

ÁREA TEMÁTICA:

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE BLOCOS PRÉ-MOLDADOS DE
MATERIAL ALCALINAMENTE ATIVADO APLICADO AO TELHADO
VERDE**

*Bárbara Karoline Lacerda Arnaud (barbara.karoline@cear.ufpb.br), Kelly Cristiane Gomes da
Silva (gomes@cear.ufpb.br), Henrique Chacon (prof.barbaraarnaud@gmail.com)*

1 Universidade Federal da Paraíba

2 Universidade Federal da Paraíba

3 Universidade Federal da Paraíba

RESUMO

A Construção Civil é uma das áreas que mais utiliza recursos naturais não renováveis no mundo, tendo em vista que é um dos pilares do desenvolvimento de uma sociedade. Mediante a criação de novas tecnologias, têm-se buscado cada vez mais a utilização de materiais de construção menos agressivos, com menor utilização de energia no seu processo de fabricação e de baixo impacto ambiental. Nesse sentido, este trabalho aborda questões de sustentabilidade na construção civil, reunindo técnicas de Telhado Verde (TV) juntamente com aplicações de Material Alcalinamente Ativado (MAA) a partir da elaboração de um bloco pré-moldado para coberturas verdes. Para tanto foram realizados estudos em argamassas de MAA avaliando o padrão construtivo a ser utilizados na confecção dos blocos, o tipo de matéria prima utilizada para a ativação alcalina (metacaulinita e solo intemperizado), dois tipos de ativadores alcalinos (silicato de sódio e de potássio), duas temperaturas de sínteses diferentes (50 °C e 75 °C) e duas idades diferentes (1 e 7 dias). As amostras foram caracterizadas física, química, mineralógica e microestruturalmente, bem como acessadas suas propriedades mecânicas em termos de resistência a compressão e flexão. Observou-se, que para os produtos obtidos, a idade e a temperatura de síntese influenciam em suas propriedades mecânicas e que o material sintetizado a base de metacaulinita e silicato de sódio a 50 °C apresenta melhores condições para a produção de blocos a serem aplicados em telhado verde.

Palavras-chave: Telhado verde; MAA; Sustentabilidade.

**EVALUATION OF PERFORMANCE OF PRE-MOLDED BLOCKS OF
ALKALINALLY ACTIVATED MATERIAL APPLIED TO THE GREEN ROOF**

ABSTRACT

The Civil Construction is one of the areas that have the most nonrenewable natural resources in the world, considering what is one of the pillars of the development of a society. Through the creation of new technologies, they have increasingly sought the use of less aggressive building materials with less energy use in their manufacturing process and low environmental impact. This study, this approach to sustainability in the civil building bringing together techniques of the Green Roof (TV) along with application of the Alkaline Activated Material (MAA) from the preparation of a pre-molded block for green roofs. It was evaluated the constructive pattern to be used in the preparation of the MAA mortar blocks, the type of raw material used for alkaline activation (metacaulinite and weathered soil), two types of alkaline activators (sodium and potassium silicate), two different synthesis temperatures (50 °C and 75 °C) and two different ages (1 and 7 days). The samples were characterized physically, chemically, mineralogically and microstructurally, as well as their mechanical properties in terms of compression and flexural strength. It was observed that, for the products obtained, the age and the synthesis temperature influence its mechanical properties and that the material synthesized on the basis of metacaulinite and sodium silicate at 50 °C presents better conditions for the production of blocks to be applied in green roof.

Keywords: Green roof; AMM; Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Apesar da vida cotidiana se desenvolver em ambientes edificados, uma das atividades menos sustentáveis do planeta é a indústria da Construção Civil (CC) que consome mais de 50% dos recursos mundiais (EDWARDS, 2005). Além de utilizar energia de forma intensiva é também o setor que mais gera resíduos sólidos no mundo (MMA, 2018). A relação qualidade de vida e ambiente construído, confeccionam o liame entre construção e meio ambiente. São esses ambientes edificados que abrigam, na maior parte do tempo, os seus usuários, que vêm a se resguardar no interior das edificações passando uma grande parcela de seu tempo diário, sejam elas, sua residência, como habitação, local de trabalho (empresas e indústrias), shoppings, hospitais e equipamentos para lazer, o que força às edificações a alcançarem padrões mais elevados de conforto para seus usuários. É decorrente da relação pessoa, clima e edifício, que o consumo de energia, cresce desenfreadamente, causando um grande impacto ambiental negativo que influencia no clima local, nas edificações e nos recursos naturais disponíveis (GONÇALVES, 2015). A construção civil é responsável pela implementação de toda a infraestrutura básica ou seja, o conjunto de equipamentos urbanos necessário para uma população: saneamento básico (abastecimento de água e rede de esgotos), transporte (vias de pavimentação), energia (iluminação pública e domiciliar) (GOLDEMBERG, 2014) além de ser o ramo que produz a maior quantidade de resíduos sólidos no mundo (EDWARDS, 2005) é tido também como o que gera o maior impacto ambiental negativo no planeta (SANCHEZ, 2013). Entende-se por impacto "qualquer alteração no meio ambiente em um ou mais de seus componentes provocada por uma ação humana" (SANCHEZ, 2013). Para agravar mais esse impacto ambiental negativo causado pelas construções, o setor da construção civil é considerado o ramo que mais emite CO₂, tornando-se líder mundial na colaboração para o efeito estufa (GOLDEMBERG, 2014). O dióxido de carbono, é um dos principais gases responsáveis pelo aquecimento global, considerado aquele que é mais emitido pela ação do homem, assim, sua diminuição seria um resultado atribuído às mudanças nos métodos e materiais de construção. A construção, também, é o setor que consome mais energia primária no mundo cerca de 25% está diretamente ligada à ocupação de edifícios, e dessa porcentagem a maior parcela encontra-se nos países desenvolvidos (LEVINE et al., 2007). Para amenizar esse grande impacto ambiental causado pela indústria da construção civil, visa-se a implantação de métodos e soluções mais sustentáveis à edificação, tais como a implantação de telhados verdes, que tem como objetivo a diminuição do impacto ambiental negativo, através da redução do uso dos recursos naturais não renováveis e do aproveitamento de uma área das edificações antes esquecida. O presente trabalho apresenta um estudo do potencial de Materiais Alcalinamente Ativado (MAA) aplicado ao telhado verde, analisando-se tanto o material precursor quanto o efeito da temperatura, do ativador alcalino e da idade para a produção dos blocos pré-fabricados, comparados com os blocos tradicionais a base de cimento Portland.

1.1 Sustentabilidade

O conceito de sustentabilidade dá-se através da união de três aspectos: ambientais, sociais (culturais) e econômicos, formando um tripé, base para o desenvolvimento sustentável. Através dessas três questões, possui-se como um desafio, a evolução da economia, respondendo às necessidades da sociedade e a condução de um desenvolvimento ambiental saudável, prevendo as necessidades das iminentes gerações (GOLDEMBERG, 2014). A amplitude desse conceito, dá-se pela abrangência dos aspectos que o compõem dentre esses, o Ambiente, parte integrante do tripé, têm sua essência maleável e multifacetada, além de abranger a natureza e a sociedade, pode ser visto por diferentes perspectivas e pode ser reduzido ou ampliado de acordo com as necessidades. Afora estas características, cada país contém sua própria explicação de Ambiente, que ao mesmo tempo não é elucidado de forma clara, tornando-a incompleta e aberta a divergentes interpretações (SÁNCHEZ, 2013).

1.2 Construção Civil e impacto Ambiental

Os desafios da Construção Civil (CC) associados à sustentabilidade são imensamente numerosos e de extrema responsabilidade, a começar pelos efeitos causadores das mudanças climáticas, compreendendo a emissão de CO₂ decorrente da produção de materiais, do funcionamento dos

edifícios e do transporte tanto da matéria prima quanto dos resíduos gerados pela CC (EDWARDS, 2005). Mais a frente, pode-se deparar com o impacto ambiental negativo causado pelas edificações, no momento da construção, seguindo pela sua adaptação ao ambiente construído que também acarreta perdas para o meio.

Como citado anteriormente, a CC é um dos ramos que mais consome os recursos naturais do planeta, tendo em vista que é o que está em constante crescimento em todo o mundo. Madeira, metal, areia, são exemplo de matérias primas extraídas diariamente para a fabricação de ferramentas e materiais utilizados na construção que causam um imenso impacto ambiental negativo. Levando-se em consideração, o gigantesco impacto ambiental negativo causado pela extrassão de materiais, as construções também aumentam esse choque quando não se adaptam ao ambiente em que foi construída ou até mesmo quando se adéquam ao local, a exemplo disso, a água, que em diversas ocasiões, lixívia perigosos compostos químicos que por sua vez estavam incorporados em materiais, isso, independe da região de implantação da edificação. Além disso, pode-se incluir a utilização de materiais que colaboram para a formação do *smog*², compostos voláteis orgânicos, e o aquecimento global (GOLDEMBERG, 2014).

1.3 Telhado Verde

Em 1950 quase 1/3 (um terço) da população mundial vivia nos grandes centros urbanos, já nos dias atuais, quase 70% da população brasileira vive na área urbana, habitando área de preservação e ocupando o espaço verde restante (ARAÚJO, 2007). Em algumas cidades brasileiras, a exemplo da grande São Paulo, nos períodos de inverno, as fortes chuvas causam desabamentos de barreiras soterrando algumas residências ocasionando a morte de seus moradores. Isso ocorre devido à falta de área permeável para absorção da imensa quantidade de água que não tem opção para escoamento, devido. Quase três séculos depois da revolução industrial, onde o êxodo rural acarretou na superpopulação das cidades, obrigando-as a crescerem em número de habitantes e em uma infraestrutura precária e abriu-se mão da vegetação pré-existente nas cidades, o homem busca um meio de trazê-la de volta, sentindo as consequências da substituição de áreas verdes por área edificada. Essa rápida expansão das cidades, algumas de forma desordenada e sem estudo, causou o aparecimento das ilhas de calor, efeito que acarreta o aumento da temperatura local devido ao alto grau de urbanização. Em períodos de verão, as temperaturas ficam muito elevadas, chegando a atingir, em algumas cidades brasileiras temperaturas acima de 40 °C (EDWARDS, 005). O problema do clima urbano evoluiu a um ponto que a solução mais aceitável é o retorno ao meio rural, ou melhor, é trazer características do meio rural para o meio urbano. Dessa maneira, uma solução utilizada há muito tempo na história da humanidade torna-se novamente necessária nos dias atuais: o telhado verde. A Alemanha, é um país que se tornou referência quando se trata de telhado verde, investindo em pesquisas e na melhoria das coberturas vegetais, tem uma grande parcela de suas edificações com algum tipo de vegetação implantada nas coberturas. Como incentivo a aplicação dessa tecnologia, algumas cidades adicionaram as suas legislações urbanas, a implantação do telhado verde, uma solução prática e saudável para o clima urbano. (HENEINE, 2008). No Brasil, a utilização de terraços e coberturas verdes começou com o arquiteto e paisagista, Roberto Burle Marx, no Ministério da Educação e Cultura, no Museu de Arte Moderna no Rio de Janeiro, em edifícios da Petrobrás e na associação Brasileira de Imprensa. Presentemente, a aplicação de coberturas vegetais no Brasil ainda é muito tímida, podendo ser encontradas em algumas residências, em guaritas de edifícios residenciais e em algumas edificações que optaram pela construção sustentável. Na cidade de João Pessoa, a aplicação do telhado verde ainda é muito escassa, e quando encontrada, exercida de forma inadequada, em razão de que algumas edificações a utilizam com o objetivo meramente estético, sem se preocupar com a funcionalidade e o funcionamento. O Hotel Verde Green, referência na cidade na aplicação de tecnologias sustentáveis, localizado no bairro de Tambaú, apresenta a aplicação de um teto jardim e outras soluções ecológicas assim como algumas residências de forma total ou parcial na sua cobertura.

1.4 Material Alcalinamente Ativado

Aliado ao telhado verde, solução de bom impacto citada anteriormente, decidiu-se associa-lo a utilização de um material ecologicamente amigável ao meio ambiente, material alcalinamente ativado, para a elaboração de uma solução ainda menos agressiva ao meio ambiente. O Material Alcalinamente Ativado (MAA) é um material que necessita de baixas temperaturas para a sua obtenção, tem alta resistência mecânica, alta estabilidade térmica, é um material isolante e sendo também uma ótima barreira antichamas (PALOMO, 1999). Desde o início de suas pesquisas, o MAA foi pensado como um material alternativo com a possibilidade de substituir o Cimento Portland (CP) e ser utilizado em tecnologias tradicionais de construção. É importante destacar que o CP é um aglomerante baseado, principalmente, em reações de hidratação de óxidos de cálcio, silício e alumínio, com a formação de fases cristalinas distintas e de uma cadeia amorfa de silicato de cálcio hidratado e sua estrutura química é intrinsecamente diferente da dos MAA's que apresentam a formação de uma fase gel de aluminossilicato (DAVIDOVITS, 1991). Embora atualmente exista uma literatura considerável sobre MAA's, referente à sua tecnologia e aplicações na construção, suas propriedades mecânicas e alta resistência ao fogo, imobilização de resíduos tóxicos e radioativos, entre outras propriedades (ALLAHVERDI e ŠKVÁRA, 2001a; ALLAHVERDI e ŠKVÁRA, 2001b; DAVIDOVITS, 1991; PALOMO e DE LA FUENTE, 2003; PALOMO et al., 1999b; VAN JAARSVELD et al., 2002), seus estudos estão baseados preferencialmente em alguns precursores tradicionais, tais como a argila calcinada metacaulinita ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), e os resíduos industriais cinzas volantes e escoria de alto forno. Isto se dá pela composição química destes materiais possuírem proporções de alumínio e silício favoráveis à formação de MAA e sua vasta disponibilidade no mercado e nas indústrias. Apesar da grande variedade de nomenclatura referente aos MAA's, tais como: cimento ativado alcalinamente, cerâmica alcalina, geocimento, hidrocerâmica, etc., todos esses termos são empregados a materiais sintetizados utilizando processos químicos semelhantes, que podem ser descritos como um sistema complexo de reação de dissolução alcalina e precipitação numa reação aquosa de substrato. Palomo et al. (1999) comenta que a ativação alcalina é um processo químico que permite transformar estruturas vítreas (parcialmente ou totalmente amorfa e/ou metaestável) em um compósito bem compactado e cimentante. O mecanismo de reação mostrado na Figura 01, apresentada abaixo, de forma altamente simplificada, os principais processos que ocorrem na síntese do MAA. Embora apresentado linearmente, estes processos são amplamente acoplados e ocorrem simultaneamente. O mecanismo inclui uma etapa de dissolução inicial (I), onde a solução alcalina não só hidrolisa a superfície do mineral, mas também dissolve uma pequena quantidade de espécies Al e Si. Estas espécies dissolvidas (II) reagem com os íons silicato, já dissolvidos, e polimerizam por reações de condensação (III), formando um gel (IV) que é transformado na (V) estrutura final, seja por outra dissolução e outro processo de cristalização, ou por um mecanismo do estado sólido (VAN JAARSVELD e VAN DEVENTER, 1999b). O equilíbrio dentro destas soluções tem sido extensivamente estudado (SWADDLE et al., 1994; SWADDLE, 2001). Em síntese, no processo de ativação alcalina ocorrem reações exotérmicas de dissolução, durante as quais acontecem desarranjos das ligações de Si-O-Si e de Al-O-Al, em que íons (silício e alumínio) passam para uma solução. Os produtos gerados, decorrentes da destruição estrutural da matéria-prima, começam a acumular por um período de tempo (período de indução) em que o calor liberado é mínimo. Finalmente, há uma condensação da estrutura (passo fortemente exotérmico) que envolve o aparecimento de um material cimentante com uma estrutura mal ordenada, porém com alta resistência mecânica (PALOMO et al., 1999a). Portanto, de uma forma geral, a obtenção dos álcalis ativados dependerá da matéria-prima utilizada, da mineralogia, da morfologia, da granulometria, da composição química e do teor de sílica reativa das matérias-primas, do ativador e sua concentração, bem como do tratamento térmico ao qual às amostras serão submetidas.

2. OBJETIVO

Estudar e avaliar o desempenho de blocos pré-moldados de telhado verde a base de material alcalinamente ativado; Avaliar o efeito da matéria prima nas propriedades física, química, mineralógica e microestrutural dos blocos de argamassas a base de MAA; Avaliar o efeito do

ativador alcalino nas propriedades física, química, mineralógica e microestrutural dos blocos de argamassas a base de MAA; Avaliar o efeito da temperatura nas propriedades física, química, mineralógica e microestrutural dos blocos de argamassas a base de MAA; Avaliar o efeito da idade nas propriedades física, química, mineralógica e microestrutural dos blocos de argamassas a base de MAA; Estudar o desempenho mecânico dos blocos pré-fabricados a base de MAA;

3. METODOLOGIA

Visando atender os objetivos de pesquisa, foi estabelecido o seguinte programa experimental: seleção da matéria prima e sua caracterização; seleção dos ativadores alcalinos; definição das temperaturas e idades de síntese; síntese alcalina (2 traços para cada MP selecionado); caracterização do produto; A pesquisa foi desenvolvida em volta de um bloco pré-moldado de telhado verde feito com Material Alcalinamente Ativado (MAA). Devido às características do MAA e sua relação com o material precursor, decidiu-se utilizar metacaulinita e solo intemperizado, como material precursor, para a elaboração do bloco pré-moldado. A escolha desses materiais precursores se deu em função dos resultados das propriedades mecânicas obtidas para MAA's a base desse precursor em outros estudos realizados na UFPB (GOMES, 2008). Foram avaliados ainda o efeito do ativador alcalino na síntese dos MAA's produzidos. Com relação ao material precursor, o tipo de ativador e a temperatura. A escolha dos ativadores se deu pela resistência mecânica do sódio e da estabilidade térmica do potássio. Inicialmente, foram realizados um estudo do traço (T1 e T2) a ser utilizado na obtenção dos blocos pré-moldados. Foram confeccionados, inicialmente, blocos de 40 x 40 x 160 mm para os testes, de MAA a base de metacaulinita e silicato de sódio (ativador alcalino), onde foram submetidos a temperaturas de 50 °C e 75 °C (temperaturas recomendadas na literatura para síntese alcalina) em diferentes idades (1 e 7 dias), sendo avaliados sua propriedade mecânica em termos de resistência a compressão e flexão, sua estabilidade térmica, e suas propriedades físicas em termos de permeabilidade/absorção.

3.1 Caracterização

A caracterização física com relação a absorção de água, é normatizada pela NBR 9778, que determina o índice de absorção de água por meio de imersão. As amostras passam por um processo de secagem dentro de uma estufa expostos a uma temperatura de 100 oC. Seguidamente, após o processo de secagem percorrendo o processo indicado na NBR, as amostras são imersas em água em temperatura ambiente. São 72 h percorridas no processo de absorção, fracionadas em 3 partes, nas primeiras 24 h são realizadas 3 pesagens com as amostras imersas em 1/3 de água, nas 48 h seguintes, as amostras imersas por completo dentro da água onde são realizadas mais 2 pesagens. Caso a diferença entre as cargas, exceda 0,5%, a amostra deverá permanecer mais 24 h imersas em água. Para a análise da composição química das amostras, utilizou-se um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X, modelo XRF 1800 da Shimadzu, onde a amostra foi irradiada por um feixe de raio gerando outro raio característico de cada elemento, esses raios são chamados de fluorescentes, e são decorrentes do comprimento de onda e da energia específica. As análises, quanto a composição química, podem ser feitas qualitativa e quantitativamente fundamentadas na NBR 12653. Através da Fluorescência, obteve-se os percentuais de SiO₂, Na₂O e Al₂O₃ entre outros elementos com menor volume. A análise foi realizada no Laboratório de Solidificações Rápida da UFPB. A caracterização mineralógica foi realizada utilizando um Difractômetro D2 Phaser da Bruker, operando com radiação K α de cobre, 30kv e 10 mA, com varredura de 2 θ entre 5° e 60° com passo de 0,02°/s e fenda de 1mm. O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais do TECNOM/UFPB com o objetivo de avaliar as modificações das fases cristalinas oriundas de sínteses e tratamentos térmicos diferentes. As análises de transmissão na região do infravermelho foram realizadas em um espectrofotômetro de infravermelho da Prestige da Shimadzu. As amostras foram misturadas com brometo de potássio (KBr) na concentração de 2% e prensadas para a obtenção das pastilhas. Este procedimento foi utilizado para verificar a transformação do estado de coordenação do alumínio de VI para IV, condição necessária à reação de ativação alcalina. A microscopia ótica foi realizada em um Microscópio Zeiss com color view– soft imaging system, utilizado-se o

programa Analysis System. Os ensaios de resistência a flexão, foram realizados nos laboratórios da UFPB na Máquina Universal de Ensaio de 10kN da Shimadzu, com velocidade de 50N/seg. Foram utilizadas amostras prismáticas com dimensões de 16 x 4 x 4 cm (largura x altura x profundidade) onde foram descobertos os valores de: máxima força; máxima tensão; máximo deslocamento máxima deformação, suportados por cada amostra.

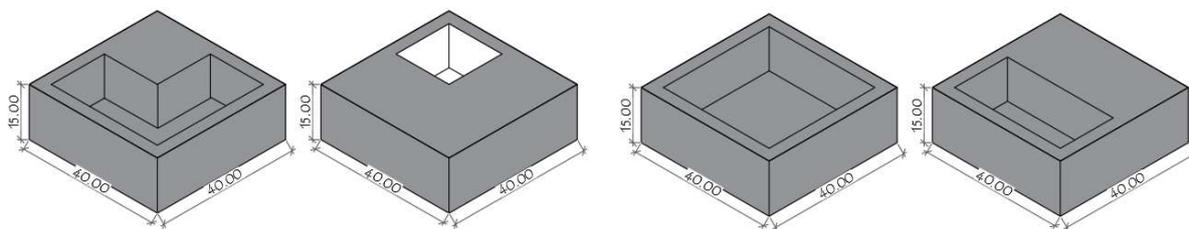
Já os testes de resistência a compressão simples, foram realizados no LABEME - UFPB, onde pode-se ser obtido os valores da resistência em Kg de cada amostra prismática com dimensões de 16 x 4 x 4 cm (largura x altura x profundidade).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Definição do Bloco

A cobertura de uma edificação ainda é a área menos aproveitada de uma construção, e se enquadra na que mais sofre com as intempéries. Para tanto, com a aplicação do Telhado Verde na cobertura, consegue-se o aproveitamento dessa área e melhorias em algumas funções para a edificação. Com o presente estudo, esperou-se tornar essa prática de baixo impacto ambiental mais benéfica e mais acessível à população. Sua utilização consiste numa aplicação da cobertura em blocos pré-fabricados com MAA e de fácil aplicação numa edificação. Através de seu emprego espera-se a diminuição da temperatura no ambiente e, conseqüentemente, a não utilização de ventilação artificial; o aumento do bioma ao redor da edificação, melhoria no isolamento acústico, além de aumentar a área permeável da edificação. O bloco a ser empregado nesta pesquisa tem como forma um prisma, com 40 cm de largura, 40 cm profundidade e 15 cm de altura. Sua espessura lateral e de base é de 3 cm, apropriadas para receber um substrato de 10 cm de altura, assim como mostra a figura abaixo:

Figura 02. Tipologias dos Blocos pré-moldados a serem empregados na pesquisa. Fonte: Elaborada pelo autor (2018).



Os blocos tiveram 4 tipologias distintas para atender aos mais diversos desenhos de piso esperados (Figura 02) e juntos, formarem uma cobertura que possibilite o cultivo de vegetação e a contemplação das mesmas por seus usuários. Dessa forma, obtêm-se uma nova área útil na edificação, anulando a cobertura tradicional, que geralmente é inutilizada e tida como área morta. O formato do bloco prismático, foi escolhido por ser de mais fácil aplicação e adaptação a qualquer tipologia de cobertura das edificações.

4.2 Caracterização do Material Precursor como escolha da matéria a ser utilizada na produção

Como material pozolânico, a composição química dos materiais indica que os mesmos atendem aos limites para uso com esta finalidade, de acordo com a norma NBR 12653 uma vez que a soma dos compostos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ variam entre 96% e 98% e, conseqüentemente, são superiores ao mínimo de 70%, preconizado em norma. Com relação ao uso na síntese de MAA, pode-se observar que, embora todos os precursores estudados sejam fontes representativas de aluminosilicatos, o teor de sílica e alumina varia significativamente de acordo com o tipo de precursor, o que afetará o desempenho dos produtos finais (GOMES, 2008). Já a matéria prima à base de MK é constituído basicamente de quartzo. O Rutilo (R) foi utilizado como material de referência para auxiliar na identificação dos demais picos cristalinos. Realizando uma Espectroscopia na região do infravermelho observou-se que as bandas que aparecem em torno

de 3695 e 3620 cm^{-1} (7) são atribuídas ao modo de deformação axial assimétrica e simétrica das hidroxilas ligadas ao Al da caulinita, mineral precursor da metacaulinita, e da água livre, e são claramente evidentes na amostra SI e tenderam a serem menos intensa, ou praticamente inexistente, na amostra MK que é uma argila calcinada (VAN DER MAREL, 1976). Isto corrobora os resultados obtidos na Difração de Raios X, com a presença da Caulinita apenas na amostra SI. As bandas entre 1450 cm^{-1} (5) e 450 cm^{-1} (1), refere-se às ligações T-O-Si (T=Si ou Al) perderam a sua definição de pico e passaram a ter uma ocorrência mais difusa ou desapareceram quando comparados as amostras MK (calcinada) e SI (In natura). Pode-se também observar que as ligações do tipo Si-OH desapareceram com a calcinação. Isto pode estar relacionado com o processo de amorfização do argilomineral. As bandas em torno de 850 cm^{-1} (2) referente à presença de Al octaedro, identificados mais facilmente nas amostras in natura (SI), diminuem na amostra calcinada (MK). Após a realização dos testes de Resistência a Compressão Simples para as pastas de MAA a base de MK e SI, sintetizados com silicato de sódio a 50 e 75 °C, pode ser observado, que não houve grandes alterações nos resultados de resistências a compressão simples dos materiais em função da alteração das temperaturas aos quais as pastas de MAA foram submetidas. Em função de toda a caracterização realizada para as matérias primas, observou-se que a Metacaulinita apresentou maiores teores de SiO_2 e Al_2O_3 (Seção 5.2.1), bem como maior reatividade quando comparadas ao SI (Seção 5.2.2 e 5.2.3). Além disto, a MK apresentou valores de resistências acima do que o esperado para a utilização em blocos pré-moldados, isso favorece a ativação alcalina. Apesar destes parâmetros, a metacaulinita apresenta uma homogeneidade reconhecida e uniformidade de área superficial, o que favorecem o conhecimento do mecanismo de reação durante a síntese alcalina. Desta forma, foi selecionada a MK para dar continuidade ao planejamento experimental.

4.3 Preparação das barras prismáticas

Para a presente pesquisa, foi utilizado um traço (em kg) de 1: 1,44: 4,17 (metacaulinita:solução alcalina:areia) com fator água/metacaulinita de 0,29. Esse traço foi utilizado em função das propriedades desejadas para o emprego do material (bloco), bem como em função de resultados obtidos por Gomes (2008) durante suas pesquisas visando aplicações de MAA a base de metacaulinita. De acordo com a escolha do material precursor e dos ativadores definidos, foi feita a preparação dos traços para a produção de 6 barras prismáticas. Os estudos foram realizados no Laboratório de Materiais do Instituto Paraibano de Educação, UNIPÊ, e tiveram duração de 20 dias. Foram utilizados os seguintes instrumentos: Balança de precisão, liquidificador industrial e argamassadeira. Foram moldados 6 corpos de prova (barras prismáticas) para cada tipo síntese, em uma fôrma confeccionada em madeira naval e revestida com acetato, para que as barras não se agregassem junto as laterais da fôrma. Após 24 horas os Corpos de Prova (CP) foram desmoldados e as barras foram identificadas (numeradas) e devolvidas à temperatura de estudo (50 e 75°C) pelo período de análise (1 e 7 dias). Ao final da realização do processo de cura, as 48 barras (no seu devido tempo de análise) foram retiradas da estufa e embaladas em plástico, para que tivessem o menor contato possível com o ar em temperatura ambiente, e submetidas aos respectivos ensaios.

4.4 Caracterização dos materiais produzidos

4.4.1 Absorção

Os ensaios de absorção, foram realizados no Laboratório de Materiais do Instituto Paraibano de Educação - UNIPE, onde 24 (vinte e quatro) barras prismáticas com 8 tipologias ficaram imersas em água por 72h. Foram realizadas 9 pesagens ao total, sendo 4 com peso seco, e 5 após a imersão em água. A pesagem inicial foi realizada com as barras em temperatura ambiente, registrando seu peso inicial para que se iniciasse o processo, onde as mesmas foram inseridas em uma estufa com temperatura de 100 °C de acordo com a NBR 9778. Após 24 h, 48 h e 72 h da primeira pesagem, foram realizadas outras três pesagens, registrando uma diferença menor que 0,5% entre elas, o que possibilitou seguir com o processo. Após a secagem das barras prismáticas, deu-se início aos testes de absorção de acordo com a NBR 9778/1987, o qual indica a imersão das barras prismáticas em água até 1/3 de seu volume com pesagens de 4 h, 8 h e 12

h depois de imersas. Outras pesagens a 24 h, 48 h e 72h foram realizadas, indicando uma diferença menor que 0,5% entre elas, possibilitando a finalização dos testes de absorção. Em seguida, foram elaborados os resultados de acordo com a NBR 9778/1987, para a obtenção das porcentagens de absorção de cada amostra e elaboração dos resultados obtidos. Pode-se observar através dos resultados da absorção que os materiais alcalinamente ativados oriundos do ativador silicato de sódio apresentaram menores valores de absorção e quando comparados ao ativado com silicato de potássio. Isto pode ter ocorrido em função da polimerização do material a base de potássio, visto que o mesmo apresenta maior raio iônico e menor energia de ionização quando comparado ao sódio. Isto favorece uma polimerização diferenciada e possibilita a formação de uma matriz mais porosa.

4.4.2 Fluorescência de Raio X

A análise foi realizada na UFPB, no Laboratório de Solidificações Rápida, onde pode ser obtido a composição química dos MAA's produzidos na pesquisa, conforme podem ser observados na Tabela 02.

Tabela 02. Composição Química das Matérias-Primas Precursoras do MAA (Fonte: Autor, 2018)

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Outros
SiNa.50.1dia	70,0039	10,7155	1,6067	15,0842	0,2413	0,0208	1,6908	0,6368
SiNa.50.7dias	57,5563	13,8732	2,0045	22,9668	0,2684	0,4356	2,0133	0,8819
SiNa.75.1dia	72,9608	7,7501	1,3633	15,8170	0,2000	0,1229	1,3974	0,3885
SiNa.75.7dias	56,1947	16,6041	2,0354	21,7641	0,2727	0,2392	1,8995	0,9903
SiK.50.1dia	65,0631	19,1918	1,8917	8,5423	2,3548	0,0276	2,0485	0,8802
SiK.50.7dias	60,4425	18,1717	2,0345	14,0083	2,4354	0,0559	2,0534	0,7983
SiK.75.1dia	74,6195	12,3509	1,7600	6,7580	2,1088	0,0270	1,6970	0,6788
SiK.75.7dias	67,2422	13,9456	2,9324	9,6815	2,7575	0,0720	2,3425	1,0263

Como pode ser observado na Tabela 02, com a idade a sílica vai sendo consumida em todos os sistemas, com sódio ou potássio e independentemente da temperatura. Observa-se, ainda, o efeito do ativador alcalino na composição química dos produtos obtidos, ou seja, os MAA's fabricados com silicato de sódio apresentam maiores teores deste álcali quando comprado com os oriundos a base de potássio. Quando analisado os teores de alumínio dos materiais produzidos, é possível observar teores mais elevados nos materiais ativados com potássio quando comparados aos de sódio. Estas disponibilidades de elementos (Al) e consumo de outros (Si, Na, K) irão afetar as propriedades dos materiais produzidos, como serão observados mais detalhadamente nas seções 5.4.3 e posteriores.

4.4.4 Difração de Raio X

Através da caracterização de Difração de Raio X, observou-se que as fases cristalinas dos MAA's obtidos são oriundas basicamente do seu material precursor e do tipo de ativador alcalino, sendo as fases de Quartzo (Qz) oriundas da Metacaulinita e as Fases de Albita (Al) e Mica (Mi), dos ativadores sódio e potássio, respectivamente. Pode-se observar, ainda, que o tratamento térmico utilizado na cura dos materiais (50 e 75°C) não acarretaram modificações significativas nas fases mineralógicas dos produtos obtidos.

4.4.5 Microscopia Óptica

Pode ser observado através da microscopia Óptica que o MAA a base de MK e Silicato de Sódio apresenta uma matriz densa e homogênea, o que confere uma melhor propriedade ao material, em especial em termos mecânicos, como será observado na seção 5.4.5.

4.4.6 Resistência x Absorção

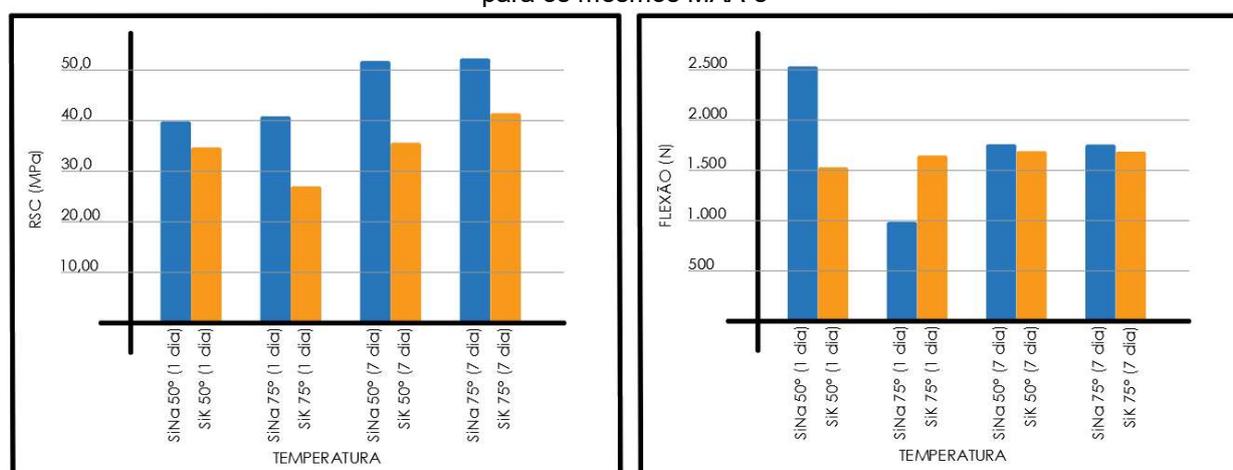
Os materiais a base do álcali sódio apresentaram maiores valores de resistência a compressão simples e menores percentuais de absorção, sendo que as amostras curadas a menores temperaturas apresentam-se mais densas quando comparadas as curadas a temperaturas mais

elevadas. Isto já era esperado, visto o aumento de temperatura acelerar a perda de água na estrutura e acarretar maior quantidade de vazios na matriz. Pode-se constatar também que os materiais a base de sódio apresentam o mesmo comportamento de resistência a flexão observado na RCS, quando analisados o tipo de álcali utilizado na síntese para obtenção dos MAA's. Contudo, quando analisados o efeito da temperatura e da idade, o comportamento é diferenciado para cada tipo de álcali.

4.4.3 Resistência Mecânica

Foram realizados ensaios de Resistência a Compressão Simples para as barras prismáticas de MAA a base de MK, sintetizados com silicato de sódio a 50 °C (7 dias) e a Figura 03 apresenta o gráfico com os resultados de RCS obtidos para os materiais produzidos na pesquisa.

Gráfico 01. Resultados de RCS para os MAA's produzidos na pesquisa e Resultados de RF e temperatura para os mesmos MAA's



Como pode ser observado pelo Gráfico 01a, as resistências obtidas sofreram influencia tanto das temperaturas de cura, quanto das idades e do tipo de ativador utilizado. Pode-se observar, quanto ao tipo de ativador, que os materiais a base do álcali sódio, apresentaram as maiores resistências, independentemente da idade e da temperatura de cura, quando comparados com os materiais obtidos a base do álcali potássio. De acordo, com Duxton (2007) isto já era esperado, pois o sódio promove maiores resistências mecânicas, enquanto que o potássio possibilita maior estabilidade térmica. Quanto a temperatura de síntese empregada, é possível observar que para os materiais a base de sódio, o aumento da temperatura de 50 para 75°C não acarretou incremento significativos nas resistências, sendo mais importante a idade de cura. Já para os materiais a base de potássio, foi possível observar que o aumento da temperatura acarretou um aumento na resistência, em especial aos 7 dias. Observando o comportamento dos materiais produzidos quanto a idade, é possível observar que este parâmetro é mais significativo para os materiais ativados com o álcali potássio, quando comparados aos ativados com sódio. Como pode ser observado no Gráfico 01b, demonstra os resultados de Resistência a Flexão dos MAA's produzidos com relação ao tipo de ativador alcalino, idade e temperatura de cura da síntese. Observa-se um comportamento relevante da amostra de MK a base de SiNa 50 °C (1 dia) que obteve a maior resistência a Flexão e a amostras de SiNa 75°C (1 dia) que obteve o menor resultado entre as amostras. Destaca-se que ambas foram moldadas no mesmo dia com as mesmas condições, sendo apenas submetidas a temperaturas distintas. De modo semelhante a RCS, as amostras que ficaram expostas a temperatura por mais tempos, obtiveram resultados mais similares com relação a resistência a flexão, independentemente do tipo de ativador alcalino.

5. CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento dessa pesquisa foi possível a obtenção de Blocos de argamassa de MAA a base de Metacaulinita que podem ser aplicados em blocos pré-moldados de telhado verde, que podem ser implementados em edificações residenciais, comerciais e condomínios verticais.

O design dos blocos pré-moldados foi criado para se adaptarem aos diversos desenhos de piso que possibilitassem o deslocamento dos usuários para futuras manutenções no telhado verde. Após a realização dos ensaios de caracterizações nos blocos pré-moldados, constatou-se, que a temperatura influenciou nas propriedades mecânicas em termos de Resistência a Compressão Simples e a Flexão, em especial quando correlacionadas com Idade e Tipo de Álcalis. Os materiais sintetizados com Silicato de Potássio (SiK) apresentaram maiores valores de absorção, enquanto os elaborados com Silicato de Sódio se apresentaram mais densos com valores na ordem de 10%. A utilização do álcali sódio acarretou um incremento das propriedades mecânicas a nível de resistência a compressão e melhora nas propriedades físicas em termos de produzir matrizes menos porosas. Após as análises, constatou-se que as amostras de argamassas de MAA sintetizadas com Silicato de Sódio curadas a 50 °C obtiveram um melhor resultado para a aplicação em telhados verdes, visto os valores obtidos nos ensaios físicos e mecânicos.

REFERÊNCIAS

- ALLAHVERDI, A; SKVARA, F. **Nitric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements - Part 1.** *Ceramics - Silikaty* 45. 2001a.
- ALLAHVERDI, A; SKVARA, F. **Nitric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements - Part 2.** *Ceramics - Silikaty* 45. 2001b.
- ARAÚJO, S. R. **As funções dos telhados Verdes no Meio Urbano, na Gestão e no Planejamento de Recursos hídricos.** Seropédica, Rio de Janeiro. 2007.
- DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: inorganic polymeric new materials.** *Journal of thermal Analysis* 37, 1633.1991
- EDWARDS, Brian. **O guia básico para a sustentabilidade.** Ed. Gustavo Gili. São Paulo. 2008
- GOMES, K. C. **Potencial de Ativação Alcalina de Materiais Residuais Aluminossilicosos no Desenvolvimento de Matrizes Cimentícias.** UFPB. João Pessoa. 2008
- GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício Ambiental.** 1 Ed. São Paulo. Oficina de textos. 2015.
- GOLDEMBERG, J. **O desafio da sustentabilidade na construção civil.** 1 Ed. São Paulo. Blucher. 2014
- HENEINE, M. C. A. S. **Cobertura Verde.** Monografia do curso de Especialização em Construção civil. UFMG. Minas Gerais. 2008.
- PALOMO, A; VARELA, M.T.B; GRANIZO, M.T; PUERTAS, F. VARQUEZ, T; GRUTZECK, M.W. **Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin.** *Cement and Concrete Research.* 1999b.
- PALOMO A.; DE LA FUENTE J.I.L. **Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes - Part I. Stabilization of boron.** *Cement and Concrete Research* 33(2): 281-288. 2003
- SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação do impacto ambiental: Conceitos e métodos.** 2ª Ed. São Paulo. Oficina de textos. 2013.
- VAN JAARSVELD, J.G.S; VAN DEVENTER, J.S.J; LUKEY, G.C. **The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers.** *Chemical Engineering Journal.* 2002.