

# Influência de aditivo no gesso reciclado considerando variações no parâmetro temperatura da água de amassamento

Maria Clara Rozo Terreiro Seffrin<sup>1</sup>, Maria Rosária de Oliveira<sup>2</sup>, Erika Peterson Gonçalves<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade do Vale do Paraíba, Brasil

<sup>2</sup>Mestre em Processamento de Materiais pela Universidade do Vale do Paraíba, Brasil

<sup>3</sup>Doutora em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Professora da Universidade do Vale do Paraíba, Brasil.

(\*autor correspondente: erika@univap.br).

## Resumo

Em visão do desperdício do gesso comercial, este trabalho tem como maior objetivo aprofundar pesquisas do uso de gesso reciclado na Engenharia Civil. O desperdício do gesso comercial considerado é gerado devido a várias questões, entre elas, a cinética da reação de cura do gesso comercial e a falta de mão de obra qualificada para o manuseio do mesmo. Este gesso, quando descartado de maneira inadequada, gera riscos ao meio ambiente por ser um material tóxico. Desta forma, o gesso reciclado é encontrado como uma alternativa para solucionar os problemas gerados pelos resíduos de gesso na construção civil, onde as características do reciclado são semelhantes ao do comercial. A obtenção do gesso reciclado ocorre por processos de moagem, secagem e calcinação. Deste modo, a fim de determinar composições para melhorar as propriedades e adaptação em obras, foram utilizados aditivos. Com a escolha destes aditivos, foram realizados experimentos, em diferentes temperaturas da água de amassamento, observando que a adição de compostos influencia diretamente o setting time e as propriedades mecânicas obtidas.

Os experimentos realizados foram: o tempo de cura, a absorção de água e a resistência mecânica do material, em 12 condições diferentes. Para chegar em melhores resultados, os aditivos apresentados neste trabalho são Ácido Cítrico e Álcool Polivinílico, adotando formulações com adição de ligante da ordem de 0,2% e 0,6% da massa de gesso para a realização dos estudos. Foram adotadas duas temperaturas para a água de amassamento, sendo elas: 25 °C e 50 °C, valores escolhidos diante de estudos, com uma relação de água/gesso de 0,7.

Os resultados obtidos apresentam promissora aplicação de aditivos poliméricos, no caso do estudo o PVAI, que mostrou aumento na resistência mecânica das formulações estudadas quando comparadas aos materiais comerciais, por outro lado o uso de ácidos carboxílicos, tais como o ácido cítrico aplicado neste estudo, não são aconselhá-

veis pois são capazes de alterar a microestrutura do gesso e por consequência culminar na redução das propriedades mecânicas.

**Palavras chave:** *Gesso, Reciclagem, Aditivos, Propriedades, Ensaios.*

## Influence of additive on gypsum considering variations in the temperature parameter of the kneading water

### Abstract

In view of the waste of commercial plaster, this work aims to deepen research on the use of recycled plaster in Civil Engineering. Commercial plaster waste is generated because of several issues, including the kinetics of the commercial plaster cure reaction and the lack of skilled labor to handle it. This plaster, when improperly disposed of, creates environmental hazards as it is a toxic material. With that, the recycled plaster is found as an alternative to solve the problems generated by the plaster residues in civil construction, where the characteristics of the recycled are like the commercial ones. Obtaining recycled plaster by calcination and grinding. Consequently, in order to determine compositions for improving properties and adaptation in constructions, additives were used. With the choice of these additives, experiments are performed at different kneading temperatures, observing that the addition of compounds directly influences the setting time and the mechanical properties obtained. The experiments were: curing time, water absorption and mechanical strength of the material under 12 different conditions. To achieve better results, the additives presented in this work are Citric Acid and Polyvinyl Alcohol, adopting formulations with binder addition of the order of 0,2% and 0,6% of the plaster mass to perform the studies. Two temperatures will be adopted for the kneading water: 25 °C and 50 °C, values chosen with studies, with a water / plaster ratio of 0,7.

**Keywords:** *Plaster, Recycling, Additives, Properties, Testing.*

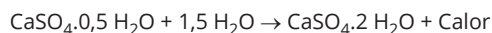
## 1. Introdução

A geração de resíduos nos dias de hoje tem sido um grande ponto para ser estudado, já que, no decorrer dos anos, a economia sustentável mundial prospera significativamente, ligando a qualidade de vida das populações, com o uso de produtos alternativos na construção civil. [1] A construção civil é responsável por um dos maiores consumos de recursos naturais e energéticos, gerando cerca de 40 a 60% de resíduos em construções, reformas e demolições. Pesquisas apontam que em regiões são encontradas cerca de 12.000 toneladas por ano de resíduos de materiais como o gesso. [2]

O gesso é um mineral utilizado nas construções, nesta aplicação é considerado um aglomerante aéreo, amplamente utilizado em revestimentos internos por proporcionar acabamento refinado mesmo quando aplicado diretamente no substrato de vedação (blocos e tijolos) o que o torna mais viável financeiramente. [3]

Gerado pela calcinação da gipsita, a formação do gesso é dada por sulfato de cálcio di-hidratado. [4] Desse modo, é possível afirmar que, os desperdícios do material geram resíduos agressivos ao meio ambiente. Isso ocorre durante o processo de desidratação do mineral, pois são formadas algumas fases sólidas, como o Sulfato de Cálcio Hemi - hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), o Anidrato II ( $\text{CaSO}_4$ ) e o Anidrato III ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) [5]. Com isso, quando o pó de gesso entra em contato com a água do solo é formado o Gás Sulfúrico, ou até mesmo o Ácido Sulfúrico, ambos considerados extremamente tóxicos, contaminando o solo e as águas subterrâneas.

Para a utilização do Gesso nas construções civis, é necessário a hidratação do mesmo com água, formando uma pasta macia e plástica. O processo de hidratação do gesso consiste, basicamente, na transformação do sulfato de cálcio hemi-hidratado em sulfato de cálcio di-hidratado [6], como visto na Equação.



Onde o resíduo, posteriormente, gerado em obra é o sulfato de cálcio di-hidratado. Com isso, o resíduo do gesso e a matéria-prima do gesso, a gipsita, possuem a mesma fórmula química. [6]

A alta geração de resíduos de gesso na construção civil, está relacionado principalmente, à cinética da reação de cura do gesso que leva a um rápido endurecimento, e à falta de mão de obra qualificada no canteiro de obras. Dessa forma, o processo de reciclagem, é a maneira estudada para solucionar os problemas gerados pelos resíduos de gesso da construção civil. [7]

O processo de reciclagem possui como principal objetivo reduzir o custo, quando comparado com o material comercial, devido à redu-

ção de custos no gerenciamento de resíduos. Comumente os estudos relacionados à reciclagem desses materiais, o gesso de estudo é curado em condições de laboratório com relação água/gesso controlado, ambientes limpos e livres de impurezas. Entretanto, a realidade do canteiro de obras é muito diferente. Após o gesso ser utilizado em obras, os resíduos são segregados em caçambas, mantidos em áreas abertas e levados para as usinas de reciclagem que dão o destino certo para o material. No Brasil, apesar de pouco utilizada, o principal método de reutilização destes resíduos é como mistura na formulação de Cimento Portland. [5]

Diante de pesquisas e de experimentos, é possível analisar que a cura do Gesso Reciclado é mais rápida que a do Gesso Comercial, dessa forma, devem ser adicionados ligantes retardadores de pega para melhorar a trabalhabilidade do material sem perda das propriedades mecânicas. Este estudo busca reciclar o gesso por meio da calcinação dos resíduos obtidos em usinas de reciclagem e a inserção de ligantes retardadores na mistura.

Após analisar aditivos, foi possível determinar que o Ácido Cítrico (AC) e o Álcool Polivinílico (PVAL) são promissores retardadores de pega. Isto devido ao custo reduzido quando comparado aos aditivos usualmente aplicados na construção civil, e ainda seu promissor desempenho conforme relatado na literatura. [8]

Os agentes retardadores de pega têm a função de desacelerar o processo de hidratação do gesso, retardando o endurecimento da pasta de gesso. [9] Além disso, a concentração de aditivo é diretamente proporcional ao fenômeno de retardamento. [10]

Hincapié [11], indica que os retardadores de pega são divididos em 2 grupos: retardadores que ampliam o período de indução e os que interferem na cinética da formação da microestrutura. Já John e Cioncotto [12], indicam que dentro desses grupos apontados por Hincapié [11], são encontradas 3 categorias, são elas: retardadores da velocidade de dissolução, retardadores do crescimento dos cristais para posterior precipitação e os retardadores da solubilização e a cristalização do hemidrato. Tanto AC quanto o PVAL encontram-se no primeiro grupo, onde são encontradas espécies químicas que reduzem a velocidade de dissolução do hemidrato, diante da introdução de íons na solução. Dessa maneira, esses ácidos, considerados fracos, retardam a saturação e prolongam a indução. [13]

Segundo relatado por Souza [14], é possível analisar que a adição de PVAL como aditivo para a reciclagem do gesso, onde resultados satisfatórios relatam de que a adição deste polímero reage ao gesso de forma que a resistência mecânica apresentada, se mostra superior à resistência mecânica oferecida do material das empresas do segmento gesso.

Entretanto, além de analisar os aditivos, também deve ser ressaltada a importância da diferença de temperatura na água de amassamento. Neste caso, foram adotadas duas diferentes temperaturas, são elas: 25°C e 50°C. Estes valores foram escolhidos, respectivamente, diante de valores próximos ao valor de temperatura ambiente e o valor aproximado que é alcançado pela exposição da água ao sol, levando em conta a elucidação de interferência do fator temperatura na cinética de cura do gesso reciclado. Com a expectativa de que em temperaturas maiores seja observado um aumento na trabalhabilidade, tanto em práticas de laboratório, como em canteiros de obras.

Este trabalho visa avaliar as características e propriedades físicas e mecânicas do Gesso Reciclado em comparação aos resultados obtidos com Gesso Comercial, já utilizado na construção civil. Por conseguinte, é possível avaliar a influência dos aditivos e das diferentes temperaturas nas propriedades do gesso. Em vista disso, os estudos apresentados são considerados como uma contribuição para os avanços tecnológicos, pelo facto de desenvolver novos produtos e desenvolver um processo de reciclagem.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Materiais

Os materiais principais utilizados foram Gesso Comercial (CP), Gesso Reciclado (RP), água de amassamento, Ácido Cítrico (AC) e Álcool Polivinílico (PVAI).

O gesso comercial adotado é amplamente utilizado no mercado da construção civil [15], seguindo a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 13207.

O gesso reciclado foi obtido em laboratório, Figura 1, onde o material como recebido da usina de reciclagem, JC Locação e Reciclagem, foi submetido à separação mecânica para remover impurezas macroscópicas, como galhos de árvores, papel, plásticos e resíduos de obra, como resíduos à base de argila e cimento. Na sequência, pedaços de



Figura 1 - Esquema de processamento e produção das amostras. Fonte: Os autores

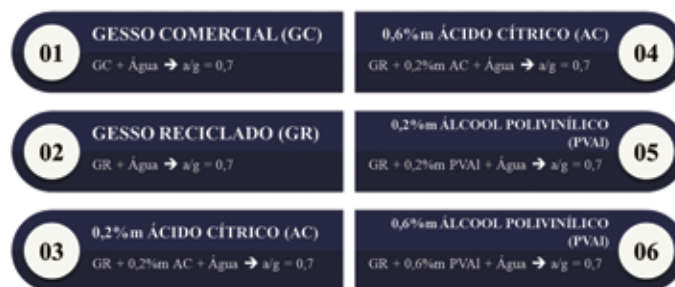


Figura 2 - Nomenclatura das composições utilizadas para estudo. Fonte: Os autores

gesso foram triturados em moinho de martelos e cominuídos em um moinho de bolas sob água. A pasta de gesso obtida no processo foi seca em estufa à 120°C e calcinado a 180 °C no ar atmosférico.[16]

### 2.2. Métodos

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados a partir de pastas de gesso foram obtidas com a mistura de água e aditivos, com a relação água/gesso (a/g) de 0,7. A Figura 2 apresenta as composições estudadas em cada lote de amostras. Amostras padrão de comparação foram moldadas com gesso comercial.

Salienta-se que para cada composição listada foram utilizadas água de amassamento em duas temperaturas 25°C e 50°C.

As pastas endurecidas foram caracterizadas por Difração de Raios X (DRX), Porosidade Aparente, Ensaio de Absorção de H<sub>2</sub>O, Ensaio de Absorção de H<sub>2</sub>O, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Ensaio Mecânico de Compressão Direta e Ensaio Mecânico de Tração Indireta.

O Gesso Comercial (CP) e o Gesso Reciclado (RP) foram caracterizados por difração de raios X realizada em difratômetro de raios X XRD-6000, Shimadzu, operando com radiação CuKα a uma voltagem de 40kV e 30 mA de corrente. Padrões foram obtidos a partir de 10° 2θ a 80° 2θ na taxa de varredura de 0,2°. min<sup>-1</sup>. As amostras foram preparadas por moagem em almofariz e pistilo e passadas em peneiras em malha 325 para identificar as fases presentes nas matérias-primas de gipsita utilizadas pelo Centro Internacional de Dados de Difração (ICDD).

A Porosidade Aparente foi aplicando-se o Princípio de Arquimedes, de acordo com a NBR 16661/17 [17,18]. O mesmo é realizado através do aquecimento da amostra em meio aquoso à 100°C durante duas horas e posteriormente pesagens das amostras. O ensaio foi realizado em triplicada.

$$\%Porosidade\ aparente = \frac{peso\ úmido - peso\ seco}{peso\ úmido - peso\ imerso} \times 100$$

O Ensaio de Absorção de H<sub>2</sub>O foi realizado no laboratório de processamento de materiais, onde as amostras foram deixadas em estufa, por 24 horas, em uma temperatura de 30°C. Para a realização desse ensaio, foi necessário pesar as amostras secas e depois realizar a imersão delas em um béquer com água. De 10 em 10 minutos, foi realizada a pesagem de uma amostra, identificando suas diferenças. Assim como de 20 em 20 minutos e após 60 minutos.

Para a verificação da morfologia dos cristais formados durante o processo de endurecimento, os corpos de prova foram rompidos e secos em estufa a 40°C por 24 horas e analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo EVO MA10 da ZEISS.

Os ensaios mecânicos foram realizados em máquina de ensaios universal INSTRON modelo 5900R5584, e o ensaio obedeceu a velocidade de ensaio de 1 mm.min<sup>-1</sup>, à uma temperatura fixa de 20°C, durante o tempo necessário até o momento de sua queda de tensão, de acordo com as normas NBR 13207/91 [19], NBR 12129/17 [20] e NBR 7222:2011. [21]

### 3. Resultados e Discussão

Devido à falta de responsabilidade de envolvidos na indústria da construção no manuseio e descarte de resíduos de gesso de demolição, os materiais utilizados na construção civil são contaminados com compostos de diferentes origens, ou seja, naturais ou sintéticos. Atualmente, é possível encontrar diversas políticas públicas nacionais e regionais, que regulam práticas de descarte indevido em obras. Esse descarte ocorre de maneira inadequada devido à falta de mão de obra especializada, o que resulta na contaminação na massa de resíduo de gesso. [22,23] Para a realização do presente trabalho

foram utilizados resíduos provenientes de recicladores instalados na região de São José dos Campos/SP/Brasil. [24,25].

#### 3.1. Difração de Raios X (DRX)

O ensaio por difração de raios X realizado nas amostras de gesso comercial, Figura 3 (a), apresentou picos característicos de Gipsita conforme descrito pela ficha ICDD-JCPS n° 01-76-1746 com sistema cristalino monoclinico descrito pelos parâmetros 10,4700 Å, 15,1500 Å, 6,2800 Å, a, b, c respectivamente e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , respectivamente 90°, 98,97 e 90° e densidade calculada igual a 1,16 g/cm<sup>3</sup>. A estrutura monoclinica indica que o hemidrato presente no gesso comercial é  $\alpha$ -forma, uma vez que, segundo Singh e Middendorf [26], o  $\alpha$ -hemidrato cristaliza na forma monoclinica, enquanto o  $\beta$ -hemihidrato cristaliza na forma trigonal.

De acordo com Chandara et. al. [27], os resultados encontrados para a análise comercial coexistem fases hemi-hidrato, descritas  $2\theta = 14,76^\circ, 25,54^\circ$  e  $29,76^\circ$  e di-hidrato em  $2\theta = 11,68^\circ, 20,84^\circ$  e  $23,48^\circ$ . Isto é que o material já apresentado não é convertido em hidratação quando exposto à água, estes são utilizados como agentes nucleantes durante o processo de hidratação em favor do processo de cura.

Já na Figura 3 (b), foi possível analisar uma presença de contaminantes, como: Carbono e Óxido de Alumínio Cálcio, Al<sub>2</sub>CaO<sub>4</sub>. Além disso, foi encontrado a outra fase do gesso, também descrita para o sistema ICDD-JCPS n° 00-003-0053 com sistema cristalino monoclinico.

Apesar de, apresentar os parâmetros 5,6700 Å, 15,1500 Å, 6,5100 Å, a, b, c respectivamente e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , com 90°, 118,38° e 90° e densidade calculada igual a 2,32 g/cm<sup>3</sup>.

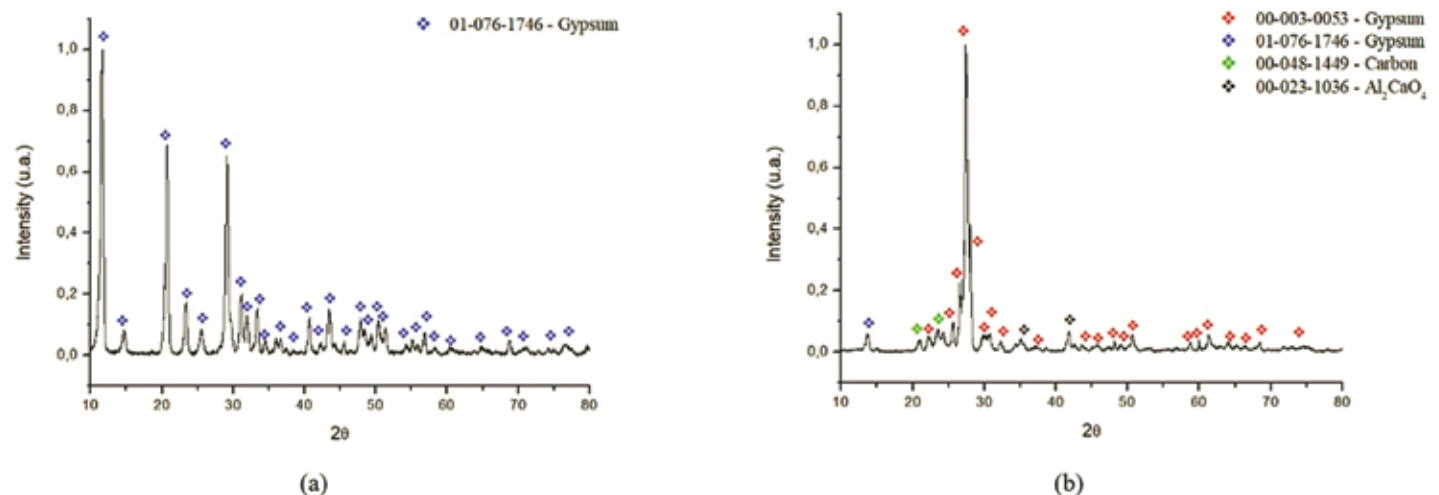


Figura 3 - Difratoograma de Raios X (a) Gesso Comercial (CP); (b) Gesso Reciclado (GR). Fonte: Os autores

Mesmo que ambas as redes cristalinas para as fases de gesso identificadas nesses ensaios sejam monoclinicas, pode-se observar que houve uma mudança nos parâmetros de rede dessas espécies, sendo predominante no gesso reciclado a fase descrita pelo ICDD-JCPS n° 00 - 003 - 0053. Essa mudança 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 para esses materiais.

Não há mudança 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 mudança de parâmetro, o que pode influenciar junto com a porosidade aparente razões de resistência e propriedades mecânicas destes materiais. As fases de gesso encontradas principalmente no gesso reciclado estão na forma hemihidrato, mas contaminações com carbono e  $Al_2CaO_4$  também foram encontradas.

O desenvolvimento de propriedades de 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. A cura envolve processos físicos e físico-mecânicos resultando em um sólido com alta porosidade e superfície interna relativamente grande caracterizada pelo intertravamento dos cristais na forma de placas e agulhas. A morfologia dos cristais de sulfato de cálcio di-hidratado depende das condições de formação e da presença e tipos de elementos.

A presença do alumínio influencia positivamente o hábito cristalino e o tamanho dos cristais formados na microestrutura do gesso. O mecanismo de interferência não é muito compreendido, 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. Promove ainda a interação entre os cristais menores aumentando a tendência destes para 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.

### 3.2. Porosidade Aparente

Na Figura 4 estão apresentados os resultados encontrados em amostras moldadas com diferentes temperaturas da água de amassamento, 25°C e 50°C.

A Figura 4 (a) apresenta os resultados obtidos para as amostras moldadas à 25°C, primeiramente, é possível analisar que a porosidade do CP é de 48,98%, o que indica que as amostras de CP possuem alta porosidade. Desse modo, a resistência a compressão diametral e axial é

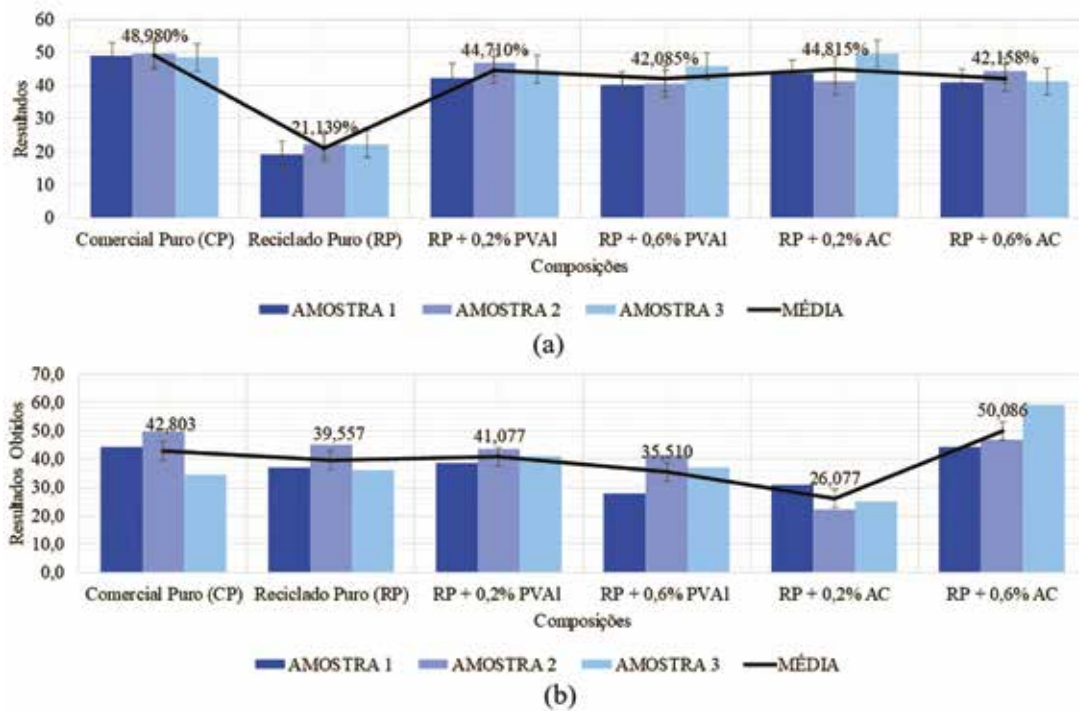


Figura 4 - Resultados de Porosidade Aparente: (a) 25°C e (b) 50°C. Fonte: Os autores

comprometida, pois os poros agem como concentradores de tensão, ou seja, quanto maior o número de poros, mais fácil o rompimento. As amostras de RP, sem aditivos, a porosidade aparente é metade da apresentada na composição de CP. Isso demonstra uma quantidade menor de poros, aumentando a sua resistência mecânica.

Com adição de 0,2% de AC, é possível observar um aumento da quantidade de poros, isso pode ser explicado devido a solubilidade elevada do aditivo. Desse modo, aumentando a temperatura da água de amassamento, aumenta-se a solubilidade. Sendo assim, o AC presente nas amostras pode ter sido dissolvido pela água durante o ensaio, criando poros dentro das amostras. Por outro lado, apesar da composição com 0,6% de AC também possuir uma elevada solubilidade, a porosidade aparente da mesma é menor quando comparada a composição de 0,2% de AC. Isso se deve ao fato de que a quantidade de aditivo nas amostras de 0,6% de AC ser superior em relação às amostras de 0,2% de AC, tornando assim, o meio aquoso mais saturado, de forma com que a quantidade de aditivo dissolvido seja maior.

Em relação às composições formuladas com PVAI, elas também são elevadas quando comparadas com o RP, sem aditivos. Desse modo, os resultados de porosidade aparente com adição de AC e PVAI são próximas. Entretanto, o PVAI não é um material tão solúvel quanto o AC, portanto, a razão pela qual a porosidade aparente do RP com adição de 0,2% é elevada, devido à característica polimérica do adi-

tivo, que aumenta a plasticidade da massa formada dificultando a moldagem.

Na Figura 4 (b) é possível analisar que a diferença de porosidade entre o CP e o RP é reduzida, porém a porosidade do material reciclado é menor quando comparado ao restante das composições. A composição com menor porosidade aparente é com adição de 0,2% de AC fato explicado devido a possível diluição do aditivo em temperatura elevada da água de amassamento à 50°C. Entretanto, analisando o Figura 4 (b), na composição de 0,6% de AC a quantidade de poros é substancialmente alta, sendo até mesmo maior que a quantidade de poros do CP, isto pode ser devido à saturação da solução de amassamento à 50°C. Em relação ao aditivo PVAI, apesar da temperatura modificar a quantidade de poros o comportamento apresentado é similar às amostras preparadas à 25°C.

### 3.3. Ensaio de Absorção de H<sub>2</sub>O

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água para as amostras moldadas à 25°C e 50°C.

Os resultados obtidos demonstram que quando adicionado 0,6% de AC nas composições, a amostra possui uma maior quantidade de absorção de água. Isso é explicado devido o AC ser um Ácido Carbo-

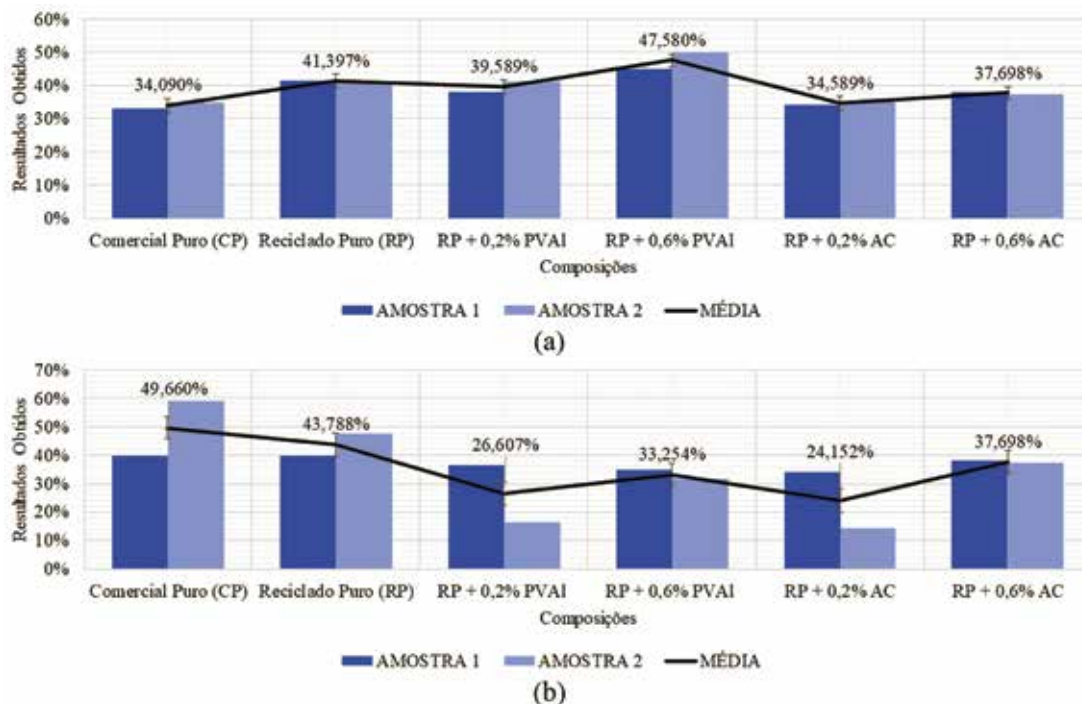


Figura 5 - Resultados de Absorção de H<sub>2</sub>O. (a) à 25°C, (b) 50°C. Fonte: Os autores

xílico, o que o torna mais solúvel quando entram em contato com água, gerando mais poros e um acúmulo de água nos mesmos.

Por outro lado, quando são adicionadas quantidades menores do aditivo, como 0,2% de AC apenas, a amostra demonstra uma maior trabalhabilidade na moldagem e uma menor quantidade de poros, a tornando mais resistente.

Em contrapartida, as amostras moldadas com PVAI demonstram não sofrer com o processo de diluição do aditivo em contato com a água. Como é possível observar na Figura 5, os resultados obtidos em composições com adição de 0,2% de PVAI são satisfatórias, fato explicado devido o PVAI ser um polímero. Consequentemente, sua interação durante o processo de hidratação resulta na alteração dos cristais do gesso. Portanto, a razão pela qual as amostras de PVAI absorveram água, é a baixa trabalhabilidade do material durante o processo de moldagem, devido à plasticidade da massa, o que resulta em vazios nos corpos de prova.

Apesar do RP apresentar menor quantidade de poros aparentes o mesmo apresenta um alto índice médio de absorção de água, porém, sem a presença de aditivos nas amostras, os cristais de gesso estão mais propensos a continuar a reação de hidratação.

Como observado na Figura 5 (b), em composições de 0,2% de AC e de PVAI, moldadas com a água de amassamento à 50°C, tem uma baixa absorção de água, isso pode ocorrer devido a saturação dos poros, o que tornou os poros menores para a absorção de água, resultando na menor permeabilidade de água, o que pode ser explicado pela baixa solubilidade do PVAI em água.

### 3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens obtidas na análise microestrutural das formulações estão apresentadas na Figura 6.

O CP processado à 25°C apresenta cristais aciculares que são características da Gipsita natural, estes cristais são responsáveis pela elevada porosidade pois esta morfologia, com elevada razão de aspecto, gera baixo empacotamento dos cristais. Como esperado, a morfologia se mantém nas amostras de RP, porém observa-se que as estruturas formadas são mais grosseiras o que acarreta menor porosidade residual, conforme observado no ensaio de porosidade aparente.

A adição de PVAI, nas concentrações estudadas, resulta em aglomerados de cristais aciculares, por se tratar de um aditivo polimérico, altera a cinética de nucleação e crescimento dos cristais de gipsita. [13]

O efeito do aditivo polimérico resulta na coalescência das agulhas formando placas, o que remete à baixa absorção de água e à rela-

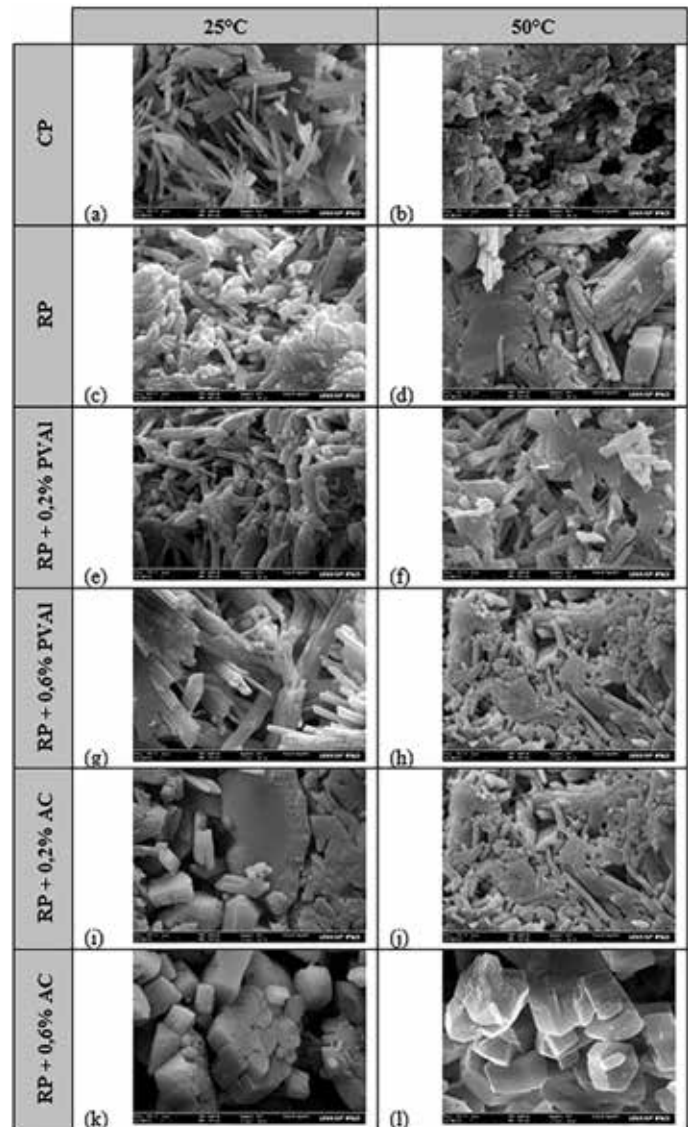


Figura 6 - Resultados de Porosidade Aparente: (a) 25°C e (b) 50°C. Fonte: Os autores

vamente baixa porosidade aparente, conforme discutido anteriormente.

A cristalização das amostras com aditivo AC ocorreu de forma desordenada devido à influência do aditivo na nucleação e crescimento dos cristais. Esta condição de cristalização acarreta a resistência mecânica e a porosidade aparente apresentadas por estas amostras, pois a formação de cristais quasi equiaxiais influencia no empacotamento devido às arestas formadas nos cristais crescidos em meio ao ácido cítrico. Acredita-se que os grupos carboxílicos presentes no ácido em questão adsorvem na superfície do cristal e direcionam o crescimento equiaxial dos grãos.

Com uma maior quantidade do Ácido Cítrico na composição, também é possível observar que o crescimento dos cristais de gesso é descontrolado resultando em blocos maciços, diferentemente dos cristais apresentados nas demais composições.

É importante ressaltar que, quanto menor a temperatura, maior será a taxa de nucleação de cristais devido a natureza exotérmica do processo de hidratação, com isso o refinamento das estruturas formadas pode ser observado nas amostras processadas à 25°C.

O aumento da temperatura, resulta em menores taxas de nucleação de cristais, dificultando a formação das agulhas mais refinadas, gerando cristais com morfologia de escamas.

As amostras processadas com água de amassamento na temperatura de 25°C observou-se que o crescimento desordenado dos cristais somente nas amostras com presença de AC. Porém, com a temperatura da água de amassamento a 50°C, as demais composições, independente da composição do aditivo na água de amassamento, mostraram-se pouco ordenadas com crescimento em diferentes orientações cristalográficas e apresentando a formação de cristais equiaxiais e placas densas de gipsita, devido ao coalescimento de cristais nucleados e crescimento lento devido ao deslocamento do equilíbrio da reação de hidratação em direção à formação de reagentes.

Observa-se que a relação entre a porosidade e a resistência mecânica apresentadas pelas amostras, não se comportam de maneira usual. É inerente em amostras cerâmicas que apresentam menor densidade de vazios (poros) possuírem resistência mecânica superior quando comparadas às com maior densidade de vazios (poros), isto é explicado pela mecânica da fratura clássica que avalia as superfícies de vazios como uma região de concentradores de tensões, amplificando nestas regiões a carga aplicada e por consequência reduzindo a resistência mecânica global do material. Porém, por outro lado, a microestrutura formada por agulhas desordenadas promove ao material resistência superior devido ao ancoramento mecânico

destes cristais, dificultando a movimentação de defeitos cristalinos na rede, assim, mesmo com maior quantidade de porosidade aparente, materiais com cristais aciculares tendem a apresentar melhores resistências mecânicas quando comparados às cerâmicas equiaxiais. Esta relação é direta quando avaliada a razão de aspecto dos cristais, quanto mais refinados, melhor a resistência mecânica apresentada. [28]

Este comportamento pode ser explicado pelas características microestruturais apresentadas pelas formulações com AC observa-se resistências mecânicas inferiores quando comparadas aos materiais aditivados com PVAI.

### 3.5. Ensaios Mecânicos: Compressão Axial e Tração Indireta

Os resultados encontrados referentes aos Ensaios Mecânicos de Compressão Direta, são analisados na Figura 7.

Os resultados obtidos indicam que o CP apresenta a resistência à compressão inferior à apresentada pelo RP, porém apresenta melhor trabalhabilidade, como verificado empiricamente em laboratório. A baixa trabalhabilidade do RP dificulta a utilização na construção civil sem a adição de retardantes.

A resistência à compressão apresentada pelas formulações de RP com adição de retardadores de pega é diminuída, porém foi observado melhor trabalhabilidade durante a moldagem dos corpos de prova.

A adição de 0,2% e 0,6% de PVAI na temperatura de 25°C apresentaram resistência mecânica superior, 99,2% e 70,98% respectivamente, quando comparado ao CP processado na mesma temperatura. Já as amostras processadas com adição de AC apresentaram redução nesta propriedade, 41,58% e 3,43% para adições de 0,2% e 0,6%

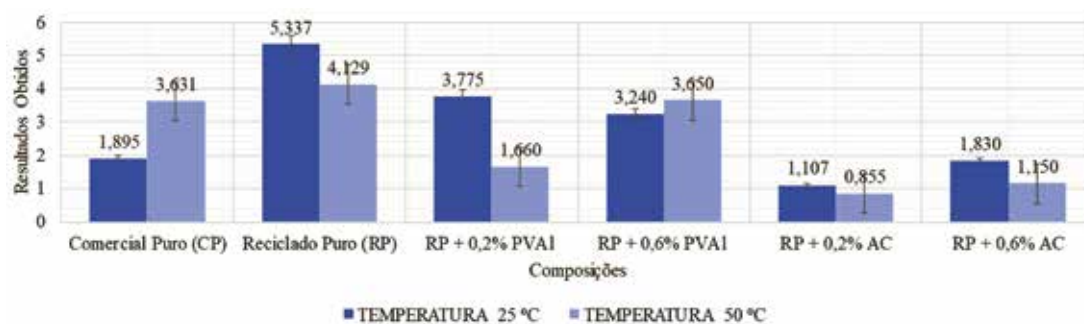


Figura 7 - Comportamento em compressão axial das formulações. Fonte: Os autores

respetivamente. Analisando somente a propriedade de resistência mecânica, acredita-se ser possível a utilização de 0,6% de adição de AC na mistura sem que seja causado grande perda na resistência esperada, visto a sua pequena redução quando comparado ao CP nesta temperatura.

Comparando os valores obtidos para o CP e as amostras com a adição de PVAI à 50°C, observa-se a redução na resistência mecânica, quando inserido 0,2% do aditivo, valor aproximado de 54%, enquanto para a adição de 0,6% houve um aumento de 0,52%, indicando que esta formulação pode ser utilizada. O aumento das propriedades a 50°C é devido ao controle do processo de nucleação e crescimento e a manutenção das microestruturas aciculares para os materiais moldados.

Do mesmo modo, realizando a comparação da adição de AC à temperatura de processamento de 50°C, observa-se a redução em ambas as composições adicionadas do retardador, sendo de 76,45% para adições de 0,2% de AC e 68,33% para adições de 0,6%. Este comportamento pode ser explicado pela alteração na morfologia dos cristais de gipsita formados. Acredita-se que a interação com o ácido carboxílico possa ter formado outras fases cristalinas com resistência mecânica inferior, o que pode ser evidenciado pela diferenciação nos cristais obtidos. Nos dois casos, as amostras com composições de AC apresentam uma menor resistência mecânica ao ser comparado às amostras moldadas com PVAI.

Autores, como Maria Clara Cavalini Pinto [7], relatam que adições acima de 0,6% de Ácido Cítrico não favorecem o aumento da propriedade mecânica além de reduzir a resistência à umidade das amostras, isso também foi observado diante de experiências laboratoriais, onde foram usadas composições de 1% de Ácido Cítrico e PVAI. Porém, não foram obtidos resultados favoráveis.

Os resultados dos ensaios tração indireta estão apresentados na Figura 8. Nela pode-se observar o comportamento similar ao apresentado em ensaio de compressão axial nas amostras de RP.

Todavia, quando a água de amassamento é utilizada à 50°C, as amostras com a presença do aditivo PVAI apresentam resistência superior. Como analisado anteriormente, visto que a quantidade de poros é baixa, a resistência dessas amostras aumenta gradativamente. Além do fato do aditivo PVAI tratar-se de um polímero incrementa as propriedades da cerâmica introduzindo um escoamento elástico a estes materiais que inerentemente não apresentam. Este comportamento pode ser explicado pela regra da mistura, [29] onde define-se que a mistura de dois ou mais materiais pode acarretar variações nas propriedades finas da mistura.

Contudo, as resistências mecânicas à tração indiretas possuem valores bem próximos, porém, observa-se a redução para as formulações com adição de AC.

O ganho na resistência mecânica é visto como promissor para o desenvolvimento de materiais a base de gesso reciclado.

## 4. Conclusão

Diante dos estudos realizados, é viável afirmar que é promissora a reciclagem de gesso de construção e demolição, pois, como dito anteriormente, foram utilizados materiais provenientes de canteiros de obras e usinas de reciclagem com intuito de comparar com o gesso comercial já usado e aproximar da realidade os resultados obtidos.

Apesar de não existir um controle dessa reciclagem, foi examinado que o gesso reciclado puro é mais resistente que o gesso comercial, é provável que isso ocorra devido a sua baixa umidade anterior ao processo de moldagem devido ao processo de reciclagem que passa por moagem, secagem e calcinação.

A utilização de aditivos retardadores de pega melhorou a trabalhabilidade do gesso reciclado o que pode ser notado pela maior facilidade no processo de moldagem das amostras.

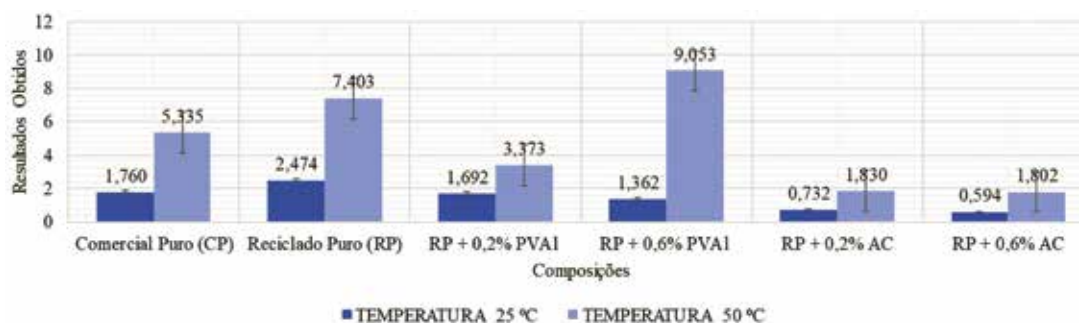


Figura 8 - Comportamento tração indireta das formulações. Fonte: Os autores

Já na análise de adição de aditivos, as conclusões são divergentes. Lembrando que, ambos os aditivos estudados são de baixo custo, o que não acarreta acréscimo de custo na obra, visto que a quantidade utilizada é muito baixa possibilitando a produção de aproximadamente 200 kg de massa de gesso com a adição de 1 kg de aditivo.

Na adição de AC os resultados não foram muito promissores, pois em ambas as composições foram obtidos valores médios de resistência mecânica menores quando comparado aos valores médios das amostras de gesso comercial puro.

No caso da utilização de PVAI, como aditivo de processamento do gesso reciclado, o resultado foi muito promissor, pois apresentou aumento na resistência mecânica média à compressão e as amostras ficaram mais lisas e com melhor acabamento superficial.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da empresa JC Locação e Reciclagem.

## 6. Referências

- [1] EIRES, S. JALALI E A. CAMÕES, "Novos Materiais de Construção à Base de Gesso e Desperdícios Industriais", Universidade de Coimbra, Congresso Construção, 2007.
- [2] MUNHOZ, F. C., "Utilização do gesso para fabricação de artefatos alternativos, no contexto de produção mais limpa", Unesp, Bauru Agosto/ 2008.
- [3] FERNANDES, Carlos Alberto, "Reciclagem de Resíduos de Gesso de Construção para uso em revestimentos, placas de forro e molduras de acabamento", UFSC, 2016.
- [4] PINHEIRO, SAYONARA MARIA DE MORAES, "Gesso Reciclado: Avaliação De Propriedades Para Uso Em Componentes", Unicamp, 2011.
- [5] NASCIMENTO, Felipe José de Farias, PIMENTEL, Lia Lorena, "Reaproveitamento de Resíduo de Gesso", ENTAC, Canela, RS, 2010.
- [6] PINTO, Maria Clara Cavalini, "Avaliação das propriedades do gesso reciclado contendo aditivos", Unicamp, Campinas, 2014.
- [7] NITA, Clovis, PILEGGI, Rafael G., CINCOTTO, Maria Alba, JOHN, Vanderley M. "Estudo da reciclagem do gesso de construção", I Con-

ferência Latino-Americana De Construção Sustentável, X Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, São Paulo, 2004.

- [8] MILITO, "Avaliação do desempenho de Aglomerante à Base de Gesso com Cimento Portland de alto forno e sílica ativa", Unicamp, 2007.
- [9] GARCIA, J. R.; R., O. I.; C., P. V. "Processo de hidratação e os mecanismos de atuação dos aditivos aceleradores e retardadores de pega do cimento de aluminato de cálcio.", Cerâmica, 2007.
- [10] BADENS, E.; VEESLER, S.; BOISTELLE, R., "Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives", Journal of Crystal Growth, 1999.
- [11] HINCAPIÉ, A. M., "Efeito de substâncias retardadoras de pega nas propriedades do gesso de construção", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- [12] JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A., "Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.", 2007.
- [13] TROVÃO, A. "Pasta De Gesso Com Incorporação De Resíduo De Gesso E Aditivo Retardador De Pega", Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.
- [14] SOUZA, J. V. T. A.; GONÇALVES, E. P., "Avaliação das propriedades na reutilização do gesso de demolição para uso em acartonados e dry-walls". XXI INIC, XXVII EPG, XI INIC Jr, VII INID. São José dos Campos, 2017.
- [15] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 13207 – Gesso para construção civil", 1994.
- [16] CAMARINI, G. P. E. A., "Effect of citric acid on properties of recycled gypsum to building components. Construction and Building Materials", 2016.
- [17] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 16661/17 – Materiais refratários densos conformados - Determinação do volume aparente, volume aparente da parte sólida, densidade de massa aparente, densidade aparente da parte sólida, porosidade aparente e absorção", 2017.
- [18] MENEZES, J.N., VARELA, D.L.V., VARELA, M.L., "Avaliação Da Porosidade Aparente E Absorção De Água Da Massa Cerâmica Para Porcelanato Em Função Da Incorporação De Resíduo De Caulim", 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2016.

[19] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13207/91 "Gesso para Construção Civil", 1991.

[20] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12129/17, "Gesso para construção civil — Determinação das propriedades mecânicas", 2017.

[21] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7222/11, "Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos", 2011.

[22] Ministério do Meio Ambiente, "Resolução CONAMA nº 448/2012", Brasília, 2012.

[23] Ministério do Meio Ambiente, "Resolução CONAMA nº 307/02", Brasília, 2002.

[24] Prefeitura Municipal de São José dos Campos, "Lei Municipal Ordinária nº 7.146/06", São José dos Campos, 2006.

[25] Prefeitura Municipal de São José dos Campos – "Decreto Municipal nº 16.762/15, que Consolida o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos" São José dos Campos, 2015.

[26] SINGH, N. B., M. B. Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. "Progress in Crystal and Characterization of Materials", 2007.

[27] CHANDARA, C.; AZIZ LI, K. A. M.; AHMAD, Z.A.; SAKAI, E., "Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in Portland cement", Waste Management, 2009.

[28] Abbaschian, R., Abbaschian, L., Reed-Hill, R. E., "Physical Metallurgy Principles", CENGAGE Learning, 2009

[29] CALLISTER JR. W.D. e RETHWISCH, D. G., "Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução", LTC, 2020. □

The image is a promotional graphic for CTCV. It features a large, stylized circular logo in the center, composed of several overlapping, semi-transparent orange and yellow rings. The text is centered over this graphic. The main title 'CTCV' is in a large, bold, white sans-serif font. Below it, the tagline 'O Parceiro Tecnológico de Confiança das empresas do Setor Cerâmico' is written in a smaller white font. At the bottom, a list of services is presented in white text, separated by bullet points: 'Inovação • Investigação e Desenvolvimento Tecnológico • Consultoria Especializada • Conformidade Legal • Engenharia • Medição e Ensaio • Formação Profissional'. The background is a solid orange color with subtle geometric patterns of lines and curves.