

RECICLAGEM DE GESSO DE DEMOLIÇÃO E INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RETARDADORES DE CURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

RECYCLING OF DEMOLITION GYPSUM PLASTER AND INFLUENCE OF THE CURING RETARDERS ADDITION ON THE MECHANICAL PROPERTIES

Maria Clara Rozo Terreiro Seffrin mcseffrin@gmail.com

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade do Vale do Paraíba (São José dos Campos/Brasil).

João Victor Toledo de Almeida de Souza toledojoaovictor@gmail.com

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade do Vale do Paraíba (São José dos Campos/Brasil).

Maria Rosária Oliveira rosaria@univap.br

Engenheira Civil pela Universidade do Vale do Paraíba (São José dos Campos/Brasil).

Erika Peterson Gonçalves erika@univap.br

Doutora em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (São José dos Campos/Brasil). Professora na Universidade do Vale do Paraíba (São José dos Campos/Brasil).

RT&T | a. 11 | n. 1 | p. 53-71 | jan./jun. 2020

Recebido em: 22 de agosto de 2019 | Aprovado em: 17 de dezembro de 2019

Sistema de Avaliação: Double Blind Review | DOI: <https://doi.org/10.25112/rtt.v11i1.2295>

RESUMO

O gesso é um material de construção amplamente utilizado devido à sua leveza e baixo custo, mas se torna um passivo ambiental, pois os resíduos gerados na construção e demolição de edifícios são descartados incorretamente e podem causar grandes danos ao solo e às águas subterrâneas. Sua reciclagem tem sido extensivamente estudada, mas fatores ambientais e de gerenciamento no descarte foram desconsiderados. O descarte desse material, mesmo quando controlado por políticas públicas, tem sido negligenciado, levando à contaminação desse material, conforme observado pela análise qualitativa da difração de raios X. Esses contaminantes atuam durante o processo de nucleação e crescimento de cristais de gesso, alterando o tamanho e sua forma. Este estudo avalia as propriedades físicas e mecânicas da reciclagem de resíduos de gesso obtidos em recicladores credenciados por órgãos públicos em estado puro e com a inserção de álcool polivinílico e ácido cítrico como retardadores do tempo de preparação comparando os resultados obtidos com o gesso comercial. Os resultados indicam que, nos casos de adição de álcool polivinílico, há ganho nas propriedades mecânicas quando comparado ao produto comercial e melhor trabalhabilidade quando comparado ao gesso reciclado puro, enquanto com a adição de ácido cítrico, essas propriedades são reduzidas nas duas comparações.

Palavras-chave: Reciclagem. PVAI. Ácido Cítrico. Gesso.

ABSTRACT

Gypsum is a widely used construction material due to its lightness and low cost, but it becomes an environmental liability as the waste generated in the construction and demolition of buildings is improperly disposed of and can cause great damage to the soil and groundwater. Its recyclability has been extensively studied, but environmental and management factors in the disposal have been disregarded. The disposal of this material, even when controlled by public policies, has been neglected, leading to the contamination of this material, as observed by the X-ray diffraction qualitative analysis. These contaminants act during the process of nucleation and growth of gypsum crystals, altering size and their form. This study evaluates the physical and mechanical properties of the recycling of gypsum waste obtained in recyclers accredited by public agencies in the pure state and with the insertion of polyvinyl alcohol and citric acid as retarders of setting-time comparing the obtained results with commercial gypsum. The results indicate that in the cases of addition of polyvinyl alcohol there is gain in the mechanical properties when compared to the commercial product and better workability when compared to pure recycled gypsum. While with the addition of citric acid these properties are reduced in both comparisons.

Keywords: Recycling. PVAI. Citric Acid. Plaster.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento da civilização acompanhado pelo crescimento industrial foi observado. Mesmo nos principais países de desenvolvimento econômico e tecnológico, esse crescimento se baseia na exploração de recursos naturais não renováveis e no descarte inadequado de resíduos sólidos industriais, muitas vezes impulsionados pelos baixos custos dessas operações, quando comparados a operações ambientalmente amigáveis.

De acordo com um relatório patrocinado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), o consumo de matérias-primas naturais extraídas do planeta triplicou nas últimas quatro décadas, sendo os maiores consumidores os países mais ricos, consumindo cerca de 10 vezes o consumo dos países mais pobres. Essa organização alerta que, se a tendência continuar em 2050, cerca de 180 milhões de toneladas de matéria-prima por ano serão extraídas do planeta (UNEP 2016).

Em 1987, em relatório apresentado pela Comissão Mundial das Nações Unidas para o Desenvolvimento e o Meio Ambiente Natural, foi definida a ideia de desenvolvimento sustentável e equilibrado, que garante atender às necessidades das gerações atuais e não impede que as futuras gerações tenham suas necessidades atendidas (CHARYTONOWICZ; SKOWRÓNSKI, 2015; COMISSÃO MUNDIAL DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE, 1987).

Reduzir a produção de resíduos não é eficaz para a estabilidade da degradação do meio ambiente. É necessário reverter a tendência de crescimento da degradação e impactos nos recursos ambientais. A opção para isso é a recuperação dos materiais aplicados, que, a longo prazo, podem reduzir o uso de recursos. (ERBS *et al.*, 2018).

A construção é um dos maiores consumidores de recursos naturais do planeta, atingindo um consumo de até 50% de todos os recursos naturais extraídos. (SJÖSTRÖM, 1996). Por outro lado, esse mesmo setor é o que apresenta a maioria das possibilidades de incorporação de resíduos em novos materiais, e uso de materiais reciclados. (SANTOS *et al.*, 2011).

Os impactos gerados pela indústria da construção não foram considerados prejudiciais, pois a produção de resíduos era pequena e a assimilação ambiental, grande. A maioria dos resíduos gerados no canteiro de obras é descartada em aterros devido à ausência de mercados para sua reciclagem (DURAN *et al.*, 2006).

As massas de gesso são materiais amplamente utilizadas como materiais de construção devido à sua facilidade de aplicação, baixo custo e leveza. Mas os resíduos gerados são muito agressivos ao meio ambiente, porque sua composição é basicamente sulfatos de cálcio, que no solo, na presença de água, podem reagir para formar gás sulfídrico extremamente tóxico e ainda podem produzir ácido sulfúrico,

ambos susceptíveis a contaminar o solo e as águas subterrâneas. Portanto, é necessário desenvolver metodologias para reciclagem desses materiais (GERALDO *et al.*, 2017; JIANXIN *et al.*, 2018).

Os fatores que afetam a alta geração de resíduos de gesso na construção estão relacionados principalmente à cinética da reação de cura do gesso que leva a um endurecimento rápido e à falta de mão de obra qualificada no canteiro de obras (MENEZES; POVOAS, 2016).

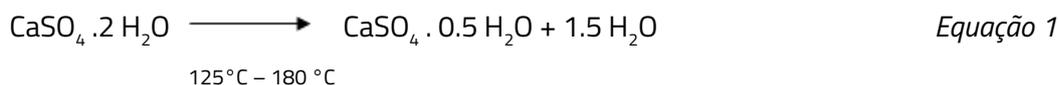
O processo de reciclagem de gesso reduz custos com o gerenciamento de resíduos (BRASILEIRO; MATOS, 2015), além disso, espera-se que o custo desse material reciclado seja menor que o material natural.

Atualmente, estuda-se como solucionar o problema dos resíduos de gesso da construção civil. Em muitos estudos, o gesso é curado em laboratório com razão água/gesso (a/g) controlada, ambientes limpos e livres de impurezas. Sabe-se que a realidade em um canteiro de obras é muito diferente. Nos locais, os resíduos gerados são segregados em caçambas, mantidos em área aberta e levados para as usinas de reciclagem que dão o destino correto. No momento atual, a principal aplicação é a mistura desse resíduo na formulação de cimento Portland, mas ainda é aplicada baixa quantidade para essa finalidade.

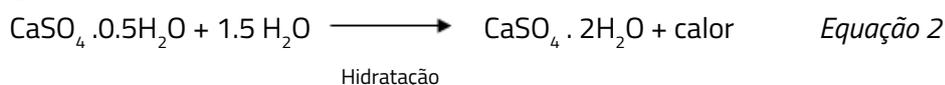
Por se tratar de uma matéria-prima natural não renovável, é necessário economizar recursos para evitar a extinção desses depósitos de extração mineral. Além disso, esse resíduo apresenta um alto grau de toxicidade para o solo, sendo considerado um passivo ambiental que foi negligenciado ao longo dos anos.

Durante o processo de desidratação do mineral, são formadas algumas fases sólidas, como hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$), sulfato de cálcio (CaSO_4), anidrato II (CaSO_4) e anidrato III ($\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon \text{H}_2\text{O}$). Quando o pó de gesso é exposto à água, reage imediatamente, pois ocorre a hidratação do hemi-hidrato formando rapidamente cristais a partir do sulfato dissolvido em uma reação exotérmica.

O gesso utilizado na construção civil é uma mistura obtida pela calcinação de sulfato de cálcio quando o di-hidrato de sulfato de cálcio perde 75% de sua água combinada, produzindo hemi-hidrato de sulfato de cálcio, anidridos e di-hidratos de sulfato de cálcio, solúveis e insolúveis. A Equação 1 mostra a desidratação do sulfato de cálcio (ERBS *et al.*, 2018; GERALDO *et al.*, 2017).



Quando em contato com a água, esses compostos reidratam, formando desidrato ou sulfato de cálcio. A Equação 2 mostra a hidratação do hemi-hidrato (ERBS *et al.*, 2018; GERALDO *et al.*, 2017).



A cura ocorre devido à formação desses cristais que precipitam em solução, aumentando a viscosidade do gesso (MORGADO *et al.*, 2017).

Alguns autores relatam que o gesso reciclado cura mais rapidamente que o gesso comercial, tornando-se importante a adição de ligantes retardantes de cura, a fim de melhorar a trabalhabilidade do material sem que ocorra a redução das propriedades mecânicas (BARDELLA, 2011; PINHEIRO, 2011).

A adição de ligantes no gesso pode influenciar a resistência e a absorção de água devido aos grupos funcionais de compostos adicionados (WU *et al.*, 2014).

Nos Estados Unidos, a adição de álcool polivinílico foi estudada em 1976 para a produção de gesso resistente à água, mas, nessa ocasião, a influência desse aglutinante nas propriedades mecânicas do gesso não foi relatada. Nos últimos tempos, a adição de polímero tem sido estudada para melhorar as propriedades mecânicas e seus efeitos na retenção de água no gesso e na sua hidratação (BÜLICHEN; PLANK, 2013; GREVE; O'NEILL, 1973).

Camarini relata que o ácido cítrico tem sido estudado como um aditivo no gesso desde 1952, avaliando o processo de hidratação. A adição desse aglutinante altera o tempo de endurecimento do gesso, pois há quimisorção na superfície dos núcleos formados, alterando a forma dos cristais (CAMARINI *et al.*, 2016).

O presente trabalho busca reciclar o gesso por meio da calcinação dos resíduos obtidos em usinas de reciclagem e a inserção de ligantes retardadores na mistura, com o objetivo de determinar o efeito da adição de retardadores de cura nas propriedades mecânicas das peças moldadas de gesso, comparando-as com a do gesso comercial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O gesso recebido da usina de reciclagem apresentava-se em grandes pedaços, coletados nos canteiros de obras, foi submetido à remoção mecânica de impurezas macroscópicas, como galhos de árvores, embalagens de papel e plástico e resíduos à base de argila e cimento que foram depositados inadequadamente nas caçambas de coleta.

Pedaços de gesso recebidos foram cominuídos em moinhos de martelos para reduzir o tamanho das partículas. O refinamento da granulometria foi realizado em um moinho de bolas com meio de moagem Al_2O_3 com 1,5 cm de diâmetro sob água por 3 horas. O pó foi seco no forno a 120 °C e calcinado a 160 °C sob ar atmosférico (BÜLICHEN; PLANK, 2013; ERBS *et al.*, 2018).

As partículas finas foram desaglomeradas por peneiramento em malha 80 e armazenadas protegidas da umidade. Posteriormente, as amostras foram moldadas em corpos de prova cilíndricos com 16 mm de diâmetro e 32 mm de altura e curados por 50 dias. A razão usada a/g foi de 0,7, pois essa condição

descrita na literatura é um ponto intermediário para obter consistência normal adequada para a aplicação de gesso na construção civil (BÜLICHEN; PLANK, 2013; ERBS *et al.*, 2018).

Os aditivos de processamento foram misturados na água de amassamento a 25 °C e subsequentemente misturados com gesso reciclado. As amostras padrão foram produzidas com gesso comercial obedecendo a razão a/g de 0,7. A Figura 1 mostra as etapas do processo.

Figura 1 - Esquema do Processo de Reciclagem do Gesso de demolição.



Fonte: o autor

Os aditivos utilizados foram ácido cítrico (Sigma-Aldrich) e álcool polivinílico (Sigma-Aldrich), ambos puros para análise. As proporções adicionadas foram de 0,2% e 0,6% em massa de gesso. As misturas foram realizadas resolvendo os aditivos em água a 25 °C usando agitador mecânico, após a solubilização total do ligante, a massa de gesso foi adicionada e agitada por 3 minutos para homogeneização. A Figura 2 mostra o detalhamento dos lotes de amostra estudados e os referidos códigos de identificação.

Figura 2 - Detalhamento das composições usadas no estudo.



Fonte: o autor

O gesso comercial e o gesso reciclado foram caracterizados por difração de raios X realizada no difratômetro de raios X XRD-6000, Shimadzu, operando com radiação $\text{CuK}\alpha$ a uma tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. Os difratogramas foram obtidos de 10° a 80° para 2θ a uma velocidade de varredura de $0,2^\circ \cdot \text{min}^{-1}$. As amostras foram preparadas por peneiramento em malha 325, para identificar as fases presentes nas matérias-primas de gesso, foram utilizadas o banco de dados do *International Center of Diffraction Data* (ICDD).

O teste de porosidade aparente foi realizado com base no princípio de Arquimedes, relacionando a flutuabilidade de um corpo submerso, e essa força pode ser calculada pela diferença entre a massa do corpo seco e úmido (FRIDLAND; ROSADO, 2003; OLIVEIRA *et al.*, 2015).

As amostras foram secas em estufa a 80°C por 24 horas e pesadas e colocadas em água fervente por 2 horas e depois pesadas úmidas e submersas em água à temperatura ambiente. Para a determinação da porosidade aparente das amostras, foi aplicada a relação matemática apresentada na Equação 3.

$$\%AP = [(m_w - m_d)/(m_d - m_i)] \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde m_d é massa seca, m_w é massa úmida e m_i é massa sob imersão.

As propriedades mecânicas foram avaliadas em máquina de teste universal INSTRON 5900 R 5584 (célula de carga 5kN). Os ensaios foram realizados com velocidade de carregamento de 1 mm.min⁻¹. A resistência à compressão foi medida no ensaio de compressão axial, enquanto a resistência à tração foi medida pelo Ensaio Brasileiro que trata-se de uma adaptação do ensaio de compressão diametral (GARCIA *et al.*, 2012) e o valor determinado segundo a ABNT-NBR 6118: 2014 (ABNT, 2014), que descreve a conversão Equação 4.

$$\sigma_{ct} = 0.9 \times \sigma_{ctsp}$$

Equação 4

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A importância na caracterização das fases presentes nas matérias-primas de gesso por difração de raios X é importante, uma vez que o hemi-hidrato ocorre em duas formas diferentes (α e β); a forma α é preparada pelo método úmido na presença de vapor e a forma β é preparada por métodos secos, em ar seco a uma temperatura entre 45 °C e 200 °C, ambos a partir de sulfato de cálcio di-hidratado. As duas formas de hemi-hidrato diferem em sua reatividade com a água e na força dos produtos de hidratação (SINGH; MIDDENDOF, 2007).

A falta de responsabilidade dos envolvidos na construção civil no manuseio e descarte de resíduos de demolição de gesso, permitindo a mistura de vários materiais nas caçambas de descarte, faz com que esses materiais sejam contaminados com compostos de diferentes fontes, sejam naturais ou sintéticas.

Embora existam políticas públicas nacionais e regionais que regulam essas práticas (CONAMA, 2002, 2012; PMSJC, 2006, 2015), ainda é muito comum nos canteiros de obras, devido principalmente à falta de treinamento e especialização da força de trabalho empregada neste setor produtivo.

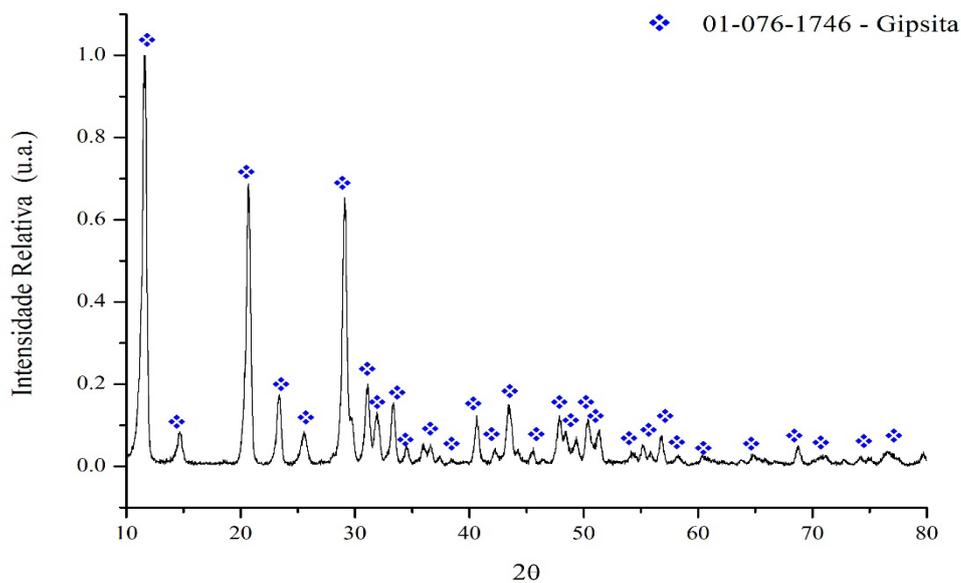
Nesses fatos reside o interesse deste trabalho em estudar a reciclagem de gesso de demolição a partir de resíduos provenientes de recicladores instalados na região de São José dos Campos-SP/Brasil. Essas contaminações foram verificadas pelos ensaios de difração de raios X realizados em material comercial obtido no comércio local e no material reciclado obtido na recicladora local.

A análise por difração de raios X foi realizada em amostras de gesso comercial e em amostras de gesso reciclado e estão apresentadas nas Figuras 3 e 4 que mostram os dois difratogramas.

Na Figura 3, é observada a caracterização do gesso puro no ICDD-JCPS nº 01-076-1746 com sistema cristalino monoclinico descrito pelos parâmetros 10.4700 Å, 15.1500 Å, 6.2800 Å, a, b, c respectivamente e α , β , γ respectivamente 90°, 98,97° e 90° e densidade calculada igual a 1,16 g/cm³. A estrutura monoclinica indica que o hemidrato presente no gesso comercial é da forma α , pois, de acordo com

Singh e Middendorf (2007), o β -hemidrato cristaliza na forma monocínica, enquanto o β -hemidrato se cristaliza na forma trigonal.

Figura 3 - Resultados difração de raios X para o gesso comercial.



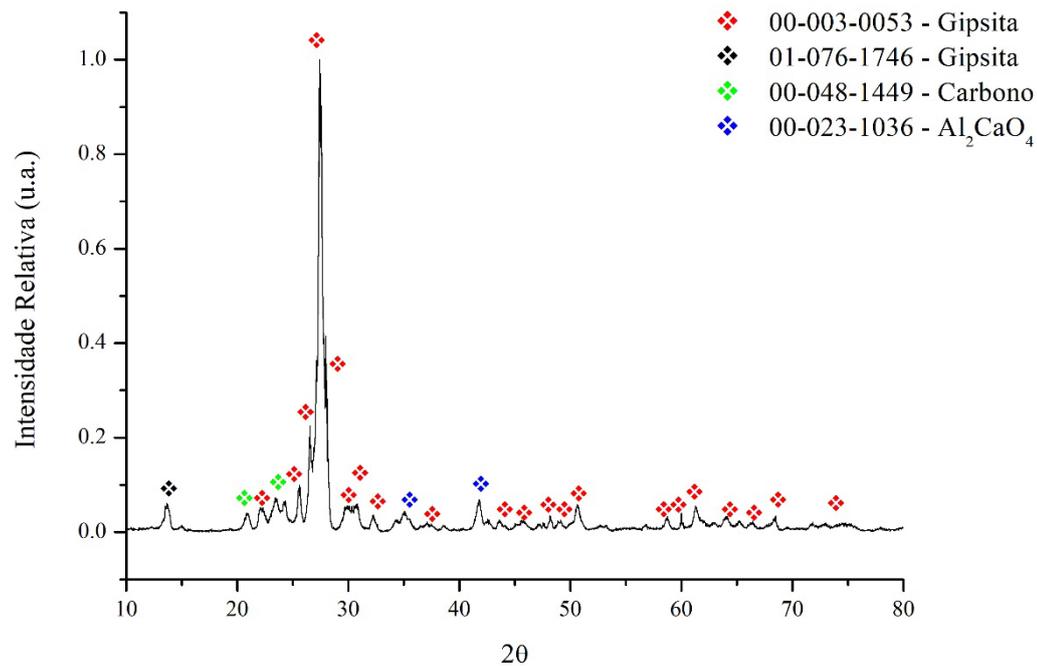
Fonte: o autor

Segundo Chandara *et al.* (2009), os resultados encontrados para análise comercial coexistem fases hemi-hidratadas, descritas $2\theta = 14,76^\circ$, $25,54^\circ$ e $29,76^\circ$ e di-hidratadas em $2\theta = 11,68^\circ$, $20,84^\circ$ e $23,48^\circ$. Isso pois o material não foi convertido por hidratação quando exposto à água, sendo utilizado como agente nucleante durante o processo de hidratação em favor do processo de cura.

Na Figura 4 foi observada a presença de contaminantes como o Carbono e o Al_2CaO_4 , além de encontrar a outra fase do gesso, descrita para ICDD-JCPS nº 00-003-0053 com sistema cristalino monocínico.

Embora apresentados os parâmetros 5,6700 Å; 15,1500 Å; 6,5100 Å; a, b, c respectivamente e α , β , γ respectivamente 90° ; $118,38^\circ$ e 90° e densidade calculada igual a $2,32 \text{ g/cm}^3$.

Figura 4 - Resultados difração de raios X para o gesso reciclado



Fonte: o autor

Mesmo que as duas estruturas cristalinas para as fases de gesso identificadas nesses ensaios sejam monoclinicas, pode-se observar que houve uma mudança nos parâmetros de rede, sendo predominante no gesso reciclado a fase descrita pelo ICDD-JCPS n ° 00-003 -0053. Essa alteração nos parâmetros resulta em uma redução no volume das células unitárias e, conseqüentemente, no volume do material da ordem de 43,9%, valor semelhante ao observado na redução da porosidade aparente desses materiais, como mostra a Figura 7. Não há alteração no sistema de deslizamento cristalino, mas a área dos planos (0 1 0) e o comprimento das distâncias [0 0 1] são reduzidos com essa alteração de parâmetro, o que pode influenciar junto com a porosidade aparente residual a resistência de proporções das propriedades mecânicas desses materiais.

As fases de gesso encontradas principalmente no gesso reciclado estão na forma hemi-hidratada, conforme descrito por Chandara *et al.* (2009), mas também foram encontradas contaminações por carbono e Al_2CaO_4 . O desenvolvimento das propriedades do gesso ocorre durante o processo de hidratação em massa, envolvendo a liberação de alta energia na forma de calor devido à natureza exotérmica da reação

de hidratação, como apresentado na equação 2. A cura envolve processos físicos e físico-mecânicos, resultando em um sólido com alta porosidade e superfície interna relativamente grande, caracterizada pelo bloqueio dos cristais na forma de placas e agulhas. A morfologia dos cristais de di-hidrato de sulfato de cálcio depende das condições de formação e da presença e tipos de elementos químicos (SINGH; MIDDENDOF, 2007).

A presença de outra fase, além de influenciar a morfologia dos cristais, também pode implicar em variabilidade de densidade, resultando na diferença entre as análises de porosidade aparente. O carbono e o Al_2CaO_4 encontrados nesta análise são o resultado do tipo de descarte desses materiais em caçambas que ficam expostas às intempéries, que estão sujeitas a vários tipos de resíduos. O conhecimento dessa composição faz com que a análise das outras propriedades possa ser melhor compreendida, vislumbrando a influência desses compostos sobre as medidas encontradas.

A presença de alumínio influencia positivamente o hábito cristalino e o tamanho dos cristais formados na microestrutura do gesso. O mecanismo de interferência não é muito conhecido, mas estudos mostram que o alumínio promove um crescimento de cristal mais regular com orientação não preferencial, com nucleação e crescimento ocorrendo em todas as direções. Desta forma, os cristais são obtidos como resultado de um processo de nucleação reduzido que promove o crescimento de cristais a taxas mais baixas. Ainda promove a interação entre os cristais menores, aumentando a tendência destes a se aglomerarem. O endurecimento rápido é explicado por essa interação entre os cristais, aumentando rapidamente a viscosidade da massa, mas não atingindo a totalidade de sua reação de hidratação (RASHAD *et al.*, 2004).

A presença de ácidos carboxílicos, como o ácido cítrico, altera a estrutura interna do bloqueio e adesão entre os cristais. Isso se deve à adsorção das moléculas de ácido nos cristais de gesso formados (LAZÓN; GARCÍA-RUIZ, 2012). O poder retardante dos ácidos carboxílicos nos processos de cristalização do gesso é devido à quimiosorção na superfície dos núcleos de gesso durante o processo de nucleação, atrasando os processos de cristalização e endurecimento. Isto sugere que, na presença de ácidos carboxílicos, a cinética de crescimento normal é alterada. O grau de mudança dependerá da extensão da quimiosorção e de sua taxa (BADENS *et al.*, 1999; SINGH E MIDDENDOF, 2007).

Aditivos de natureza orgânica e inorgânica desempenham um papel importante nos processos de cristalização. Eles alteram as propriedades da superfície dos cristais, que levam a mudanças na nucleação e crescimento e, portanto, a mudanças na forma dos cristais, bem como no seu comportamento de aglomeração ou dispersão (SINGH; GARG, 1997). Eles também são usados como retardadores ou aceleradores para controlar a hidratação nas indústrias de gesso e concreto. O uso de retardadores

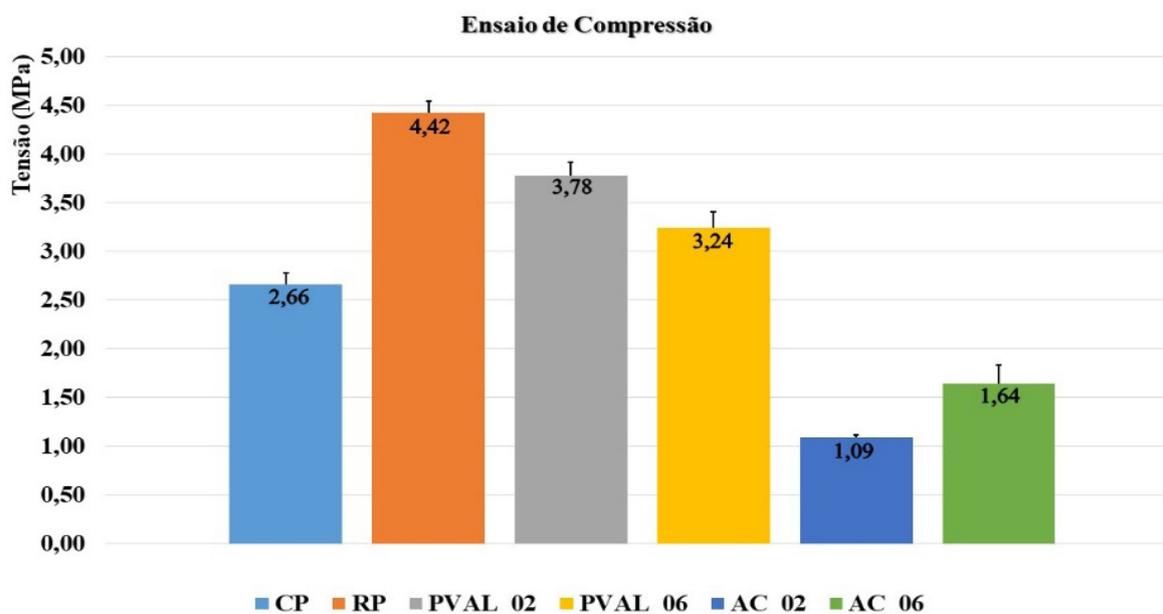
durante a hidratação do hemidrato para controlar o crescimento de cristais de gesso é uma preocupação prática. Em geral, observou-se que ácidos orgânicos fracos e seus sais com bases fortes atuam como retardadores. Os efeitos retardadores dos ácidos carboxílicos têm sido geralmente estudados medindo-se as mudanças de temperatura ou a taxa de variação da evolução do calor durante a hidratação do hemi-hidrato (SINGH; MIDDENDOF, 2007). O uso de ácido carboxílico retarda o aumento da temperatura, pois ocorre em período e tempo de indução diferentes para o aumento máximo da temperatura. Quanto maior o período de indução, maior o tempo para o aumento máximo da temperatura e maior é o poder retardante do ácido.

A adição de materiais poliméricos na água de hidratação altera a forma do cristal de gesso. Foi relatado que o aumento da porcentagem adicionada de polímero influencia o crescimento dos cristais. Com uma quantidade crescente, a forma do cristal muda gradualmente de agulha fina para bastonetes, e o tamanho transversal do cristal apresenta constantemente a tendência crescente, mecanismo pelo qual o polímero inibe o crescimento do cristal de gesso em cada eixo (LI *et al.*, 2007).

Devido ao caráter hidrofílico do álcool polivinílico, a reação de hidratação do sulfato de cálcio pode apresentar dificuldade, resultando em uma redução na velocidade dessa reação. Além disso, a presença dessas moléculas poliméricas reduz as propriedades mecânicas, pois promovem a separação dos cristais, sendo esse efeito mais evidente com o aumento de sua massa molecular (WU *et al.*, 2014).

A forma e o tamanho dos cristais influenciam as propriedades mecânicas, portanto, a presença ou ausência dos ligantes pode ser avaliada pelos ensaios mecânicos realizados. A Figura 5 mostra que o gesso reciclado apresentou valores mais altos quando comparado ao gesso comercial, em torno de 66,0%. Considerando a diferença entre os parâmetros de rede nas células monoclinicas do gesso comercial e do gesso reciclado, onde no gesso reciclado a célula de volume de α -hemidrato é 43,9% menor do que no gesso comercial, esperava-se que apresentasse uma força consideravelmente maior (SINGH; MIDDENDOF, 2007).

Figura 5 - Resultados do ensaio de Compressão.



Fonte: o autor

Percebeu-se a dificuldade na moldagem das amostras, com uma secagem rápida da pasta, indicando que a trabalhabilidade do gesso reciclado puro inviabiliza o uso em canteiros de obras e a produção de peças vazadas. Essa dificuldade é explicada analisando os resultados da difração de raios X, Figuras 3 e 4, onde mostra a diferença entre as duas matérias-primas, onde o gesso comercial formado é uma mistura de hemidrato e di-hidrato, enquanto o gesso reciclado é formado apenas para o hemidrato. A ausência de di-hidrato favorece a reação de hidratação por promover maior superfície livre para hidratação. Além disso, a presença de compostos de alumínio favorece o aglomerado dos cristais menores, aumentando a velocidade de endurecimento do gesso pelo aumento da viscosidade, mesmo que a reação de hidratação não tenha sido concluída (RASHAD *et al.*, 2004). Estudos mostram que o gesso reciclado apresenta maior consumo de água para manter a consistência normal para aplicação na construção, esse valor aumenta com o aumento dos ciclos de reciclagem, outro fator que pode explicar a diminuição da trabalhabilidade do gesso (BÜLICHEN; PLANK, 2013; ERBS *et al.*, 2018).

Nos resultados dos ensaios de compressão mostrados na Figura 5, pode-se observar que a adição de ligantes no processamento do material levou à redução da resistência à compressão, em comparação com o gesso reciclado puro, comportamento esperado, uma vez que os ligantes interferem na cinética

da nucleação e crescimento dos cristais, interagindo na superfície desses, resultando em variações na porosidade aparente dessas formulações.

Essa interação superficial explica as melhores condições de moldagem, pois esses aditivos atuam no controle da reação de hidratação, seja pelo caráter hidrofílico do álcool polivinílico ou pela quimisorção do ácido cítrico (BADENS *et al.*, 1999; LAZÓN; GARCÍA-RUIZ, 2012; SINGH; GARG, 1997; WU *et al.*, 2014).

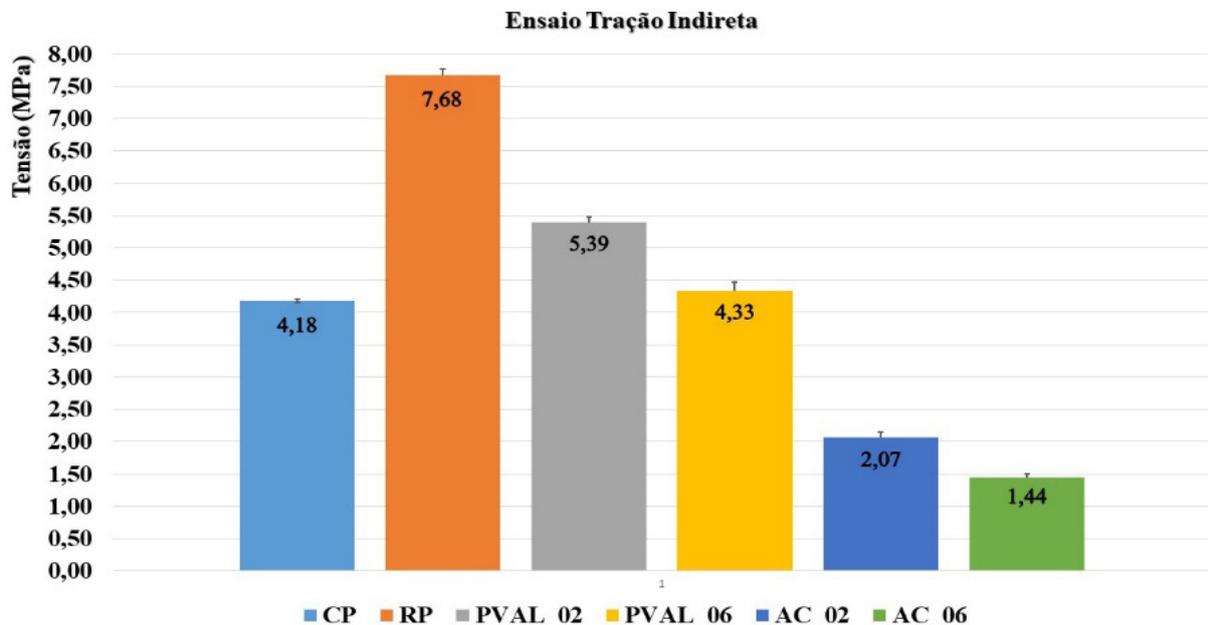
Nas amostras em que o PVAL foi adicionado, mostrou melhora na trabalhabilidade e aumento da resistência à compressão quando comparado ao gesso comercial, com um aumento de cerca de 42% e 22%, para adições de 0,2% e 0,6% em massa, respectivamente.

Este aumento na resistência mecânica à compressão é devido à redução na porosidade aparente dessas formulações quando comparada à porosidade aparente do gesso comercial. Essa redução na porosidade reduz o número de concentradores de tensão no material, melhorando seu comportamento mecânico. Comportamento semelhante pode ser observado no ensaio de Tração Indireta, Figura 6, mas o aumento na resistência à tração indireta é menor quando comparado à resistência à compressão, com diferença no aumento da resistência de aproximadamente 31% e 82% para as amostras com 0,2% e 0,6% de PVAL em massa de gesso, respectivamente. O desempenho microestrutural dos materiais, quando submetidos a tensões compressivas, é a aproximação dos grãos, tendo, neste caso, uma ação menor dos concentradores de tensão, enquanto nos materiais sujeitos às tensões de tração esse comportamento é o desprendimento dos cristais, tendo, neste caso, maior influência de os concentradores de tensão sendo as regiões de porosidade os pontos de trinca (GARCIA *et al.*, 2012).

O mesmo não ocorreu nas amostras com adição de ácido cítrico, pois, nas mesmas condições de formulação, essas amostras apresentaram redução de cerca de 59% e 38% para 0,2% e 0,6%, respectivamente, embora tenha sido notada melhora na trabalhabilidade da pasta. A presença de ácido cítrico adsorvido na superfície dos cristais pode ser responsável por uma menor energia de ligação entre eles, mesmo com a redução da porosidade do material, o bloqueio e a adesão dos cristais podem ser prejudicados pela presença do ácido carboxílico adsorvido.

Comportamento semelhante foi observado nos testes de tensão indireta, Figura 6, onde as amostras produzidas com gesso reciclado apresentaram um aumento na resistência à tração indireta da ordem de 84% quando comparadas às amostras obtidas com gesso comercial. Esse efeito pode ser explicado pela presença de compostos de alumínio que influenciam o processo de nucleação e crescimento de cristais de gesso, promovendo a formação de cristais menores que resultam no aumento das propriedades mecânicas devido ao intertravamento e adesão entre os cristais.

Figura 6 - Resultados do ensaio de Tração Indireta

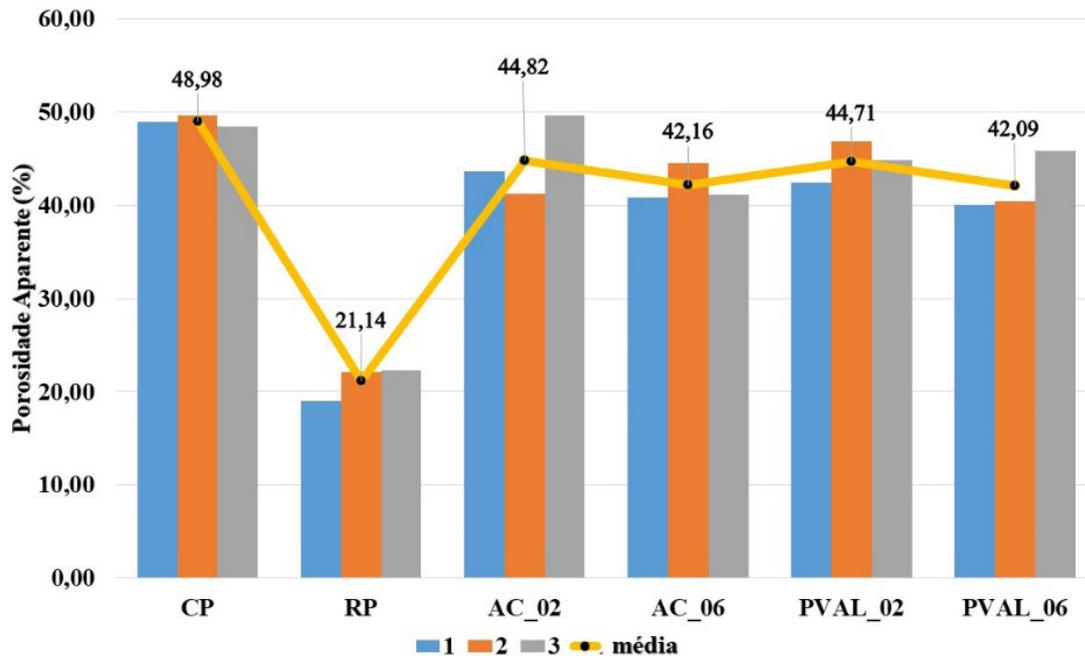


Fonte: o autor

Com a adição dos aglutinantes, observou-se que, na presença de PVAL, as amostras apresentaram aumento na resistência quando comparadas ao gesso comercial, mas a taxa de aumento foi menor que a apresentada nos testes de compressão, aumentando em cerca de 29% e 4 % para composições com adição de 0,2% e 0,6% de PVAL, respectivamente. No entanto, com a adição de ácido cítrico, as reduções nas propriedades apresentadas foram da ordem de 51% e 66% para as composições de 0,2% e 0,6%, respectivamente, explicadas pela redução na interação entre os cristais causada pela adsorção de ácido cítrico.

A resistência mecânica obtida pelas amostras está relacionada à porosidade aparente, Figura 7, obtida em cada uma das formulações, observa-se que a porosidade aparente do gesso reciclado é reduzida na ordem de 57%, o que corrobora com os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica, uma vez que o menor volume de poros resulta em um número menor de concentradores de tensão responsáveis pela redução considerável da resistência mecânica.

Figura 7 - Resultados de Porosidade Aparente



Fonte: o autor

Além disso, a presença de compostos à base de alumínio favorece a aglomeração de pequenos cristais, reduzindo assim o vazio entre eles. A presença desses compostos reduziu a porosidade aparente em níveis muito inferiores aos obtidos para o gesso reciclado puro, sendo da ordem de 8% para as adições de 0,2% em massa e 14% para as adições de 0,6% em peso de gesso. A incongruência na relação entre a porosidade aparente e o comportamento mecânico das formulações de adição de ácido cítrico é explicada pelo fato de esses compostos serem adsorvidos nos cristais, promovendo a redução do intertravamento e adesão entre os cristais, facilitando seu deslizamento quando submetidos às forças compressivas.

4 CONCLUSÕES

As condições do gesso de demolição encontrado nas plantas de reciclagem apresentam contaminações do ambiente e do armazenamento desses materiais, provavelmente resultado da falta de controle na coleta e separação nos canteiros de obras. O ensaio por difração de raios X pôde caracterizar a existência de compostos à base de alumínio capazes de alterar o comportamento de nucleação e crescimento dos cristais durante o processo de hidratação do gesso, reduzindo a taxa de crescimento e a quantidade de núcleos presentes, mas o efeito mais deletério está relacionado à capacidade de promover a aglomeração

de pequenos cristais, o que aumenta significativamente a resistência mecânica final desse material, mas por outro lado reduz a trabalhabilidade da pasta.

O estudo realizado com dois tipos de ligantes, um polimérico e outro ácido carboxílico, permitiu avaliar a influência da funcionalidade e do tamanho da molécula desses compostos nas propriedades mecânicas do gesso reciclado. No entanto, o uso de aditivos à base de ácido carboxílico, como o ácido cítrico, não é aconselhável, mesmo se for encontrado na literatura que é mais eficiente para melhorar o tempo de cura do gesso, pois foi comprovado que seu efeito é prejudicial às propriedades mecânicas, uma vez que a adsorção das moléculas nos cristais resulta em uma diminuição significativa nas propriedades mecânicas.

No entanto, o uso de aditivos poliméricos, como o álcool polivinílico, parece promissor, uma vez que alcançou resistência superior à apresentada pelo gesso comercial, com porosidade aparente próxima.

Estudos futuros concentram-se na análise microscópica dos cristais formados e a interferência destes ligantes na cristalização da gipsita.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à JC Locação e Reciclagem por fornecer materiais de demolição para este estudo.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT-NBR 6118:2014** - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BADENS, E.; VEESLER, S.; BOISTELLE, R. Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives. **Journal of Crystal Growth**, p. 704-709, 1999.

BARDELLA, P. S. **Análise das Propriedades de Pastas de Gesso de Construção Reciclado**. 2011, 213f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão Bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**. 61, 178-189, 2015.

BÜLICHEN, D.; PLANK, J. Water retention capacity and working mechanism of methyl hydroxyl propyl cellulose (MHPC) in gypsum plaster— which impact has sulfate? **Cement and Concrete Research**, v. 46, p. 66-72, 2013.

CAMARINI, G. *et al.* Effect of acid citric on properties of recycled gypsum plaster to building components. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 383-390, 2016.

CHANDARA, C. *et al.* Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in portland cement. **Waste Management**, v. 29, p. 1675–1679, 2009.

CHARYTONOWICZ, J.; SKOWRÓNSKI, M. Reuse of building materials. **Procedia Manufacturing**, v. 3, p. 1633 – 1637, 2015.

DURAN, X.; LENIHAN, H.; O'REGAN, B. A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling – the case of Ireland. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 46, 3, p. 302-320, 2006.

ERBS, A. *et al.* Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 1314-1322, 2018.

FRIDLAND, M.; ROSADO, R. Mineral trioxide aggregate (MTA) solubility and porosity with different water-to-powder ratios. **Journal of Endodontics**, v. 29, p. 814-817, 2003.

GERALDO, R. H. *et al.* 2017. Gypsum plaster waste recycling: a potential environmental and industrial solution. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 288-300, 2017.

LI, J.; LI, G.; YU, Y. The influences of gypsum water-proofing additive on gypsum crystal growth. **Materials Letters**, v. 61, p. 872–876, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2006.06.005>>.

MENEZES R. B.; PÓVOAS, Y. V. Influência de aditivo retardador de pega na reciclagem da pasta de gesso utilizada como revestimento interno de parede. **Revista Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2-1, p.55-62, 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 307/02**. Brasília, DF, Brasil, 2002.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 448/2012**. Brasília, DF, Brasil, 2012.

MORGADO, G. *et al.* Submicrometric Picture of Plaster Hydration: Optimization of the Addition of Gypsum Needles. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 121, p.5657-5666, 2017.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* Production of porous ceramic material using different sources of alumina and cálcia. **Revista Matéria**, v. 20, 3, p. 739 – 746, 2015.

PINHEIRO, S.M.M. **Gesso Reciclado**: avaliação de propriedades para uso em componentes, 2011, 303f, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. **Lei Municipal Ordinária nº 7.146/06** – São José dos Campos, SP, Brasil, 2006.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. **Decreto Municipal nº 16.762/15**, que Consolida o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de São José dos Campos, SP, Brasil, 2015.

R. GREVE, D.; O'NEILL, E. D. **Water-resistant Gypsum Products**. Patent number 412968. 1973.

RASHAD, M. M *et al.* Crystallization of calcium sulfate dihydrate under simulated conditions of phosphoric acid production in the presence of aluminum and magnesium ions. **Journal of Crystal Growth**, v. 267, p.372–379, 2004.

SANTOS, M. F. N.; BATTISTELLE, R. A. G.; HORI, C. Y.; JULIOTI, P. S. Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. **GEPROS-Gestão da Produção, Operação e Sistemas**, v. 6, 2. 57-73, 2011.

SINGH, M.; GARG, M. Retarding action of various chemicals on setting and hardening characteristics of gypsum plaster at different pH. **Cement and Concrete Research**, v. 27, p. 947-950, 1997.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**, v. 53, p.57-77, 2007.

SJÖSTRÖM, C. Service life of the building. in: applications of the performance concept in building. **Proceedings**, v. 2, p.6-11, 1996.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Raw material flows and resource upgrades on a global scale**, 2016.

WU, H. *et al.*, 2014. Improvement on mechanical strength and water absorption of gypsum modeling material with synthetic polymers. **Ceramics International**, v. 40, p.14899–14906, 2014.