
Examinador Externo (UAEMa/CCT/UFCG)

Campina Grande - PB.

2016

Aos que não deixaram de acreditar...

AGRADECIMENTOS

Inicialmente a Deus e às suas formas de iluminar os caminhos que em vários momentos pareceram-me sem saídas, e a São Jorge, que estendeu sobre mim o seu escudo, protegendo-me até o fim dessa jornada.

À minha avó e mãe, que desde sempre me apoiaram em todas as decisões, que estiveram comigo em todos os altos e baixos. Por todo o incentivo e ensinamentos, por moldarem o homem que me tornei. E ao meu avô, sem o qual nada disso teria acontecido.

Ao Professor Gilmar Araújo, por depositar sua confiança em minha capacidade. Pela orientação, ensinamentos e oportunidade de me mostrar o que, de fato, é pesquisa.

À Aline, por sua amizade, pelo companheirismo e, principalmente, pela sua ajuda durante o desenvolvimento desse projeto, e à Mariaugusta, não só por todos os anos de amizade, mas por sempre me incentivar e não me deixar desistir quando pensei não haver mais saída.

Aos professores Romualdo, Nilton e Romildo pelas contribuições, e à professora Djane, pelas contribuições e ajuda no desenvolvimento do projeto.

À Maricé, por estar sempre disponível a atender aos pedidos dos alunos, e prestar a assistência administrativa.

Ao Centro de Tecnologia de Argamassas pela assessoria, e em especial à Élide, que contribuiu de forma significativa para o início da pesquisa.

Aos amigos em que a passagem pela pós-graduação me proporcionou conhecer e conviver: Marcílio, Paulo, Raphael, Wellington, Liliane, Ângela, Everton, Joseane, Rochélia, Jocielys, Elaine, Adna, Joelma, Alana e Janaína.

Aos amigos de trabalho por me ajudarem direta e indiretamente no desenvolvimento do trabalho: Emmanuel, Leandro, Thatiana, Hemmannuella, Fátima, Ulisses, Selma, Welliton, e em especial a Everton, que me substituíra nos momentos em que eu precisava me ausentar.

À CAPES pelo financiamento concedido.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

Dentre os diversos minerais extraídos, no Brasil, o caulim é um dos principais. Esse mineral de da família das caulinitas, apresenta uma grande versatilidade quanto ao seu uso. Porém, durante o processo de beneficiamento, altas quantidades do material extraído são rejeitadas, chegando a 70% do montante. Esse resíduo é disposto a céu aberto, causando transtorno às populações circunvizinhas e ao ecossistema da região. Esse trabalho objetivou utilizar o resíduo gerado nesse processo como matéria prima para o desenvolvimento de argamassas. O resíduo foi caracterizado, e utilizando a difratometria de raios X (DRX) verificou-se que é, basicamente, constituído de caulinita e mica. O resíduo foi testado quanto à sua pozolanicidade e verificou-se que não apresentava potencial adequado para ser utilizado como substituinte parcial do cimento. Entretanto, suas características físicas indicaram que o resíduo de caulim apresentava propriedades para ser utilizado como agregado miúdo. Traços de argamassas colantes foram realizados substituindo o agregado miúdo natural, areia, pelo resíduo do caulim em proporções de 0 a 100 %. Essas argamassas foram testadas de acordo com as especificações contidas na norma ABNT NBR 14081. Os resultados indicaram que, à medida que se aumentou a quantidade de resíduo, a argamassa necessitou de uma maior quantidade de água para se obter a trabalhabilidade adequada. Com relação aos dados de resistências mecânicas, verificou-se um decaimento linear nos dados. Para o Tempo em Aberto (TA), observou-se uma redução de, aproximadamente, 90% na resistência mecânica do material; com relação às Resistências de Aderência à Tração (RAT), houve diminuição de 87% nas resistências mecânicas dos traços curados ao ar e, 81 %, nas argamassas curadas em meio aquoso. O traço que continha 25 % de seu agregado natural substituído por resíduo de caulim, apresentou valores dentro dos limites estabelecidos pela NBR 14081 e uma demanda de água próxima à das argamassas colantes industrializadas disponíveis no mercado. Dessa forma, o resíduo oriundo do processo de beneficiamento de caulim, apresentou-se como uma opção viável para a redução do uso de areia no desenvolvimento de argamassas colantes. Essa substituição foi favorável tanto para dar uma destinação ao resíduo, como também para a diminuição do uso de areia como agregado miúdo, uma vez que sua extração acarreta em diversos problemas ambientais.

Palavras-chave: resíduo de caulim, agregado miúdo, argamassa colante.

ABSTRACT

Among various minerals extracted in Brazil, kaolin is one of most important. This mineral from the kaolinite family has great versatility as its use and during its beneficiation process, high amounts of the extracted material are rejected, reaching values as 70%. This residue is disposed on the environment with no treatment, causing inconvenience to surrounding communities and to the region ecosystem. This work aimed to use this residue as raw material for the construction industry, more specifically in the development of AC-I type adhesive mortars. The residue was characterized and by X-ray diffraction verified that it is basically constituted of kaolinite and mica. Based on Brazilian standards, the residue was tested for its pozzolanic and it was found that showed no suitable potential for using as a partial replacement for cement. However, its physical characteristics indicate that the kaolin residue had properties to be used as fine aggregate. Traces of adhesive mortars were made by replacing the fine natural aggregate, sand, by kaolin residue in proportions from 0 up to 100 %. The results indicated that, as it increased the amount of residue, the mortar required a larger amount of water to obtain adequate workability. Due to mechanical resistance data, there was a linear decay in. For the Open Time (TA), there was a reduction of approximately 90% in the mechanical strength of the material; and about to Resistance Adhesion Tensile (RAT), a reduction of 87 % in the mechanical strength of the admixtures air-cured and 81 % in the mortar cured in an aqueous medium. The admixtures that contained 25 % of its fine aggregate replaced by kaolin residue, showed values within the limits established by the NBR 14081 and a water demand close by the demand in industrialized adhesive mortars. Thus, the residue derived from kaolin beneficiation process, proved to be a viable option for reducing the use of sand in the development of adhesive mortars. This substitution is in favour both to give a destination to residue, also to reduce the use of sand as fine aggregate, since its extraction brings several environmental problems in.

Keywords: kaolin residue, fine aggregate, adhesive mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Volume de extração de caulim bruto no Brasil e no mundo.....	12
Figura 2.2 - Quantidades de caulim bruto e beneficiado produzidos no Brasil entre os anos de 2005 e 2014.	13
Figura 2.3 - Vista lateral da estrutura da caulinita.....	14
Figura 2.4 - Setor de peneiramento do caulim.....	15
Figura 2.5 - Tanques de decantação.	16
Figura 2.6 - (a) Filtro-prensa, e (b) tortas de caulim expostas ao ar livre para diminuição da umidade.	16
Figura 2.7 – Depósitos de resíduo de caulim a céu aberto.	18
Figura 2.8 - Micrografia dos produtos da hidratação dos aluminatos de cálcio: (a) etringita e (b) monossulfato hidratado.	25
Figura 2.9 - Micrografias do processo de hidratação de partículas de silicatos de cálcio.....	25
Figura 2.10 - Distribuição de partículas e o empacotamento do sistema.	28
Figura 2.11- Estruturas do: (a) MC; (b) HEC; (c) HEMC e (d) HPMC.....	30
Figura 3.1 - Etapas do ensaio de Índice de Consistência.....	37
Figura 3.2 - Substrato padrão contendo argamassa e placa cerâmica na posição vertical durante o ensaio de deslizamento.	38
Figura 3.3 - Etapas dos ensaios para determinação do Tempo em Aberto e da Resistência de Aderência à Tração.....	39
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do resíduo de caulim e da areia.....	47
Figura 4.2 - Difratoograma do resíduo de caulim.	49
Figura 4.3 - Resultados do Índice de Consistência das argamassas.	52
Figura 4.4 - Resultados da densidade no estado fresco.	53
Figura 4.5 - Resultados de Retenção de Água.....	53
Figura 4.6 - Resultado de Deslizamentos das argamassas colantes.	54
Figura 4.7 - Densidades no estado endurecido das argamassas.	55
Figura 4.8 - Resultados do ensaio de Tempo em Aberto.....	56
Figura 4.9 - Resultados das Resistências de Aderência à Tração.....	57
Figura 4.10 - Probabilidade normal dos modelos.....	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Contribuição científica	10
1.2 Objetivos	11
<i>1.2.1 Objetivo Geral</i>	11
<i>1.2.2 Objetivos Específicos</i>	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Caulim: Aspectos Gerais, Beneficiamento e Resíduo	12
<i>2.1.1 Processo de Beneficiamento</i>	14
<i>2.1.2 Resíduo</i>	17
2.2 Argamassas para construção civil	18
<i>2.2.1 Argamassas Colantes</i>	20
2.3 Incorporação do resíduo de caulim em materiais de construção	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Caracterização do resíduo	34
3.2 Ensaio das argamassas no estado fresco	36
3.3 Ensaio das argamassas no estado endurecido	39
4 DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA COLANTE UTILIZANDO RESÍDUO DE CAULIM	41
4.1 Introdução	42
4.2 Materiais e Métodos	45
<i>4.2.1 Caracterização dos materiais</i>	45
<i>4.2.2 Caracterização das argamassas</i>	46
<i>4.2.3 Planejamento experimental</i>	46
4.3 Resultados e discussões	47
<i>4.3.1 Caracterização dos Materiais</i>	47
<i>4.3.2 Resultados das argamassas no estado fresco</i>	51
<i>4.3.3 Resultados das argamassas no estado endurecido</i>	55
4.4 Conclusões	58
5 CONCLUSÕES	60
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Por possuir um território amplo, o Brasil desfruta de ampla variedade de recursos minerais, sendo um dos grandes exportadores de minérios do mundo, tornando assim, o extrativismo mineral uma importante fonte de recursos para a economia do país, contribuindo com aproximadamente 4,5% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro no ano de 2015. (IBGE, 2016).

Dentre esses minerais, o Brasil é grande produtor de caulim, argila muito utilizada pelas indústrias de papel, como agentes de enchimento (*filler*) ou cobertura (*coating*), e na composição de pastas cerâmicas.

Durante o processo de beneficiamento do caulim são gerados resíduos, que podem representar até 70% do volume total extraído, que são dispostos a céu aberto provocando impactos para o meio físico e biótico, modificando a paisagem natural. Esses rejeitos podem conter, além de outros contaminantes, concentração de metais pesados acima da permitida pela legislação. Os reflexos dessa contaminação extravasam, frequentemente, os limites das áreas de trabalho, atingindo também a topografia, flora, fauna, sistema hídrico e morfofisiológico do solo (AZEREDO e DINIZ, 2013).

Nos últimos anos diversos pesquisadores têm voltado suas atenções para a reutilização e destinação do resíduo proveniente do processo de beneficiamento de caulim, a fim de minimizar o impacto causado pela disposição inadequada desse material. Esse resíduo tem sido amplamente utilizado no desenvolvimento de materiais de construção como argamassas, revestimentos cerâmicos, blocos de concreto e tijolos. Em estudos prévios o material foi utilizado satisfatoriamente na produção de argamassas de cal para restauração (AZEREDO *et al.*, 2014), concretos asfálticos (INGUZA *et al.*, 2014), blocos de solo-cal (ANJOS e NEVES, 2011); mas não foi verificada a utilização do resíduo de caulim na preparação de argamassas colantes que atendessem aos pré-requisitos exigidos na norma brasileira NBR 14081:1 (ABNT, 2012).

Portanto, esse trabalho tem por objetivo desenvolver um produto para a construção civil a partir da utilização do resíduo gerado no processo de beneficiamento de caulim, criando, então, um uso para esse resíduo que é gerado continuamente, e disposto no meio ambiente de forma inadequada.

1.1 Contribuição científica

O aproveitamento industrial de resíduos sólidos, que normalmente são descartados sem a devida adequação tem-se mostrado uma alternativa eficaz para mitigar o problema causado pela geração e descarte desses resíduos. Assim o presente trabalho buscou contribuir com a proposta de incorporar o resíduo em argamassa colante, tipo AC-I, com características mecânicas dentro dos limites aceitáveis, para o fim a que se destina.

Como contribuição científica, o presente trabalho apresenta dados experimentais visando contribuir com as várias pesquisas a respeito dos resíduos sólidos gerados pela exploração, não só de caulim como de outros minerais, na mitigação do impacto ambiental causado pela geração e descarte deste resíduo e na redução da exploração de areia que diminuirá o impacto causado a biomas que estão sofrendo forte degradação pela pressão causada pela sua exploração.

Quanto ao ineditismo é importante dizer que alguns trabalhos já foram desenvolvidos sugerindo a adição de resíduos sólidos em argamassas para alvenaria, em matrizes de cimento e/ou concreto como tratamento alternativo. No entanto, a atividade pozolânica desse resíduo no seu estado natural não o indicava como um potencial aditivo a ser utilizado na fabricação de argamassas, de concretos. Assim, o ineditismo está na aplicação desse resíduo como agregado miúdo, compondo um novo produto verde, uma argamassa colante com propriedades que atendem a norma NBR 14081:1 (ABNT, 2012) de tal qualidade que gerou o depósito de uma patente

No aspecto da não trivialidade, apesar da questão ambiental ser muito debatida atualmente, este trabalho apresenta como principal característica propor, não um tratamento adequado para resíduos sólidos da indústria de mineração, uma vez que esses resíduos tendem a serem dispostos de forma a causar impactos ao meio ambiente, mas buscar agregar valor, transformando esse resíduo em um produto com importância industrial.

Logo o desenvolvimento desse trabalho contribuiu tanto para a redução da quantidade de resíduo de caulim que são eliminadas no meio ambiente, como também, propôs um material alternativo para ser utilizado como agregado miúdo em argamassas, diminuindo assim a necessidade do uso de areia pelas indústrias de construção civil.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo Geral*

Desenvolver uma argamassa colante utilizando o resíduo gerado no processo de beneficiamento de caulim.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Caracterizar física e quimicamente o resíduo;
- Avaliar as características do resíduo para fins de utilização em materiais de construção;
- Avaliar a pozolanicidade do resíduo;
- Realizar incorporações do resíduo na argamassa colante;
- Avaliar a argamassa quanto à sua integridade física;
- Otimizar a incorporação do resíduo.

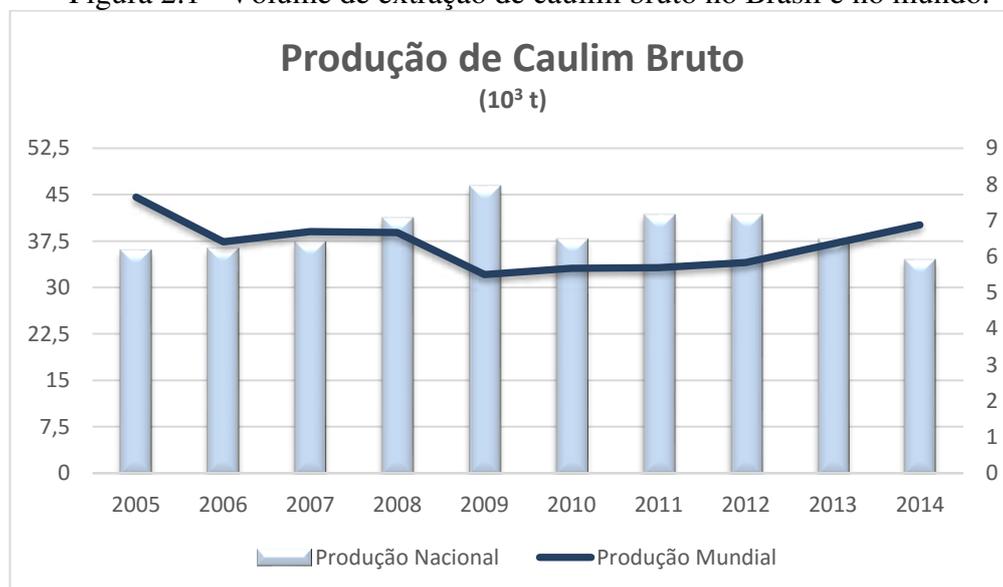
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Caulim: Aspectos Gerais, Beneficiamento e Resíduo.

O termo caulim é utilizado para denominar a rocha constituída em sua maior parte pelo mineral caulinita que é oriundo das alterações de silicatos de alumínio, principalmente dos feldspatos (LUZ *et al.*, 2005). No passado, o caulim, conhecido como *china clay*, foi descoberto na região montanhosa de *Jauchou Fu*, na China. Apresenta normalmente cor branca ou quase branca, devido ao baixo teor de ferro. O nome caulim deriva da palavra chinesa *Kauling*, que significa cume alto. Nome dado à argila branca, encontrada a 45 km da cidade de *Ching-teh-chien* (CHEN *et al.*, 1997).

Na Figura 2.1, pode-se observar os volumes de extração mundial e brasileiro de caulim nos últimos anos. O volume nacional representou 4,5% do total de caulim produzido no mundo, em 2014.

Figura 2.1 - Volume de extração de caulim bruto no Brasil e no mundo.

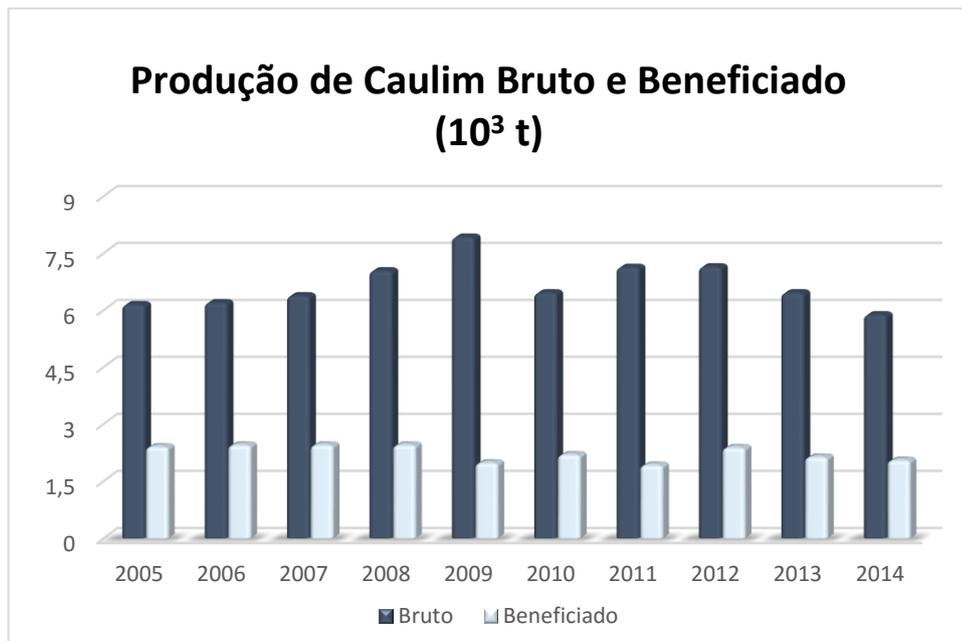


Fonte: Adaptado do Sumário Mineral Brasileiro (2006-2015).

A produção mundial total de caulim em 2014 foi de aproximadamente de 40 milhões de toneladas, sendo os maiores produtores: Uzbequistão (17,5 %), Estados Unidos (14,5 %) e Alemanha (11,2 %). Segundo o Anuário Mineral Brasileiro (2015), o Brasil ocupou a sexta posição no *ranking* mundial: produzindo 4,5 % do total.

Já na Figura 2.2, observam-se as quantidades de caulim extraídas, e o montante produzido após beneficiamento entre os anos de 2005 e 2014 no Brasil, onde nota-se a grande diferença entre esses valores.

Figura 2.2 - Quantidades de caulim bruto e beneficiado produzidos no Brasil entre os anos de 2005 e 2014.



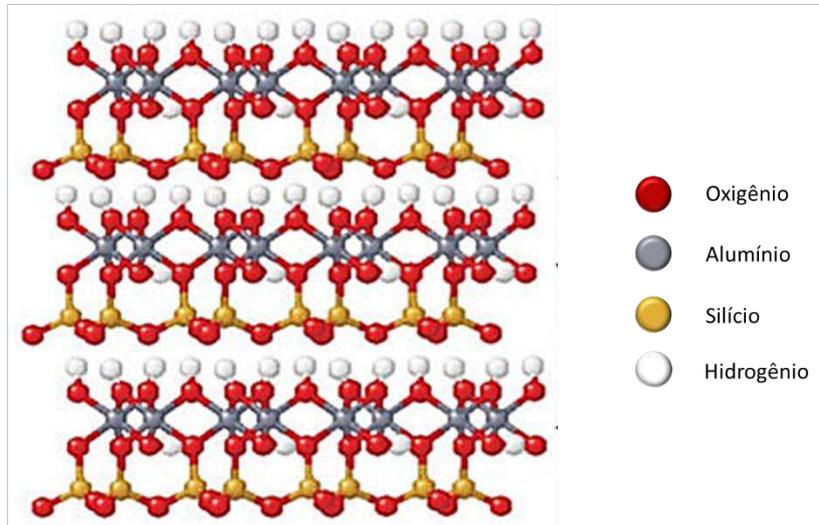
Fonte: Adaptado do Sumário Mineral Brasileiro (2006-2015).

A caulinita, argilomineral constituinte do caulim, é um silicato hidratado de alumínio, constituído por uma folha de formato hexagonal de coordenação tetraédrica, composta por silício e oxigênio, unida a uma folha de coordenação octaédrica, composta por alumínio, oxigênio e hidroxilas, como pode ser observado na Figura 2.3 (SOUZA SANTOS, 1992). Sua célula unitária é expressa pela fórmula $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$, e sua composição química aproxima-se de $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. A sua composição química apesar de composta basicamente por SiO_2 e Al_2O_3 , apresenta uma grande gama de outros óxidos em pequenas quantidades oriundos de contaminações, substituições isomórficas e presença de cátions de compensação. A sua composição química é usualmente expressa em termos de óxidos dos vários elementos, embora eles possam estar presentes em formas mais complexas (LIMA *et al.*, 2008).

O caulim é um bem mineral extremamente versátil em função de suas características, como: quimicamente inerte em ampla faixa de pH; elevada alvura; pouco abrasivo; fácil dispersão; baixas condutividades térmica e elétrica; preço competitivo em relação aos materiais alternativos. Essas características o torna comumente utilizado nas indústrias para a formação

de filmes, suporte de catalisadores, extensão e reforço de polímeros, agente polidor, papel e produção de refratários (DILL, 2016; SILVA, 2007; BUNDY, 1993).

Figura 2.3 - Vista lateral da estrutura da caulinita.



Fonte: Rodrigues *et al.* (2010).

2.1.1 Processo de Beneficiamento

A utilização do caulim em qualquer área industrial requer um tratamento físico e químico para a eliminação das impurezas que devem ser reduzidas a baixos níveis, preestabelecidos de acordo com a sua utilização; este tratamento é feito por meio de um processo de beneficiamento que pode ocorrer por via úmida ou seca.

O processo de beneficiamento a seco é mais simples, sendo realizado quando o caulim já apresenta alvura e distribuição granulométrica adequada, bem como baixo teor de quartzo. Nesse processo, o caulim bruto é inicialmente fragmentado (britador), sendo em seguida conduzido para secagem em secadores rotativos. Após seco, o caulim é pulverizado em moinhos de rolos, para então ser classificado, por tamanho, por flotação de ar (*air flotation*), onde as partículas mais finas são conduzidas ao topo do aereoseparador por uma corrente de ar quente, havendo assim a separação das partículas por tamanho. No entanto, dificilmente se encontra caulins, em estado natural, com essas características, predominando assim o beneficiamento por via úmida (LUZ *et al.*, 2005).

Nesse processo, o caulim bruto é desintegrado, e adicionado água para a lavagem dos materiais acessórios de modo a retirar a fração de caulim agregada aos mesmos. Em seguida, o material passa por um tanque contendo água para que, por decantação, seja separado, e

posteriormente, em outros tanques, o caulim é floculado. Após a precipitação, o caulim é bombeado para filtros-prensa, nos quais é retirado o excesso de água, resultando na “torta” de caulim, com uma umidade de 30% a 40%. A torta é seca ao ar ou em fornos no período chuvoso (MENEZES *et al.*, 2009).

Segundo Rocha *et al.* (2008), no processo de beneficiamento do caulim, o minério pode ser submetido a uma lixiviação química, com o objetivo de remover, principalmente, as impurezas de ferro, que conferem coloração ao produto final e, com isso, depreciam seu valor comercial. Nessa lixiviação é empregado o zinco metálico em meio ácido, com a finalidade de reduzir quimicamente o ferro. A água de lavagem resultante é bombeada para um tanque e posteriormente neutralizada com hidróxido de cálcio.

Na empresa onde foi coletado o resíduo, o caulim é beneficiado por via úmida, dividido em quatro etapas: decantação, filtragem, secagem e moagem. Inicialmente, o material bruto é oriundo das jazidas, batido e disperso em água, e por gravidade transportado até o setor de peneiramento. Durante esse processo, já há a geração, em grande quantidade, de um resíduo de granulometria maior, conhecido como “caulim brita” ou “resíduo grosso”.

No setor de peneiramento, apresentado na Figura 2.4, um conjunto de peneiras ABNT nº. 200, de abertura 0,074mm, e peneiras ABNT nº. 325, de abertura 0,044mm, estão empilhadas em ordem crescente da abertura da malha. Nesse sistema, a mistura é classificada de acordo com as dimensões de suas partículas. Todo o material que atravessa as peneiras ABNT nº. 200, corresponde ao caulim que será beneficiado. Caso seja necessário um maior refinamento do minério, ele é passado nas peneiras ABNT nº. 325. O material retido nas peneiras nº. 200, é rejeitado e consiste no resíduo fino da cadeia produtiva do caulim, conhecido usualmente, como “borra de caulim”.

Figura 2.4 - Setor de peneiramento do caulim



Fonte: Própria (2016).

Após o peneiramento, o material é levado, por gravidade, através de tubulações para um sistema de tanques, como pode ser visualizado na Figura 2.5, onde se inicia a fase de decantação e sedimentação. O primeiro tanque recebe a mistura e é preenchido completamente com água; nele ocorre a separação da fração de maior granulometria por sedimentação. A fração mais fina que se posiciona na região superficial é transportado, para um segundo tanque que apresenta um desnível de altura em relação ao primeiro; e isso ocorre repetidas vezes em vários tanques.

Figura 2.5 - Tanques de decantação.



Fonte: Própria (2016).

A água é vazada para outro tanque de onde é reciclada para a fase inicial de dispersão do minério bruto. O material sedimentado é, então, encaminhado para um filtro-prensa por uma bomba, onde grande parte da água é removida por prensagem, e encaminhada para reutilização nos tanques.

Figura 2.6 - (a) Filtro-prensa, e (b) tortas de caulim expostas ao ar livre para diminuição da umidade.



Fonte: Própria (2016).

O caulim é compactado em formas de blocos circulares, denominados de “tortas” (Figura 2.6); e em seguida, o material é inicialmente exposto ao sol e a correntes de ar, e se necessário, levado ao forno, para eliminação da água remanescente.

Após a secagem, o caulim é desagregado, e transferido para os moinhos, onde são ensacados e encaminhados para distribuição. No processo de beneficiamento dessa empresa, o caulim não é submetido a nenhum processo químico.

2.1.2 Resíduo

As indústrias de beneficiamento de caulim normalmente produzem dois tipos de resíduos: o primeiro é o resíduo grosso, proveniente da separação do quartzo do minério, gerado logo após a extração; o segundo é o resíduo fino, que provém da segunda etapa do beneficiamento, quando o caulim é purificado (ANJOS e NEVES, 2011). Esses resíduos podem conter, além de outros contaminantes, concentração de metais como o ferro (Fe), alumínio (Al), zinco (Zn), cádmio (Cd) e chumbo (Pb) acima do permitido pela legislação (MARTELLI e NEVES, 2012).

Do caulim extraído, 70% é desperdiçado, uma vez que não é reutilizado pelas indústrias ou por qualquer outro segmento. Esses resíduos são, quase sempre, descartados indiscriminadamente em campo aberto, conforme pode ser visualizado na Figura 2.7, desprezando-se as exigências de utilização de aterros e provocando uma série de danos ao meio ambiente, com impactos ambientais ao meio físico e biótico e à saúde da população residente nas regiões circunvizinhas aos “depósitos” de resíduos; fazendo com que os moradores rurais, pequenos agricultores em geral, sejam os mais afetados pelo inadequado gerenciamento do resíduo da indústria do beneficiamento do caulim (INGUZA *et al.*, 2014; MENEZES *et al.*, 2009).

Quando seco, partículas finas desse resíduo podem ser facilmente transportadas pelo ar, e a exposição a esse material provoca o aparecimento de pneumoconioses como a silicose e silicatose. Doenças essas que são causadas pela inalação de partículas de sílica e silicatos, que são depositadas no trato respiratório, dando início ao processo inflamatório que, se perpetuado pela inalação crônica e/ou em quantidade que supera as defesas, pode levar à fibrose intersticial do parênquima pulmonar (MO *et al.*, 2014; EROL *et al.*, 2013).

Figura 2.7 – Depósitos de resíduo de caulim a céu aberto.



Fonte: Própria (2016).

Frente à essa situação, as empresas vem sendo alvo de severas fiscalizações por parte dos órgãos de proteção ambiental, fazendo com que o resíduo gerado se torne uma fonte de custos para as empresas e um limitante no aumento de suas produções. Recentemente, vários esforços vêm sendo dedicado aos estudos e pesquisas visando à reutilização e aplicação segura dos resíduos originados das indústrias de mineração e beneficiamento mineral, no entanto, esses esforços ainda são pequenos frente ao volume de produção e graves problemas gerados por esses resíduos. (NOBRE e ACCHAR, 2010).

Em estudos, observaram que o resíduo, constituído basicamente por caulinita, caracteriza-se como uma matéria-prima excelente para fabricação de metacaulinita de alta reatividade (BARATA e ANGÉLICA, 2012), como precursor em síntese de zeólitas (MAIA *et al.*, 2007), na produção de refratários e cerâmicas avançadas (MENEZES *et al.*, 2007a), em cimento Portland (BARATA e DAL MOLIN, 2002) e para fabricação de chamota e refratários (MARTELLI e NEVES, 2012). Tais observações, levaram à pesquisa da utilização desse resíduo nas argamassas utilizadas na construção civil.

2.2 Argamassas para construção civil

Muito utilizadas na construção civil, as argamassas mais antigas (os primeiros registros de empregos de argamassa como material de construção são de aproximadamente 11.000 anos atrás) eram à base de cal e areia. No entanto, com as alterações das técnicas de construção, novos materiais foram desenvolvidos, sendo as argamassas modernas constituídas, geralmente, por cimento Portland, areia, cal hidratada e água (DALMOLIN, 2011).

No Brasil, o setor de argamassas apresenta-se pulverizado em diversas unidades produtivas com diferentes níveis tecnológicos, dificultando a produção de informações precisas

a respeito da produção e desenvolvimento no mercado, entretanto, dados da Associação Brasileira de Argamassa Industrializada (ABAI, 2016), estimam que a produção de argamassas industrializadas (adesivas, alvenarias e revestimentos) em 2015 foi de 120 milhões de toneladas, sendo o nordeste responsável por 22 % desse valor.

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), argamassa é definida como uma mistura homogênea de agregado (s) miúdo (s), aglomerante (s) inorgânico (s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada). A norma as classifica de acordo com sua finalidade:

- Argamassa para assentamento de alvenaria:
 - ✓ Com função de vedação;
 - ✓ Com função estrutural;
 - ✓ Para complementação da alvenaria (encunhamento): indicada para fechamento de vedação, após a última fiada de componentes.
- Argamassa para revestimento de paredes e tetos:
 - ✓ Revestimento interno: indicada para revestimento de ambientes internos da edificação, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única);
 - ✓ Revestimento externo: indicada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos da edificação em contato com o meio externo, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).
- Argamassa de uso geral: Indicada para assentamento de alvenaria sem função estrutural e revestimento de paredes e tetos internos e externos;
- Argamassa para reboco: Indicada para cobrimento de emboço, propiciando uma superfície fina que permita receber o acabamento; também denominada massa fina;
- Argamassa decorativa em camada fina: Argamassa de acabamento indicada para revestimentos com fins decorativos, em camada fina;

- Argamassa decorativa em monocamada: Argamassa de acabamento indicada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos de edificação em contato com o meio externo, aplicada em camada única e com fins decorativos.

2.2.1 *Argamassas Colantes*

As argamassas colantes começaram a serem pesquisadas nos Estados Unidos a partir do fim da II Guerra Mundial com a finalidade de racionalizar os serviços de instalação de revestimentos cerâmicos e oferecer aos consumidores uma alta produtividade nas instalações destes revestimentos a um menor custo possível. A racionalização se fazia necessária uma vez que o processo tradicional exigia múltiplos e simultâneos serviços, provocando indesejável lentidão. A partir desses objetivos surgiu o *dry-set mortar*, uma argamassa colante para assentar revestimentos cerâmicos sem necessidade de imergi-los em água (FIORITO, 2010).

A partir da década de 70, o Brasil passou a produzir argamassas colantes, sendo apenas na década seguinte que o produto passou a se popularizar, necessitando, então, de normalizações específicas. Dessa forma, o Comitê Brasileiro de Cimento, Concretos e Agregados, CB-18 da ABNT, em 1994, iniciou os estudos para a normalização das argamassas colantes; para em 1998 (COSTA *et al.*, 2007) terem as primeiras normas aprovadas e publicadas, dando origem às NBRs 14081-1 a 14081-5/2012. Estima-se que o Brasil produza anualmente 3 milhões de toneladas de argamassas colantes industrializadas (ABAI, 2016).

Fiorito (2010) define argamassa colante como uma mistura constituída de aglomerantes hidráulicos, agregados minerais e aditivos que possibilitam, quando preparada em obra com adição exclusiva de água, a formação de uma massa viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de peças cerâmicas para revestimentos ou pedras de revestimento.

Já a NBR 14081-1 (ABNT, 2012) define argamassa colante industrializada como um produto industrializado, no estado seco, composto por cimento Portland, agregados minerais, e aditivos químicos, que, quando misturando com água, forma uma pasta viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de placas cerâmicas para revestimento. De acordo com suas características (Tabela 2.1), elas são classificadas em:

Tabela 2.1 - Requisitos das argamassas colantes.

Propriedade	Argamassa Colante Industrializada				
	I	II	III	D	E
Tempo em aberto (min)	≥ 15	≥ 20	≥ 20	Argamassa do tipo I, II ou III, com deslizamento menor ou igual a 2 mm.	Argamassa do tipo I, II ou III, com tempo em aberto estendido em no mínimo 10 min.
Resistência de aderência à tração aos 28 dias em (mPa):					
- cura normal	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0		
- cura submersa	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0		
- cura em estufa	-	≥ 0,5	≥ 1,0		

Fonte: NBR 14081 (ABNT, 2012).

A argamassa colante do tipo AC-I é indicada para uso em ambientes internos, que não serão expostos ao calor e umidade, como paredes e pisos internos de residências; já a do tipo AC-II, é indicada para uso em ambientes externos que serão expostos ao calor e umidade, como fachadas, pisos ao ar livre; a do tipo AC-III é indicada para ambientes que estarão expostos a condições extremas de calor e umidade, como saunas, piscina, estufas. A norma ainda classifica as argamassas em tipo D, quando apresentam um deslizamento reduzido, e em tipo E, quando apresentam um tempo em aberto estendido em 10 minutos.

A normalização não prescreve a quantidade de água a ser adicionada, bem como um critério para proporcionamento e escolha dos materiais constituintes (aditivos, adições, agregados e aglomerante), sendo os mesmos determinados pelos próprios fabricantes, sendo comumente preparadas pela mistura de Cimento Portland, areia e aditivos poliméricos.

As argamassas podem ser avaliadas em função de suas propriedades no seu estado fresco e endurecido. Em seu estado fresco, elas estão diretamente ligadas à facilidade com que as argamassas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea antes do seu endurecimento, denominado de trabalhabilidade. Uma correta adequação de suas características reológicas às diversas solicitações envolvidas no momento da sua aplicação contribui para obtenção das máximas propriedades finais determinadas pelas características de formulação (CARDOSO *et al.*, 2010).

Rotineiramente, a determinação da consistência da argamassa tem caracterizado sua trabalhabilidade. Cincotto *et al.* (1995) define consistência como a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a resistir à deformação, não existindo uma unidade definida que a quantifique. A consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo influenciada pelos seguintes fatores: relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria do agregado, natureza e qualidade do aglomerante (COSTA *et al.*, 2013).

Desta maneira a água tem grande importância no comportamento reológico das argamassas, pois influencia diretamente sua trabalhabilidade e viscosidade, tendo papel fundamental nas reações de hidratação do aglomerante e na resistência de aderência entre a argamassa colante e o substrato. Para isso é importante que a argamassa possua uma boa capacidade de retenção de água, que Bezerra *et al.* (2011) define como a capacidade que a argamassa fresca tem em manter a sua trabalhabilidade quando sujeita às solicitações que provocam perda de água, seja por evaporação ou pela absorção de água pela base.

No caso de argamassas colantes, o tempo em aberto é um dos principais requisitos de desempenho de argamassas colantes. Esta propriedade refere-se ao maior intervalo de tempo entre a aplicação da argamassa colante estendida em cordões sobre o substrato e o assentamento da placa cerâmica sobre estes cordões, de modo a obter-se uma aderência adequada. A aplicação de argamassas em cordões, como é o caso das argamassas colantes, seria tecnicamente impossível sem o uso de um aditivo retentor de água, pois com a ausência deste, em poucos minutos, a argamassa perderia sua trabalhabilidade e secaria completamente (PÓVOAS e JOHN, 2006).

A NBR 13528 (ABNT, 2014) define aderência como a propriedade do revestimento de resistir às tensões normais e tangenciais atuantes na interface com o substrato. A norma cita que a resistência de aderência não é uma propriedade exclusiva da argamassa colante, mas sim da interação entre as camadas do sistema de revestimento, sendo necessário, ao se tratar do assunto, especificar em que substrato a argamassa será assentada.

Segundo Carasek (1996), a aderência entre um substrato poroso e a argamassa ocorre através de um fenômeno essencialmente mecânico. Este fenômeno é caracterizado basicamente pela transferência de água que ocorre entre a argamassa e o substrato, possibilitando a entrada da pasta de cimento nos poros do substrato que, ao hidratar, precipita hidróxidos e silicatos que promovem a ancoragem do revestimento.

2.2.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland apresenta extrema importância para a construção civil, sendo o mais utilizado, pois em função das suas características pode ser empregado em todas as etapas dos processos construtivos. Ele tem como principais matérias-primas o calcário e a argila, sendo constituído basicamente por silicatos de cálcio, alumina e óxido de ferro reativos, os quais são os responsáveis pela adesividade e estabilidade do cimento quando hidratado (MEHTA e

MONTEIRO, 2014). Este se caracteriza como um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, com capacidade de endurecer-se em presença de água. Em meio aquoso ele forma uma pasta homogênea que durante o processo de cura adquire rigidez conservando a sua estrutura, mesmo com novo contato com a água (ABCP, 2002).

O cimento Portland é basicamente o produto da calcinação de uma mistura de calcário, composto predominantemente por CaCO_3 , e materiais argilosos, à base de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , onde também estão presentes outros constituintes secundários, como: óxido de magnésio, fosfatos, álcalis. A mistura proporcionada dos constituintes principais (aproximadamente 3:1), além de eventualmente outros materiais (areia, cinza de pirita), é calcinada em forno rotativo a uma temperatura em torno de 1500 °C. Obtém-se então novos compostos químicos que se aglomeram em grânulos denominados clínquer. Após sofrer resfriamento brusco por injeção de ar na saída do forno, o clínquer é moído juntamente com compostos sulfáticos, geralmente a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), numa porcentagem de 1 a 5 %, para formar o cimento Portland. (NEVILLE, 1997).

Embora o cimento Portland consista essencialmente de vários compostos de cálcio, os resultados de análises químicas de rotina são expressos em termos de óxidos dos elementos presentes. É costume expressar os compostos individuais dos óxidos do clínquer utilizando-se de algumas abreviações. Na Tabela 2.2 estão dispostos os óxidos do cimento Portland e suas abreviações; já na Tabela 2.3 encontram-se as porcentagens usuais dos compostos existentes no cimento Portland.

Tabela 2.2 - Abreviações geralmente utilizadas para designar os óxidos presentes no cimento Portland.

Óxido	Abreviação
CaO	C
SiO ₂	S
Fe ₂ O ₃	F
Al ₂ O ₃	A
MgO	M
Na ₂ O	N
K ₂ O	K
SO ₃	\bar{S}

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Tabela 2.3 - Porcentagem dos principais compostos presentes no cimento Portland.

Composto	Abreviação	Porcentagem (%)
$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	55 – 60
$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	15 – 10
$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	10 – 12
$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{FeO}_3$	C_4AF	8 – 7

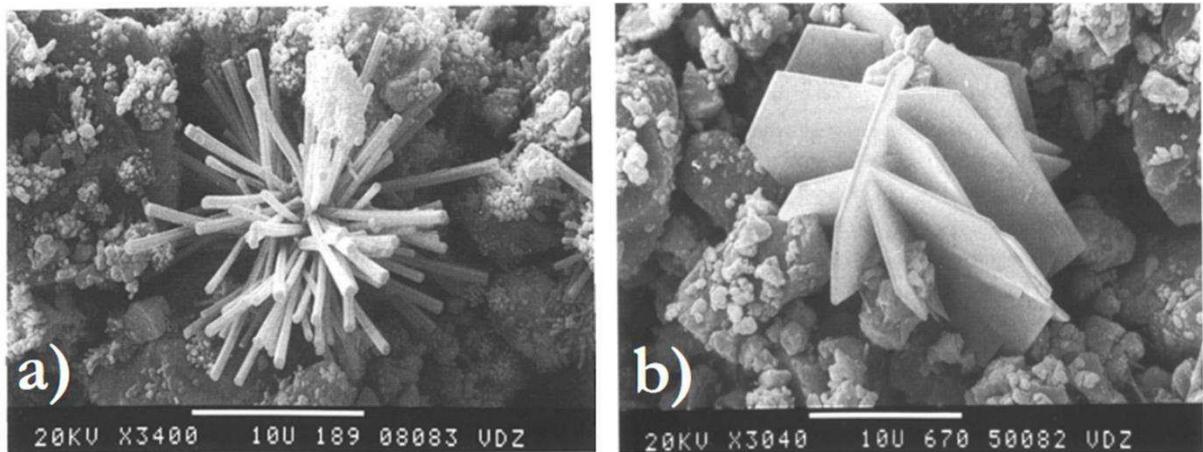
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

As reações de hidratação do cimento Portland são reações químicas que ocorrem entre os silicatos e aluminatos quase que imediatamente após a adição de água. Ocorrem sob mecanismos distintos com o passar do tempo, conduzindo a alterações químicas, físicas e mecânicas do sistema. Num primeiro momento, a hidratação ocorre pelo mecanismo de dissolução-precipitação, que envolve a dissolução dos compostos anidros, a formação de hidratos na solução e, a precipitação dos produtos hidratados devido às suas baixas solubilidades. Posteriormente, quando ocorre restrição na mobilidade iônica, a hidratação passa a ocorrer por reações no estado sólido. Os produtos destas reações – compostos hidratados estáveis – aderem uns aos outros conferindo ao cimento propriedades adesivas e coesivas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Quando o cimento é disperso em água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio formados a altas temperaturas tendem a entrar em solução, e a fase líquida torna-se rapidamente saturada em várias espécies iônicas. Reações da água com o aluminato tricálcico (C_3A) e o gesso ($\text{C}\bar{\text{S}}$) formam cristais curtos de trissulfato de cálcio hidratado (AFt), denominados etringita. Após alguns dias, de acordo com a proporção alumina-sulfato do cimento Portland, a etringita pode se tornar instável e se transformar em monossulfato hidratado (AFm), que tem a forma de placas hexagonais, conforme pode ser visualizado na Figura 2.8 (MEHTA e MONTEIRO, 2014; GRIESSER, 2002).

Silicato tricálcico (C_3S) reage com água formando um gel amorfo de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) – que se deposita na superfície da partícula – e hidróxido de cálcio (CH) – que precipita nos espaços entre as partículas de cimento. As reações de hidratação com os silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) formam uma camada fibrosa adicional de C-S-H em torno da partícula que se designa correntemente por C-S-H exterior (COSTA *et al.*, 2009).

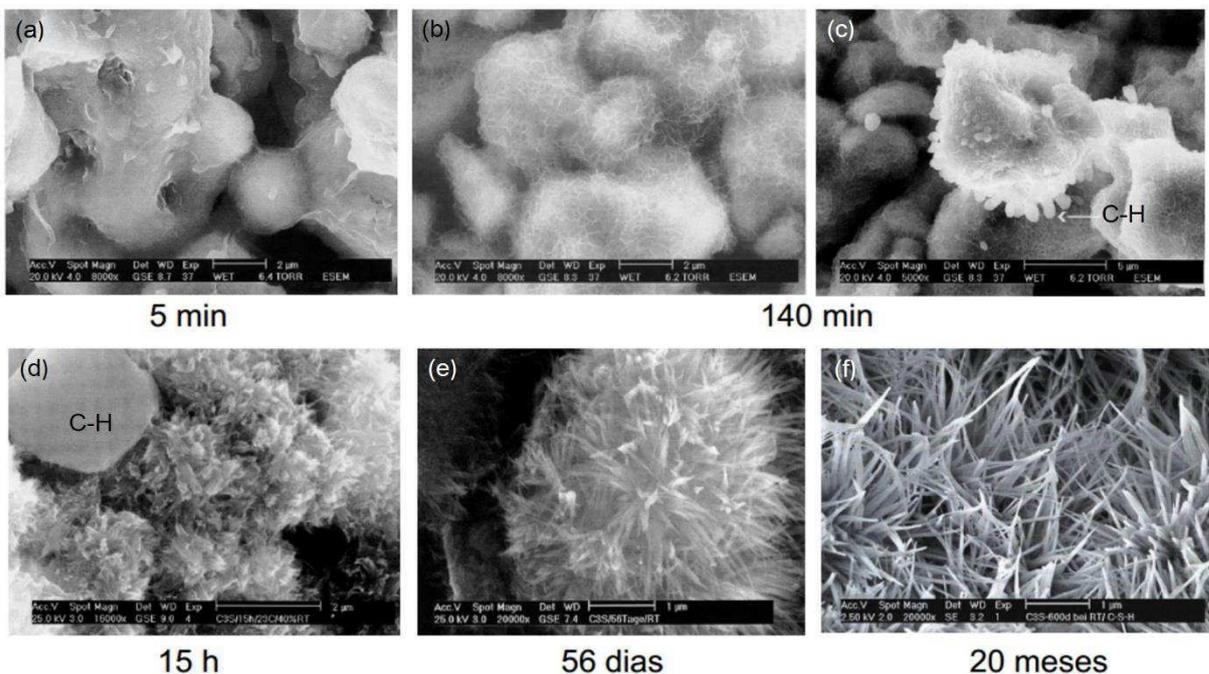
Figura 2.8 - Micrografia dos produtos da hidratação dos aluminatos de cálcio: (a) etringita e (b) monossulfato hidratado.



Fonte: Griesser (2002)

Na Figura 2.9 pode-se visualizar as micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica Ambiental (ESEM) do processo de hidratação dos silicatos de cálcio.

Figura 2.9 - Micrografias do processo de hidratação de partículas de silicatos de cálcio.



Fonte: STARK e WICHT (2000).

Inicialmente observa-se em (a) a formação de uma camada de C-S-H ao redor das partículas; em (b), uma elevação no volume da estrutura de C-S-H, adquirindo um aspecto esponjoso, sendo (c) uma imagem mais ampliada, verifica-se a formação de estruturas em

formas de gotas ligadas às esponjas de C-S-H, denominadas portlanditas (C-H) que se precipitaram na superfície da camada esponjosa. Na micrografia (d), pode ser verificado o crescimento das placas C-H, como também o desenvolvimento da estrutura da camada de C-S-H, que passa a apresentar estruturas alongadas mais espessas; em (e) observa-se o desenvolvimento dessas estruturas alongadas, que passam a se interpenetrar, formando o mineral tobermorita, como pode ser visualizado na micrografia (f).

Em síntese, a microestrutura do cimento hidratado é constituída por: fases sólidas (essencialmente, C-S-H, CH, AFt, AFm, partículas de cimento ainda por hidratar e inertes); poros (com diferentes formas, dimensões e conectividades); e, fases líquidas e gasosas (no interior dos poros). Os compostos hidratados de C-S-H constituem a fase ligante mais importante dos materiais de base cimentícias, uma vez que estabelecem entre si ligações de *van der Waals* que asseguram a aglomeração das fases sólidas e determinam a sua coesão e adesão.

2.2.1.1.1 *Materiais pozolânicos*

A norma ABNT NBR 12653 (2014), define materiais pozolânicos como sendo materiais silicosos ou silico-aluminosos que, de maneira isolada, apresentam pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas, quando submetidos a um meio cimentício aquoso, reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades aglomerantes. A mesma norma classifica os materiais pozolânicos em três classes: classe N, pozolanas naturais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas; classe C, cinzas volantes, produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas; e classe E: qualquer material cujos requisitos diferem das classes anteriores e que possa ser classificado como pozolana de acordo com os critérios pré-estabelecidos na mesma norma.

A divisão das pozolanas nestas três classes depende de suas características químicas e físicas, as quais devem ser comparadas com os parâmetros pré-estabelecidas pela norma para a sua classificação. A Tabela 2.4 apresenta as exigências normativas para as propriedades físicas e químicas dos materiais pozolânicos.

Atualmente, diversos materiais pozolânicos, como cinza volante, sílica ativa e cinza da casca de arroz, são utilizados em substituição parcial ao cimento Portland em pastas, argamassas e concretos. O emprego de pozolanas possibilita a redução de problemas ambientais relacionados ao uso de cimento Portland, como a grande quantidade requerida de matéria-prima

natural (argila e calcário) e o elevado montante de gases causadores do efeito estufa, sobretudo dióxido de carbono, emitidos para a atmosfera durante sua produção (ACI, 2013).

Tabela 2.4 - Exigências físicas e químicas dos materiais pozolânicos de acordo com suas classes.

Propriedade	Classe		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% mínima)	70	70	50
SO ₃ (% máxima)	4	5	5
Teor de umidade (% máxima)	3	3	3
Perda ao fogo (% máxima)	10	6	6
Material retido na peneira #325 (45 µm)	34	34	34
Atividade pozolânica com cimento (% mínima)	75	75	75
Atividade pozolânica com cal (MPa)	6	6	6
Teor de Ca(OH) ₂ fixado (mg/g mínimo)	436	436	436

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014).

Donatello *et al.* (2010) recomendam que, ao avaliar a atividade pozolânica de um material, é importante a escolha do método a ser utilizado, baseado em suas particularidades, isto é, conhecimento das limitações e das condições de ensaio. Assim sendo, recomendam a avaliação por mais de um método, apesar de que podem não apresentar correlação entre eles e de que pelo menos um deles deve apresentar uma tendência evolutiva de consumo de portlandita.

2.2.1.2 Areia

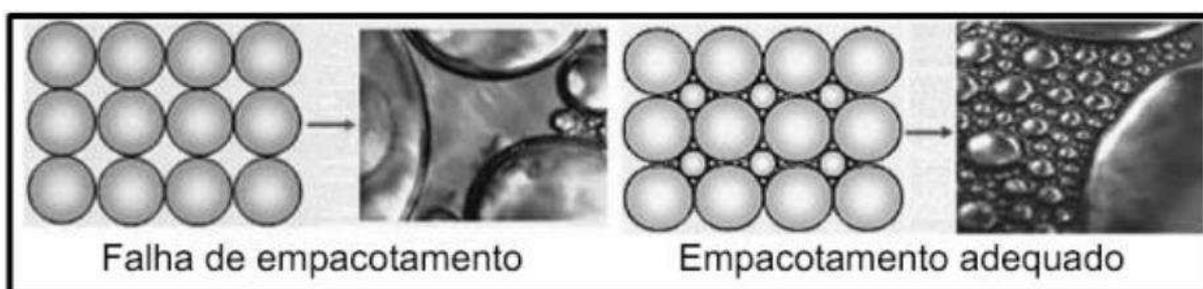
A areia é um agregado miúdo de grãos originada da desagregação de rochas em consequência da ação de agentes atmosféricos ou de trituração de rochas, consideradas areias puras, apresentam custo mais elevado. A sua produção ocorre em várzeas e leitos de rios, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, arenitos e pegmatitos decompostos. O uso de areias, como agregado miúdo, além de possibilitarem a fabricação de argamassas de natureza mais econômica do ponto de vista financeiro, tendo como base que o custo unitário da areia é inferior quando comparado ao do cimento, podem também favorecer outras propriedades

tais como: redução da retração da pasta de cimento, aumento da resistência ao desgaste, melhor trabalhabilidade e aumento da resistência ao fogo (BEZERRA *et al.*, 2011).

A areia não participa ativamente das reações químicas de endurecimento da argamassa, no entanto suas características granulométricas influenciam diretamente a quantidade de água utilizada em uma mistura e a acomodação das partículas (empacotamento). A sua finura é proporcional a quantidade de água utilizada, ou seja, quanto mais fino o agregado maior deve ser a quantidade de água necessária para obter a trabalhabilidade adequada. No estado endurecido, a areia influencia as resistências mecânicas, a capacidade de deformação e a permeabilidade (BEZERRA *et al.*, 2011; CARNEIRO *et al.*, 1997).

Na Figura 2.10 pode ser visualizada a acomodação das partículas do cimento preenchendo os vazios entre as partículas de agregados, visando à obtenção de sistemas de empacotamento com menor porosidade.

Figura 2.10 - Distribuição de partículas e o empacotamento do sistema.



Fonte: Winckler (2015).

Segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC, 2015), a quantidade de areia consumida pela construção civil, no Brasil, em 2014, foi de 439 milhões de toneladas; sendo que 70% da areia é produzida em leito de rios e 30% nas várzeas. A sua extração comumente se faz junto às matas ciliares, consideradas Áreas de Preservação Permanente. A atividade junto aos rios prevê um ciclo sazonal de deslocamento contínuo ao longo dos leitos, seguindo o ciclo de exploração de deposições e sua renovação por processos naturais. A areia de rios é comumente utilizada na forma *in natura*, sendo submetida naturalmente a processos de lixiviação, não apresentando quantidades significativas de sais e impurezas.

A atividade de extração de areia exige licenciamento ambiental, porém o índice de clandestinidade dessa atividade é significativo e preocupante. Com isso, os impactos ambientais provocados são grandes e descontrolados, degradando ambientes de delicado equilíbrio

ecológico (dunas e manguezais), alterando canais naturais de rios e os aspectos paisagísticos. Geralmente, as cavas da extração de areia são utilizadas como bota-fora da construção civil e até mesmo como lixões (VIEIRA e REZENDE, 2015).

Diante das restrições legais e ambientais impostas à extração de agregados miúdos naturais, o meio técnico tem pesquisado alternativas para sua substituição; considerando que a construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais minerais em todo o mundo, sendo responsável por um consumo em torno de 50% dos recursos naturais utilizados (AGOPYAN e JOHN, 2011), esse segmento surge como o mais indicado para reaproveitar materiais reciclados e resíduos derivados de diversos processos industriais em substituição ao uso da areia como agregado miúdo (MALTA *et al.*, 2013; MATTANA *et al.*, 2012).

2.2.1.3 Aditivos poliméricos

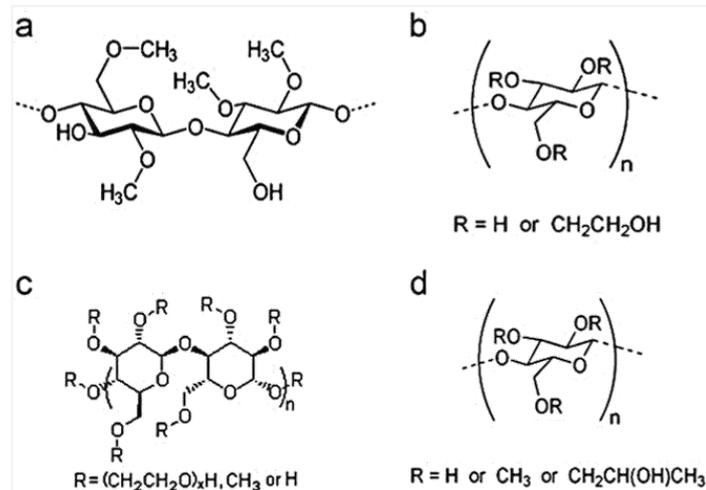
Na produção das argamassas colantes industrializadas são adicionados polímeros que possuem a finalidade de conferir maior capacidade de retenção de água, melhor trabalhabilidade, maiores adesividade e elasticidade às mesmas. A interação das moléculas dos polímeros com a água e entre si dificultam a separação entre a fase aquosa e os sólidos, aumentando a coesão e estabilidade da mistura e reduzindo a possibilidade de segregação (SILVA e ROMAN, 2002). Os éteres de celulose solúveis em água são os polímeros orgânicos mais utilizados para este fim, dentre eles destacam-se os usos de: metil celulose (MC), hidroxietil celulose (HEC), hidroxietil metil celulose (HEMC) e hidroxipropil metil celulose (HPMC).

De acordo com Pourchez *et al.* (2010), os usos desses éteres melhoram significativamente as características finais de resistência interna das argamassas. Estes aditivos, por aumentarem substancialmente a capacidade de retenção de água, impedem que ela seja drenada muito rapidamente pelo substrato, favorecendo a hidratação do cimento, e assim aumentando a resistência mecânica final.

Os éteres de celuloses são polímeros termoplásticos, de alta massa molecular obtido a partir de uma modificação da estrutura da celulose pela substituição de um ou mais grupos hidroxilas por grupos hidroxialquis, conforme pode ser visualizado na Figura 2.11; em um sistema a base de cimento, a água permanece ligada ao éter devido à sua natureza hidrofílica, resultando num aumento da viscosidade da fase aquosa. Com isso, a mobilidade da água e o transporte de íons são inibidos, tornando as reações de hidratação mais lentas, causando assim um retardo no tempo de pega e endurecimento. Esse retardo também está relacionado às

interações das macromoléculas do polímero com os cátions Ca^{+2} (SILVA e ROMAN, 2002; PATURAL *et al.*, 2010. KUDO, 2012).

Figura 2.11- Estruturas do: (a) MC; (b) HEC; (c) HEMC e (d) HPMC.



Fonte: Petit e Wirquin, 2013.

2.3 Incorporação do resíduo de caulim em materiais de construção

A produção de concretos substituindo até 25 % da massa de cimento Portland por resíduo de caulim *in natura* foram estudados por Lofty *et al.* (2015), que verificaram que as resistências mecânicas dos concretos após 7, 28 e 56 dias de cura. Verificou-se que resíduo elevou a resistência à compressão axial dos concretos com substituições de até 25% após 7 dias de cura, de 36,2 para 42,9 MPa. Após 28 dias de cura, não se observou diferença significativa entre as resistências dos concretos, variando de 44,8 até 47,7 MPa; o mesmo foi observado após 56 dias de cura, o resíduo não alterou significativamente os valores das resistências, os valores variaram de 48,5 até 51,3 MPa.

Argamassas de cal para serem utilizadas na restauração de prédios históricos foram produzidas por Azeredo *et al.* (2014) com a incorporação do resíduo de caulim. O resíduo substituiu o uso da areia nas argamassas em proporções de 10% a 50%, e suas propriedades relacionadas a durabilidade do material foram avaliadas após 28, 90 e 180 dias de cura. Após 28 dias de cura não foram observadas diferenças significativas entre as resistências mecânicas das argamassas de referências e a com 50 % de resíduo; apenas após 180 dias de cura que se verificou um aumento de 1,13 para 1,49 MPa na resistência mecânicas do material.

O resíduo de caulim foi utilizado com agregado e *filler* em concretos asfálticos por Inguza *et al.* (2014) que pesquisaram o efeito dessa adição substituindo de 5% a 40% da massa de aglomerados pelo resíduo. Observaram que ao aumentar a quantidade de resíduo em até 30%, aumentou-se a estabilidade do material. Valores maiores do que 30% tiveram efeito negativo sobre a estabilidade mecânica do concreto asfáltico. Já com relação à resistência à tensão por compressão diametral, verificaram que ao aumentar a quantidade de resíduo, houve um decréscimo na resistência do concreto, obtendo valores próximos aos de referências, mas menores do que os especificados pelas normas técnicas.

Argamassas de cimento para assentamento de revestimentos cerâmicos foram estudadas por Beltrão *et al.* (2014) ao utilizarem duas frações de resíduo de caulim calcinados em seus traços como aglomerantes. Os corpos de provas produzidos foram mantidos por 30 dias submersos em água saturada com cal, e posteriormente curados a temperatura ambiente por 60 e 90 dias. Esses materiais foram então submetidos a ensaios de resistência à compressão. Verificou-se um aumento da resistência do material contendo 5% de resíduo quando comparado ao material de referência (0%) após 60 dias de cura; os que tiveram substituição de 30% do cimento por resíduo de caulim calcinado não foram eficientes quando comparados aos de referência e aos com 5%.

A performance de concretos preparados com resíduo de uma indústria indiana de beneficiamento de caulim numa proporção de 10%, 20% e 30% em massa foi investigada por Bhimani e Vyas (2013). Após 28 dias de cura, testes de resistência à compressão foram realizados e observou-se um decréscimo de 34% nos valores. O concreto de referência apresentou uma resistência mecânica de 43,7 N/mm², enquanto que o concreto contendo 30 % de resíduo substituindo o cimento, apresentou 28,89 N/mm².

Bloco de solo-cal utilizando o resíduo do beneficiamento de caulim foram preparados por Anjos e Neves (2011). Os corpos de prova foram preparados contendo 10, 20, 30 e 40% do resíduo que foram curados por 28, 60 e 90 dias. Verificaram que houve um aumento da resistência à compressão simples dos corpos de prova em todas as composições em relação à cura de 28, 60 e 90 dias; a maior resistência observada para os corpos de prova foi aos 90 dias de cura, com a incorporação de 10% de resíduo (5,05 MPa). Os valores aos 28 e 60 dias, com exceção do resultado a 30% em 60 dias, foram inferiores ao limite mínimo de 2,0 MPa estabelecido pela norma. Diante o exposto, afirmaram a eficácia da incorporação do resíduo de caulim calcinado na produção de blocos solo-cal, observando que tempos inferiores a 60 dias de cura não apresentam resistências mecânicas mínimas estipuladas pelas normas.

Com o objetivo de avaliar a potencialidade da utilização do resíduo oriundo do beneficiamento do caulim em pisos cerâmicos, Andrade *et al.* (2009a) produziram placas cerâmicas com argilas plásticas e resíduo de caulim nas proporções de 10 a 90% de resíduo e em três diferentes temperaturas: 2.220, 2.230 e 2.250 °C. Ensaios de tensão de ruptura a tração foram realizados e observou-se que independente da temperatura de sinterização, o resíduo causou uma diminuição nas tensões dos materiais, passando de 47 MPa para 25 Mpa em média.

A incorporação de resíduo do beneficiamento do caulim em argamassas para alvenaria foi investigada por Rocha *et al.* (2008). Prepararam materiais para diversas finalidades: chapisco, assentamento, emboço e revestimento. Esses materiais foram preparados com cimento Portland, cal, areia e resíduo *in natura* em diversas proporções em massa (0, 5, 10, 15, 20 e 25%) substituindo a cal. As argamassas apresentaram melhorias em suas performances após 60 dias de cura, e essa melhoria é atribuída a pequena interação pozolânica entre o resíduo e o cimento, como também ao efeito *filler* do resíduo.

Avaliando a utilização do resíduo de caulim como constituinte de blocos de vedação, Rezende *et al.* (2008) avaliaram a substituição da areia pelo resíduo nas proporções de 40%, 70% e 100%. Testes de resistência a compressão foram realizados para avaliar a integridade dos blocos. Observaram um aumento na relação água/cimento devido ao teor de finos do resíduo em relação ao agregado miúdo. Após 63 dias de cura todos os blocos apresentaram valores superiores ao requisitado (1,0 MPa), sendo assim, esses blocos poderiam ser utilizados na construção de habitações populares e instalações agrícolas da região geradora do resíduo, constituindo uma boa alternativa para destinação desse material que é gerado em tão grande volume.

Telhas e blocos cerâmicos queimados a 800, 900 e 1000 °C foram produzidos por Menezes *et al.* (2007b) utilizando os resíduos de caulim e granito. Os materiais foram submetidos a testes de absorção de água e ruptura a flexão. Verificaram que o aumento da temperatura provocou a diminuição da absorção de água dos corpos de prova tanto das formulações contendo apenas resíduo de caulim, como daquelas contendo os dois tipos de resíduos. Como também verificaram um decréscimo do módulo de ruptura com a adição e aumento da quantidade de resíduo incorporado. Dessa forma, a combinação dos dois tipos de resíduos possibilitou obter melhores propriedades físicas quando se trabalhou com quantidade de até 50% de resíduos, em formulações para produção de tijolos maciços e furados e telhas.

O processo de beneficiamento de caulim gera uma grande quantidade de resíduo, que é lançado no meio ambiente sem um tratamento adequado. Esse material pode trazer danos à saúde da população como, também, prejudicar o ecossistema. Surge-se, então, a necessidade de

se agregar utilidade a esse material. Pesquisadores voltaram as suas atenções à utilização do resíduo no desenvolvimento de produtos para o setor de construção civil. Resultados satisfatórios foram observados com a utilização desse resíduo como agregado miúdos em argamassas a base de cimento, cal ou mistas. De acordo com os trabalhos anteriormente citados, percebe-se que o resíduo no seu estado *in natura* apresenta uma pequena pozolanicidade que pode elevar as resistências mecânicas dos materiais obtidos, como também atuar como *filler*, melhorando o empacotamento do sistema, e contribuindo, também, para melhorar as resistências mecânicas do material. Não se encontraram referências relativas à utilização desse resíduo no seu estado *in natura* em argamassas colantes, que é amplamente utilizada no assentamento de placas cerâmicas e porcelanatos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo de caulim foi coletado na região de Juazeirinho, no interior da Paraíba, e peneirado *in loco* em malha com abertura de 2,36 mm a fim de se eliminar impurezas como folhagens, raízes e pequenas pedras.

Além do resíduo, nos ensaios foram utilizados: areia de granulometria média e areia normal de acordo com a norma NBR 7214 (ABNT, 2015), cimentos Portland do tipo CP II – F32 (com filler calcário numa proporção em massa de 6 a 10 %) e CP II – Z32 (com adição de pozolanas de 6 a 14 % em massa), óxido de cálcio P. A., hidróxido de cálcio P. A., aditivo polimérico hidroxipropil metilcelulose (HPMC), que foi gentilmente cedido pelo Centro de Tecnologia de Argamassas, e água do sistema de abastecimento.

Também foram utilizados para ensaios das argamassas colantes, substrato-padrão, conforme especificações da NBR 14081:2 (ABNT, 2012), e placas cerâmicas de acordo com as especificações contidas nas NBR14081:3, NBR 14081:4 e 14081:5 (ABNT, 2012).

3.1 Caracterização do resíduo

Os seguintes ensaios e técnicas foram utilizados para caracterizar o resíduo de caulim:

- Distribuição granulométrica;
- Massa específica e massa unitária;
- Umidade;
- Perda ao fogo;
- Atividade pozolânica com cimento;
- Atividade pozolânica com cal;
- Teor de hidróxido de cálcio fixado;
- Fluorescência de raios X por energia dispersiva (ED-XRF);
- Difractometria de Raios X (DRX);

A areia de granulometria média, utilizada nos traços das argamassas foram caracterizadas quanto à sua distribuição granulométrica, massas específica e unitária.

Os ensaios a seguir foram realizados no Laboratório de Solos do Campus III da Universidade Federal da Paraíba.

A análise granulométrica do material foi realizada baseada na norma NBR NM 248 (ABNT, 2013), onde uma quantidade de amostra é submetida a peneiramento em um conjunto de peneiras sucessivas em ordem decrescente de abertura da malha (2,36; 1,19; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075 mm), sendo determinada em cada malha a quantidade de amostra retida por pesagem, como também o módulo de finura e diâmetro máximo característico.

A massa específica foi determinada de acordo com a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009) por meio de um picnômetro; e a massa unitária foi determinada seguindo a norma NBR NM 45 (ABNT, 2009) ao medir a massa de resíduo ou areia que ocupou um molde metálico em formato de paralelepípedo medindo 316 x 316 x 150 mm.

O ensaio do teor de umidade do resíduo foi realizado de acordo com a NBR NM 24 (ABNT, 2012) onde o material foi seco em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C, e, a cada 30 min, realizadas pesagens das amostras até que o seu peso permanecesse constante, e por diferença, determinada a quantidade de água evaporada.

A perda ao fogo, foi realizada seguindo os procedimentos indicados na NBR NM 18 (ABNT, 2012). A amostra após secagem, foi levada à mufla, onde permaneceu sob temperatura de 900 °C, por 50 minutos. O material foi retirado e levado ao dessecador para posterior pesagem.

A atividade pozolânica com cimento foi determinada seguindo os procedimentos constantes na norma NBR 5752 (ABNT, 2014). Foi preparada uma argamassa de referência constituída de cimento Portland, areia normal (234 g de cada fração retidas nas peneiras 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm) e água, e outra argamassa com 25% da massa do cimento substituída pelo resíduo de caulim. Foram preparados 5 corpos de prova cilíndricos de cada argamassa que foram curados nos próprios moldes durante 24 h a temperatura ambiente, desmoldados e durante 27 dias a temperatura de 38 ± 2 °C. A ruptura à compressão dos corpos de prova foi realizada aos 28 dias e os valores obtidos foram comparados com a resistência à compressão da argamassa de referência.

Já a atividade pozolânica com cal, seguiu a metodologia da norma NBR 5751 (ABNT, 2015), onde uma argamassa é preparada com areia normal (234 g de cada fração retidas nas peneiras 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm), 104 g de hidróxido de cálcio, resíduo de caulim em quantidade que correspondia ao dobro do volume de hidróxido de cálcio, e água. Após a preparação, os

corpos de prova foram curados nos próprios moldes durante 24 h a temperatura ambiente e durante seis dias a temperatura de 55 ± 4 °C, sendo no sétimo dia a ruptura dos mesmos realizadas a temperatura ambiente.

As rupturas dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande.

O teor de hidróxido de cálcio fixado foi determinado no Laboratório de Química e Biomassa da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, pelo método *Chapelle* modificado, seguindo a NBR 15895 (ABNT, 2010). Este método consiste em manter sob agitação constante uma mistura de 1 g do material a ser avaliado com 2 g de óxido de cálcio em 250 ml de água, à temperatura de 90 ± 5 °C, durante 16 horas; decorrido o tempo, filtra-se a mistura, e titula o filtrado com ácido clorídrico 0,1 N. O resultado é expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido por grama de material analisado.

No Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO) da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande foi determinada a composições química do mineral, em termos de seus óxidos componentes, através da fluorescência de raios X por energia dispersiva (ED-XRF). E no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande foi realizada a difratometria de raios X (DRX) a fim de se determinar as principais fases minerais que constituem o resíduo.

3.2 Ensaios das argamassas no estado fresco

Para os ensaios a argamassa foi preparada seguindo as indicações contidas na norma 14081:2 (ABNT, 2012), onde previamente os elementos que compõe a argamassa foram misturados, e acondicionados em sacos plásticos e fechados para evitar a entrada de ar. Em um misturador mecânico, foi adicionada a água, e posteriormente a argamassa anidra de modo contínuo por 30 segundos e acionou-se o misturador por 30 segundos em velocidade baixa. Desligou-se o misturador, e com o auxílio de uma espátula misturou-se manualmente a argamassa por 1 minuto, raspando a aderida às paredes do misturador. Em seguida, acionou-se o misturador por mais 1 minuto, misturou-se manualmente por no máximo 30 segundos, retirando a argamassa aderida às pás do misturador, e, finalmente, utilizou a argamassa nos ensaios.

O ensaio de Índice de Consistência foi realizado no Centro de Tecnologia de Argamassas, localizado em Recife (PE), seguindo o método preconizado na NBR 13276 (ABNT, 2005), onde inicialmente a argamassa preparada com uma determinada quantidade de água foi utilizada para preencher o molde tronco-cônico que foi localizado no centro da mesa de consistência (*flow table*). Após preenchimento, rasou-se o molde com auxílio de uma régua metálica e acionou-se a manivela da mesa, de modo que ela se elevasse 30 vezes em 30 segundos, totalizando 30 golpes. Imediatamente após, mediu-se o diâmetro do espalhamento da argamassa sobre a mesa, devendo esse estar dentro de 225 ± 10 mm. Caso não, água é adicionada, ou prepara-se uma argamassa com menor quantidade de água até atingir esse intervalo de espalhamento. Na Figura 3.1 pode-se visualizar as etapas da realização do ensaio.

Figura 3.1 - Etapas do ensaio de Índice de Consistência.



Fonte: Bezerra *et al.*, 2011.

As densidades das argamassas no estado fresco foram determinadas seguindo o método descrito na NBR 13278 (ABNT, 2005), onde um molde cilíndrico metálico de volume aproximado de $196,35 \text{ cm}^3$ vazio foi pesado, e em seguida preenchido com a argamassa no estado fresco. Rasou-se a borda do molde com uma régua metálica e em seguida pesaram-se os moldes contendo as argamassas. A determinação da densidade foi realizada relacionando a massa de argamassa contida no molde pelo volume dele. O ensaio foi realizado no Laboratório de Química e Biomassa da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande.

A retenção de água foi determinada de acordo com a metodologia contida na norma NBR 13277 (ABNT, 2005). Em um molde cilíndrico (25 x 100 mm) previamente pesado, foi adicionada a argamassa, rasou-se com auxílio da régua metálica, e pesou-se o conjunto. Sobre a argamassa foram colocadas duas telas de gaze e 12 papeis de filtros pesados anteriormente. Colocou-se a tampa metálica sobre o conjunto, e o virou de cabeça para baixo. Sobre o mesmo foi posto um o peso de 2 kg e aguardou-se por 2 min.

Decorrido o tempo, desvirou-se o conjunto e pesaram-se os 12 papeis de filtros. A retenção de água foi calculada relacionando-se a quantidade de água absorvida pelos papeis de filtros, com a quantidade de argamassa que foi adicionada ao molde. O ensaio foi realizado no Laboratório de Química e Biomassa da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande.

O deslizamento, uma característica importante das argamassas colantes, foi determinado seguindo a norma NBR 14081:5 (ABNT, 2012). De acordo com o ensaio, a argamassa foi espalhada sobre o substrato padrão que se encontrava na posição horizontal, e após 2 minutos, foram posicionadas 3 placas cerâmicas rentes a borda da argamassa espalhada. Sobre as placas, pesos-padrões foram posicionados por 30 segundos. Retirou-se os pesos-padrões e mediu, com auxílio do paquímetro, a posição das placas em relação a borda do substrato.

Em seguida, o conjunto foi verticalizado suavemente, e após 20 min, o conjunto foi posto novamente na posição horizontal, e mediu-se com um paquímetro as variações das posições das placas em relação a borda do substrato. Na

Figura 3.2, pode-se visualizar o conjunto substrato padrão, argamassa e placa cerâmica na posição vertical. O ensaio foi realizado no Centro de Tecnologia de Argamassas, em Recife (PE).

Figura 3.2 - Substrato padrão contendo argamassa e placa cerâmica na posição vertical durante o ensaio de deslizamento.



Fonte: Própria (2016).

3.3 Ensaios das argamassas no estado endurecido

As determinações das densidades das argamassas no estado endurecido foram realizadas no Laboratório de Química e Biomassa da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande. Seguiu-se a metodologia proposta pela NBR 13280 (ABNT, 2005), onde os corpos de prova preparados no ensaio de densidade no estado fresco foram curados por 28 dias. Após esse período, as alturas e os diâmetros dos corpos de prova foram medidos com auxílio do paquímetro e em seguida foram pesados. A densidade foi determinada relacionando as massas dos corpos de prova com os seus volumes.

O Tempo em Aberto (TA) é o ensaio que está relacionado ao tempo em que a argamassa pode ficar estendida sobre o substrato, antes de serem posicionadas as placas cerâmicas, sem que perca a resistência mecânica adequada. Esse ensaio é normatizado pela NBR 14081:3 (ABNT, 2012). Nesse ensaio, a argamassa foi estendida sobre o substrato padrão e aguardou-se 15 minutos de acordo com o indicado pela norma para argamassas do tipo AC-I, que é o da argamassa desse estudo. Decorrido esse tempo, 10 placas cerâmicas foram posicionadas sobre a argamassa, e em seguida foram posicionados pesos-padrões sobre cada uma. Após 30 segundos, os pesos foram retirados e esse conjunto foi curado ao ar livre por 28 dias. Após a cura, foi realizado o arrancamento das placas e medidas as resistências mecânicas de cada uma. Os ensaios foram realizados no Centro de Tecnologia de Argamassas, em Recife (PE).

Figura 3.3 - Etapas dos ensaios para determinação do Tempo em Aberto e da Resistência de Aderência à Tração.



Fonte: Rossa, 2009.

Já o ensaio de Resistência de Aderência à Tração (RAT) foi determinado de acordo com a norma NBR 14081:4. O ensaio assemelha-se ao Tempo em Aberto com exceção de que após o espalhamento da argamassa, aguardou-se apenas 5 minutos para se posicionar as 10 placas cerâmicas. Para cada argamassa, foram preparados dois substratos padrões contendo 10 placas cerâmicas, um foi curado ao ar, e outro foi curado imerso em água. Após 28 dias de cura, as placas cerâmicas foram submetidas à tração por arrancamento. Na Figura 3.3 estão as etapas seguidas nos ensaios para determinação do Tempo em Aberto e da Resistência de Aderência a Tração.

4 DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA COLANTE UTILIZANDO RESÍDUO DE CAULIM

Oliveira, G. C.¹, Patrício, A. C. L.¹, Araújo, G. T.¹

¹Laboratório de Química e Biomassa, Unidade Acadêmica de Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.
Rua Aprígio Veloso, 882, Bloco CX, 58429-900, Telefone: + 55 (83) 2101-1330.

Resumo

Esse trabalho objetivou investigar o comportamento de uma argamassa colante do tipo AC-I utilizando o resíduo fino oriundo do processo de beneficiamento de caulim, no seu estado natural, como agregado miúdo. O resíduo foi caracterizado e incorporado às argamassas. Identificou-se que o resíduo é basicamente composto por caulinita e mica e que não apresentou as características necessárias para ser tratado como uma pozolana. Substituições de 0 a 100 % da areia pelo resíduo foram realizadas e observou-se que as argamassas se apresentaram mais leves e com um decréscimo do deslizamento à medida que se aumentou o teor de resíduo nos traços. O mesmo foi observado para as resistências mecânicas ao se elevar o teor de resíduo, mas argamassas contendo até 25 % de resíduo apresentaram valores de resistências dentro das especificações brasileiras. Dessa forma, o uso desse resíduo nos traços de argamassas colantes possibilita reduzir o seu depósito inadequado no meio ambiente, como também reduzir a quantidade de areia utilizada, minimizando a sua extração e seus efeitos no meio ambiente

Palavras-chave: resíduo caulim, agregado miúdo, argamassa colante.

Abstract

This study aimed to investigate the behaviour of an AC-I adhesive mortar type using the residue derived from the kaolin beneficiation process in its natural state as fine aggregate. The residue was characterized and incorporated into the mortar formulation. It was identified the residue is essentially composed by kaolinite and mica and did not present necessary characteristics to be treated as pozzolan. Substitutions from 0 up to 100 % of sand by residue were performed and it was observed the mortar was lighter and with a slipping decreasing when increased the residue content. The same was observed about the mechanical strength when increased the residue content, but mortar containing up to 25 % of residue presented resistance values according to Brazilian specifications. Thus, the using of this residue in adhesive mortars enable to reduce a malfunction storage in the environmental, as also the amount of sand used, minimizing its extraction and effects on the environment.

Keywords: kaolin residue, fine aggregate, adhesive mortar.

4.1 Introdução

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (2015), no ano de 2014 o Brasil ocupou a sexta posição mundial de produção de caulim, mineral importante para as indústrias pois apresenta aplicações em várias áreas, como na cobertura e carga de papel, cerâmica, tintas, plásticos, borracha, fibras de vidro, suporte de catalisadores de craqueamento de petróleo (BERTOLINO *et al.*, 2012). O caulim apresenta coloração clara, quase branca, devido ao seu baixo teor de ferro, e é constituído em sua grande parte pelo mineral caulinita $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$ (GRIM, 1968).

O caulim é extraído contendo diversas impurezas, como quartzo, mica, feldspato e óxidos contaminantes, sendo necessário passar por um processo de beneficiamento, a fim de se adequar às necessidades industriais. Durante esse processamento há uma geração de resíduos que chegam a representar 70 % do volume total extraído (ANJOS e NEVES, 2011). Todo esse material é disposto de forma indiscriminada em grandes áreas abertas próximas às usinas de beneficiamento, sem o menor controle ambiental. De acordo com Castro *et al.* (2015), o resíduo é classificado como II A (não perigoso e não inerte), mas as consequências de sua disposição inadequada vão desde a transformação da paisagem local, alterando topografia, flora, fauna, sistema hídrico e morfofisiológico do solo; como também levam ao surgimento de doenças respiratórias devido às partículas em suspensão no ar (BELTRÃO *et al.*, 2014).

Frente à essa situação, faz-se necessário o gerenciamento através da criação de procedimentos e dispositivos como a destinação adequada para esse tipo de resíduo, o reuso e/ou reciclagem, minimizando assim o impacto ambiental causado. Dentre as alternativas, uma promissora é o seu uso pela construção civil, uma vez que esse segmento consome aproximadamente 50 % de todo o recurso natural produzido, além de seus produtos serem grandes consumidores de energia. Ademais a Associação Brasileira de Materiais de Construção (ABRAMAT) indica aumentos progressivos no consumo de insumos básicos para o setor devido ao constante crescimento da construção civil no Brasil, por essa razão, é de fundamental importância o desenvolvimento de materiais que supram essa necessidade (ROCHA *et al.*, 2008; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A aplicação e o uso de resíduos como adições minerais em cimentos, argamassas e concretos vem sendo amplamente pesquisados nos últimos anos, a fim de promover a melhoria dos aspectos econômicos, mecânicos e de durabilidade dos compósitos. A possibilidade de se desenvolver um novo material, agregando melhorias nos aspectos técnicos, propicia um novo

foco para a desenvolvimento de produtos para a construção civil com matéria prima reaproveitada (KANNING *et al.*, 2014).

As adições minerais podem ser utilizadas em substituição parcial ou em adição ao cimento Portland, objetivando um desempenho tecnológico diferenciado aos produtos cimentícios; Dalmolin (2011) classifica as adições minerais em três grupos, de acordo com sua ação físico-química: adições pozolânicas, que reagem com o Ca(OH)_2 em meio aquoso formando compostos aglomerantes, como as cinzas volantes; adições cimentantes, que não reagem com o hidróxido de cálcio, levando a uma auto hidratação lenta, como as escórias de alto forno, formando produtos não indicados para fins estruturais; e adições *filler*, que são quimicamente inertes, mas influenciam na hidratação do cimento devido ao melhoramento do empacotamento das partículas, como o *filler* calcário.

Dentre as argamassas, temos a argamassa colante industrializada, definida pela NBR 14081:1 (ABNT, 2012) como sendo produto industrializado, no estado seco, composto por cimento Portland, agregados minerais, e aditivos químicos, que, quando misturando com água, forma uma pasta viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de placas cerâmicas para revestimento. Essa mesma norma classifica as argamassas colantes de acordo com as indicações de uso, em AC-I, para ambientes interno, AC-II, para ambientes externos e AC-III, para ambientes com umidade e calor excessivos.

A normalização não prescreve a quantidade de água a ser adicionada, bem como um critério para proporcionamento e escolha dos materiais constituintes (aditivos, adições, agregados e aglomerante), sendo os mesmos determinados pelos próprios fabricantes, sendo comumente preparadas pela mistura de Cimento Portland, agregado miúdo (areia) e aditivos poliméricos, mas sabe-se que o agregado miúdo representa grande parte de sua composição.

As argamassas a base de cimento Portland apresentam até 80% de sua composição constituída de agregados miúdos (areia), e esse material é oriundo da desagregação de rochas em consequência da ação de agentes atmosféricos ou de trituração. A areia não participa ativamente das reações químicas de endurecimento da argamassa, a sua influência deve-se às características físicas, como a sua distribuição granulométrica, forma e textura, que influenciam diretamente na quantidade de água utilizada em uma mistura, na acomodação das partículas (empacotamento), como também nas resistências mecânicas finais (BEZERRA *et al.*, 2011).

Grande parte (70 %) da areia produzida no Brasil é extraída em leito de rios, apesar da exigência de licenciamento ambiental, a atividade clandestina é alarmante, pois gera altos impactos ambientais, alterando canais naturais de rios e aspectos paisagísticos (VIEIRA e REZENDE, 2015). Como há uma grande necessidade de agregados miúdos no preparo de

argamassas, pesquisadores vem voltado suas atenções para o desenvolvimento de materiais alternativos para sua substituição.

Segundo dados da Associação Nacional das Empresas Produtoras de Agregados para Construção (ANEPAC, 2015), a quantidade de areia consumida anualmente na construção civil brasileira é de 320 milhões de m³, sendo que 70% da areia é produzida em leito de rios e 30% nas várzeas. A sua extração comumente se faz junto às matas ciliares, consideradas Áreas de Preservação Permanente. A atividade próxima aos rios prevê um ciclo sazonal de deslocamento contínuo ao longo dos leitos, seguindo o ciclo de exploração de deposições e sua renovação por processos naturais. A areia de rios é comumente utilizada na forma *in natura*, sendo submetida naturalmente a processos de lixiviação, não apresentando quantidades significativas de sais e impurezas.

A atividade de extração de areia exige licenciamento ambiental, porem o índice de clandestinidade dessa atividade é significativo e preocupante. Com isso, os impactos ambientais provocados são grandes e descontrolados, degradando ambientes de delicado equilíbrio ecológico (dunas e manguezais), alterando canais naturais de rios e os aspectos paisagísticos. Geralmente, as cavas da extração de areia são utilizadas como despejo de resíduos da construção civil e até mesmo como lixões (VIEIRA e REZENDE, 2015).

Diante das restrições legais e ambientais impostas à extração de agregados miúdos naturais, o meio técnico tem pesquisado alternativas para sua substituição; considerando que a construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais minerais em todo o mundo, sendo responsável por um consumo em torno de 50% dos recursos naturais utilizados (AGOPYAN e JOHN, 2011), esse segmento surge como o mais indicado para reaproveitar materiais reciclados e resíduos derivados de diversos processos industriais em substituição ao uso da areia como agregado miúdo (MALTA et al., 2013; MATTANA et al., 2012).

Em estudos prévio, observou-se que o resíduo, basicamente constituído por caulinita e mica, apresentou performances consideráveis ao ser utilizado como adições em cimento para produção de concretos (LOFTY *et al.*, 2015), como agregado miúdo em argamassas de cal para restauração (AZEREDO *et al.*, 2014), na produção de blocos solo-cal (ANJOS e NEVES, 2011), pisos cerâmicos (ANDRADE *et al.*, 2009a) e em blocos de vedação (REZENDE et al., 2008).

Frente às situações mencionadas, o uso do resíduo de caulim pela indústria civil surge como uma oportunidade de reduzir o problema relativo à sua disposição inadequada no meio ambiente. O material, de acordo com suas características físicas e químicas pode ser utilizado

como adição mineral ou agregado miúdo, contribuindo também para a minimização da extração de areia para uso como agregado em argamassas e concretos.

Esse trabalho tem por objetivo investigar o uso do resíduo de caulim no estado *in natura* como agregado miúdo na formulação de argamassa colante do tipo AC-I, uma vez que não foram encontrados registros sobre a sua utilização nesse tipo de argamassa.

4.2 Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento desse trabalho foram utilizados areia, adquirida de comércio local, na cidade de Campina Grande (PB), cimentos Portland dos tipos CP II-F32 (contendo de 6 a 10 % de filler calcário) e CP II-Z32 (contendo de 6 a 14 % de pozolanas), óxido de cálcio P. A., hidróxido de cálcio P. A., água do sistema de abastecimento, o aditivo polimérico hidroxipropil metilcelulose (HPMC), que foi gentilmente cedido pelo Centro de Tecnologia de Argamassas, e o resíduo fino de caulim, que foi coletado na região de Juazeirinho, no interior da Paraíba.

4.2.1 Caracterização dos materiais

O teor de umidade do resíduo foi determinado seguindo a NBR NM 24 (ABNT, 2012), já a perda ao fogo, pela NBR NM 18 (ABNT, 2012). As atividades pozolânicas do resíduo foram avaliadas por dois métodos físicos: com cimento (ABNT NBR 5752, 2014) e com cal (ABNT NBR 5751, 2015), e por um método químico, seguindo a NBR 15895 (ABNT, 2010). Fluorescência de raios X por energia dispersiva (ED-XRF), como também difratometria de raios X (DRX) foram realizadas para se conhecer a composição química e mineralógica do material.

Tanto para o resíduo como para a areia, que foi utilizada nas formulações das argamassas, foram determinadas suas características granulométricas por peneiramento, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2013), como foram determinadas as massas específicas (ABNT NBR NM 52, 2009) e unitárias (ABNT NBR NM 45, 2009).

4.2.2 Caracterização das argamassas

Na Tabela 4.1 a seguir encontram-se os ensaios realizados para caracterizar as argamassas, bem como as metodologias utilizadas.

Tabela 4.1 - Ensaios realizadas nas argamassas colantes no estado fresco e endurecido.

Estado	Ensaio	Norma ABNT
Fresco	Índice de Consistência	13276 (2005)
	Densidade	13278 (2005)
	Retenção de Água	13277(2005)
	Deslizamento	14081-5 (2012)
Endurecido	Densidade aparente	13280 (2005)
	Resistência de Aderência à Tração	14081-4 (2012)
	Tempo em Aberto	14081-3 (2012)

Fonte: Própria (2016).

4.2.3 Planejamento experimental

Para avaliar a substituição da areia pelo resíduo de caulim na composição da argamassa, um planejamento de misturas de dois componentes foi delineado, tendo como base a formulação geralmente encontrada pela região para argamassas colantes do tipo AC-I: 18 % de cimento, 82 % de areia e uma adição de 0,18 % de aditivo de celulose em relação à massa total de argamassa.

Portanto, para o desenvolvimento desse trabalho, as concentrações de cimento e aditivo foram fixadas e variou-se a concentração de areia, substituindo-a por resíduo de caulim. Na Tabela 4.2 encontram-se os traços das argamassas propostos pelo delineamento, lembrando que a cada mistura foi adicionada 0,18 % de aditivo em relação à massa total.

As Resistências de Aderência à Tração (RAT) das argamassas foram utilizadas como principal parâmetro a ser avaliado, através de análise de variância (ANOVA) com auxílio do software STATISTICA[®], versão 7.0, onde foi determinado o melhor modelo que descreveu o comportamento dessa variação, e que a partir deste, foi possível prever qual a quantidade máxima de areia que pode ser substituída pelo resíduo de caulim, obtendo uma argamassa com propriedades adequadas para uso.

Tabela 4.2 - Proporções dos componentes das argamassas colantes.

Proporções das Composições das Argamassas (% em massa)				
Codificação	Teor de Substituição (%)	Cimento (C)	Areia (A)	Resíduo de Caulim (K)
A1	0	18	82	0
A2	25	18	61,4	20,5
A3	50	18	41	41
A4	75	18	20,5	61,5
A5	100	18	0	82

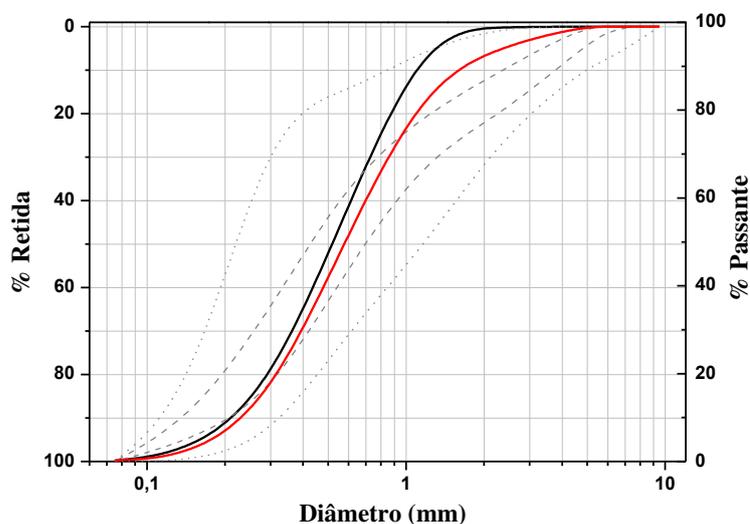
Fonte: Própria (2016).

4.3 Resultados e discussões

4.3.1 Caracterização dos Materiais

A distribuição granulométrica (Figura 4.1) apresentada pelo resíduo de caulim e pela areia não mostra pico acumulativo de material entre as peneiras. A norma NBR NM 248 (ABNT, 2013) estabelece os limites granulométricos para que agregados miúdos sejam utilizados em argamassas e concretos. Esses limites podem ser observados pela região delimitada por linhas pontilhadas, região considerada ótima para utilização; e por linhas tracejadas, a região considerada utilizável.

Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do resíduo de caulim e da areia.



Fonte: Própria (2016).

A distribuição granulométrica apresentada demonstra que a utilização do resíduo como adição mineral ao cimento Portland ou em substituição de agregados miúdos em argamassas e concretos, pode contribuir para a obtenção de uma melhor granulometria das misturas, contribuindo com o preenchimento de vazios, proporcionando a obtenção de sistemas de empacotamento com a menor porosidade e ampliando os pontos de nucleação, favorecendo a hidratação do cimento Portland.

Já na Tabela 4.3 constam os valores referentes às massas específicas, massas unitárias, módulos de finura e dimensões máximas das partículas. Os materiais apesar de apresentarem massas específicas semelhantes, possuem porosidades diferenciadas, pois pode-se observar que a massa unitária do resíduo de caulim é aproximadamente 30% menor do que a da areia; essa porosidade pode contribuir na aderência – fator importante na resistência mecânica final da argamassa – entre a pasta de cimento hidratada e o agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 1997). O resíduo de caulim apresenta um módulo de finura ligeiramente menor do que o apresentado pela areia, o que indica que as argamassas preparadas com o resíduo necessitarão, para se obter uma mesma trabalhadade, de uma quantidade de água superior às preparadas com areia, conforme afirmam Silva *et al.* (2015).

Tabela 4.3 - Propriedades físicas das partículas da areia e do resíduo de caulim.

Propriedade	Areia	Resíduo de Caulim
Massa específica (g/cm³)	2,59	2,51
Massa unitária (g/cm³)	1,59	1,13
Módulo de finura (%)	2,49	2,21
Diâmetro máximo (mm)	2,36	1,19

Fonte: Própria (2016).

A análise química do resíduo está apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Composição química do resíduo de caulim.

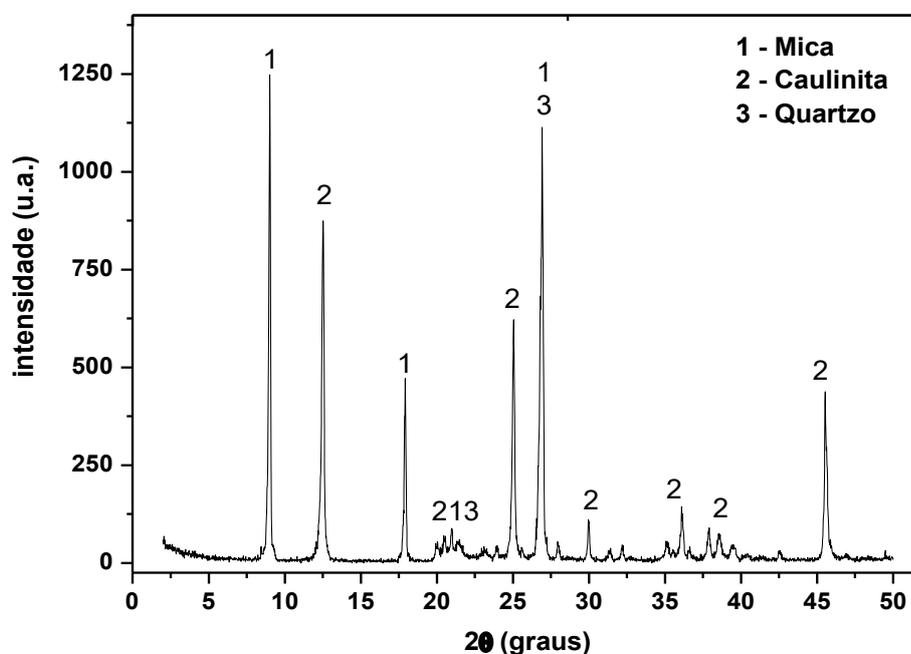
Constituinte	Al₂O₃	SiO₂	MgO	K₂O	Fe₂O₃	CaO	TiO₂	SO₃	Rb₂O	MnO	ZnO
%	48,77	46,69	2,15	1,80	0,36	0,09	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01

Fonte: Própria (2016).

O resíduo apresenta altas porcentagens de alumínio e silício, principais constituintes dos argilominerais (BERGAYA e LAGALY, 2013). Comparando-se o resultado da análise semi-quantitativa com os valores indicativos para materiais pozolânicos descritos na norma NBR 12653 (ABNT, 2014) cuja concentração porcentual da soma dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , mínima necessária é de 50%, em massa; o resíduo oriundo do processo de beneficiamento de caulim atende a esse parâmetro, uma vez que apresenta 95,82 % de sua composição constituídas pelos devidos óxidos; como também apresenta quantidade de SO_3 (0,04 %) inferior ao limite estabelecido (5 %).

A caracterização das fases minerais presentes no resíduo pode ser observada no difratograma exibido na Figura 4.2

Figura 4.2 - Difratograma do resíduo de caulim.



Fonte: Própria (2016).

No difratograma pode ser observada a presença do mineral caulinita que apresenta baixa quantidade de defeitos, pois apresenta picos agudos e de alta intensidade nos ângulos 2θ de $12,51^\circ$ a $25,03^\circ$ e tripletes com reflexões localizados entre 35° e 40° . Picos semelhantes foram encontrados por Barata e Angélica (2012) ao caracterizar resíduos de caulim da região amazônica. Picos referentes aos minerais do grupo mica (muscovita) são visualizados em $9,01^\circ$, $17,96^\circ$, $26,91^\circ$, o que explica as porcentagens de potássio e magnésio presentes na amostra conforme a Tabela 4.4.

Brigatti *et al.* (2006) afirmam que a composição das caulinitas é caracterizada pela predominância de Al^{3+} nos sítios octaédricos, mas podem ocorrer substituições isomórficas por cátions Mg^{2+} , Fe^{3+} , e Ti^{4+} . Portanto, as quantidades dos óxidos desses metais apresentadas na análise química podem estar relacionadas à essas substituições. Varela *et al.* (2009) ao caracterizar o resíduo de caulim da região do Equador (RN), região à 30 km de Juazeirinho (PB), encontrou em sua análise química pequenas quantidades de CaO, MgO e atribuiu a possíveis fases acessórias, que não puderam ser identificadas nos difratogramas, ou serem associadas a presença de matéria orgânica presente na argila.

Sabe-se que minerais como caulinita e mica possuem em sua composição maiores quantidade de SiO_2 do que de Al_2O_3 , portanto a maior quantidade de alumínio observada pela fluorescência de raios X pode estar relacionada à utilização de agentes floclantes no processamento do caulim.

A interação entre os agregados e a pasta de cimento dependerá das características superficiais das partículas do agregado e da natureza da pasta de cimento hidratada na interface entre os dois materiais. Essas interações correm devido à rugosidade superficial do agregado, devido às propriedades químicas do cimento e do agregado e às propriedades eletrostáticas da superfície das partículas (SCHACKOW *et al.*, 2015; MEHTA e MONTEIRO, 2014). Os argilominerais constituintes do resíduo são formados, de modo geral, por silicatos hidratados de alumínio dispostos em camadas lamelares de SiO_2 e Al_2O_3 , sobrepostas e ligadas entre si pelos átomos de oxigênio, conforme explica Souza Santos (1992). Assim, os agrupamentos atômicos (oxigênio e hidroxilas) dispostos externamente na estrutura dos minerais poderão interagir positivamente com as partículas do aglomerante, favorecendo a aderência entre os constituintes.

A forma e a textura das partículas dos agregados influenciam mais nas propriedades do concreto fresco do que nas do endurecido; comparadas às partículas lisas e arredondadas, mais comuns em areias de origem natural, as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas, dos argilominerais, como os presentes no resíduo, podem favorecer a formação de uma aderência mecânica forte entre a pasta de cimento e o agregado, porém poderão requerer mais pasta de cimento para produzir misturas mais trabalháveis (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Na Tabela 4.5 constam os resultados dos parâmetros avaliados para determinar a pozolanicidade do resíduo de caulim.

Tabela 4.5 - Resultados da caracterização do resíduo de caulim.

Parâmetros	Resíduo de Caulim	Limites da NBR 12653
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	95,82	50 (min.)
SO ₃ (%)	0,04	5 (máx.)
Teor de umidade (%)	0,81	3 (máx.)
Perda ao fogo (%)	5,55	6 (máx.)
Atividade pozolânica com cimento (%)	59	75 (min.)
Atividade pozolânica com cal (MPa)	3,89	6,0 (min.)
Teor de Ca(OH) ₂ fixado (mg/g)	296	436,0 (min.)

Fonte: Própria (2016).

Como pode ser observado, o resíduo de caulim *in natura* não apresenta as características químicas necessárias para ser classificado como uma pozolana, conforme avaliação das exigências da NBR 12653 (ABNT, 2014) O resíduo apresenta uma baixa pozolanicidade de acordo com os resultados dos ensaios físicos para avaliar a pozolanicidade e o teor de hidróxido de cálcio fixado. Isso está relacionado ao fato de que o resíduo apresenta estruturas cristalinas bem definidas formadas por fortes ligações entre seus átomos, não permitindo dessa forma que os grupos iônicos reajam com hidróxido de cálcio formando os compostos aglomerantes.

O resíduo não apresentou atividade pozolânica mínima para ser utilizado como adição em cimentos, porém apresenta alta potencialidade para ser utilizado como matéria prima no desenvolvimento de pozolanas, que após calcinação, tem sua estrutura cristalina destruída, liberando os óxidos para reagirem com as partículas de cimento. Apesar de não ser indicado para ser utilizado como pozolana, o material apresentou características físicas que o possibilitam a ser utilizado como agregado miúdo em argamassas: a distribuição granulométrica contínua do resíduo o torna um material com características adequadas para o empacotamento das partículas da pasta cimentícia

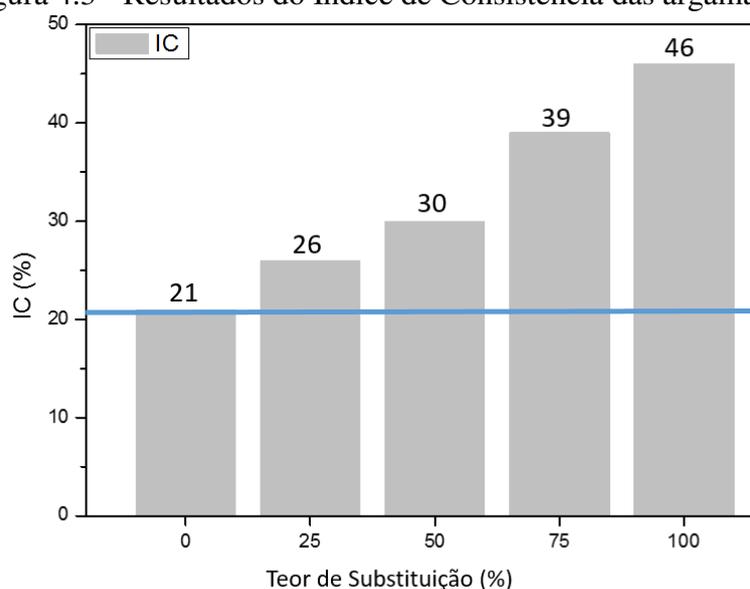
4.3.2 Argamassas no estado fresco.

As argamassas foram submetidas ao ensaio de Índice de Consistência na mesa – *Flow Table* – a fim de se determinar a quantidade de água, expressa pela relação massa de água por

massa de argamassa, necessária para se obter um produto com uma trabalhabilidade adequada. A norma NBR 13276 (ABNT, 2005) informa que a quantidade ideal será aquela que promover um espalhamento da argamassa de (255 ± 10) mm. Na Figura 4.3 podem ser observados os resultados obtidos.

A incorporação de resíduo de caulim na composição da argamassa proporcionou um aumento linear ($R^2 = 0,9897$) na quantidade de água necessária para se obter uma boa trabalhabilidade. A argamassa de referência (0%) necessitou de uma quantidade de água semelhante às indicadas pelos fabricantes de argamassas industrializadas, representado na Figura 4.3 pela linha horizontal; já a argamassa A5, necessitou de uma quantidade de água 120 % superior à de referência. O resíduo de caulim, formado basicamente por mica e caulinita, apresentam uma estrutura lamelar, tendo uma alta área superficial; assim, conforme explicam Lagerblade *et al.* (2014), argamassas contendo agregados com baixa esfericidade necessitam de uma maior quantidade de água para se obter a trabalhabilidade adequada.

Figura 4.3 - Resultados do Índice de Consistência das argamassas.

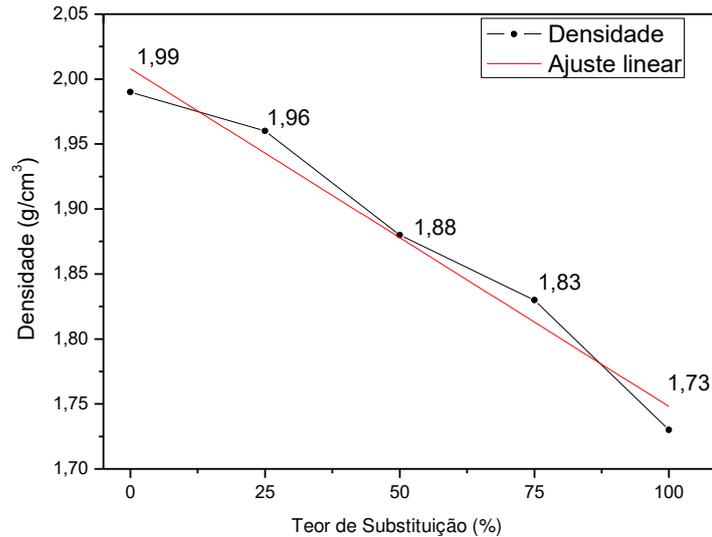


Fonte: Própria (2016).

Observa-se que a densidade da argamassa no estado fresco (Figura 4.4) diminuiu 13 % à medida que aumentou a quantidade de resíduo de caulim em sua composição ($R^2 = 0,9858$), essa diminuição está relacionada ao fato de o resíduo ser poroso, propiciando menor empacotamento das partículas, logo numa menor densidade. Resultados semelhantes foram encontrados por Penacho *et al.* (2014) ao substituir o agregado miúdo natural de argamassas por resíduo de vidro. Neno *et al.* (2014) substituíram a areia natural de argamassas por resíduos de concreto, e observaram um decréscimo nas densidades das argamassas de aproximadamente

10%; em ambos os trabalhos, essa diminuição foi creditada à densidade dos resíduos utilizados: por serem menores do que as das areias naturais utilizadas; nesses trabalhos, as quantidades de água necessárias para se obter uma boa trabalhabilidade, aumentaram à medida que se aumentou o teor de substituição, o que também contribuiu para a diminuição da densidade da argamassa.

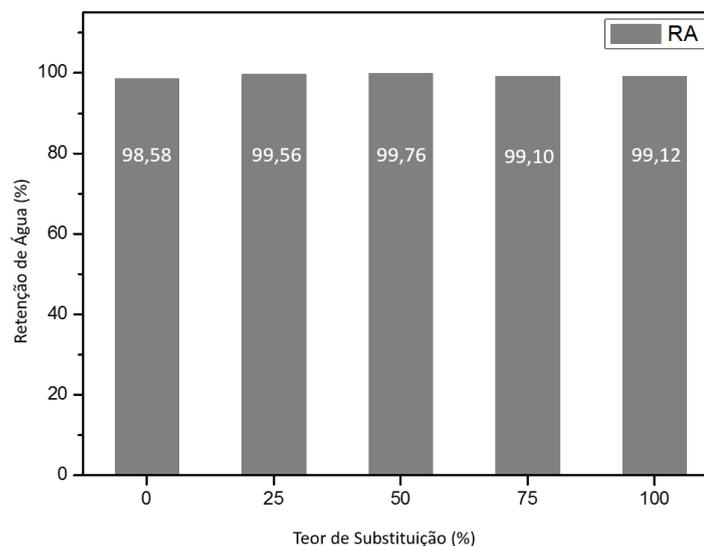
Figura 4.4 - Resultados da densidade no estado fresco.



Fonte: Própria (2016).

Os dados resultantes do ensaio de retenção de água podem ser visualizados na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Resultados de Retenção de Água.

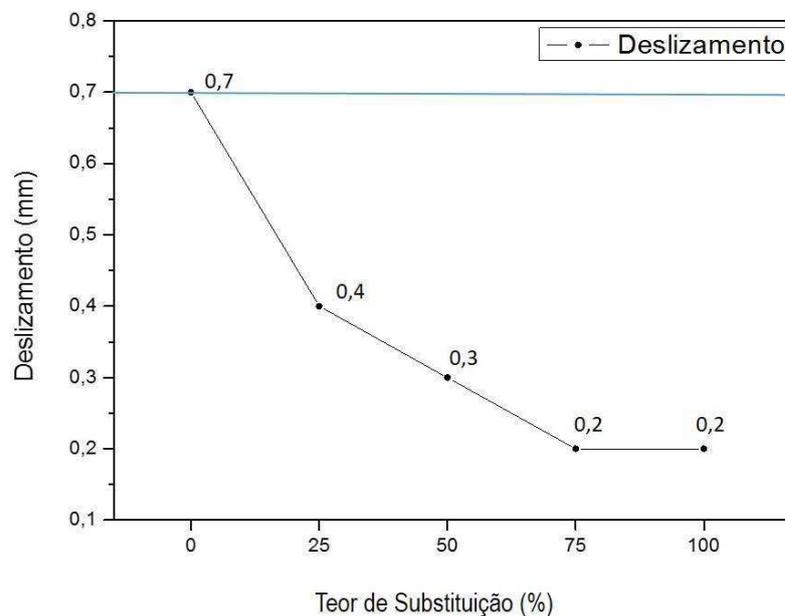


Fonte: Própria (2016).

A retenção de água é uma propriedade importante que previne a rápida perda de água da argamassa para o meio externo, seja por evaporação, ou por absorção do substrato no qual a argamassa será utilizada. Tal propriedade afeta a trabalhabilidade da argamassa e a interação entre os constituintes, favorecendo as resistências mecânicas (PATURAL *et al.*, 2011). Observa-se que não houve diferença significativa entre os valores, comprovando a ação do aditivo a base de celulose; Singh e Siddique (2014) afirmam que o uso de um agregado poroso, como é o caso do resíduo de caulim, pode favorecer essa retenção, pois os poros absorvem água mais internamente do que a areia.

A norma brasileira limita em 0,7 mm o deslizamento das argamassas colantes (Figura 4.6) para todas as classes. Nota-se que a substituição do agregado miúdo natural pelo resíduo de caulim diminuiu esse deslizamento em aproximadamente 70%. Esse fato relaciona-se ao formato das partículas dos agregados, conforme explicam Pereira *et al.* (2013): quanto menos esféricas forem as partículas do material utilizado como agregado, maior será a tensão de cisalhamento necessária para o escoamento.

Figura 4.6 - Resultado de Deslizamentos das argamassas colantes.



Fonte: Própria (2016)

Os resultados referentes ao estado fresco das argamassas indicaram que a substituição da areia pelo resíduo de caulim apresentou uma maior necessidade de água necessária, para se obter a trabalhabilidade adequada. Guneyisi *et al.* (2015) ao estudarem o efeito da substituição de agregado miúdo natural por cinzas volantes em argamassas, utilizaram um aditivo

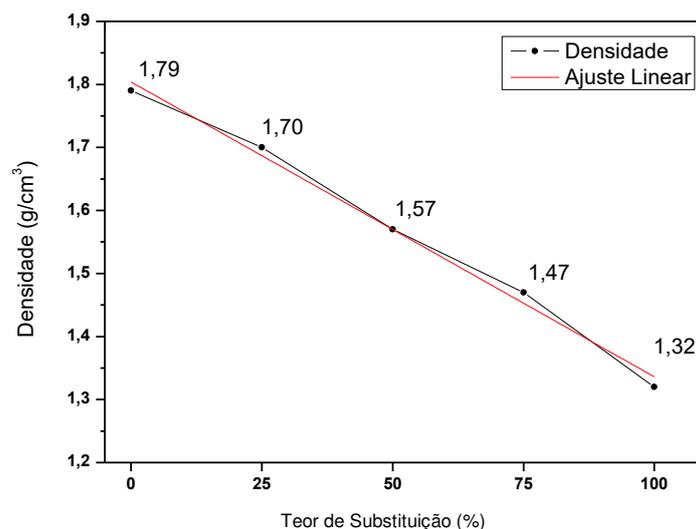
plastificante para se ajustar a viscosidade da argamassa, mantendo assim a mesma relação de água/materiais secos em todas as misturas propostas. O aumento no consumo de água pode acarretar na diminuição das resistências mecânicas das argamassas (NEUWALD, 2010).

4.3.3 Argamassas no estado endurecido

Os dados relativos aos ensaios realizados no estado endurecido, após 28 dias de cura, dos traços avaliados, encontram-se nas Figura 4.7 a 4.9.

A redução de 13 % da densidade da argamassa no estado endurecido (Figura 4.7) apresentou-se proporcional ($R^2 = 0,9967$) à quantidade de areia substituída pelo resíduo de caulim. Rashad (2016) compilou trabalhos a respeito da substituição do agregado miúdo por alguns materiais como cinzas volantes e cinzas de carvão, e verificou que os autores observaram diminuições nas densidades das argamassas, e atribuíram essa redução às densidades dos substituintes – menores do que a da areia. Castro e Pandolfelli (2009) estudaram o empacotamento das partículas, e afirmaram que as partículas porosas diminuem a densidade, como também a carbonatação da água leva à sua evaporação, diminuindo assim a massa da argamassa.

Figura 4.7 - Densidades no estado endurecido das argamassas.

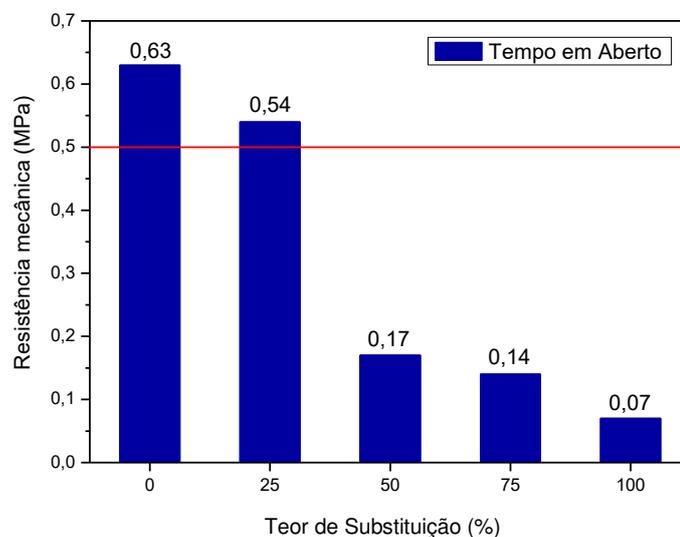


Fonte: Própria (2016).

O tempo em aberto é o intervalo máximo de tempo, depois de estendidos os cordões, em que as placas ainda podem ser assentadas obtendo resistência de arrancamento estabelecida

pela norma NBR 14081-3 (ABNT, 2012). A norma exige que uma argamassa do tipo ACI, apresente resistência de aderência à tração mínima de 0,5 MPa (representado pela linha horizontal da Figura 4.8), sendo assentadas 15 min após o espalhamento dos cordões da argamassa. Observa-se na Figura 4.8 que as resistências diminuíram ao se utilizar o resíduo do caulim como agregado miúdo; o traço com 25 % de resíduo apresentou valor dentro do estabelecido pela norma. Substituições acima desse valor não foram satisfatórias, reduzindo em até 89% a resistência da argamassa.

Figura 4.8 - Resultados do ensaio de Tempo em Aberto.

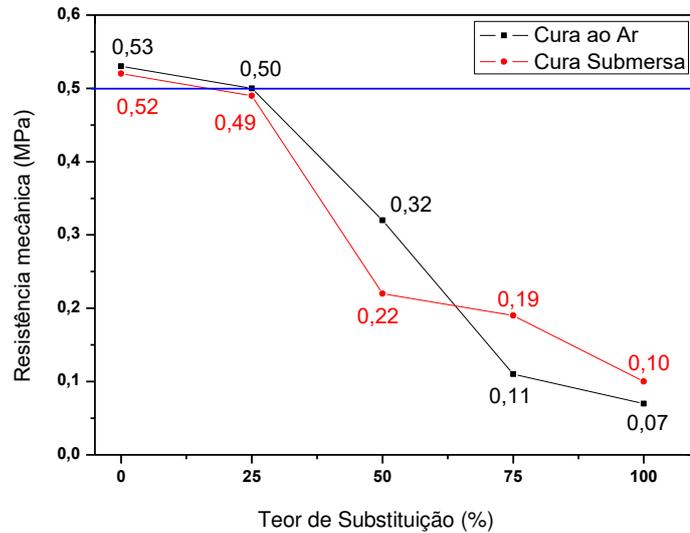


Fonte: Própria (2016).

A perda de resistência mecânica das placas assentadas está relacionada à formação de uma película superficial que interfere na adesão inicial da argamassa colante. A formação dessa película foi estudada por Póvoas *et al.* (2002) que em seus estudos identificaram que a película, na verdade, é resultado da dessecação superficial causada pela evaporação e sucção de água da argamassa, que mesmo com o uso de aditivos retentores de água, não consegue ser evitada (COSTA *et al.*, 2013). Na Figura 4.9, encontram-se os valores de RAT para as argamassas.

As resistências de aderências à tração diminuíram consideravelmente para os traços com substituições acima de 25 %, tanto para a cura ao ar, quanto para a cura submersa. Observa-se que independentemente do meio utilizado (ao ar ou submerso) os resultados apresentaram um comportamento semelhante: decréscimo das resistências.

Figura 4.9 - Resultados das Resistências de Aderência à Tração.



Fonte: Própria (2016).

Para a cura ao ar, os dados se ajustaram linearmente ao modelo codificado ($p = 0,006$ e $R^2 = 0,9422$), descrito pela Equação 4.1.

$$RAT_{ar} = 0,568A + 0,044K \quad (\text{Equação 4.1})$$

Para a cura submersa, um ajuste semelhante foi observado ($p = 0,01$ e $R^2 = 0,9093$) ao modelo codificado descrito pela Equação 4.2.

$$RAT_{submersa} = 0,532A + 0,076K \quad (\text{Equação 4.2})$$

Onde:

RAT – Resistência de aderência à tração (MPa);

A – Areia;

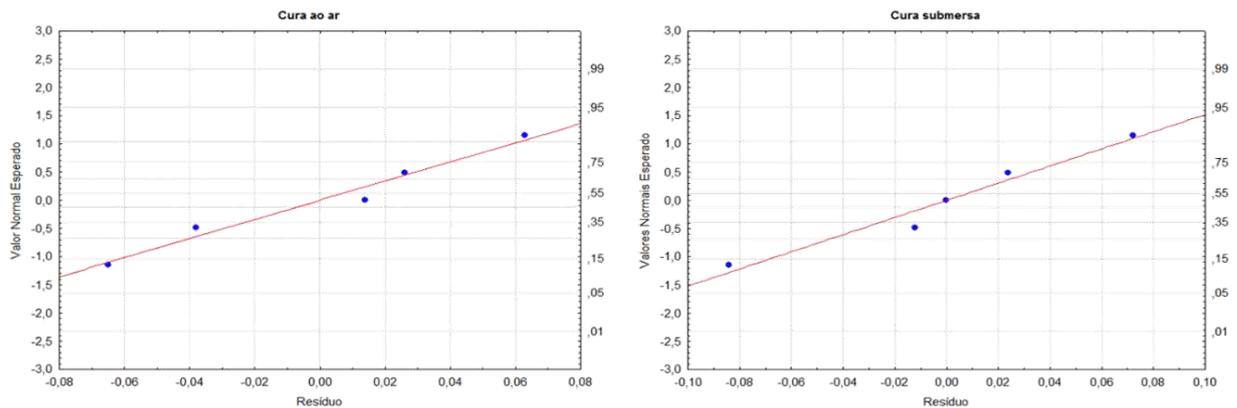
K – Resíduo de caulim.

A redução do desempenho observado para teores de substituição mais elevados pode estar, de acordo com os estudos de Castro e Pandolfelli (2009), relacionada à aglomeração das partículas de argilominerais ao redor das partículas de cimento. Sabe-se que durante o processo de hidratação, uma camada de C-S-H forma-se ao redor do cimento, gerando uma carga negativa, que por sua vez, acaba atraindo os íons de cálcio. Essa camada de Ca^{2+} pode ter ocasionado a atração de argilominerais, como a caulinita e mica, impedindo, dessa forma, a

aproximação das moléculas de água, logo, reduzindo a cristalização regular e homogênea dos componentes hidratados.

A Figura 4.10 apresenta a probabilidade normal dos resíduos, onde pode-se observar a validade do modelo, uma vez que os valores esperados se encontram próximos à reta, indicando um comportamento normal dos dados.

Figura 4.10 - Probabilidade normal dos modelos.



Sales *et al.* (2014) utilizaram o pó de mármore como agregado miúdo em argamassas, realizando substituições de até 40 % em massa. Utilizando a resistência por compressão diametral, calcularam a resistência à tração indireta, e observaram um decréscimo de aproximadamente 33 % nos valores das resistências dos traços contendo 40 % do pó. Já Munoz-Ruiperez *et al.* (2016), observaram a redução das resistências mecânicas de argamassas, ao se substituir o agregado miúdo por argilas expandidas e resíduo de demolição. Os pesquisadores creditaram essa diminuição à maior absorção de água dos agregados utilizados, pois geram um aumento da porosidade do material no estado endurecido.

4.4 Conclusões

Como agregado miúdo, o resíduo gerado no processo de beneficiamento de caulim causou um aumento da necessidade de água, à medida que aumentou a quantidade de resíduo nos traços estudados.

O uso do resíduo tornou a argamassa, no estado fresco, mais leve, tornando-a mais fácil de se trabalhar. Esse aumento na quantidade de água influenciou nas características do estado endurecido do material obtido.

Os traços que contêm acima de 25 % de resíduo substituindo a areia como agregado miúdo, apresentaram resultados inferiores aos mínimos estabelecidos pela normalização brasileira. O resíduo, em grande quantidade, interferiu no processo de hidratação das partículas de cimento. As causas estão relacionadas à retenção de água entre as lamelas dos argilominerais, como também ao impedimento, causado pela aglomeração das partículas de resíduo em torno das de cimento.

Mesmo apresentando deficiências nos traços contendo mais do que 25% de resíduo, o uso deste no estado natural como agregado miúdo apresentou-se como uma alternativa favorável a destinação desse material.

Argamassas contendo até 25% do resíduo podem ser utilizadas no assentamento de placas cerâmicas, atendendo os pré-requisitos das normas nacionais.

5 CONCLUSÕES

O resíduo fino oriundo do processo de beneficiamento de caulim apresentou elevados teores de alumínio e silício, que utilizando a difratometria de raios X, identificou-se ser constituído, em sua grande parte, por caulinita e mica. O resíduo apresentou características físicas semelhantes às do agregado miúdo comumente utilizado na preparação de argamassas, areia. Por meio dos testes de pozolanicidade, observou-se que o resíduo não apresentou os valores mínimos exigidos pela normalização brasileira para ser considerado uma pozolana.

Na utilização do resíduo de caulim como agregado miúdo em argamassas colantes, à medida que se aumentou a quantidade de resíduo no traço da argamassa, aumentou-se a quantidade de água necessária para se obter a trabalhabilidade adequada. Imaginou-se que esse aumento fosse favorável para a hidratação do cimento, porém as partículas do resíduo podem ter se aglomerado e se arranjando de forma a ter aprisionada certa quantidade de água, tornando-a indisponível para as reações de hidratação.

As argamassas produzidas com resíduo apresentaram-se mais leves em comparação com a de referência, sendo mais fácil de se trabalhar. A estrutura lamelar do resíduo contribuiu para a diminuição do deslizamento das argamassas. Com relação às resistências mecânicas dos traços estudados, percebeu-se que substituições de até 25% da areia pelo resíduo de caulim, apresentaram resultados satisfatórios. A argamassa com esse teor de resíduo de caulim apresentou propriedades físicas dentro das especificações técnicas exigidas pela normalização brasileira, gerando assim uma patente de um produto para a construção civil.

O uso do resíduo de caulim, além de proporcionar uma diminuição da quantidade de material lançado no meio ambiente, também contribui para a redução do desgaste ambiental causado pela extração de areia, solucionando dessa forma, dois grandes problemas ambientais.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos relacionados, deve-se investigar diferentes frações granulométricas, controlando o teor de material finos, como também, testar aditivos plastificantes para diminuir a quantidade de água necessária para se obter a fluidez necessária.

Um outro ponto importante, é ampliar os prazos para que sejam testadas as resistências mecânicas, uma vez que com a presença de materiais não convencionais, as argamassas podem atingir resistências físicas mais altas, mas a prazos de tempo mais longos. Como também, utilizar o resíduo de caulim no desenvolvimento de argamassas colantes do tipo AC II e III.

REFERÊNCIAS

ACI - American Concrete Institute; Cementitious Materials for Concrete – ACI Education Bulletin E3 – 13, 2013.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. O desafio da sustentabilidade na construção civil. In: GODEMBERG, J. (Coord.). Sustentabilidade. São Paulo: Blucher, v.5, 2011.

ANDRADE, F. L. F.; VARELA, M. L.; DUTRA, R. P. S.; NASCIMENTO, R. M.; MELO, D. M. A.; PASKOCIMAS, C. A. Avaliação da potencialidade de uso do resíduo proveniente da indústria de beneficiamento do caulim na produção de piso cerâmico. *Cerâmica Industrial*, v.14, n.1, p.41-45, 2009.

ANDRADE, L. B.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete. *Construction and Building Materials*. v.23, n.2, p.609-614, 2009.

ANJOS, C. M.; NEVES, G. A. Utilização do resíduo de caulim para a produção de blocos solo-cal, *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.6, p.91-96, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. Boletim Técnico. Guia básico de utilização do cimento Portland. v.106, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 12653, Materiais pozolânicos - Especificações. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13276, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13277, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13278, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13280, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13528, Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13821, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 14081:1, Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 1: Requisitos, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 14081:2, Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 14081:3, Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 3: Determinação do tempo em aberto, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 14081:4, Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 4: Determinação da resistência de aderência à tração, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 14081:5, Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 5: Determinação do deslizamento, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 15895, Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado, Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 5751, Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias, Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 5752, Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214, Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 18, Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 24, Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45, Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52, Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

AZEREDO, A. F. N.; CARNEIRO, A. M. P.; AZEREDO, G. A.; SARDELA, M. Hardened properties of lime based mortars produced from kaolin wastes. *Key Engineering Materials*, v.600, p.282-296, 2014.

AZEREDO, G.; DINIZ, M. Self-compacting concrete obtained by the use of kaolin wastes. *Construction and Building Materials*, v.38, p.515–523, 2013.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S. Caracterização dos resíduos caulínicos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade. *Cerâmica*, v.58, n.345, 2012.

BARATA, M. S.; DALMOLIN D. C. C. Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. *Ambiente Construído*, v.2, n.1, p.69-78, 2002.

BELTRÃO, S. L. D.; SEVERO, C. G. S.; BEZERRA, I. M. T.; LIRA, B. S.; FERREIRA, H. C.; NEVES, G. A. Kaolin residue as an alternative binder for grout seat and revetment. *Materials Science Forum*, v.775-776, p.653-658, 2014.

BERGAYA, F.; LAGALY, G. *Handbook of clay science*. Elsevier, 2ed, 1752p, 2013.

BERTOLINO, L. C.; TOREM, M. L.; SCORZELLI, R. B.; ROSSI, A. M. Caracterização mineralógica e beneficiamento do caulim de prado, *Holos*, v.5, p.83-92, 2012.

BEZERRA, I. M. T.; SOUZA, J.; QUEIROZ DE CARVALHO, J. B.; NEVES, G. A. Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.639-645, 2011.

BHIMANI, P.; VYAS, C. M. Performance of Concrete with China Clay (Kaolin) Waste. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, v.2, n.3, p.49-54, 2013.

BRIGATTI, M. F.; GALAN, E.; THENG, B. K. G. Structures and mineralogy of clay minerals, In: BERGAYA, F.; THENG, B. K. G.; LAGALY, G. *Handbook of Clay Science: Developments in Clay Science*, Vol. I. Elsevier, 2ed, p.19-86, 2006.

BUNDY, W. M. The Diverse Industrial Applications of Kaolin. In: MURRAY, H. H., BUNDY, W. M., HARVEY, C. C. *Kaolin Genesis and Utilizations*. Colorado, USA: The Clay Mineral Society, p.43-75, 1993.

CARASEK, H. Aderência de argamassas à base de cimento portland a substratos porosos – Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação. 1996. 285p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1996.

CARDOSO, F. A., PILEGGI, R. G., JOHN, V. M., *Squeeze flow* aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/545, São Paulo, 2010.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassa. São Paulo. *Ambiente Construído*, São Paulo, v.1, n.2, p 37-41. 1997.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Cerâmica*, v.55, p.18-32, 2009.

CASTRO, R. J. S.; SOARES, R. A. L.; NASCIMENTO, R. M.; BISON, E. C.; Estudo do efeito do feldspato e resíduo de caulim na produção de revestimento cerâmico. *Cerâmica Industrial*, v.20, n.1, p.30-36, 2015.

CHEN, P. Y.; LIN, M. L.; ZHENG, Z. On the Original of the Name Kaolin deposits of the Kauling and Dazhou areas, Kiangsi, China, *Applied Clay Science*, v.12, p.1 – 25. 1997.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Boletim Técnico n.68, 1995.

COSTA, C.; CARVALHO, P. A.; BORDADO, J. C.; NUNES, A. Estudo de Argamassas de Base Cimentícia por Microscopia Electrónica de Varrimento. Ciência e Tecnologia dos Materiais, v.21, n.3-4, 2009.

COSTA, M. R. M. M., CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Metodologia de caracterização de argamassas colantes. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PCC, v.1, p.1-23, 2007.

COSTA, M. R. M. M.; PEREIRA, E.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A. Study of the influential factors on the rheological behaviour of adhesive mortar available in the market. Ibracon Structures and Materials Journal, v.6, n.3, p.399-413, 2013.

DALMOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, v.2, 1946p. 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN, Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 44, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN, Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 43, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN, Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 42, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN, Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 41, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN, Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 40, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN, Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 39, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN, Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 39, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN, Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 38, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN, Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 37, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPN, Anuário Mineral Brasileiro, Brasília: Departamento Nacional de produção Mineral – DNPN, ano 36, 2006.

DILL, H. G. Kaolin: Soil, rock and ore from the mineral to the magmatic, sedimentary, and metamorphic environments. Earth-Science Reviews, 2016.

DONATELLO, S.; TYER, M.; CHEESEMAN, C. R. Comparison of Test Methods to Assess Pozzolanic Activity. Cement e Concrete Composites, v.32, n.2, p. 121-127, 2010.

EROL, I.; AYDIN, H.; DIDARI, V.; URAL, S. Pneumoconiosis and quartz content of respirable dusts in the coal mines in Zonguldak, Turkey, *International Journal of Coal Geology*, v.116-117, p.26-35, 2013.

FIORITO, A. J. S. I. *Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e procedimentos de execução*. 2ed. São Paulo: PINI, 2010, 232p.

GRIESSER, A. *Cemente-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures*. 147p. Tese (Instituto Federal de Tecnologia da Suíça). Zurique. 2002.

GRIM, R. E. *Clay Mineralogy*. Second ed, International Series in the Earth and Planetary Sciences. New York: McGraw-Hill Book Company. 596p. 1968.

GUNEYISI, E.; GESOGLU, M.; ALTAN, I.; OZ, H. O. Utilization of cold bonded fly ash lightweight fine aggregates as a partial substitution of natural fine aggregate in self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, v.74, p.9–16, 2015.

INGUZA, M. P. D.; JÚNIOR, O. F. S.; COSTA, C. G. Recycling of kaolin processing waste as aggregate in asphalt concrete. *Materials Science Forum*, v.717, p.21-29, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Relatório de Contas Nacionais*, 2016.

KANNING, R. C.; PORTELLA, K. F.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; BONATO, M. M.; DOS SANTOS, J. C. M. Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement. *Construction e Building Materials*, v.54, p.460-465, 2014.

KUDO, E. K. *Caracterização reológicas de argamassas colantes*. 141p. Dissertação. (Universidade de São Paulo), São Paulo, 2012.

LAGERBLADE, B.; GRAM, H. E.; WESTERHOLM, M. Evaluation of the quality of fine materials and filler from crushed rocks in concrete production. *Construction and Building Materials*, v.67, p.121-126, 2014.

LIMA, M. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; NASCIMENTO, J. W. B. do; LEAL, A. F. Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação. *Revista Escola de Minas*, v.61, p.285-290, 2008.

LOFTY, A.; KARAHAN, O.; OZBAY, E.; HOSSAIN, K. M. A.; LACHEMI, M. Effect of kaolin waste content on the properties of normal-weight concretes. *Construction and Building Materials*, n.83, p.102-107, 2015.

LUZ, A. B.; CAMPOS, A. R.; CARVALHO, E.A.; BERTOLINO, L. C. Caulim, In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. *Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações*. Rio de Janeiro: CETEM, p.231-262, 2005.

MAIA, A. A. B.; SALDANHA, E.; ANGELICA, R. S.; SOUZA, C. A. G.; NEVES, R. F. Utilização do resíduo de caulim da Amazônia na síntese de zeólita A. *Cerâmica*. v.53, n.327, 2007.

MALTA, J. O.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v.1, n.2, p.176-188, 2013.

MARTELLI, M. C.; NEVES, R. F. Characterization and Technological Applications for Kaolin Processing Wastes. *Materials Science Forum*, v.727-728, p.697-702, 2012.

MATANNA, A. J.; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, N. G.; COSTA, M. R. M. M. Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimento. *Ambiente Construído*. Porto Alegre, v.12, n.4, p.63-79. 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2º ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

MENEZES R. R.; ALMEIDA, R. R.; SANTANA, L. N. L.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos. *Revista Matéria*, v.2, n.1, 2007a.

MENEZES R. R.; NEVES, G. A.; SOUZA, J.; MELO, W. A.; FERREIRA, H. S.; FERREIRA, H. C. Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.6, p.795–801, 2009.

MENEZES, R. R.; ALMEIDA, R. R.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos. *Cerâmica*, v.53, p.192-199, 2007b.

MO, J.; WANG, L.; AU, W.; SU, M. Prevalence of coal workers' pneumoconiosis in China: A systematic analysis of 2001–2011 studies, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, v.217, p.46-51, 2014.

MUÑOZ-RUIPEREZ, A. RODRÍGUEZ, S. GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, V. CALDERÓN. Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v.118, p.139–145, 2016.

NENO, C.; BRITO, J.; VEIGA, R. Using Fine Recycled Concrete Aggregate for Mortar Production. *Materials Research*, v.17, n.1, p.168-177, 2014.

NEUWALD, A. D. Water-to-cement ratio and aggregate moisture corrections. *Precast Magazines*. May, 2010.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. Trad. Salvador Eugênio Giammusso. São Paulo, Pini, 2a ed., 1997.

NOBRE, L. L. S.; ACCHAR, W. Aproveitamento de rejeitos de mineração de caulim em cerâmica branca. *Holos*, v.26, n.3, 2010.

PATURAL, L.; GOVIN, A.; GROSSEAU, P.; RUOT, B.; DEVES, O. The effects of cellulose ethers on water retention in freshly-mixed mortars. *Ceramic materials*, v.63, n.1, p.85-87, 2011.

PATURAL, L.; MARCHAL, P.; GOVIN, A.; GROSSEAU, P.; RUOT, B.; DEVES, O. Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*, v.41, p.46-55, 2010.

PENACHO, P.; BRITO, J.; VEIGA, R. Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate. *Cement e Concrete Composites*, v.50, p.47–59, 2014.

PEREIRA, E.; SILVA, I. J.; COSTA, M. R. M. M. Avaliação dos mecanismos de aderência entre argamassa colante e substrato não poroso. *Ambiente Construído*, v.13, n.2, p.139-149, 2013.

PETIT, J.; WIRQUIN, E. Evaluation of various cellulose ethers performance in ceramic tile adhesive mortars. *International Journal of Adhesion e Adhesives*, v.40, p.202-209, 2013.

POURCHEZ, J.; RUOT, B.; DEBAYLE, J.; POURCHEZ, E.; GROSSEAU, P. Some aspects of cellulose ethers influence on water transport and porous structure of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, v.40, p.242-252, 2010.

POVOAS, Y. V.; JOHN, V. M. Avaliação da formação de “película” na argamassa colante. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Civil; BT/PCC/430*, 2006.

POVOAS, Y. V.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Influência da perda de água por evaporação na resistência de aderência entre argamassa colante e placa cerâmica. *Ambiente Construído*, v.2, n.2. P.7-18, 2002.

RASHAD, A. Cementitious materials and agricultural wastes as natural fine aggregate replacement in conventional mortar and concrete. *Journal of Building Engineering*, v.5, p.119–141, 2016.

REZENDE, M. L. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; NASCIMENTO, J. W. B.; LEAL, A. F. Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação. *Revista Escola de Minas*, v.61, n.3, p.285-290, 2008.

ROCHA, A. K. A.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; MELO, W. A. Argamassas mistas para alvenaria utilizando resíduo de caulim - Parte I: comportamento mecânico. *R. Esc. Minas*, v.61, n.4, p.505-512, 2008.

RODRIGUES, O. M. S.; ARAÚJO, A. C.; PERES, A. E. C. Microflotação de caulinita utilizando aminas. *R. Esc. Minas, Ouro Preto*, v.63, n.4, p.661-666, 2010.

SALES, A. G. T.; SÁ, B. R. C.; SANTOS, D. G. Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por pó de mármore. In: *XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, 2014.

SCHACKOW, A.; STRINGARI, D.; SENFF, L.; CORREIA, S. L.; SEGADÃES, A. M.; Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars, *Cement and Concrete Composites*, v.62, p.82-89, 2015.

SIDDIQUE, R.; SINGH, M. Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate. *Construction and Building Materials*, v.50, p.246-256, 2014.

SILVA, D. A.; ROMAN, H. R.; Caracterização microestrutural de pastas de cimento aditivadas com polímeros HEC e EVA. *Ambiente Construído*, v.2, n.2, p.31-46, 2002.

SILVA, F. A. N. G. Estudos de caracterização tecnológica e beneficiamento do caulim da Região Borborema-Seridó (RN). 70p. Dissertação (Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE). Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, R. B.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L.; GOMES, O. F. M.; LIMA, L. G. L. M.; MOURA, R. C. de A.; TOLEDO FILHO, R. D. Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. *Ambiente Construído*, v.15, n.4, p.321-334, 2015.

SOUZA SANTOS, P. *Ciência e Tecnologia de Argilas*. São Paulo: Edgar Blücher, v.2, 1992.

STARK, J; WICHT, B. *Durability of Concrete*. Berlin: Springer Vieweg, 479p., 2000.

VARELA, M. L.; FORMIGA, F. L.; DUTRA, R. P. S.; NASCIMENTO, R. M.; PASKOCIMAS, C. A. Influência da adição de resíduo de caulim nas propriedades tecnológicas de uma massa padrão de porcelanato produzido em escala industrial. *Cerâmica*, v.55, p.209-215, 2009.

VIEIRA, G. REZENDE, E. N. Mineração de areia e meio ambiente: é possível harmonizar? *Revista do Direito Público*. Londrina, v.10, n.3, p.181-212, 2015.

WINCKLER, J. R. Caracterização física e química de cinza de *pinus spp.* para a adição em produtos de cimento Portland: concreto e argamassa. 98p. Dissertação (Instituto de Engenharia do Paraná). Curitiba. 2015.