



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
NÚCLEO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CLAYNE KATIANE COSTA SILVA**

**Desenvolvimento de compósitos de gesso/resíduo de gesso da  
construção civil pelo método Umedecimento, Compactação e  
Secagem (UCOS)**

Caruaru, 2011

CLAYNE KATIANE COSTA SILVA

**Desenvolvimento de compósitos de gesso/resíduo de gesso da construção civil pelo método Umedecimento, Compactação e Secagem (UCOS)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia/Engenharia Civil/Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega

CARUARU, Dezembro de 2011.

CLAYNE KATIANE COSTA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE GESSO/RESÍDUO DE  
GESSO DA CONSTRUÇÃO CIVIL PELO MÉTODO UMEDECIMENTO,  
COMPACTAÇÃO E SECAGEM (UCOS).

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico  
do Agreste - CAA, da Universidade Federal de  
Pernambuco - UFPE, como requisito para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Civil.

Área de concentração: Engenharia/Engenharia  
Civil/Construção Civil

Aprovado em: Caruaru, 20 de dezembro de 2011.

Banca examinadora:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Cecília Vieira da Nóbrega \_\_\_\_\_

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientadora)

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Érika Pinto Marinho \_\_\_\_\_

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliadora)

Prof. Dr. Flávio Eduardo Gomes Diniz \_\_\_\_\_

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro Paiva \_\_\_\_\_

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

*Dedico este trabalho ao meu Amor Maior,  
minha jóia mais preciosa: meu pai, Clóvis.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço acima e antes de tudo a Deus, meu refúgio e minha fortaleza.

Ao meu porto seguro, meus pais, Clóvis e Valda, minhas jóias preciosíssimas, por todo esforço, carinho, amor e atenção a mim dedicado. Pelo apóio e incentivo ao estudo, e por me ensinarem que para ser grande é preciso ser perseverante e forte. *Essa conquista é nossa!*

Às jóias especiais do meu tesouro, meus irmãos: Júnior, Cleyton e Karinne pelo apóio em toda minha vida acadêmica, e até mesmo pela super proteção, da qual sempre reclamei, visando sempre o melhor pra mim. *Muito obrigada por tudo!*

Aos meus pequenos, meus diamantes: Camylla, César, Laura, João Victor e Cleyton Filho; os sobrinhos mais lindos e amados. Muito obrigada por cada sorriso, cada abraço que me injetam ânimo e força. *Vocês me fazem querer ser uma pessoa melhor a cada instante!*

Ao meu avô, José Costa (in memorian) por cada gesto de carinho e amor a mim dedicados, por ter sido fundamental no meu crescimento como ser humano, e me mostrado o quanto é bom ser simples e humilde! *Saudades de acariciá-lo! Saudades sempre!*

A cada pessoinha, amigos e familiares, que ao longo de minha caminhada passaram de especiais a essenciais para mim, me incentivando em todos os momentos. *Muito obrigada!*

A Professora Ana Cecília, por acreditar em meu potencial, me dar força, por estar sempre presente. *Minha enorme admiração pela profissional e amiga que és, e meu muitíssimo obrigada pela amizade, pela orientação e pelos conselhos, que contribuíram fortemente na minha formação acadêmica, profissional e pessoal!*

Ao professor Flávio Eduardo Gomes Diniz, pela dedicação ao ensino, pelo acompanhamento em cada etapa, desde o início à reta final desta caminhada, pela paciência e pelas grandes contribuições profissionais. *Muito obrigada por todas contribuições!*

A professora Érika Pinto Marinho pelos ensinamentos, por estar sempre pronta e com muita boa vontade em ajudar, esclarecer dúvidas, pelas contribuições acadêmicas e pela receptividade, além da excelente administração no Laboratório de Química. *Muito obrigada!*

Aos demais professores, sou muito grata a todos, sem exceção, pelo empenho e dedicação na arte de ensinar.

Aos colegas de curso que ao longo do tempo, se tornaram amigos. Em especial a Carla Soraia, Mirele Almeida, Anderson Farias, Arthur Aurélio, e René Bueno: muito obrigada pelo apoio, principalmente nesta etapa final do curso, pelo carinho e amizade. *Vocês tornaram esta caminhada mais leve! Muito obrigada!*

Aos técnicos do Laboratório de Química (LQ) e de Sistemas Construtivos (LSC), pela atenção, dedicação, empenho e ajuda nos ensaios. Ao colega do LSC, Márcio Saraiva pelas dicas e companheirismo. *Vocês foram meus anjos neste trabalho!*

A toda equipe da Construtora COMELLO. Em especial a José Marcelino, o qual é um dos grandes responsáveis pelo meu conhecimento profissional. *Muitíssimo obrigada pela paciência, pelos ensinamentos, pela confiança e por acreditar em meu potencial.*

## RESUMO

### **Desenvolvimento de compósitos de gesso/resíduo de gesso da construção civil pelo método Umedecimento, Compactação e Secagem (UCOS).**

Expressivas quantidades de resíduos de gesso, de difícil descarte ambiental, são geradas diariamente na construção civil. No entanto, o baixo custo desse insumo desvia o foco ambiental de sua reutilização. Dentre os métodos de conformação de gesso, o método Umedecimento, Compactação e Secagem (UCOS) têm sido empregadas para obtenção de gessos de alto desempenho. Quando se utiliza apenas gesso hemihidratado com granulometria da ordem de 7 $\mu$ m, resistências a compressão da ordem de 90 MPa podem ser atingidas. Nesse cenário, acredita-se ser um modelo de conformação de gesso robusto, apto a gerar resistências a compressão ainda interessantes para a construção civil, mesmo com a incorporação de resíduos dihidratados em granulometrias maiores (300  $\mu$ m) ao gesso hemidratado comercial. Blocos de concreto para alvenaria estrutural necessitam fornecer em torno de 7,5 MPa com absorção de água máxima de 10% e as normas de gesso preconizam uma resistência mínima para esse material de 8,4 MPa. Assim, propõe-se desenvolver compósitos conformados pelo método UCOS, fazendo uso concomitante da poliuretana em dispersão aquosa não-iônica para correção de permeabilidade, quando necessária. Para tanto, foram estudados compósitos com adição de 5, 10, 15, 20% de resíduo ao gesso comercial, em relação a massa de gesso; 5, 10, 15, 20% de poliuretana ao gesso comercial, em relação a massa de água; e, suas combinações sinérgicas (5-5, 5-10, 5-15, 5-20, 10-5, 10-10, 10-15, 10-20, 15-5, 15-10, 15-15, 15-20, 20-5, 20-10, 20-15 e 20-20). De uma forma geral, a adição do resíduo de gesso tende a reduzir a resistência ao mesmo tempo em que aumenta a absorção de água por imersão e por capilaridade. A adição da poliuretana ao gesso hemidratado comercial mantém o patamar de resistência até adições de 15%, tendendo a reduzi-la a partir de 20%. A poliuretana mostra-se eficiente na redução das absorções de água, seja com ou sem a adição de resíduos. Existe um ponto ótimo de adição de poliuretana de acordo com a porcentagem de resíduo. Dentre os traços avaliados, visando alocar mais resíduo, a adição concomitante de 20% de resíduo e 25% de poliuretana apresenta propriedades adequadas para as aplicações desejadas. O sistema é capaz de absorver quantidades maiores de resíduos, desde que as absorções sejam devidamente corrigidas para um máximo de 10% e a resistência de 8,4 MPa resguardada.

**Palavras-chave:** UCOS, gesso, resíduo de gesso, resistência, absorção, poliuretana.

## ABSTRACT

### **Development of gypsum / gypsum waste composites by the method of humidification, compaction and drying (Umedecimento, Compactação e Secagem – UCOS).**

Significant quantities of gypsum waste with difficult final disposal are daily generated in civil construction. However, their lower cost is responsible for diverting the focus for the environmental reuse. Among the methods to obtain the gypsum, the method of humidification, compaction and drying (Umedecimento, Compactação e Secagem – UCOS) has been used to obtain high strength gypsums. 90 MPa compression resistance can be achieved when is used 7 $\mu$ m particle size of hemihydrates plaster. In this way, it is believed to be a robust model to obtain gypsum, able to generate still adequate compressive resistances for the civil construction materials, even with the incorporation of larger gypsum wastes particle sizes (300 $\mu$ m) in the gypsum. Structural concrete block masonry needs to provide around 7.5 MPa with maximum water absorption of 10% and gypsum standards recommend a minimum strength of 8.4 MPa for this material. Thus, it is proposed to develop gypsum / gypsum waste composites conformed by UCOS method, with concomitant use of nonionic aqueous polyurethane in order to correct the water absorption, when it is necessary. Composites were studied with the addition of 5, 10, 15, 20% of the gypsum waste about the plaster weight; 5, 10, 15, 20% of polyurethane, in relation to the water weight; and synergistic combinations (5-5, 5-10, 5-15, 5-20, 10-5, 10-10, 10-15, 10-20, 15-5, 15-10, 15-15, 15 - 20, 20-5, 20-10, 20-15 and 20-20). In a general way, the addition of gypsum waste tends to reduce the resistance while increasing the water absorption by total immersion and capillary action. The addition of the polyurethane to the plaster keeps the level of the resistance for additions until 15%, but tends to decrease after 20%. The polymer is effective in reducing the water absorption by total immersion and capillary action, either with or without the waste additions. There is an optimum addition of polyurethane according to the percentage of gypsum waste. In order to allocate more waste, it is indicated the concomitant addition of 20% gypsum waste and 25% of polyurethane among the doses evaluated. It has suitable properties for the desired applications. The system is capable of absorbing large quantities of waste, provided that the absorptions are properly corrected for a maximum of 10% and the compressive resistance of 8.4 MPa is safeguarded.

**Keywords:** UCOS, plaster, gypsum waste, resistance, absorption, polyurethane

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do pólo gesseiro do Araripe, extremo oeste de Pernambuco.....	24
Figura 2 - Processo tradicional de conformação do gesso. (KANNO, 2009) .....	33
Figura 3- Microscopias de compósitos de gesso (a) com 1% e (b) 10% de látex, respectivamente (S. EVE et al, 2007 apud SILVA, 2010). .....	37
Figura 4 - Microscopias de compósitos de cimento Portland, destacando formação de teia polimérica (NASCIMENTO, 2006).....	37
Figura 5 - Equipamentos para moagem do resíduo (a)moinho de barras (b)liquidificador industrial.....	42
Figura 6 - Peneirador eletromagnético.....	42
Figura 7- Molde usado no método.....	43
Figura 8 – Umidificador.....	43
Figura 9 - Dessecador .....	44
Figura 10 - Prensa hidráulica.....	44
Figura 11 - Prensa Universal .....	46
Figura 12 - Absorção de água por capilaridade.....	47
Figura 13 - Ensaio de absorção por imersão .....	47
Figura 14. Micrografias eletrônicas de varredura para o gesso comercial comumente utilizado na construção civil em modo SE (300X) (a), SE (1200X) (b) e SE (5000X) (c). .....	49
Figura 15. Micrografias eletrônicas de varredura para o resíduo de gesso da construção civil moído em modo SE (300X) (a), SE (1200X) (b) e SE (5000X) (c). .....	49
Figura 16. Espectros de infravermelho concomitantemente para gesso comercial e resíduo de gesso.....	50
Figura 17 – Resistência a compressão – Influência da adição do resíduo .....	51
Figura 18 – Absorção por capilaridade - Influência da adição do Resíduo no Comercial .....	52
Figura 19- Absorção por imersão - Influência da adição do Resíduo no Comercial.....	52
Figura 20– Resistência a compressão – Influência da adição da poliuretana(PUD) .....	54
Figura 21 – Absorção por capilaridade - Influência da adição do Polímero no Comercial .....	55
Figura 22 – Absorção por imersão - Influência da adição do Polímero no Comercial.....	55
Figura 23 – Resistência a compressão – Influência da adição concomitante de % de poliuretana e % de resíduos.....	59

Figura 24 – Absorção por capilaridade água – Influência da adição concomitante de % de poliuretana e % de resíduos.....	61
Figura 25 – Absorção por imersão – Influência da adição concomitante de % de poliuretana e % de resíduos.....	62
Figura 26 - Absorção por imersão - Influência da adição concomitante de % de poliuretana e 20% de resíduo. ....	64
Figura 27 – Resistência a compressão - Influência da adição concomitante de % de poliuretana e 20 % de resíduo .....	64
Figura 28 – Absorção por capilaridade - Influência da adição concomitante de % de poliuretana e 20% de resíduo .....	65
Figura 29 – Resistência a compressão – Influencia da adição do resíduo (extrapolando valores). ....	66
Figura 30 – Densidade – Influência da adição do resíduo. ....	66
Figura 31. Microscopia eletrônicas de varredura em SE 100x para as amostras conformadas (a) apenas com gesso comercial, (b) 20% de adição de resíduo e (c) 20% de adição de resíduo e 25% de poliuretana.....	70
Figura 32. Microscopia eletrônicas de varredura em SE 500x para as amostras conformadas (a) apenas com gesso comercial, (b) 20% de adição de resíduo e (c) 20% de adição de resíduo e 25% de poliuretana.....	71
Figura 33. Microscopia eletrônicas de varredura em SE 2000x para as amostras conformadas (a) apenas com gesso comercial, (b) 20% de adição de resíduo e (c) 20% de adição de resíduo e 25% de poliuretana.....	72
Figura 34. Microscopia eletrônicas de varredura do gesso comercial SE 1200x.....	73
Figura 35. Microscopia eletrônicas de varredura do resíduo de gesso moído SE 5000x. ....	73

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Nomenclatura e fórmula química das fases do gesso.....	27
Tabela 2 - Características Químicas do gesso para construção civil.....	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.C – Anos Antes de Cristo  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
APL – Arranjo Produtivo Local  
AT – Argamassa Tradicional  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
Com – Gesso comercial  
DH – Dihidrato de Sulfato de Cálcio  
EPS – Poliestireno Expandido  
GC – Gesso-cola  
HEC – Hidroxietilcelulose  
HH – Hemihidrato de Sulfato de Cálcio  
NBR – Norma Brasileira  
PP – Polímero Polipropileno  
PS – Polímero de poliestireno  
PUD – Dispersões aquosas poliuretânicas  
PVA – Álcool polivinílico  
PVAL – Polímero Poli (vinil álcool)  
PVP – Polivinilpirolidone  
SINDUSGESSO – Sindicato da Indústria do Gesso  
UCOS – Umedecimento Compactação e Secagem

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	18
1.1	Justificativa.....	20
1.2	Objetivos Geral e Específicos .....	21
1.2.1	Objetivo Geral .....	21
1.2.2	Objetivos Específicos.....	21
2	Referencial Teórico.....	22
2.1	O gesso.....	22
2.1.1	A história do gesso.....	22
2.1.2	O gesso em Pernambuco .....	23
2.1.3	O gesso na construção civil.....	24
2.1.4	A produção do gesso.....	25
2.1.5	As propriedades do gesso.....	27
2.2	O gesso como resíduo .....	29
2.2.1	CONAMA .....	29
2.2.2	Fundamentos básicos segundo a resolução n° 307 do CONAMA .....	29
2.2.3	Classificações do gesso segundo a resolução n° 307 do CONAMA.....	30
2.2.4	Reciclagem do Gesso .....	31
2.3	Técnica tradicional para obtenção de blocos de gesso.....	32
2.4	Blocos de gesso .....	33
2.5	Blocos de gesso com resíduo de gesso .....	34
2.6	Polímeros.....	35
2.6.1	Látex poliuretânicos - Dispersões aquosas poliuretânicas (PUD's). .....	35
2.6.2	Ação do polímero (látex) no material gesso.....	36
2.7	Compósitos de gesso com polímeros.....	38
2.7.1	O que são compósitos?.....	38
2.7.2	Compósito a base de gesso e EPS para construção de casas populares.....	39
3	Metodologia.....	40
3.1	Materiais.....	40
3.2	Métodos.....	40
3.2.1	Caracterização do Material.....	40

3.2.2 Tratamento prévio do resíduo de gesso.....	41
3.2.3 Umedecimento Compactação e Secagem (UCOS).....	42
3.3 Ensaio.....	45
3.3.1 Ensaio de resistência a compressão .....	45
3.3.2 Ensaio de absorção de água .....	46
4 Resultados e Discussões.....	48
4.1 Caracterização do Material.....	48
4.1.1 DRX .....	48
4.1.2 FRX.....	48
4.1.3 MEV.....	49
4.1.4 Infravermelho .....	50
4.2 Análise de desempenho dos compósitos.....	51
4.3 Avaliações microestruturais dos compósitos (MEV) .....	68
5 Conclusões .....	74
6 Sugestões para trabalhos futuros .....	76
7 Referências .....	77

## 1 INTRODUÇÃO

O atual aquecimento da construção civil associado a um cenário em que a matéria prima e mão de obra qualificada estão em falta leva o mercado a buscar alternativas em matéria prima e processos rápidos e/ou que necessitem de menor mão de obra. Esta tecnologia de processamento pode dispor à construção civil uma alternativa em materiais (por exemplo, o gesso mineral e o fosfogesso) com função estrutural ou não (blocos, placas, forros, revestimentos, divisórias, etc.).

Caruaru, cidade situada no agreste de Pernambuco, encontra-se diante deste quadro de aquecimento, em que o constante desenvolvimento e evolução das formas de construção, e diante do excelente mercado em que a construção de edificações está em alta, principalmente a vertical, mercado este que exige cada vez mais rapidez no processo construtivo, surge então a preocupação com o destino final dos resíduos gerados de forma a minimizar o impacto ambiental.

Com esta busca por processos construtivos cada vez mais dinâmicos e eficientes, nota-se nesta região a grande utilização de gesso para revestimento interno nas edificações, material que apresenta vantagens como: a facilidade de manuseio, rapidez e boa estética, entretanto, durante a aplicação do mesmo, uma grande quantidade de material é desperdiçada e este resíduo, que tem a classe C, segundo a resolução nº 307 no CONAMA, o qual não pode ser disposto em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de "bota fora", em encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei, comprovando assim, mais uma vez a necessidade de um reúso para o mesmo, uma vez que este município não possui aterro industrial.

Embora já existam possibilidades de reciclar este material, esta não é uma atividade comum da região, por ser um material de pequeno valor monetário (material muito barato). Com isto, este trabalho destina-se a reciclar o gesso, incorporando um polímero de baixo custo, como a poliuretana, a fim de aumentar a coesão das partículas, visando a obtenção de blocos estruturais.

O desenvolvimento de compósitos estruturais será ratificado quando do emprego da técnica (UCOS), a qual foi aplicada previamente na literatura por Kanno (2009), onde foi verificado que tanto a adesão intercrystalina quanto a microestrutura podem ser alteradas pelo

processamento e, por isso, o métodos UCOS consegue melhorar o comportamento mecânico através do aumento da adesão entre os cristais e microestrutura mais compacta.

Kanno (2009) aplicou o método UCOS empregando resíduos de gesso hemidratados com granulometria da ordem de  $7\mu\text{m}$ , obtendo compósitos com resistência a compressão com até 90 MPa. No entanto, sabe-se que a adição de energia de moagem e classificação granulométrica para proporcionar a adição de um resíduo caminha contra a posterior possibilidade de aceitação pelo mercado, embora a vertente da sustentabilidade e foco ambiental não possam ser desprezadas. Ademais, esse raciocínio é ratificado quando se leva em consideração o fato do gesso ser um insumo de baixo custo.

Nesse cenário, propõe-se avaliar a adição do resíduo de gesso em granulometrias maiores que  $7\mu\text{m}$ , verificando a influência do resíduo classificado em  $300\mu\text{m}$  nas propriedades do gesso prensado pelo método UCOS, em termos de resistência a compressão e absorção de água, seja capilar, seja por imersão.

A supracitada proposta está calcada no fato de necessitarmos na construção civil de blocos com resistência a compressão apenas de 7,5 MPa quando direcionamos os esforços para alvenaria estrutural e 2,5MPa para alvenarias de vedação, sem cunho estrutural. Por outro lado, a norma de gesso preconiza que deva ter 8,4 MPa por mínimo. Assim, o fato de não investir energias expressivas em moagem e classificação granulométrica pode ser capaz de gerar compósitos com propriedades não tão nobres, mas suficientes para algumas aplicações de interesse na construção civil, inclusive de cunho estrutural.

Como o método UCOS trabalha com o pó HH, propomos usar porcentagens de adição do pó de resíduo DH ao gesso comercial HH.

Além disso, Kanno (2009) propõe que a adição de um polímero ao sistema atue com funções de adesão e lubrificação. A adição de adesivo polimérico ao material com o objetivo de aumentar a adesão entre cristais foi utilizada substituindo a água de hidratação por uma solução aquosa de PVAL em Kanno (2009). Nesse cenário, a proposta de incorporação de um polímero não-iônico, além de não interferir nas cargas eletrostáticas do sistema, pode aumentar a aderência e melhorar a coesão do sistema, uma vez que resultados positivos foram observados por Nascimento (2006) com a formação de teias poliméricas entre os cristais hidratados do cimento Portland dada a coalescência desse polímero associada à hidratação do sistema cimentício.

Assim, o sucesso desse projeto consiste em conseguir compósito de gesso/ resíduo de gesso, com mínima absorção de água e resistência a compressão mínima dita pela NBR

13207-Gesso para construção civil e NBR 6136-Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural, o que aumentará o interesse das empresas para incorporar esses blocos em seus sistemas construtivos, além de dá um destino correto a um resíduo da própria construção civil.

### ***1.1 Justificativa***

Para que os objetivos propostos neste trabalho sejam atingidos, faz-se necessário a adoção de uma metodologia de pesquisa com embasamento teórico baseado no trabalho de Kanno (2009), acima citado, e a norma que rege a resistência mínima do gesso, NBR 13207.

A questão do destino final do resíduo do gesso na construção civil é de fundamental importância. E o tema abordado na presente pesquisa, nada mais é, que uma metodologia utilizada por Kanno (2009); com o objetivo de reutilizar o resíduo do gesso da construção civil, obtendo assim um composto de gesso/resíduo de gesso, de elevada resistência e também avaliar a absorção de água, visando desenvolver um composto com o mínimo de absorção.

Com base no exposto, verifica-se que para que o destino final do resíduo do gesso esteja de acordo com a resolução nº 307 no CONAMA, seria necessário a implantação de um aterro industrial no município de Caruaru (local estudado). Visando solucionar esta questão e ainda reciclar o gesso, transformando-o em blocos com resistência, é necessário estudos que mostrem a possibilidade da obtenção dos blocos de gesso com resistência, e viabilidade da implantação desses métodos nas construtoras da região. Assim, este Trabalho de Conclusão de Curso visa ajudar na solução deste problema de destinação final do resíduo do gesso.

## ***1.2 Objetivos Geral e Específicos***

### ***1.2.1 Objetivo Geral***

O objetivo desse estudo é o desenvolvimento compósito de gesso/resíduos de gesso da construção civil, adicionando poliuretana líquida não-iônica, visando obter um bloco resistente e com absorção mínima de água.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

- Caracterizar físico-quimicamente o resíduo de gesso da construção civil a ser utilizado:
- Desenvolver a dosagem dos compósitos de gesso/resíduo de gesso-poliuretana aquosa não-iônica
- Avaliar resistência mecânica, densidade de massa no estado endurecido, porosidade por imersão total e por capilaridade dos compósitos de gesso moldados utilizando o processos de conformação proposto: UCOS (Umedecimento Compactação e Secagem)

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 *O gesso*

#### 2.1.1 *A história do gesso*

O gesso é o mais antigo aglomerante de que se tem notícia. Foi encontrado em construções no Antigo Egito como na pirâmide de Khufu, com cerca de cinco mil anos. Suas técnicas de calcinação e suas propriedades hidráulicas já eram amplamente conhecidas pelos egípcios o que permite inferir que o material era utilizado por civilizações até anteriores a esta. Seu emprego era variado, desde a confecção de objetos decorativos, como estátuas, até revestimentos de paredes na forma de argamassas e pastas que serviram de base para afrescos que decoram até hoje o interior de algumas pirâmides. Também era comum a utilização de pigmentos para a produção de revestimentos coloridos (TURCO, 1961; KARNI, 1995 apud ANTUNES, 1999).

No séc. XVIII, a utilização do gesso na construção generalizou-se a ponto de, no âmbito das construções existentes,  $\frac{3}{4}$  dos hotéis e a totalidade dos edifícios do Poder e da população ter sido feitos em painéis de madeira tosca e rebocos de gesso – e no caso das construções novas, cerca de 95% eram feitas em gesso. Nessa época, a fabricação do gesso ainda era feita de forma empírica e rudimentar. É assim que Lavoisier, em 1768, apresenta à Academia de Ciências o primeiro estudo científico sobre os fenômenos que estão na origem da preparação do gesso. (SANTOS, 2008)

O Rio Grande do Norte foi o Estado pioneiro no Brasil na produção de gipsita e gesso, e durante cerca de 20 anos, a partir de 1938, ocupou a posição de maior produtor nacional, sendo as atividades conduzidas pelo Grupo Rosado. O elevado capeamento, da ordem de 20m, e a pequena espessura da camada de gipsita, de apenas 5 m, inviabilizou a continuidade da atividade mineradora, especialmente após a descoberta das jazidas de Pernambuco (SANTOS, 2008).

Desde os anos da década de 1960 que Pernambuco assumiu, e vem mantendo, a posição de maior produtor nacional de gipsita. Isto pode ser explicado pelo fato das suas

minas apresentarem melhores condições de lavra (menor razão de mineração e maior pureza do minério); mais adequada infraestrutura (fácil acesso, vias de escoamento asfaltadas e disponibilidade de energia elétrica); e ainda, uma maior proximidade do mercado consumidor do que as da maioria dos outros Estados produtores (SANTOS, 2008).

### 2.1.2 O gesso em Pernambuco

O Brasil possui reservas abundantes de gipsita, estimadas em 1,2 milhões de toneladas, distribuídas principalmente nos estados da Bahia, Pará e Pernambuco (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

Desde a década de 60, o estado de Pernambuco assumiu e vem mantendo a posição de maior produtor nacional de gipsita. O universo empresarial do pólo gesseiro de Araripe, inicialmente, era composto por alguns poucos pioneiros locais e por grupos sementeiros de capital nacional (SINDUSGESSO, 2004 apud CANUT, 2006).

Atualmente, considerado um APL – Arranjo Produtivo Local - de nível estadual e federal, o Pólo Gesseiro de Pernambuco possui uma reserva estimada em 1,22 bilhões de toneladas, com previsão para 600 anos, sendo umas das mais expressivas e importantes do mundo, principalmente considerando o alto teor de pureza do gesso. A região do Araripe contempla cinco municípios, 80% das minas do país, além de 139 fábricas de gesso calcinado e cerca de 726 fábricas de pré-moldados. São mais de 13.200 empregos diretos e 66.000 indiretos (SIDUSGESSO, 2011).

A gipsita extraída destina-se principalmente à calcinação (67%) e à indústria cimenteira (33%), sendo o uso para fins agrícolas inexpressivo (0,1%). Do gesso natural obtido através da calcinação da gipsita, cerca de 96 % destina-se diretamente ao emprego na construção civil, seja como gesso para fundição (61 %) ou como gesso para revestimento (35 %). O restante da produção é distribuído entre a confecção de moldes para a indústria cerâmica (3 %) e uso hospitalar (0,4 %) (SEBRAE, 1996; SUMÁRIO MINERAL, 1996; PERSPECTIVA, 1999 apud ANTUNES, 1999).

Os principais fatores que contribuem pelo interesse no aproveitamento do minério do Araripe são: condições favoráveis de mineração (relação estéril/minério e geomorfologia da jazida); elevada pureza do minério (considerado o de melhor qualidade no mundo com teor

médio de pureza em torno de 95%) e melhor localização, se comparado ao minério do estado do Pará (MONÇÃO JÚNIOR, 2008)

O pólo gesso (Figura 1) fica situado na fronteira dos estados de Pernambuco, Ceará e Piauí, ou seja, a um raio de cerca de 700 km encontram-se 8 capitais de estado (Salvador, Aracajú, Maceió, Recife, João Pessoa, Natal, Fortaleza e Teresina) e 8 importantes portos (Salvador, Aratú, Recife, Suape, Mucuripe, Pecém, Itaqui e Ponta da Madeira) (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).



Figura 1 - Localização do pólo gesso do Araripe, extremo oeste de Pernambuco.

### 2.1.3 O gesso na construção civil

O gesso é utilizado em áreas bem distintas como: agricultura, indústria cerâmica, saúde (especialmente na odontologia) e na construção civil. Para diferenciar o gesso utilizado na construção civil dos demais na norma nacional foi adotado o termo Gesso de Construção (ANTUNES, 1999).

O gesso utilizado na construção civil, tecnicamente, é definido como um aglomerante aéreo, com rápido tempo de pega e baixa resistência inicial (BORRACHERO et al., 2008 apud SILVA, 2010), conhecido por gesso de Paris, gesso estucador ou gesso rápido (PETRUCCI, 1995 apud SILVA, 2010), moído em forma de pó, podendo conter aditivos utilizados como controladores do tempo de pega (NBR 13.207, 1994).

A RILEM (1982) define gesso de construção como material pulverulento, constituído predominantemente de hemidrato ou de uma mistura de sulfatos (hemidrato, anidrita ou

gipsita), com um baixo valor percentual de água livre e substâncias consideradas como impurezas: carbonato de cálcio e de magnésio, argilominerais e sais solúveis (SILVA, 2008).

Segundo Petrucci (1993), o gesso é um aglomerante aéreo, produzido a partir da calcinação da gipsita composta basicamente de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (sulfato de cálcio dihidrato) e algumas impurezas como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgO}$  não ultrapassando 6% do total (SILVA, 2008).

A NBR 13207 (1994) define gesso para construção como material moído em forma de pó, obtido da calcinação da gipsita, constituído predominantemente de sulfato de cálcio, podendo conter aditivos controladores de pega. Ainda classifica os gessos em dois tipos: fundição e revestimento; sendo subdivididos em fino e grosso.

A diferença mais marcante entre os dois tipos de gessos: gesso para fundição e gesso para revestimento, basicamente, é o teor de anidrita II, sendo mais elevado no tipo para revestimento. Diferenciam-se ainda pelo fato de o de fundição ser utilizado para pré-fabricados de construção civil e o de revestimento ser destinado para uso interno em edificações, uma vez que sofre alterações de suas propriedades pela ação da água. O gesso de revestimento pode ainda ser chamado de gesso comum (SILVA, 2008).

#### 2.1.4 A produção do gesso

A produção do gesso natural acontece basicamente em 4 etapas: extração do gipso; preparação para calcinação; calcinação e seleção.

##### 2.1.4.1 Extração do gipso

O gipso é uma rocha sedimentar, particularmente denominada evaporito. Em sua composição estão presentes, basicamente, a gipsita, a anidrita e algumas impurezas, geralmente argilominerais, calcita, dolomita e material orgânico. A gipsita é o mineral que se constitui na matéria-prima para o gesso; sua fórmula química é  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . (SILVA, 2008)

Desse modo a qualidade do gipso é avaliada pelo teor de gipsita. A matéria-prima nacional é bastante pura, favorecendo a produção de gessos de alvura elevada (HINCAPIÉ HW\_DO\_ 1996 apud ANTUNES, 1999).

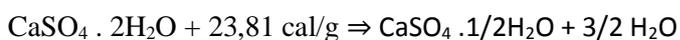
#### 2.1.4.2 Preparação para Calcinação

Após a extração a gipsita passa por alguns processos de beneficiamento de adequação ao tipo de forno onde será calcinada. Basicamente, as etapas são as seguintes: britagem, moagem grossa; estocagem; secagem; moagem fina e ensilagem (SILVA, 2008).

#### 2.1.4.3 Calcinação

A calcinação é o processo térmico pelo qual a gipsita é desidratada. Segundo Pires Sobrinho (2002), essa desidratação pode acontecer utilizando 5 tipos de fornos: tipo panela; tipo marmitta; tipo rotativo, tubulares paralelos e barriga quente. A maior diferença entre eles no que tange ao processo, consiste no controle de temperatura de calcinação (SILVA, 2008).

O material é calcinado numa faixa de temperatura da ordem de 140 °C a 160 °C, quando se deseja obter hemidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ). A anidrita III ( $\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O}$ ) é obtida entre 160°C e 200°C e pode conter água de cristalização em baixo teor. Esta fase é solúvel, como o hemidrato, porém instável, transformando-se em hemidrato com a umidade do ar. Quando a calcinação acontece em temperaturas variando de 250°C a 800°C a anidrita III transforma-se em anidrita II ( $\text{CaSO}_4$ ) cuja velocidade de hidratação é lenta. A anidrita I, só é obtida em temperaturas acima de 800°C (CINCOTO et al. 1988a; SANTOS, 1998 apud ANTUNES, 1999).



(equação 1)

A calcinação ainda pode ser por via seca ou úmida. Se o gipso for calcinado a seco sob pressão atmosférica, ou baixa pressão, será obtido o hemidrato  $\beta$ . Caso a calcinação ocorra sob pressão de vapor de água saturante, será obtido o hemidrato  $\alpha$  (SILVA, 2008).

Devido ao menor tempo de pega, maior resistência mecânica e custo mais elevado, o hemidrato  $\alpha$  tem sua maior utilização como gesso hospitalar. Já o  $\beta$ , com custo de produção mais baixo, predomina no gesso de construção nacional (CINCOTTO et al., 1998 apud ANTUNES, 1999).

A Tabela 1 faz um resumo da nomenclatura e a fórmula química das fases do gesso.

Tabela 1 - Nomenclatura e fórmula química das fases do gesso

Nomenclatura	Fórmula Química
Gipsita ou Dihidrato	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Hemidrato	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
Anidrita III	$\varepsilon\text{CaSO}_4$
Anidrita II e I	$\text{CaSO}_4$

FONTE: ANTUNES, 1999

#### 2.1.4.4 Seleção

O material calcinado é moído, selecionado em frações granulométricas e classificado conforme o tempo de pega, de acordo com a NBR 13207, 1994.

#### 2.1.5 As propriedades do gesso

Quimicamente a gipsita é um sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) cuja composição estequiométrica média é de 32,5% de CaO, 46,5% de  $\text{SO}_3$  e 20,9% de  $\text{H}_2\text{O}$  (DANA, 1969 apud CANUT, 2006).

A presença de água na composição química do gesso causa a absorção de grande quantidade de energia calorífica para transformações químicas internas, liberação e vaporização de moléculas da água, tornando o gesso um material com capacidade de resistência ao fogo. Essa higroscopicidade proporciona a este material uma grande capacidade de absorção de água do ambiente, pois sua estrutura de cristais funciona como grandes poros,

e essa umidade é liberada automaticamente com o aquecimento do ambiente devido sua capacidade de desorção. Estudos sobre o desempenho térmico de ambientes com incidência de sol têm apresentado uma redução na temperatura do ambiente em aproximadamente 4°C com uso de placas de gesso (ATHIENITIS, 1997 apud SILVA , 2010).

A resistência mecânica e a rigidez do conjunto de gesso são, essencialmente, com base no encadeamento dos cristais dihidratado, que acompanha a sua precipitação (KUNKELY e VOGLER, 2008 apud SILVA , 2010).

O gesso utilizado na construção civil já foi normatizado no Brasil e as exigências preconizadas para os tipos finos em revestimento, fino para fundição, grosso para revestimento e grosso para fundição, estão apresentadas na Tabela 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (RIBEIRO, 2006)

Tabela 2 - Características Químicas do gesso para construção civil

Determinações químicas	Limites (%)
Água livre	Max. 1,3
Água de cristalização	4,2 a 6,2
Óxido de cálcio (CaO)	min. 38,0
Anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	min. 53,0

FONTE: RIBEIRO, 2006

Dentre as suas propriedades físicas destacam-se: a dureza 2 na escala Mohs; a densidade real de 2,35 g/cm<sup>3</sup>; o índice de refração 1,53 (LINHALES, 2004). No estado em que se encontra no mercado, o gesso é um pó branco de elevada finura (CANUT, 2006).

O gesso apresenta também propriedades intrínsecas que viabilizam a sua aplicação como material na construção civil tais como: isolamento térmico e acústico; a aderência a substrato; a trabalhabilidade, a moldabilidade e a resistência mecânica.

## 2.2 *O gesso como resíduo*

### 2.2.1 CONAMA

Como nem todos os resíduos gerados na indústria da construção civil, segundo a Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 307 (05/07/02) que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil, podem ser reutilizados ou reciclados. O gesso, por exemplo, é enquadrado na Classe C, “resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação” (SILVA, 2008).

### 2.2.2 Fundamentos básicos segundo a resolução nº 307 do CONAMA

A Resolução nº 307 do CONAMA, de 5 de julho de 2002, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais. Segundo esta resolução, tem-se as seguintes definições:

I - Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha;

II - Geradores: são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos definidos nesta Resolução;

III - Transportadores: são as pessoas, físicas ou jurídicas, encarregadas da coleta e do transporte dos resíduos entre as fontes geradoras e as áreas de destinação;

IV - Agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;

V - Gerenciamento de resíduos: é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos;

VI - Reutilização: é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo;

VII - Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação;

VIII - Beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo às operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto;

IX - Aterro de resíduos da construção civil: é a área onde serão empregadas técnicas de disposição de resíduos da construção civil Classe "A" no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro e/ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente;

X - Áreas de destinação de resíduos: são áreas destinadas ao beneficiamento ou à disposição final de resíduos. (CONAMA, 2002)

### 2.2.3 Classificações do gesso segundo a resolução n° 307 do CONAMA

Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso. (CONAMA, 2002)

É importante destacar que segundo esta Resolução, já em vigor desde dois de janeiro de 2003, os geradores deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final e que ainda os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares,

em áreas de "bota fora", em encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei (SILVA, 2008).

Desta forma, existe grande preocupação por parte dos geradores de resíduos em dar uma destinação final a eles, não por preocuparem-se com o impacto ambiental causados pela sua geração ou por sua deposição indevida, mas por estar garantido em lei a responsabilidade e sujeito a multas (SILVA, 2008).

#### 2.2.4 Reciclagem do Gesso

No cenário atual da reciclagem de resíduos de construção pode-se identificar a necessidade de especificações técnicas para a produção e aplicação do reciclado, para a garantia da qualidade dos produtos e para respaldar o aumento do consumo do material, fator fundamental para viabilizar economicamente as centrais de reciclagem. Sendo a reciclagem de resíduos de construção relativamente recente no Brasil e estando em fase de avanço é natural que existam lacunas de conhecimento sobre produção e aplicação do material produzido (LIMA, 1999 apud SILVA, 2008).

O desperdício estimado de gesso na Indústria da Construção Civil é de 45%. A redução deste desperdício deve fazer parte do dia a dia das empresas, pois o custo do material perdido, aliado ao da gestão dos resíduos, pode afetar a competitividade da solução. A solução está basicamente associada ao aumento do tempo útil das argamassas de gesso e ao uso de mão de obra qualificada (JOHN; CINCOTTO, 2003).

A presença de gesso em resíduos de concreto e de argamassa que serão aproveitados futuramente pode provocar efeito danoso aos mesmos (AGUIAR, 2004). O sulfato, presente no gesso, em compostos de alumínio e de cálcio, por exemplo, podem levar a formação de produtos expansivos e provocar fortes tensões internas e a fissuração desses materiais. A maioria das normas limita o teor de sulfatos nos agregados a um valor máximo de 1% (JOHN; CINCOTTO, 2003). Sendo assim, o resíduo a base de gesso deve ser separado e ter destinação própria (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

Em relação ao descarte das peças pré-moldadas e de gesso acartonado são seguramente mais fáceis de separar no processo de triagem de entulho para a produção de

agregados reciclados, em função do seu tamanho e também por ficarem isoladas dos outros componentes construtivos (AGUIAR, 2004).

No caso de revestimentos de gesso, a identificação do material e a tarefa de separar o gesso do substrato não são viáveis, pois o gesso apresenta elevada aderência a todos os tipos de base mineral (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

Com isso percebe-se a necessidade de separação dos resíduos de demolição e reforma a base de gesso antes do seu reaproveitamento, tornando necessária a elaboração de um adequado e apropriado plano de gerenciamento e separação desses resíduos. A ausência de procedimentos adequados pode introduzir a presença de contaminantes no resíduo, fato que pode inviabilizar a sua reutilização (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

### ***2.3 Técnica tradicional para obtenção de blocos de gesso***

No processo tradicional para obtenção de blocos de gesso (Figura 2), o gesso (HH) é adicionado à água numa relação em peso de água/gesso que varia entre 0,6 e 1,0. Essa quantidade de água é necessária para que a pasta seja trabalhável, ou seja, facilite a mistura do gesso com a água e permita que a pasta formada seja vertida sobre um molde que definirá o formato do material após a cura (hidratação). O restante da água que não reage com o HH ocupa volume durante a conformação e evapora após a cura deixando vazios na microestrutura do material, razão pela qual resulta num material de baixa densidade. Portanto, o gesso conformado produzido com excesso de água possui baixa resistência mecânica e são mais susceptíveis ao ataque da água devido à menor superfície de contato entre grãos (cristais de DH) e, conseqüentemente, menor adesão (KANNO, 2009).

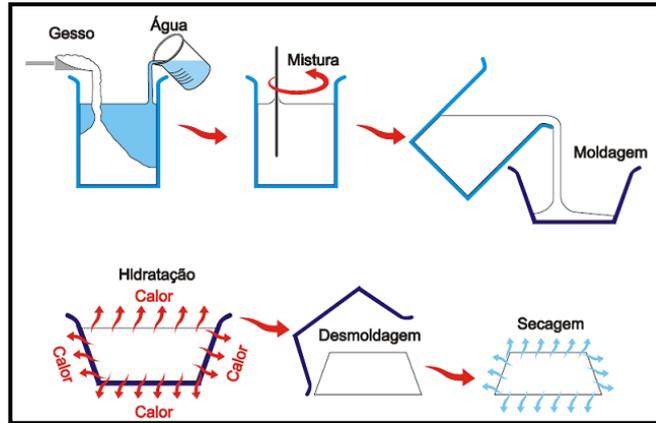


Figura 2 - Processo tradicional de conformação do gesso. (KANNO, 2009)

## 2.4 Blocos de gesso

As alvenarias internas em blocos de gesso representam um grande avanço em relação às tradicionais alvenarias em blocos cerâmicos e de concreto no que diz respeito à diminuição do peso na estrutura; aproveitamento maior da área plana interna, melhor acabamento e facilidade de embutir as redes de instalações, maior produtividade e diminuição das etapas e insumos de execução, e no tempo total para recebimento do acabamento final (PIRES SOBRINHO, 2009).

Apesar dessas vantagens existem poucas empresas que utilizam este tipo de alvenaria nas vedações internas das edificações. As principais razões decorrem do pouco conhecimento do desempenho deste subsistema, da falta de conhecimento técnico sobre projeto e execução e de exemplos de casos que mostrem resultados satisfatórios com aplicação desta tecnologia de vedação (PIRES SOBRINHO, 2009).

As alvenarias em blocos de gesso são mais leves, variando entre  $0,6 \text{ KN/m}^2$  à  $1,0 \text{ KN/m}^2$ , quando comparadas às alvenarias tradicionais em blocos cerâmicos revestidos com argamassa, que variam entre  $1,2 \text{ KN/m}^2$  à  $1,8 \text{ KN/m}^2$ , contribuindo para diminuição das cargas permanentes nas lajes/vigas. Esta diminuição também influencia na redução das flechas imediatas e deformação lenta das lajes de concreto. As alvenarias em blocos de gesso apresentam rigidez 69% maior que as alvenarias de blocos cerâmicos revestidas com argamassa, devendo desta forma concentrar igual proporção nas tensões. Por outro lado, a resistência das alvenarias em blocos de gesso de 100mm de espessura apresentam o dobro da

capacidade resistente das paredes, respondendo satisfatoriamente no comportamento global. (PIRES SOBRINHO, 2009)

A economia de custo e tempo produzida com a opção tecnológica de utilizar paredes internas em alvenaria de blocos de gesso em substituição as paredes tradicionais pode ser avaliada tanto na estrutura quanto nas construções das paredes internas (PIRES SOBRINHO, 2009).

O sistema construtivo em alvenaria de blocos de gesso é constituído de blocos pré-moldados intertravados de dimensões nominais de 50 cm x 66,7cm x espessura. As espessuras comercializadas no País são de 7cm(vazado ou compacto) e 10cm(compacto) unidos com fina camada de cola de gesso (PIRES SOBRINHO, 2009).

Este sistema apresenta melhores resultados econômicos e maior eficácia (redução de custos, maior produtividade, menor tempo de execução, menor desperdício e menor geração de entulhos) se o projeto da alvenaria considerar a compatibilização dos demais projetos (arquitetura, estrutural e de instalações) e associado a utilização de componentes e mão de obra de boa qualidade (PIRES SOBRINHO, 2009).

## ***2.5 Blocos de gesso com resíduo de gesso***

As etapas de fabricação dos blocos são as seguintes: primeiramente, a fôrma é untada com óleo desmoldante e deixada à espera para receber a pasta de gesso. Após a mistura da pasta de gesso com misturador mecânico, o operário começa a fabricar molduras e sancas. Quando a pasta não possui mais fluidez para moldagem, esta é retirada e depositada na fôrma do bloco. Este processo é repetido até que o material complete a fôrma. Após a fôrma cheia, esta sofre desempenho na superfície com desempenadeira de aço. Os blocos são desenhados e armazenados a céu aberto para secagem SILVA, 2008).

Desta forma, a produção dos tijolos de gesso constitui um processo de otimização dentro da fábrica de produtos de gesso, onde a pasta de gesso que não possui mais fluidez para moldagem de sancas e molduras é reutilizada na fabricação dos blocos para alvenaria.

Conforme visto em Silva (2008), os blocos de gesso reciclados foram assentadas de duas maneiras: Alvenaria de blocos de gesso reciclado assentado com Argamassa Tradicional (AT) e Alvenaria de gesso reciclado assentado com Gesso-Cola (GC), onde entre as duas

maneiras a construção de alvenarias de gesso reciclado com a utilização de argamassa tradicional (AT), mostrou-se mais viável economicamente e ainda apresentou uma maior produtividade, quando comparada com a alvenaria de gesso reciclado utilizando assentamento de gesso cola (GC).

## 2.6 *Polímeros*

Os polímeros têm sido utilizados com valiosas funções quando adicionados a sistemas cimentícios. Vários controladores de filtrados para pastas de cimento utilizadas em cimentação de poços de petróleo foram desenvolvidos nos últimos anos. A função é a formação de cargas eletrostáticas ou teias após a hidratação dos sistemas. As teias poliméricas entre os grãos hidratados da pasta cimentícia conferem maior tenacidade a pasta e evitam que não trinque, dada sua fragilidade intrínseca (NASCIMENTO, 2006).

Esses aditivos existem na forma de materiais particulados, tipo betonita, resinas termoplásticas, látex (APPLEBY e WILSON, 1996; NELSON, 1990 apud NASCIMENTO, 2006) e polímeros solúveis em água como derivados de celulose, tipo hidroxietilcelulose ou HEC (FYTEN e GETZLAF, 2006 apud NASCIMENTO, 2006).

Também existem os derivados de polímeros sintéticos não-iônicos tipo polivinilpirolidone (PVP) e álcool polivinílico (PVA), aniônicos como o poliacrilamida e catiônico como o poli(etilenamina) (LU et al, 2005; BONCAN, 2004; LARAMAY et al, 2000; BONCAN e GANDY, 1986; CARPENTER, 1986; McKENZIE, 1984; McKENZIE e McELFRESH, 1982 apud NASCIMENTO, 2006).

O polímero que será utilizado no desenvolvimento deste trabalho será do tipo látex, uma poliuretana não aquosa.

### 2.6.1 *Látex poliuretânicos - Dispersões aquosas poliuretânicas (PUD's).*

As dispersões aquosas poliuretânicas (PUD's) foram introduzidas no mercado no final dos anos 60 devido aos aspectos ambientais relacionados a redução do uso de solventes

orgânicos. Todavia, tem alcançando importância comercial e consumo crescente, devido as propriedades que se aproximam e em alguns casos superam as dos sistemas de dois componentes reativos a base de solvente. As PUD's são empregadas em revestimentos têxteis, acabamento de couro, adesivos, revestimentos de pisos, acabamento de fibra de vidro, revestimentos para madeira, borracha e folhas, acabamento de máquinas de escritório e peças de plástico, e como "primer" para metais (SPINARDI JUNIOR, 2001 apud NASCIMENTO, 2006).

Sua vantagem é que na sua fabricação, não se utiliza solventes, conseqüentemente, diminui a toxicidade. Elas são constituídas de poliuretano/uréias lineares, de alto peso molecular, dispersos em água. Os PU's devem ser modificados para formar dispersões estáveis em água, pela incorporação de grupos (PU ionomérico), que atuam como emulsificantes internos. Tanto grupos aniônicos, catiônicos e não iônicos podem ser utilizados. Os grupos aniônicos, normalmente são carboxilatos ou sulfonatos. As PUD's não iônicas são preparadas pela introdução no PU de segmentos hidrofílicos de polieter [poli(óxido de etileno)] mono funcional de peso molecular médio (LEE et al, 2005; VILAR, 2002 apud NASCIMENTO, 2006).

### 2.6.2 Ação do polímero (látex) no material gesso

A incorporação do látex no gesso após a hidratação resulta na modificação da rede de poros interferindo na sua hidratação, interrompe sua decomposição e dificulta a cristalização (SILVA, 2010).

Além disso, o aumento do teor de látex reduz a porosidade devido ao preenchimento dos vazios entre os cristais de gesso com pequenas unidades, onde seus grãos são revestidos com polímero látex dificultando a hidratação do gesso o que contribui para a melhor compactação das misturas. A Figura 3 (a) e (b) ilustram a microestrutura do gesso com adição de látex. (EVE et al., 2007 apud SILVA, 2010).

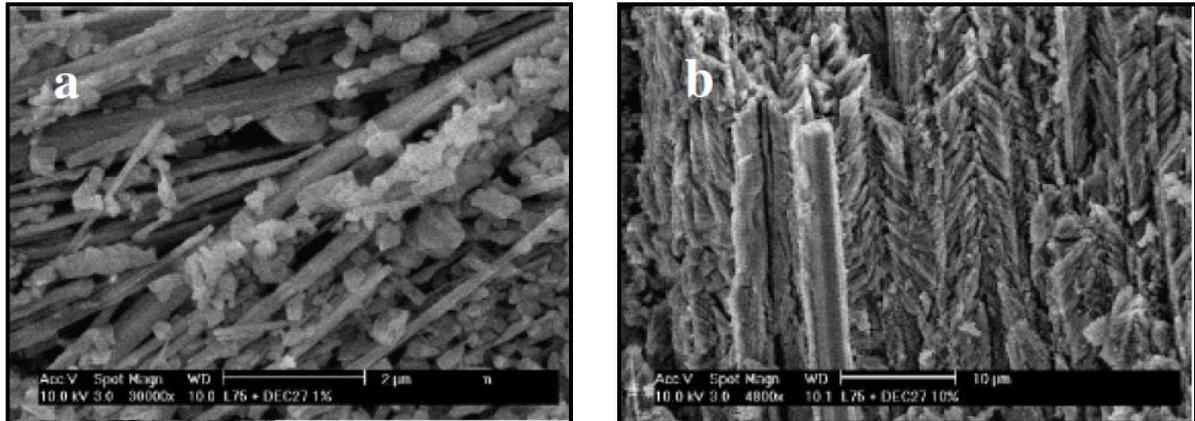


Figura 3- Microscopias de compósitos de gesso (a) com 1% e (b) 10% de látex, respectivamente (S. EVE et al, 2007 apud SILVA, 2010).

Resultados de formação de teia polimérica quando da hidratação de pastas cimentícias com a adição de poliuretana não iônica também foram positivamente relatadas por Nascimento (2006). A coalescência do polímero se deu ao mesmo tempo das reações de hidratação das pastas cimentícias, proporcionando ao sistema maior coesão, menores porosidade e permeabilidade, maior resistência ao ataque ácido, bem como maior tenacidade (NASCIMENTO, 2006). Micrografia ilustrativa pode ser vista na Figura 4.

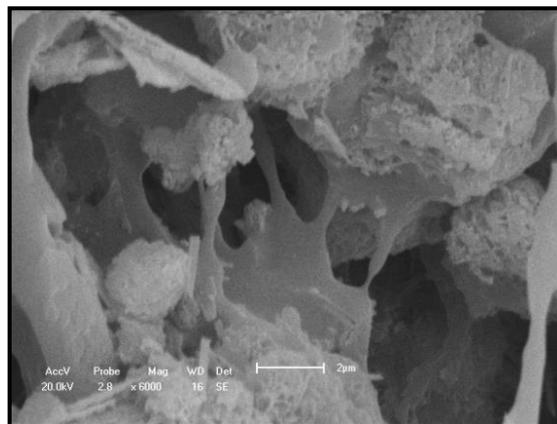


Figura 4 - Microscopias de compósitos de cimento Portland, destacando formação de teia polimérica (NASCIMENTO, 2006).

## 2.7 *Compósitos de gesso com polímeros*

### 2.7.1 *O que são compósitos?*

O uso de compósitos ocorre desde a pré-história, onde mistura argila com palha de trigo ou de arroz produzia materiais com melhor maleabilidade e com menor desenvolvimento de fraturas (MOSLEMI, 1999 apud SANTOS, 2008). Em 5000 a.C., o homem utilizou uma combinação de junco e piche na construção de botes, onde o piche serviu como adesivo (SHELDON, 1982 apud SANTOS, 2008).

Materiais compósitos são resultantes da combinação entre dois ou mais materiais de modo a formar um novo produto com características diferentes dos seus constituintes originais. Estes materiais são produzidos através da mistura física de uma fase dispersa que pode ser na forma de partículas, fibras ou mantas em uma fase contínua, denominada de matriz (SHELDON, 1982; BODIG e JAYNE, 1993; HULL, 1981 apud SANTOS, 2008).

A combinação de polímeros de alto desempenho com fibras cerâmicas ou poliméricas de alto módulo elástico e resistência mecânica, permitiu a produção de novos compósitos com um grupo de propriedades específicas (por unidade de peso) superiores ao aço, alumínio e outros. Esses compósitos apresentam, em geral, altas razões módulo/peso e resistência/peso superiores à de materiais cerâmicos, poliméricos e metálicos (SANTOS, 2008).

As propriedades mecânicas dos compósitos são afetadas por duas fases: a fase estrutural, geralmente possui módulo alto e elevada resistência mecânica e é representada por um material fibroso; a fase matricial possui módulo baixo e em geral é capaz de grande alongamento sendo tipicamente constituída de um material plástico, não quebradiço (SANTOS, 2008).

Em relação ao peso, os compósitos revelam propriedades mecânicas que podem exceder consideravelmente às dos metais. A combinação de excelentes propriedades mecânicas e leveza estrutural torna os compósitos interessantes materiais de aplicação em engenharia (MANO, 1999 apud SANTOS, 2008).

O desenvolvimento de compósitos a base de gesso tem sido intensificado com o intuito de melhorar suas propriedades e combater suas patologias. Bijen e Van Der Plas apud Çolak (2006) obtiveram um material compósito de gesso com adição de polímeros acrílicos

no estado de dispersão juntamente com a fibra de vidro, observaram melhorias na força mecânica e estabilidade aos efeitos externos. Çolak (2006) obteve um aumento na força a flexão do gesso modificado com látex, essa modificação da força a flexão foi atribuída à formação de polímeros dentro do gesso (SILVA, 2010).

### 2.7.2 Compósito a base de gesso e EPS para construção de casas populares

Buscando uma maneira de baratear o custo de uma habitação, apresenta-se um novo tipo de bloco de vedação destinado a edificação, fabricado através do uso de um compósito de matriz mineral, constituído de gesso, isopor, cimento, areia e água (SANTOS, 2008).

Tal bloco tem como principais características o baixo custo, boa resistência à compressão, boa estética, baixo peso, versatilidade e fáceis processos de fabricação e montagem (SANTOS, 2008).

Outra grande vantagem do compósito produzido é seu rápido processo de cura permitindo uma considerável agilidade do processo construtivo. Ressalta-se ainda o bom acabamento do bloco produzido, diminuindo-se, por conseguinte, o custo de mão de obra pela não necessidade de acabamento (SANTOS, 2008).

A matéria prima do EPS, o polímero de poliestireno (PS), é um polímero de estireno que contém um agente expensor. Ele é obtido, a partir do petróleo, por meio de diversas transformações químicas. Apresenta-se sob a forma de pequenos grânulos capazes de expandir cerca de 50 vezes o seu volume inicial (SANTOS, 2008).

No que diz respeito à análise comparativa entre os compósitos com diferentes composições de EPS percebe-se que a maior proporção de EPS conduz a uma redução na condutividade térmica. Essa redução corresponde a aproximadamente 20%, para um aumento de 50% na proporção de EPS. O aumento de 50 % do EPS corresponde a um aumento de 42% na proporção desse componente na mistura total do compósito (SANTOS, 2008).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 *Materiais*

- a) Gesso Comercial:  
Hemihidratado tipo  $\beta$  de pega lenta  
Granulometria média de  $7\mu\text{m}$ .
  
- b) Resíduo de Gesso:  
Resíduo do gesso comercial oriundo do revestimento da alvenaria de vedação, fornecido pela construtora Comello.
  
- c) Poliuretana Líquida Aquosa não-iônica:  
Procedência: CROMPTON  
Fração total de sólidos (% em peso): 35,0  
Tamanho da partícula:  $3\mu\text{m}$   
pH a  $25^\circ\text{C}$ : 7,0  
Densidade ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ): 1,06  
Ponto de ebulição:  $>100$   
Viscosidade ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ): Max. 0,5

#### 3.2 *Métodos*

##### 3.2.1 Caracterização do Material

A fim de caracterizar possíveis diferenças morfológicas, químicas e microestruturais do gesso comercial e do resíduo de gesso, foi realizado os ensaios de FRX (fluorescência de Raios-X), DRX (difração de Raios-X) e MEV (microscopia eletrônica de varredura).

As amostras foram caracterizadas por difração de raios X em um equipamento da Shimadzu modelo XRD-7000 utilizando-se uma fonte de radiação de  $\text{CuK}\alpha$  com voltagem de 30kV, corrente de 30 mA . Os dados foram coletados na velocidade do goniômetro de  $0,02^\circ$   $2\theta$  por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo e coletados de  $10$  a  $80^\circ$   $2\theta$ , utilizando o spin em 60 rpm para diminuir erros causados pela orientação preferencial.

A determinação da composição química foi feita através de fluorescência de raios X (FRX) por energia dispersiva em um equipamento Shimadzu modelo EDX-820. Os espectros de fluorescência de raios X foram obtidos utilizando-se cerca de 300 mg de amostra em pó fino depositado em uma porta-amostra formado por um filme plástico de polietileno, que apresenta baixa absorção de raios X na faixa de energia de interesse.

A caracterização morfológica dos materiais foi feita por microscopia eletrônica de varredura. Os exames microscópicos das amostras foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura da Philips modelo XL30 ESEM. O procedimento de preparação dos materiais para a análise consistiu na deposição de uma porção do sólido sobre uma fita adesiva de carbono fixada no porta-amostra.

### 3.2.2 Tratamento prévio do resíduo de gesso

Para utilizar no método aplicado neste experimento, o resíduo de gesso sofreu um “pré-tratamento”. Como este resíduo foi obtido da pasta de gesso para revestimento que cai ao ser aplicado na alvenaria, o mesmo foi posto ao sol por 12 horas para secar, depois levado ao moinho de barras (Figura 5(a)), deixando-o numa menor granulométrica, porém esta ainda foi considerada grande para ser utilizada no método, sendo o resíduo de gesso ainda liquidificado em liquidificador industrial (Figura 5(b)), e peneirado no peneirador eletromagnético (Figura 6) obtendo-se, ao final, uma granulometria máxima de  $300\mu\text{m}$ .



(a)



(b)

Figura 5 - Equipamentos para moagem do resíduo (a)moinho de barras (b)liquidificador industrial



Figura 6 - Peneirador eletromagnético

### 3.2.3 Umedecimento Compactação e Secagem (UCOS)

O método UCOS consiste no umedecimento do pó de gesso (HH) por aspersão de água, seguido de homogeneização e compactação desse pó úmido. A aspersão é executada até atingir uma relação água/gesso em torno de 0,20. Essa quantidade de água é muito próxima da mínima necessária para que haja uma completa hidratação e também é a quantidade máxima de água que o pó consegue reter durante a compactação.

Ao ser submetido à compactação de 10 MPa de compressão, obtém-se um corpo endurecido que pode ser imediatamente removido da fôrma (Figura 7). Após a compactação, a

reação de hidratação inicia (monitorada pelo aumento da temperatura) e não é necessário que a pressão continue sendo aplicada para que a reação se mantenha e consuma o HH. Essa técnica utiliza a água em dois processos fundamentais: dissolução-hidratação do HH e a outra, uma parcela bem menor, que fica envolvida no processo de adesão (KANNO, 2009).

Segundo Kanno (2009) após o desmolde é necessário aguardar a cura completa do material, até ensaiá-lo. A cura acontece com o corpo em ambiente úmido, por meio de um umidificador (Figura 8) por 24h, e depois a secagem acontece a uma temperatura entre 50° e 60°C para retirada da água em excesso acumulada nos poros do corpo. Após a secagem o corpo é colocado em dessecador (Figura 9) até o momento do ensaio.



Figura 7- Molde usado no método

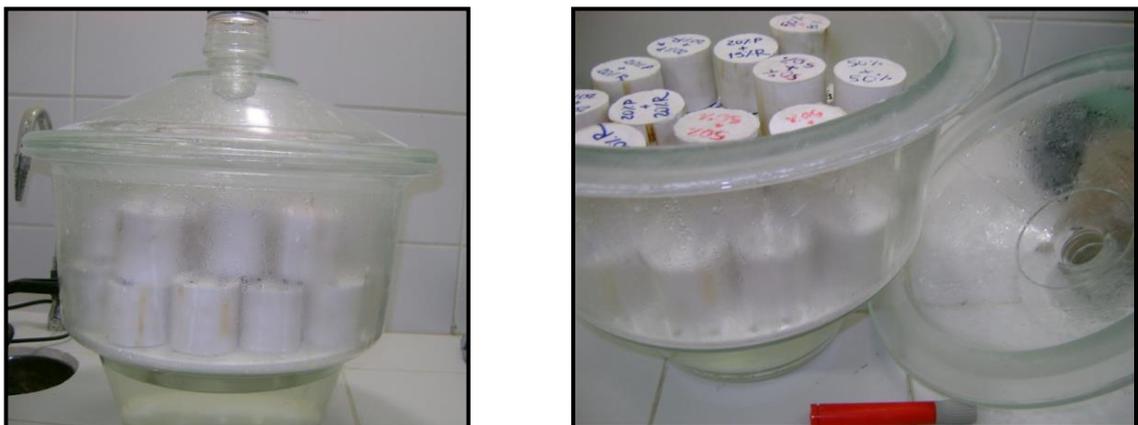


Figura 8 – Umidificador



Figura 9 - Dessecador

Com o intuito de visualizar os efeitos acima descritos por Kanno (2009), foram moldados corpos-de-prova em fôrma cilíndrica, de aço inox, com 5cm de largura e 10cm de comprimento, e compactado numa prensa hidráulica (Figura 10), seguindo a risca a metodologia UCOS.



Figura 10 - Prensa hidráulica

Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é desenvolver um compósito de gesso/resíduo de gesso de maneira que garanta a resistência normatizada pela NBR6136 (1994) para blocos de concreto de uso estrutural e a resistência mínima descrita na NBR 13207 (1994) - Gesso para construção civil, moldou-se inicialmente compósitos de gesso/resíduo de gesso.

Estes corpos-de-prova foram moldados adicionando o resíduo de gesso da construção civil (DH) nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 50% e 100% de resíduo de gesso em

relação ao peso do pó seco do gesso comercial da indústria civil, mantendo-se a relação água/gesso de 0,20. Estes foram ensaiados e, então, foi analisado qual o percentual que oferece uma melhor resistência mecânica sem absorver muita água.

Após análise do comportamento obtido por meio destes corpos-de-prova, visando aumentar a adesão entre cristais, passou-se a adicionar o polímero, a poliuretana líquida não-iônica com concentração de 35% em peso, substituindo a água de hidratação, em proporções de 5%, 10%, 15% e 20%, 25% e 30% de polímero/água e mantendo a proporção líquido/gesso de 0,20, como indica Kanno (2009) por meio do método UCOS. Ou seja, de acordo com o acréscimo da proporção de poliuretana em relação a água, levando em consideração que 35% da massa de PUD é de sólidos, se faz necessário a correção da quantidade de água, pois estequiometricamente é necessário pelo menos 0,186 da relação água/gesso para a hidratação completa do gesso. Caso contrário, interferiríamos negativamente na hidratação completa do gesso.

O passo seguinte foi ensaiar os corpos-de-prova com essas proporções da poliuretana em relação à água e analisar o comportamento da poliuretana (PUD), buscando visualizar qual o percentual que garante uma maior adesão entre os cristais, tornando-os assim o sistema menos poroso e permeável, sem resultar em grandes perdas de resistência mecânica.

De posse desses dados, foram moldados novos corpos-de-prova com resíduo de gesso, gesso comercial e poliuretana, e estudado o comportamento destes três materiais concomitantemente, obtendo assim um compósito, de resíduo de gesso/gesso comercial com a adição da poliuretana líquida não-iônica, de desempenho adequado (boa resistência e pouca absorção).

### **3.3 Ensaios**

#### **3.3.1 Ensaio de resistência a compressão**

Para os ensaios no estado endurecido de resistência a compressão foram empregados três corpos de provas (CP's) de argamassa moldados em moldes cilíndricos de 50x50 mm, curados e secos previamente em estufa (a aproximadamente 60°). Para a determinação da

resistência a compressão foi utilizada prensa de Ensaio Universal da marca Shimadzu (Figura 11), com velocidade de carregamento de 17,9 kN/min e fundo de escala de 10t.



Figura 11 - Prensa Universal

### 3.3.2 Ensaio de absorção de água

#### 3.3.2.1 Absorção de água por capilaridade

Por não haver ensaio normatizado que determine a absorção por capilaridade em blocos de gesso, este ensaio foi baseado na NBR 15259 (2005), que preconiza como determinar o coeficiente de capilaridade das argamassas. Este coeficiente de capilaridade é analisado nos tempos de 10 e 90 minutos e por não ter esse coeficiente para o material gesso, a análise foi feita comparativamente, observando para cada amostra o percentual absorvido nos tempos acima descritos e buscando a que possua a menor absorção (Figura 12).



Figura 12 - Absorção de água por capilaridade

### 3.3.2.2 Absorção de água por imersão

Este ensaio foi baseado em trabalhos publicados sobre blocos de gesso. Neste ensaio os corpos-de-prova são totalmente imersos na água, e feito a pesagem no momento inicial, ou seja antes da imersão em água, sendo pesados após 1 hora e 2 horas após imersão. O percentual total de absorção é calculado pelas diferenças de massa para estes intervalos de tempo acima descritos (Figura 13).



Figura 13 - Ensaio de absorção por imersão

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 *Caracterização do Material*

#### 4.1.1 DRX

Os difratogramas de Raios-X mostram diferenças nos picos indicando somente a presença ou não de moléculas de água. O padrão de cartas indica sulfato de cálcio hidratado no caso do resíduo e sulfato de cálcio no caso do gesso comercial. Nenhum pico representativo de composto secundário formado por possíveis reações com contaminados do gesso moído foi determinado.

#### 4.1.2 FRX

Análises químicas por fluorescência de Raios-X mostraram pouca variação no que diz respeito aos teores de enxofre e cálcio, ratificando a presença de gesso, hidratado ou semi-hidratado nos dois sistemas.

Além disso, no caso das amostras de gesso provenientes do revestimento de alvenaria, não foram detectados possíveis contaminantes ao sistema, que, mesmo em pequenas quantidades, poderiam gerar alterações microestruturas, termodinâmicas e cinéticas de hidratação dos novos sistemas.

### 4.1.3 *MEV*

Verifica-se, ao comparar as micrografias expostas nas Figura 14 (gesso comercial) e Figura 15 (resíduo de gesso da construção civil) que os materiais são morfologicamente distintos. A amostra de gesso comercial apresenta grãos irregulares com aspecto de superfície irregular estrelada. Já no caso do sistema previamente hidratado de resíduos do gesso de revestimento verifica-se a presença de cristais aglomerados com formas mais definidas e superfícies mais maciças e densas, com aspecto sintetizado.

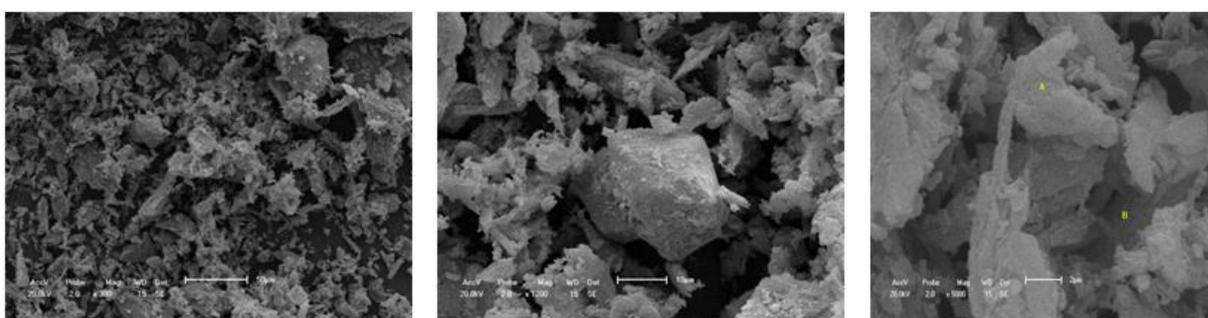


Figura 14. Micrografias eletrônicas de varredura para o gesso comercial comumente utilizado na construção civil em modo SE (300X) (a), SE (1200X) (b) e SE (5000X) (c).

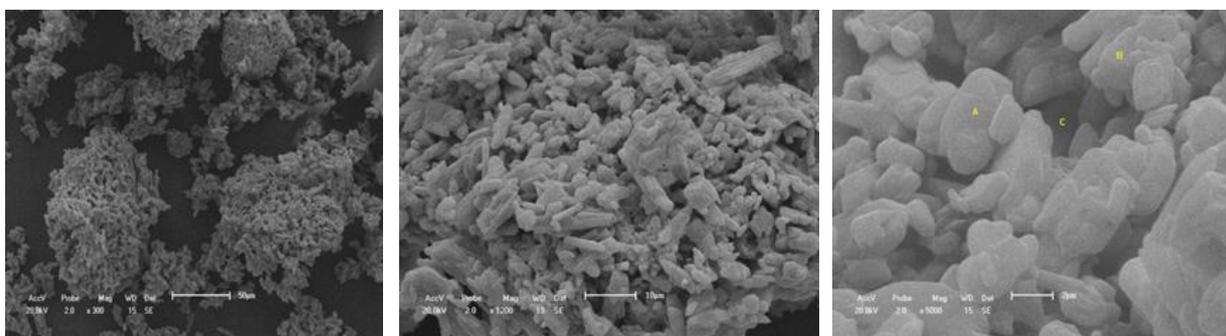


Figura 15. Micrografias eletrônicas de varredura para o resíduo de gesso da construção civil moído em modo SE (300X) (a), SE (1200X) (b) e SE (5000X) (c).

Além de não tão disponível para reagir com a água, a morfologia do resíduo pode ser negativa durante as reações de hidratação do gesso, dificultando termodinamicamente a formação do produto hidratado em forma de agulha que proverá a resistência a compressão do sistema pelo método UCOS, com regiões entre cristais disponíveis para a formação da água confinada.

Em ambos os casos (gesso da construção civil e resíduo de gesso moído), análises empregando microsonda por energia dispersiva (EDS) detectara picos de S (enxofre) e Ca (cálcio) como era esperado. Não foram detectados contaminantes no caso do resíduo de gesso moído por EDS associado ao MEV. Apesar da leitura química, nesse caso, ser extremamente pontual, fato que interfere na extrapolação dos fenômenos e comportamentos como um todo dos sistemas, esse resultado ratifica os obtidos por FRX.

#### 4.1.4 Infravermelho

As análises de infravermelho do gesso comercial em contraposição ao resíduo de gesso da construção civil encontram-se expostas na Figura 16. Pode-se verificar que, embora haja um leve deslocamento no eixo y, relativo à transmitância, as bandas são as mesmas para ambos os materiais, mostrando a semelhança entre o gesso comercial e o resíduo. Esse resultado sugere que não há contaminações no resíduo de gesso, sendo apenas a quantidade de água quimicamente ligada a diferença entre o gesso comercial e o resíduo de gesso, ratificando resultados já apresentados.

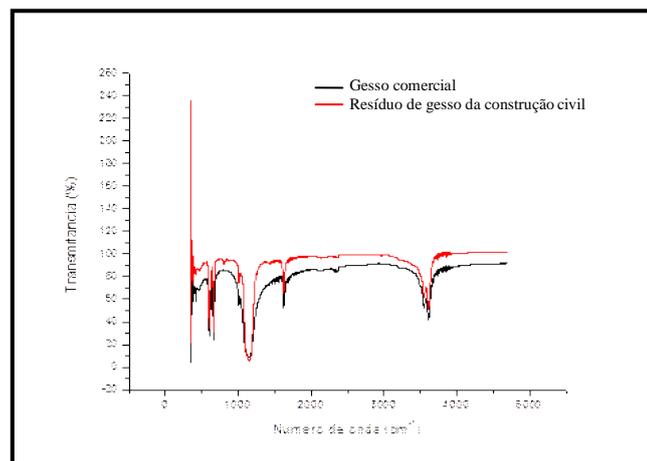


Figura 16. Espectros de infravermelho concomitantemente para gesso comercial e resíduo de gesso

#### 4.2 Análise de desempenho dos compósitos

Os resultados obtidos e analisados nos ensaios para os compósitos moldados pelo método UCOS segue abaixo de acordo com a sequência relatada na metodologia (item 3.2.3), salientando-se que todos os ensaios ocorreram após a cura dos compósitos.

Assim, analisaram-se inicialmente os compósitos de gesso comercial/resíduo de gesso.

Conforme nos mostra a Figura 17, todos os compósitos de gesso comercial/resíduo de gesso, nas proporções de 0, 5%, 10%, 15% e 20% em massa de resíduo de gesso em relação a massa do gesso comercial atingiram resistências muito superiores as especificadas na NBR 13.207 (1994) – Gesso para construção civil (mínima de 8,4 MPa) e NBR 6136 (1994) - Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural (aproximadamente 7,5MPa), assim a resistência a compressão dos compósitos com até 20% de resíduo está nos fornecendo um compósito de alto desempenho mecânico, em relação aos mínimos preconizados em norma, para as aplicações desejadas.

Conforme pode ser visto na Figura 17, resistências entre 20 e 30 MPa foram atingidas, ou seja, cerca de três vezes superior aos mínimos exigidos. No entanto, mesmo obtendo resistências elevadas, nota-se uma tendência a redução da resistência a medida que se aumenta a quantidade de resíduos inseridos no compósito. Ressalta-se que a mínima atingida, considerando-se os desvios-padrão foi de 20 MPa, o que representa duas vezes mais que a resistência mínima de 8,4 MPa e caracterizando uma redução em torno de 33% quando comparado ao sistema com 100% de gesso comercial.

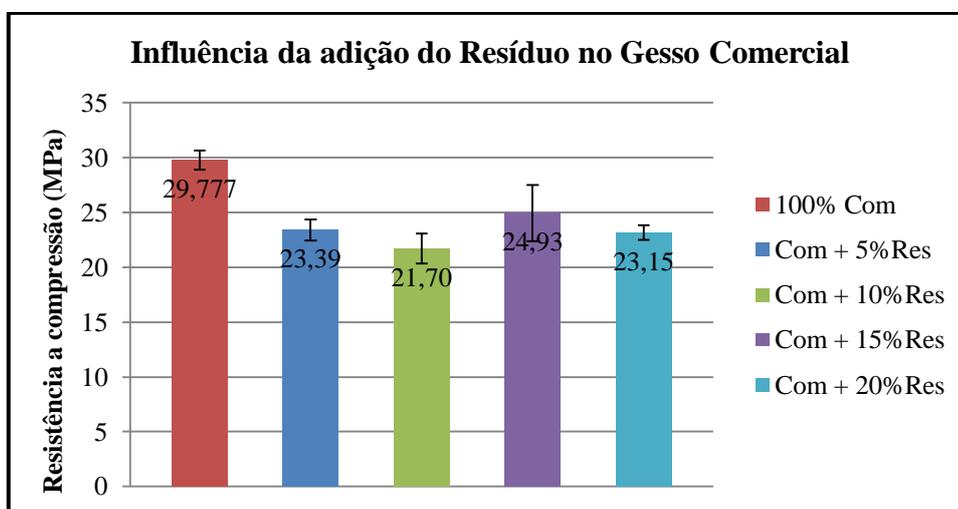


Figura 17 – Resistência a compressão – Influência da adição do resíduo

Para que estes compósitos atendam aos requisitos desejados neste trabalho, os mesmos necessitam também possuir uma absorção de água máxima, assim, para as mesmas proporções do compósito de gesso comercial/resíduo de gesso acima citados foram feitos os ensaios de absorção por capilaridade e absorção por imersão total, respectivamente, cujos resultados estão na Figura 18 e Figura 19.

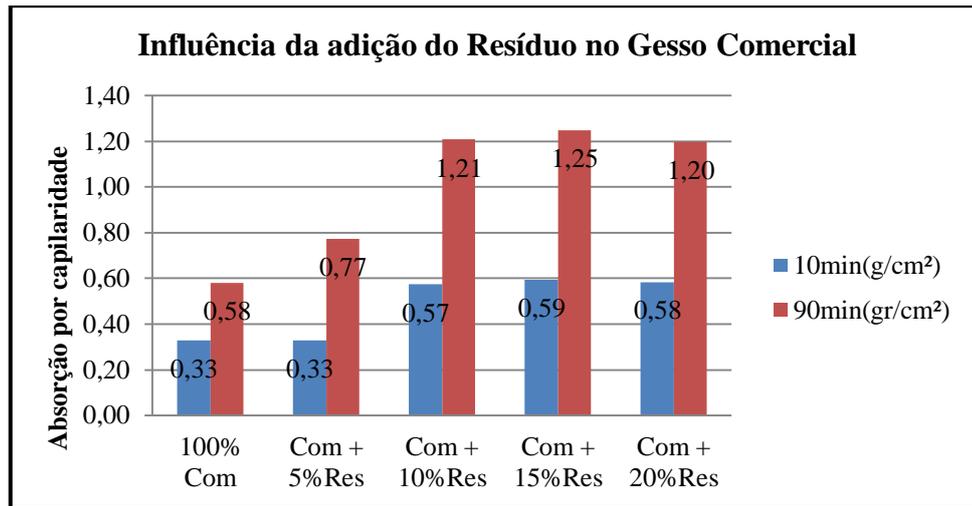


Figura 18 – Absorção por capilaridade - Influência da adição do Resíduo no Comercial

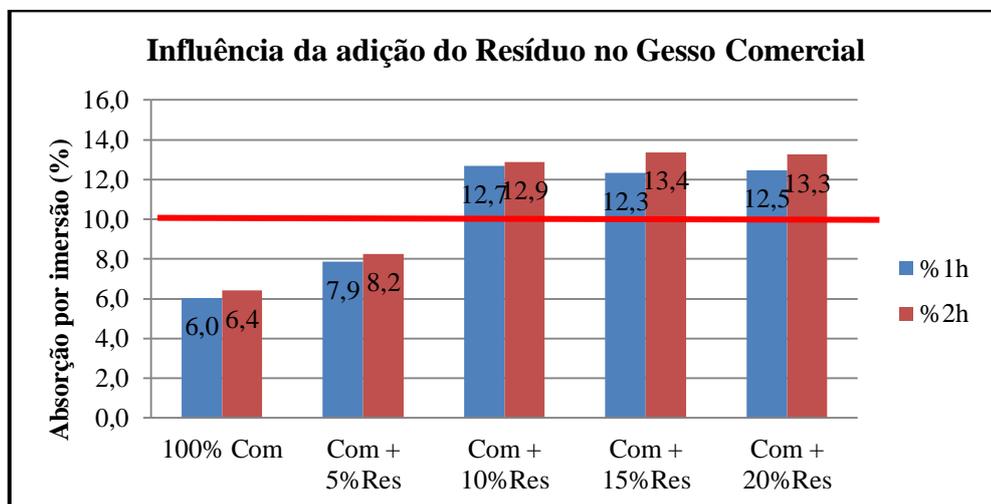


Figura 19- Absorção por imersão - Influência da adição do Resíduo no Comercial

Como pode ser observado nas Figuras 18 e 19, a adição gradual do resíduo de gesso causa elevação de valores nas absorções por capilaridade e por imersão, respectivamente, ultrapassando o percentual permitido por norma (10%) para a absorção por imersão a 1 hora em praticamente todas as adições. Observam-se aumentos em torno de 100% na absorção por

imersão e capilaridade com a adição dos resíduos. A exceção encontra-se no compósito com apenas 5% de resíduo de gesso em relação a massa do gesso comercial, o qual embora tenha passado a absorver mais, ainda manteve-se dentro da faixa permitida por norma, comportamento provavelmente devido a ainda baixa quantidade de resíduo.

Os comportamentos associados a tendência a redução na resistência a compressão associada ao aumento das porosidades por imersão e por capilaridade, quando do aumento do teor de resíduo adicionado ao sistema, estão intimamente relacionados ao arranjo que a estrutura está obtendo em função da maior granulometria do resíduo em relação ao gesso comercial.

Esse comportamento pode estar sendo regido pela simples redução da compacidade do sistema, pelo aumento da dimensão dos vazios a serem ocupados pela água entre os cristais, reduzindo a eficiência de atuação da água confinada como um líquido estruturado, ou como consequência da redução do caminho de propagação da trinca. A combinação de uma microestrutura com granulometria mais fina e uma maior quantidade de ligações conferiria uma resistência mecânica extra ao corpo (KANNO, 2009).

Outra possível explicação também é dada também por Kanno (2009):

... O outro fator que determina a resistência é o tamanho e geometria dos defeitos existentes no corpo. Corpos com defeitos grandes são menos resistentes que aqueles com defeitos menores. Portanto, quanto mais compacto, a probabilidade de existir um defeito grande diminui e com isso a resistência do material é maior. (KANNO, 2009)

Dada a maior granulometria do resíduo, acredita-se que esse fenômeno esteja ocorrendo no presente sistema.

Visando solucionar/minimizar a absorção de água, adicionou-se a estes compósitos (gesso comercial + resíduo de gesso) a poliuretana líquida não iônica (um polímero látex), atuando como corretor de permeabilidade/porosidade do sistema.

A fim de desvencilhar o comportamento sinérgico do resíduo de gesso e da dispersão aquosa poliuretânica (PUD), inicialmente estudou-se apenas a adição da PUD nos compósitos de base gesso comercial.

Conforme pode ser visto na Figura 20, a presença da poliuretana não agiu negativamente no meio quando o gesso comercial foi utilizado como matéria-prima, tendendo a manter constante a resistência do mesmo, com redução máxima de 10% quando da adição de 20% de poliuretana. Este comportamento nos indica que, no que concerne a resistência a compressão, a poliuretana em conjunto com o gesso comercial nos fornece um bom compósito nas proporções estudadas, até 20% de adição.

Visando minimizar custos, decidiu-se estagnar a varredura dos percentuais de adição de poliuretana em 20%, pois se entende que a melhor relação custo-benefício é obtida quando maximizando o uso do resíduo e minimizando o uso do polímero.

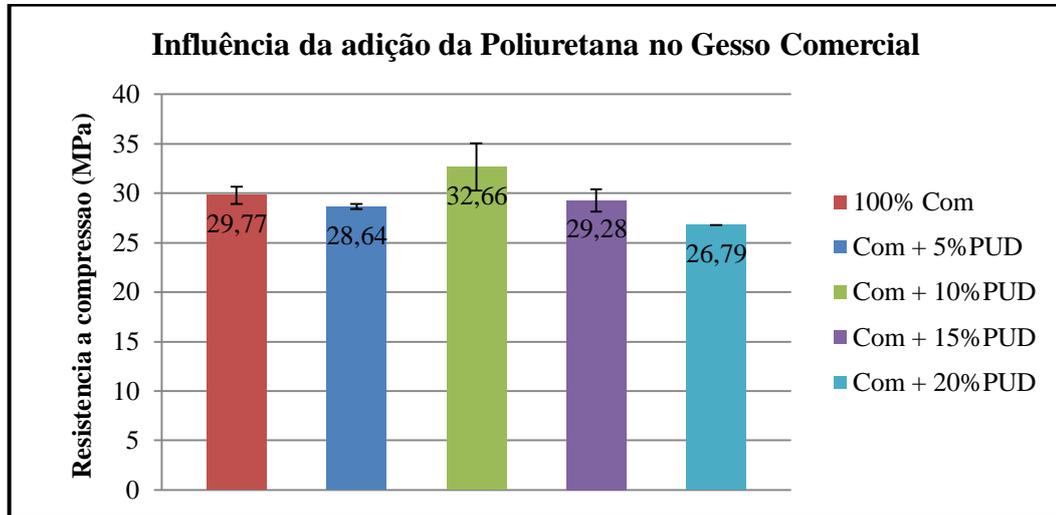


Figura 20– Resistência a compressão – Influência da adição da poliuretana(PUD)

A absorção de água, analisando a adição da PUD no gesso comercial, segue uma tendência linear de redução, como pode ser verificado por meio da Figura 21 e da Figura 22, tanto para absorção por capilaridade, quanto para absorção por imersão, respectivamente. Assim, a poliuretana agiu positivamente, como esperado, na redução das absorções de água.

Conforme pode ser visto na Figura 21, houve redução de 66% na absorção por capilaridade a 10 minutos e 62% para 90 minutos, quando da adição de 20% de PUD, em relação a massa de água.

Já na Figura 22, onde se contemplam os resultados para absorção total, 45% de redução foi observada para 1 hora e 37% para 2 horas, quando da adição de 15% de PUD. Os valores aumentaram levemente para reduções de 35% e 35,2%, respectivamente, que pode ter sido alguma distorção específica na moldagem do corpo-de-prova, uma vez que apenas um corpo foi utilizado para cada medição.

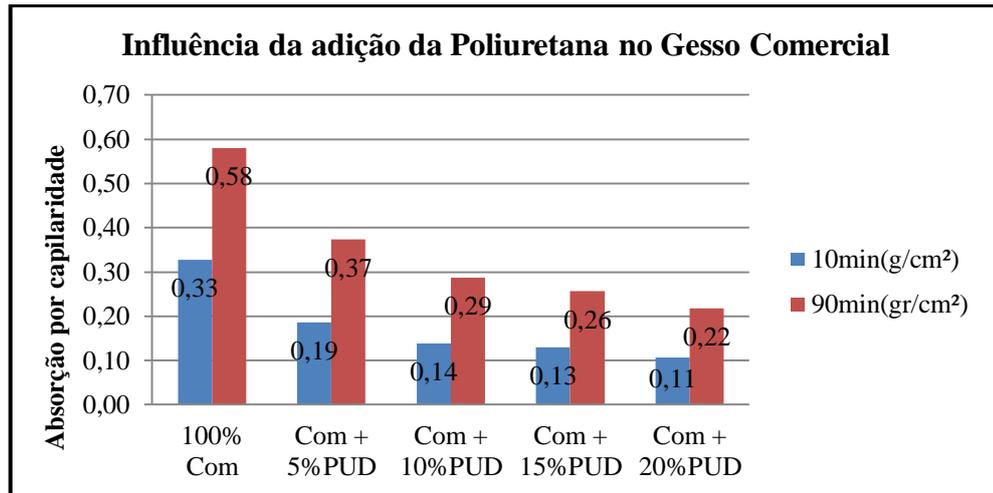


Figura 21 – Absorção por capilaridade - Influência da adição do Polímero no Comercial

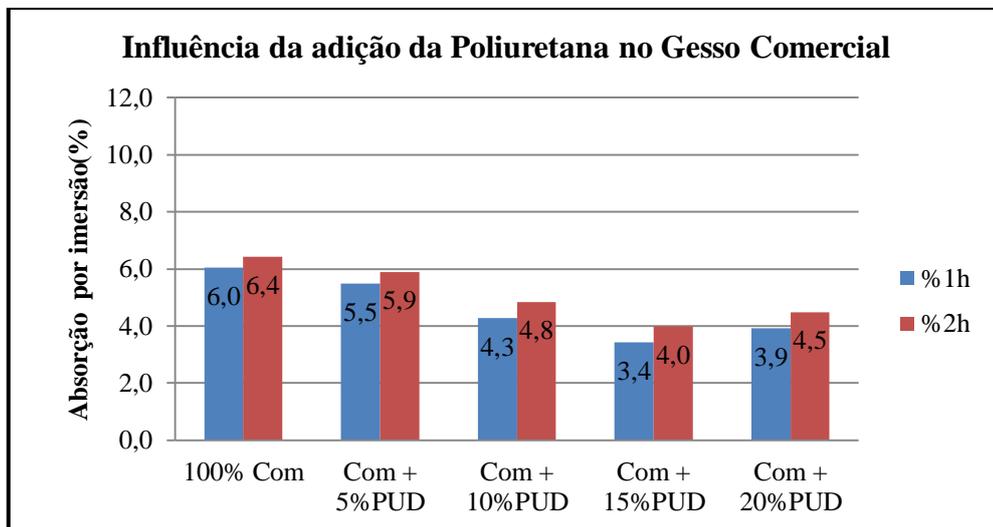


Figura 22 – Absorção por imersão - Influência da adição do Polímero no Comercial

Nesse cenário, Silva (2010) diz que o aumento do teor de látex reduz a porosidade devido ao preenchimento dos vazios entre os cristais de gesso com pequenas unidades, onde seus grãos são revestidos com polímero látex, o que contribui para a melhor compactação das misturas, apesar de dificultar a hidratação do gesso.

O preenchimento dos vazios pelo filme polimérico de poliuretana aquosa não iônica durante o processo de coalescência do látex é também ressaltado (ROSSIGNOLO, 2005 apud NASCIMENTO, 2006). Analogicamente a adição de látex a pastas de cimento Portland, Nascimento (2006) citando outros autores resalta que depois de curada, as pastas consistem em cimento hidratado conectado por um filme de partículas do polímero. A formação do filme polimérico é ratificada por Ding *et al* (2001 apud NASCIMENTO, 2006).

No entanto, como o método UCOS trabalha com a conformação por pressão, essa dinâmica de hidratação do gesso também pode estar sendo regida em função da quantidade de água confinada entre os cristais.

Kanno (2009) diz que ao adicionar polímeros em emulsão aquosa ao sistema, além da função de hidratação das partículas de gesso no método UCOS, também se tem outras duas funções: lubrificante e adesivo. O autor ressalta que, no caso da adesão, a película de água sobre o cristal é responsável pela adesão entre os cristais e a solução polimérica atua como adesivo polimérico. Assim, a poliuretana aquosa não iônica pode estar auxiliando no empacotamento das partículas (atuando como lubrificante) e na adesão entre partículas e cristais de resíduo (quando presentes).

De fato, a atuação do látex como lubrificante também é ressaltada por Nascimento (2007) para pastas de cimento. Esse autor, citando Kuhlmann (1985), Drecq e Parcevaux (1988), diz que observaram que a pastas de cimento aditivadas com látex promovem excelentes propriedades reológicas devido a sua ação lubrificante.

Assim, a poliuretana agiu positivamente sinergicamente com o gesso comercial, uma vez que tendeu a manter constante a resistência a compressão e reduziu a absorção mantendo todos os compósitos das dosagens/proporções acima indicados dentro do percentual indicado pela norma para blocos estruturais.

Deve ser observado também que nos intervalos estudados da adição da PUD, intervalos de 5% (de 0 a 20%), a redução da absorção de água de um intervalo para outro foi consideravelmente grande, de forma que para indicar o quanto a PUD interfere na redução da absorção, talvez fosse necessário intervalos menores de adição da PUD. No entanto com o intervalo adotado neste trabalho, alcançou-se o objetivo desejado de entendimento da adição da PUD no gesso comercial, que era de redução da absorção por meio da adição da mesma.

Após análise do comportamento de cada dosagem com resíduo ou com a poliuretana separadamente, estudou-se o comportamento da adição sinérgica do resíduo com a poliuretana.

Analisando a resistência a compressão em termos de efeitos sinérgico, conforme pode ser observado na Figura 23, a ação ao polímero neste novo compósito segue um comportamento diferente do observado no compósito gesso comercial/poliuretana. O importante a observar é que a adição concomitante de resíduos e PUD não é deletéria ao sistema e resistências da ordem entre 20 e 30 MPa podem continuar sendo obtidas.

Observa-se nas Figura 23a, Figura 23b, Figura 23c e Figura 23d que não há uma tendência de comportamento em termos de resistência a compressão, quando se mantém fixa a quantidade de resíduo adicionada e se aumento gradualmente a quantidade de PUD. De uma forma geral, pode-se verificar que para quantidades menores de resíduo adicionada, 5% (Figura 23a) e 10% (Figura 23b), quantidades baixas de poliuretana tendem a aumentar a resistência a compressão. Provavelmente consequência do efeito de lubrificação do sistema, favorecendo a moldagem e a conformação dos cristais.

As menores resistências foram observadas quando aparentemente não houve um equilíbrio entre a quantidade de PUD adicionada e resíduo adicionado, com redução de 40% quando da adição de 5% de resíduo e 20% de PUD, bem como 33% para 20% de resíduo e 15% de PUD. Ainda assim, ressalta-se que o menor valor encontrado em todas as adições sinérgicas avaliadas é da ordem de 14 MPa, ainda superior aos mínimos exigidos por norma.

A poliuretana parece ser negativa em termos de resistência, quando se tem mais grãos HH do que quando se tem maiores quantidades de resíduo DH, previamente incorporado. Provavelmente, esse fenômeno possa ser explicado quando da maior porosidade do sistema com resíduo, ao se aumentar a porosidade, se aumenta o número de vazios para a poliuretana coalescer, de forma a aumentar a adesão polimérica, sem interferir fortemente na adesão proveniente da água confinada. A adsorção do polímero na superfície do grão HH a ser hidratado, também pode estar interferindo na cinética e termodinâmica da hidratação, de forma a prejudicar a velocidade e crescimento dos cristais hidratados.

A incorporação de resíduo à matriz de gesso (DH-H<sub>2</sub>O) com adição concomitante de polímero, não altera significativamente a resistência do material, pois devido a sua maior adesão, reforçada pela adesão polimérica (KANNO, 2009), o material fica menos sensível aos maiores tamanhos de defeitos provocados pela presença do resíduo.

A adição da solução polimérica pode estar ainda atuando no empacotamento dos cristais DH, por efeitos de lubrificação do sistema, bem como atuando como incrementador de resistência, por aumento de adesão entre as partículas DH e a matriz de gesso. Apesar de a densidade ser menor, há um aumento nas forças de aderência entre os cristais de gesso, propiciando a manutenção da resistência.

O adesivo polimérico está dissolvido na água utilizada no processo de conformação do método UCOS, e, quando a água em excesso evapora, esse adesivo polimérico adere às superfícies dos cristais de DH, promovendo assim uma melhor adesão (ancoramento) do

resíduo à matriz cerâmica de gesso (DH) e entre os próprios cristais nucleados, precipitados e desenvolvidos decorrentes da hidratação das partículas de gesso comercial HH.

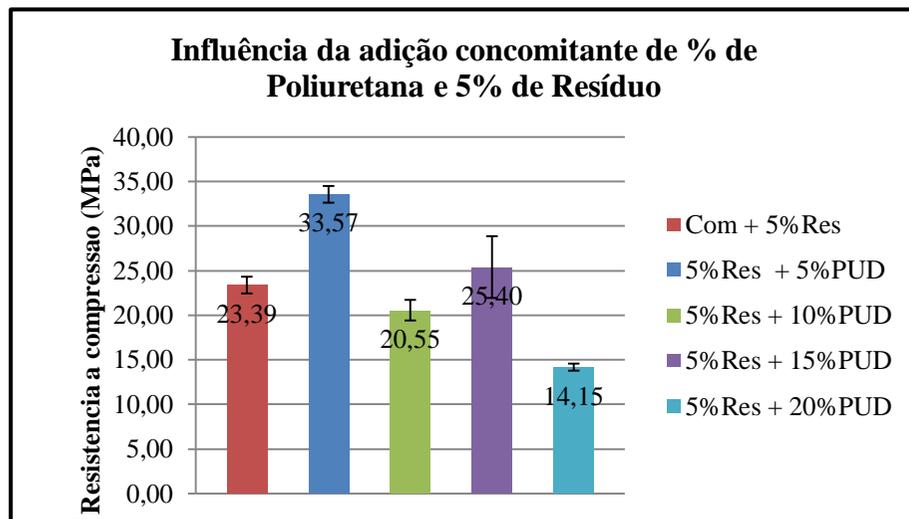
Além disso, a presença das partículas poliméricas nos interstícios pode reduzir o acúmulo de água “livre” que afasta os cristais por capilaridade. O favorecimento da união dos cristais é positiva, uma vez que propicia a superfície de contato entre os cristais e a região de água confinada e conseqüentemente, os processos de adesão.

Por outro lado, como demanda um tempo para iniciar e se propagar o fenômeno de coalescência do polímero, que deve ocorrer concomitantemente com a hidratação do gesso em câmara úmida, além de a relação entre a massa de água e a de gesso (a/g) utilizada se ser igual  $0,20 \geq 0,186$ , estequiometria necessária para conseguir a hidratação completa do gesso (KANNO, 2009), acredita-se que a água foi sim confinada durante o processo de prensagem.

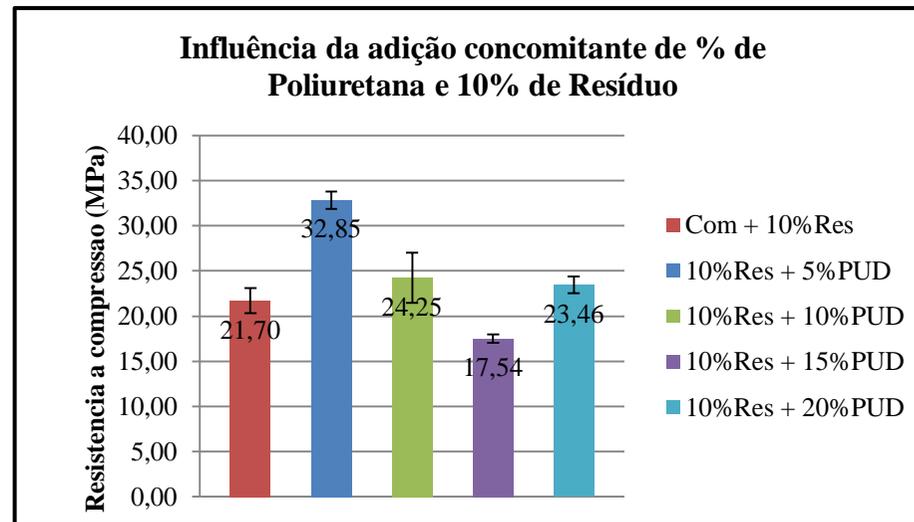
Observa-se que para concentrações maiores dos resíduos há tendência a redução de resistência (Figura 23(d)). A presença de polímero adsorvido nas superfícies dos cristais pode estar perturbando a cinética e termodinâmica de seu crescimento, bem como reduzindo a adesão entre as superfícies de contato, dificultando o incremento de resistência.

Assim, a presença do polímero pode estar influenciando na quantidade de películas de água presentes entre os cristais de DH (corpos secos) e na presença de água livre nos poros. Kanno (2009) alerta que a resistência mecânica deve decair quando houver substâncias e/ou íons capazes de perturbarem as ligações de hidrogênio entre as moléculas de água, desestruturando assim as camadas da água confinada. Acredita-se que o fato do polímero ser aniônico esteja favorecendo a não alteração do ponto de vista iônico do sistema, mantendo as ligações de hidrogênio entre as moléculas de água.

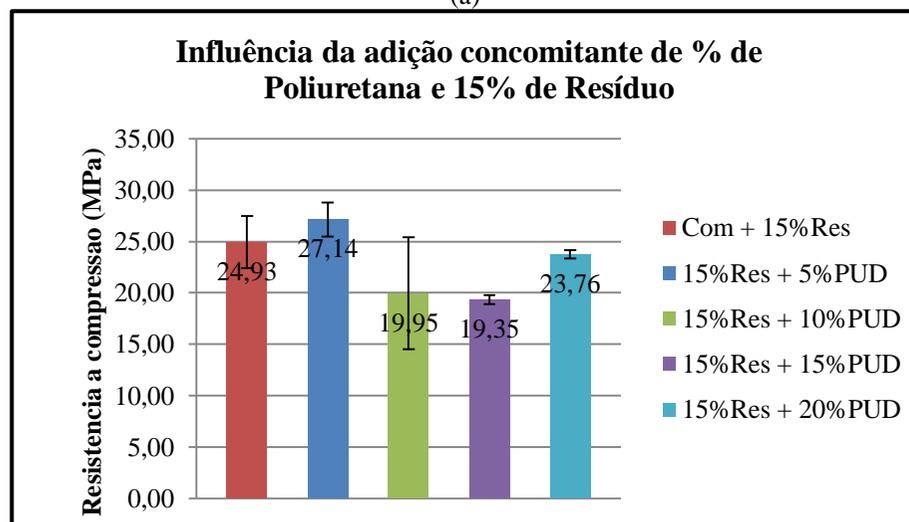
Ratificando tal comportamento, Silva (2010) diz que no caso da adição de polímeros é possível encontrar trabalhos com decréscimos e outros com ganho na resistência à compressão, o que varia com a quantidade de material utilizado. Isto acontece porque, segundo Silva (2010), a incorporação do látex no gesso resulta na modificação da rede de poros interferindo na sua hidratação, interrompe sua decomposição e dificulta a cristalização, após a hidratação pelo sistema tradicional de moldagem. Esses fenômenos podem ser extrapolados quando do emprego do método UCOS, principalmente no que concerne a interferir na hidratação e dificuldade de cristalização.



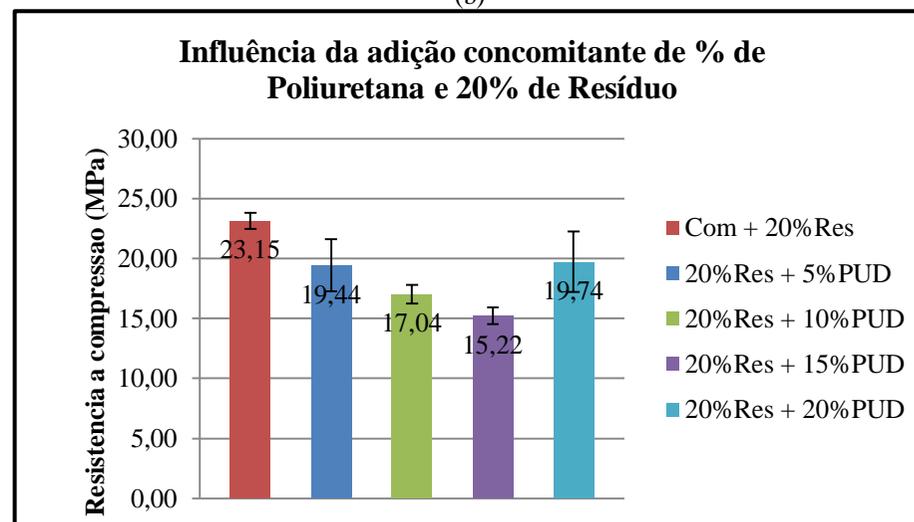
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 23 – Resistência a compressão – Influência da adição concomitante de % de poliuretana e % de resíduos

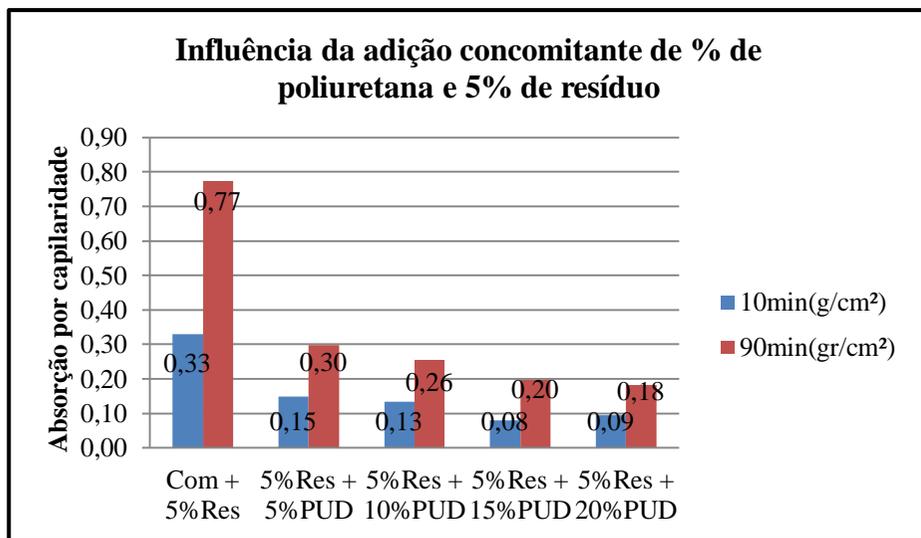
Assim, se por um lado a presença do resíduo introduz defeitos maiores, o próprio resíduo, por não sofrer dissolução, ou seja, já se encontrar hidratado e em tamanhos maiores, reforça o material o suficiente para compensar esses defeitos pela adesão polimérica, atuando como ancoragem mecânica com a matriz de gesso, aumentando a adesão entre o grão de resíduo e a matriz de gesso, a partir da camada polimérica coalescida e curada.

Nesse cenário, em termos de resistência a compressão, percebe-se que existe uma quantidade ótima de polímero de acordo com cada quantidade de resíduo adicionada, e que seguramente tem forte relação com a granulometria do resíduo. Há muitos parâmetros que irão reger o comportamento do sistema e o resultado final tanto em termos de resistência quando em termos de absorção de água, dentre eles: quantidade de água confinada, adsorção de polímero no grão HH, adsorção de polímero no cristal DH, adesão polimérica, homogeneização da PUD durante a mistura, etc...

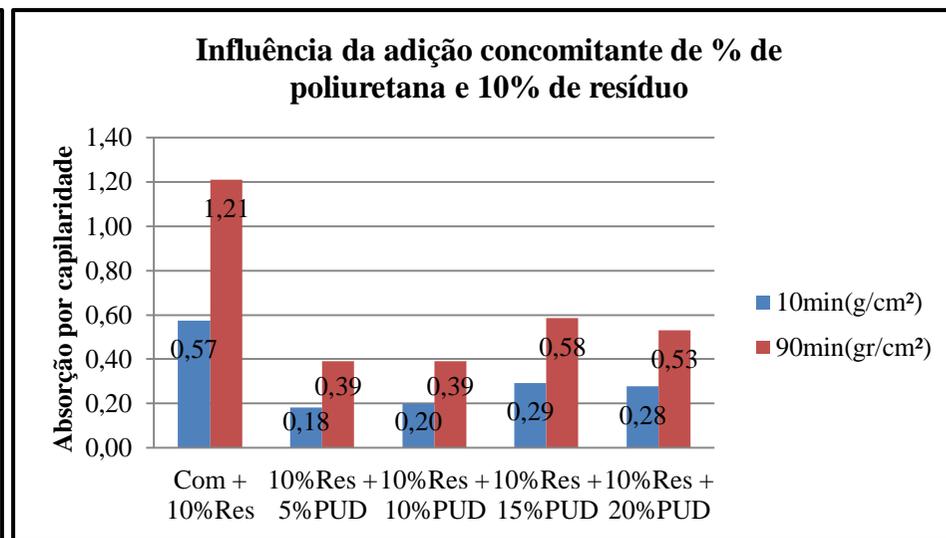
Quanto a absorção de água, pode-se verificar nas Figura 24 e Figura 25, que independente da quantidade de resíduo, tanto a absorção de água por capilaridade, quanto por imersão, reduzem significativamente após a adição do polímero. Para a adição de 5% de resíduo (Figura 24a), as reduções são para absorção capilar são da ordem de até 70% para 10 minutos e 77% para 90 minutos. Ao se aumentar a quantidade de resíduo, 10% (Figura 24b), 15% (Figura 24c) e 20% (Figura 24d) apresentaram comportamentos semelhantes, com reduções da ordem de até 40 a 70% para 10 minutos e 50% para 90 minutos.

Em termos de absorção por imersão (Figura 25), a adição resíduo/poliuretana também mostrou-se positiva, exceto para adições de 20% de resíduo, onde a proporção de poliuretana adicionada não parece ter sido suficiente para preencher todos os defeitos gerados no sistema. Todos os fenômenos já citados que podem estar influenciando o comportamento do sistema que tem sinergicamente resíduo e PUD, podem ser extrapolados em termos absorção de água.

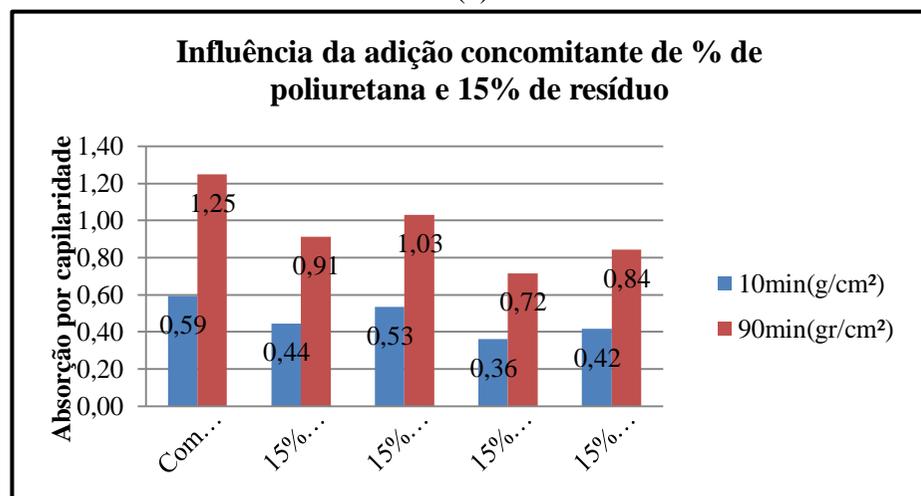
No entanto, com base nos resultados dos ensaios de absorção (Figura 24 e Figura 25), se pode inferir que a cinética e termodinâmica da formação da água confinada é prejudicada quando os vazios gerados no processo de conformação são distintos. A microestrutura é distinta quando se tem apenas gesso comercial e quando se adiciona resíduo, com granulometria fixa máxima em 300 $\mu$ m. Além disso, o fato do resíduo já estar dihidratado associado com a possibilidade da formação de água confinada de diferente espessura de camada durante a compactação pode estar alterando o funcionamento do sistema. Kanno (2009) afirma que quanto maior a espessura da nanocamada de água, a força de adesão será menor.



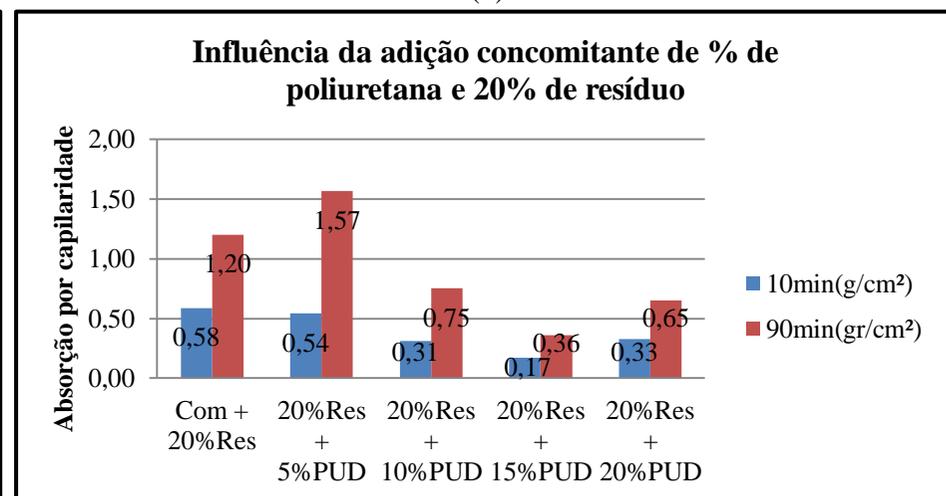
(a)



(b)

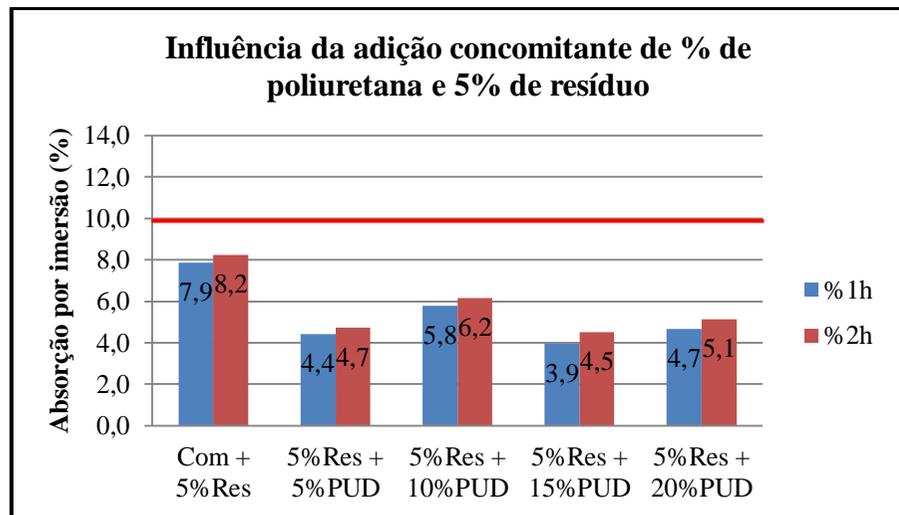


(c)

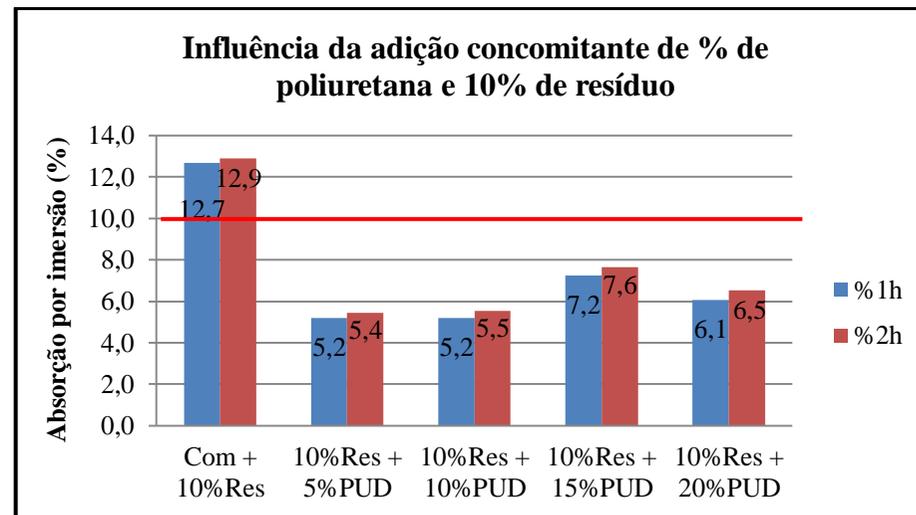


(d)

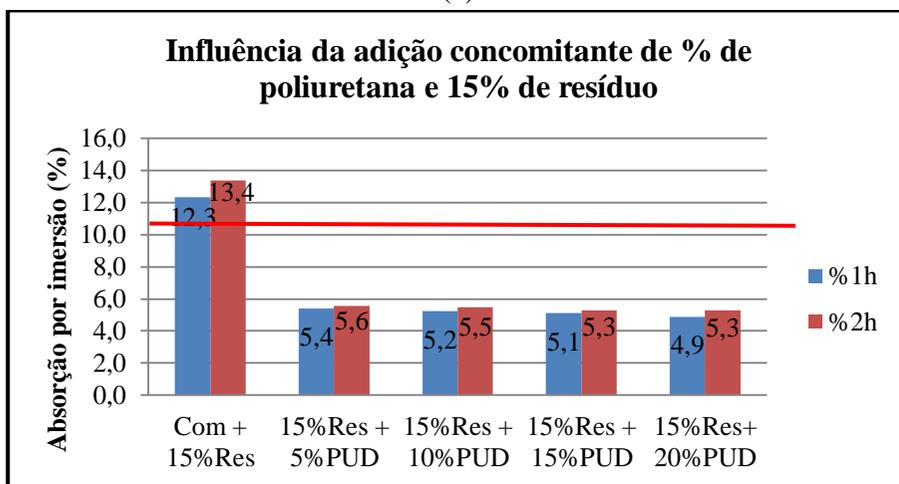
Figura 24 – Absorção por capilaridade água – Influência da adição concomitante de % de poliuretana e % de resíduos



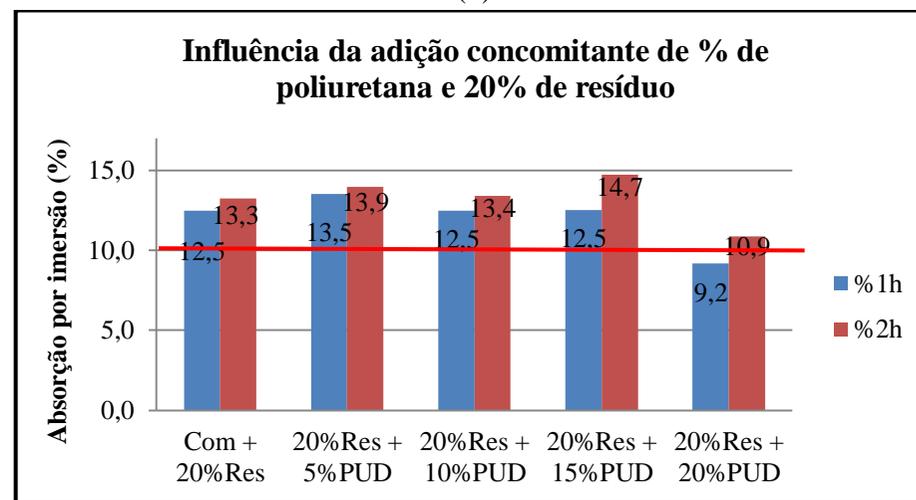
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 25 – Absorção por imersão – Influência da adição concomitante de % de poliuretana e % de resíduos

Com base nos dados de absorção de água limitados em 10%, segundo norma, e visando reutilizar o máximo de resíduo, desde que este ofereça desempenho mecânico e absorção adequados, optou-se por ajustar a quantidade de poliuretana para adequar a absorção de água por imersão a norma. Assim, estoudou-se a adição de 25 e 30% de PUD, uma vez que os valores de absorção total (Figura 25d) para a adição de 20% já estavam próximos ao desejado, associado ao fato de menores custos.

Os valores das absorções por imersão obtidas são apresentados na Figura 26. Observa-se que para a adição de 25% os valores, tanto para 1 hora quanto para 2 horas, estão abaixo do limite de 10% desejado.

Ao aumentar para 30% a quantidade de adição de PUD, vemos que há aumento novamente para esses parâmetros. Isto sugere que a presença de polímero pode estar influenciando negativamente na hidratação dos grãos HH de gesso, uma vez que pode estar retardando as reações de hidratação e a presença de água confinada devido ao polímero poder formar um filme sobre os grãos por adsorção.

No entanto, é difícil sem ensaios mais específicos e profundos prever se há a existência de películas de água quando da adição sinérgica de resíduo e polímero. Kanno (2009) acredita que a água confinada somente contribui para a adesão quando sua camada possui espessura menor que 3,0 nm entre os cristais de DH, o que pode estar sendo alterada pela presença do filme de poliuretana. Além disso, esta afirmação baseia-se na necessidade de certo grau de estruturação das moléculas dessas camadas para que a adesão por tais películas seja forte (KANNO, 2009), de forma que a presença do polímero pode estar desestruturando o meio.

Sujata et al. (1996), Su et al. (1991) e Lar bi e Bijen (1990), todos citados em Nascimento (2007), verificaram que o polímero látex em dispersão base estireno-acrilato (SA) retarda a hidratação da pasta de cimento e forma um filme sobre os grãos de cimento por adsorção. Mecanismo similar pode estar ocorrendo para o sistema de gesso, embora se acredite que esse comportamento seja mais expressivo em pastas de gesso com altas relações água-gesso (0,6 a 1,0) e método de conformação tradicional, sendo bem menos expressivo no método UCOS de conformação.

Esse aumento ratifica que há uma quantidade ótima de adição de PUD no sistema quando da adição de resíduo. Para a dosagem de 20% de resíduo, 25% de PUD caracterizam a dosagem ótima para essa quantidade de resíduo.

Conforme pode ser visto na Figura 27, a resistência a compressão para a dosagem ótima em termos de 20% de resíduo está em torno de 16 MPa, ainda o dobro do que preconizam a NBR 13.207 (1994) e a NBR 6136 (1994). As absorções por capilaridade ratificam os resultados, uma vez que foram as menores quando comparadas a toda a série de adição de PUD testada com 20% de resíduo constante (Figura 28).

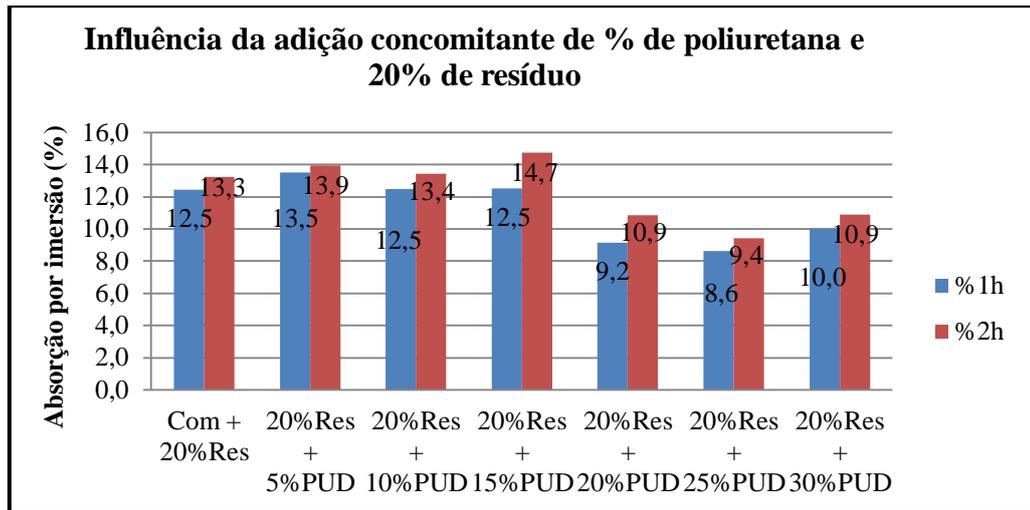


Figura 26 - Absorção por imersão - Influência da adição concomitante de % de poliuretana e 20% de resíduo.

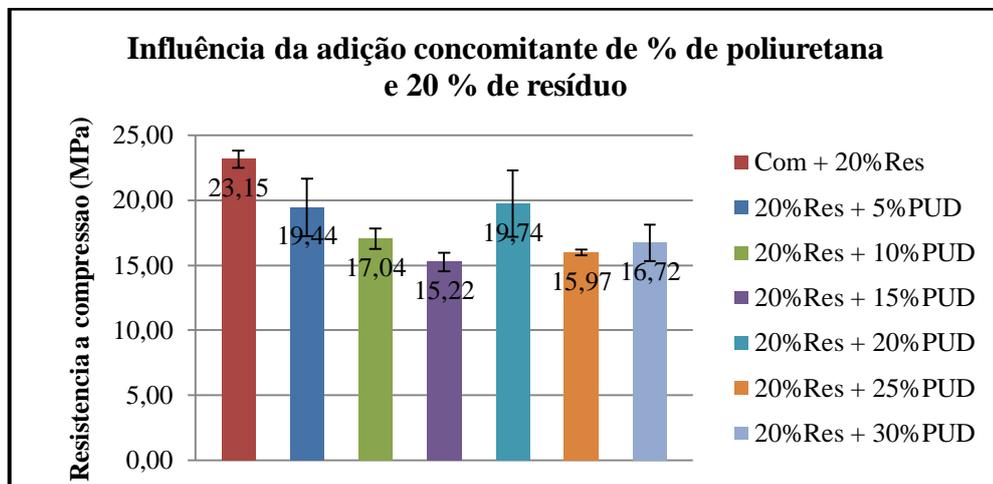


Figura 27 – Resistência a compressão - Influência da adição concomitante de % de poliuretana e 20 % de resíduo

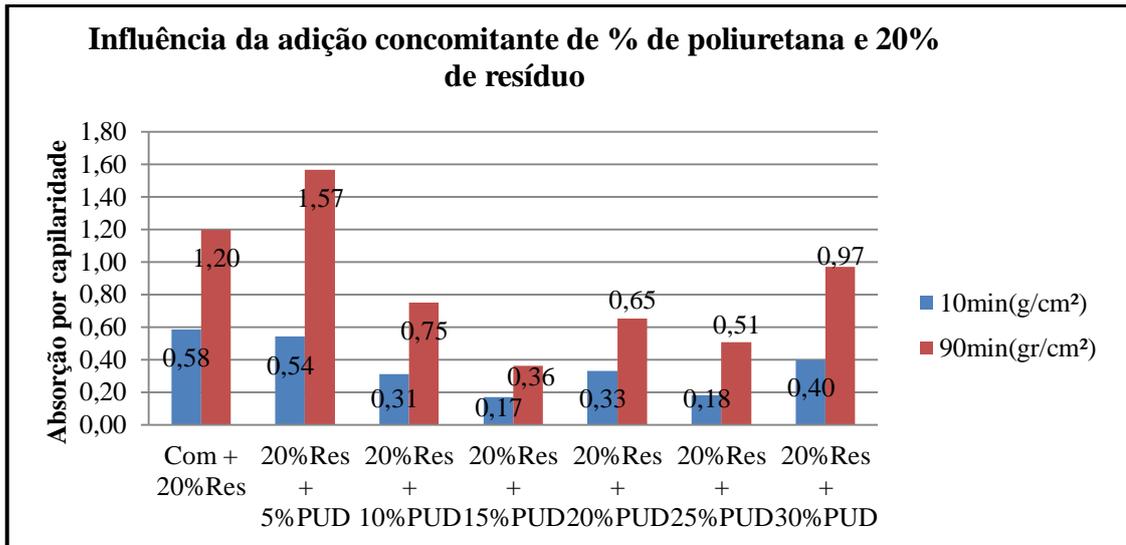


Figura 28 – Absorção por capilaridade - Influência da adição concomitante de % de poliuretana e 20% de resíduo

Visando confirmar alguns fenômenos que estavam obscuros, foram ainda realizados estudos extrapolados, maximizando a variável quantidade de resíduo para auxiliar no entendimento mecânico dos fenômenos.

A resistência decresceu quando se tentou a adição de 50% e 100% de resíduo (Figura 29). Visualmente, foi observado durante a moldagem que o aumento gradativo da quantidade de resíduo nos corpos-de-prova gerava sistemas menos densos (Figura 30), ou seja, com menor empacotamento dos grãos, bem como aumentava o tamanho dos corpos-de-prova, em termos de altura, após prensagem, para uma mesma massa.

Em alguns sistemas, após a adição de resíduo em maiores porcentagens, sobrou muito material após umidificação sem participar do preenchimento inicial do molde, indicando menor grau de compacidade já durante o lançamento no molde. Nesse sentido, Kanno (2009) diz que o comportamento dos corpos quanto à resistência mecânica tende a aumentar à medida que há um melhor empacotamento dos grãos (maior densidade). Para uma maior densidade, há uma maior quantidade de ligações e, conseqüentemente, maior resistência do material, acrescenta o autor

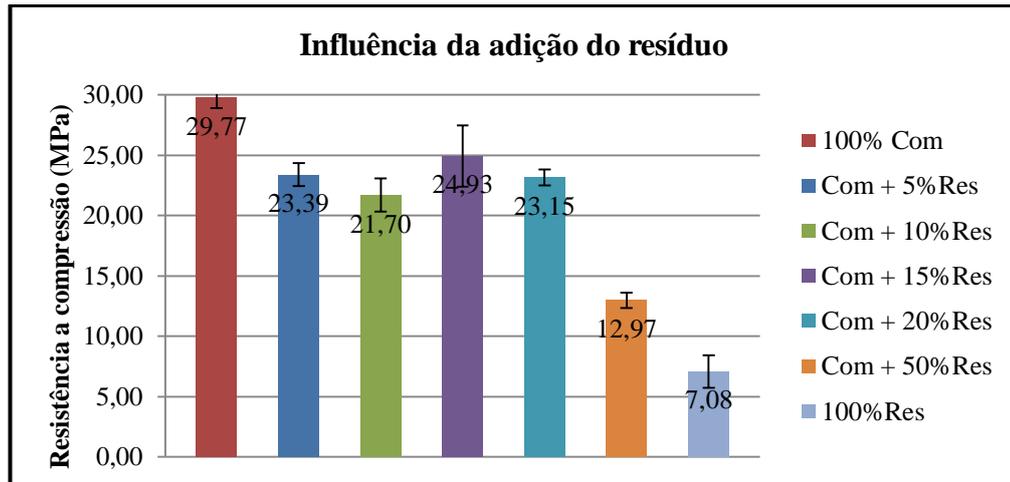


Figura 29 – Resistência a compressão – Influência da adição do resíduo (extrapolando valores).

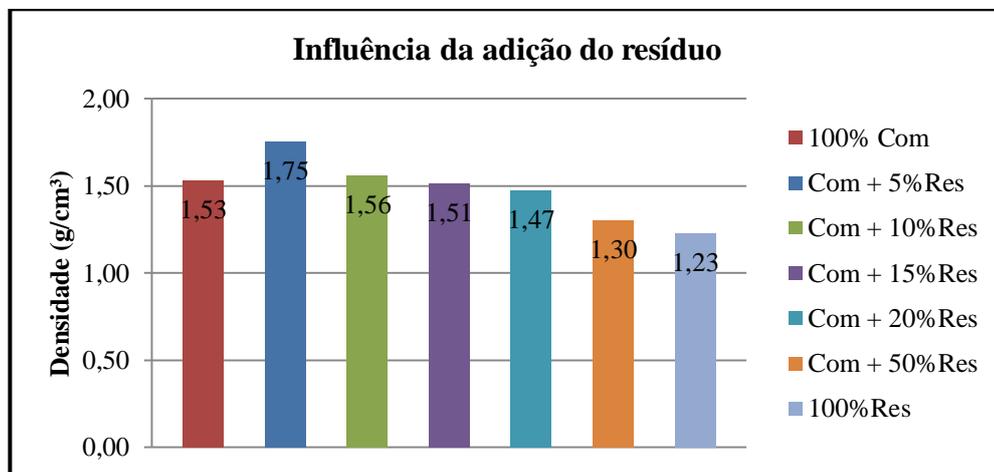


Figura 30 – Densidade – Influência da adição do resíduo.

Analisando de maneira geral todos os compósitos moldados, segundo Kanno (2009) os compósitos de gesso conformados pelo método UCOS apresentam como vantagem o fato de não desintegrarem na presença de água. De fato, após ciclos de envelhecimento, nenhum dos compósitos avaliados desintegrou, mesmo quando da presença do resíduo e do polímero, isolados ou sinergicamente.

Outra propriedade observada foi a tenacidade que, apesar de não terem sido determinados os valores da energia de fratura para cada um dos corpos-de-prova rotos, verificou-se, em função do tempo necessário para rompimento, que a adição da poliuretana também atuou positivamente no aumento da tenacificação do sistema.

Kanno (2009) diz que esse aumento na tenacidade do material se deve ao fato da técnica UCOS aumentar as ligações entre grãos, aumentando assim a energia necessária para formar uma superfície de ruptura. Com relação a presença de polímero no meio agir

positivamente para aumento da tenacidade é ratificada por Silva (2010), que citando Çolak (2006), obteve aumento na força a flexão com a adição de polímeros ao gesso, atribuindo a formação de polímeros dentro do gesso.

Kanno (2009) ainda acrescenta que outro fator que contribui positivamente para o aumento da tenacidade do sistema é o formato de agulhas dos cristais, como pôde ser comprovado pelo MEV que será posteriormente apresentado e discutido no presente trabalho, que dificulta a abertura da trinca. Isso ratifica o aspecto de aplicação do compósito do ponto de vista da fratura frágil associada ao material gesso.

Além disso, a presença do polímero pode estar aumentando o fenômeno de escorregamento entre os cristais DH, e conseqüentemente, a deformação plástica do sistema. Além disso, pode estar influenciando positivamente no início e propagação da trinca. Essa habilidade dos cristais em deslizar um sobre o outro na presença de umidade faz com que as ligações não sejam desfeitas durante o deslizamento e a energia necessária para a propagação de trinca no corpo seja maior devido à energia adicional gasta durante a “deformação plástica” (deslizamento dos cristais) (KANNO, 2009).

A dimensão da força de adesão entre os grãos também é um fator importante, além da microestrutura para o início de trincas (KANNO, 2009). Assim, devido ao polímero estar atuando positivamente na promoção de adesão polimérica, o aumento da tenacidade pode estar sendo incrementado. Nesse cenário, Rubio-Avalos (2005 apud KANNO, 2009) diz que o adesivo polimérico distribui as tensões mais uniformemente devido ao aumento da adesão intergranular, atuando como elemento de reforço e de absorção de energia.

Por outro lado, o fato do polímero poder estar influenciando no crescimento dos cristais, gerando cristais menores e menos alongados, pode estar atuando como uma parcela negativa a tenacidade do meio. Assim, o cristal de DH pode deixar de ter o formato de agulhas.

Assim, apesar da presença dos cristais de DH (resíduo) prejudicar o empacotamento do compósito, a presença do polímero promoveu uma melhor adesão do cristal DH à matriz de gesso proveniente da hidratação do gesso comercial HH, e desse modo disponibilizou uma resistência maior que àquela perdida devido à porosidade e população de defeitos provocados pela presença isolada do resíduo.

Conclui-se que se deve adequar a quantidade de polímeros a cada sistema, de forma para que o efeito tenacificador e de preenchimento dos poros e adesão seja mais acentuado e sobreponha o efeito da perda de tenacidade devido à menor densidade.

Embora toda uma gama de explicações no presente trabalho esteja sendo calcada no comportamento do sistema em termos da presença ou não de água confinada, Kanno (2009) ressalta:

...apesar de ter sido observada experimentalmente e tratada teoricamente por vários pesquisadores (TEIXEIRA et al., 1997; BELLINSENT-FUNEL et al., 1995; GIOVAMBATTISTA et al., 2005; STARR et al., 1999 apud KANNO, 2009), o completo entendimento das propriedades da água em camadas próximas às superfícies hidrofílicas, dita “água confinada”, continua sendo um desafio. (KANNO, 2009)

De posse da análise de todos estes dados, observa-se que para cada matriz gesso/resíduo de gesso, existe uma quantidade ótima de poliuretana. Para a varredura feita neste trabalho, consideramos que o compósito gesso comercial/20% de resíduo de gesso concomitantemente com 25% de polímero foi o que nos apresentou melhores resultados, porém é importante salientar que apesar dos compósitos com adição de resíduos apresentarem comportamento mecânico favorável, eles apresentam defeitos mais críticos: maior porosidade, maior quantidade de micro-trincas e heterogeneidade, comprovados pelos ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade. Com isso, a resistência mecânica e a confiabilidade do compósito são menores que o material puro.

Portanto, a escolha das características dos resíduos, a quantidade ótima de polímeros para cada sistema gesso comercial/resíduo e o processamento devem ser aprimorados para garantir a adesão ideal entre as partes constituintes do compósito sem incorporar defeitos no corpo. É importante ressaltar também que não deseja se empregar muita poliuretana nos compósitos, pois visando a aplicabilidade o compósito necessita ser atrativo, ou seja, ter um baixo valor agregado na sua composição.

#### **4.3 Avaliações microestruturais dos compósitos (MEV)**

As avaliações microscópicas do gesso conformado pelo método UCOS ratificam muitos dos mecanismos e fenômenos observados e previamente discutidos.

Os aspectos microestruturais para amostras conformadas apenas com gesso comercial, 20% de adição de resíduo, bem como 20% de adição de resíduo concomitante com 25% de poliuretana, encontram-se expostas nas Figura 31, Figura 32 e Figura 33, para aumentos de 100x, 500x, 2000x e 5000x, respectivamente. Ressalta-se que as nomenclaturas são para

amostras conformadas pelo método UCOS utilizando como material de partida em (a) apenas com gesso comercial, em (b) 20% de adição de resíduo e em (c) 20% de adição de resíduo e 25% de poliuretano.

Ao se observar as morfologias superficiais em aumento de 100x nas micrografias expostas na Figura 31, pode-se verificar aspecto de maior densidade do sistema quando utilizado como material de partida apenas com gesso comercial (Figura 31a). Ao se adicionar 20% de resíduo ao sistema (Figura 31b) é observado que a textura superficial sugere menor compactidade do sistema e maior porosidade. Essa morfologia pode ser melhor visualizada na Figura 32b, devido ao maior aumento (500x). Por fim, ao se adicionar o polímero, visualiza-se nas micrografias expostas nas Figura 31c e Figura 32c, um sistema menos poroso, sugerindo visualmente o preenchimento dos poros pelo polímero coalescido. Esse detalhe pode ser mais bem visualizado na micrografia exposta na Figura 32c, onde aspecto de massa polimérica tanto no bolsão de polímeros coalescido, como na superfície em análise como um todo pode ser evidenciada. Há um aspecto de polímeros uniformemente distribuído entre os cristais.

Essa formatação explica os fenômenos de aumento de absorção de água quando da adição de resíduo, bem como sua redução quando da introdução da poliuretano ao sistema. Além disso, os fenômenos de redução da densidade no estado endurecido também estão intimamente relacionados a esse aumento de porosidade quando da adição do resíduo.

Além do aspecto de menor porosidade, verifica-se na Figura 31c alguns pontos de acúmulo de polímero concentrado, expostos mais claramente na Figura 32c. A formação desses bolsões de polímero coalescido acumulado, apesar de estar contribuindo para a redução da absorção do sistema, pode estar sinalizando uma metodologia de mistura ineficiente, principalmente quando a quantidade de sólidos poliméricos em suspensão aumenta na solução aquosa polimérica.

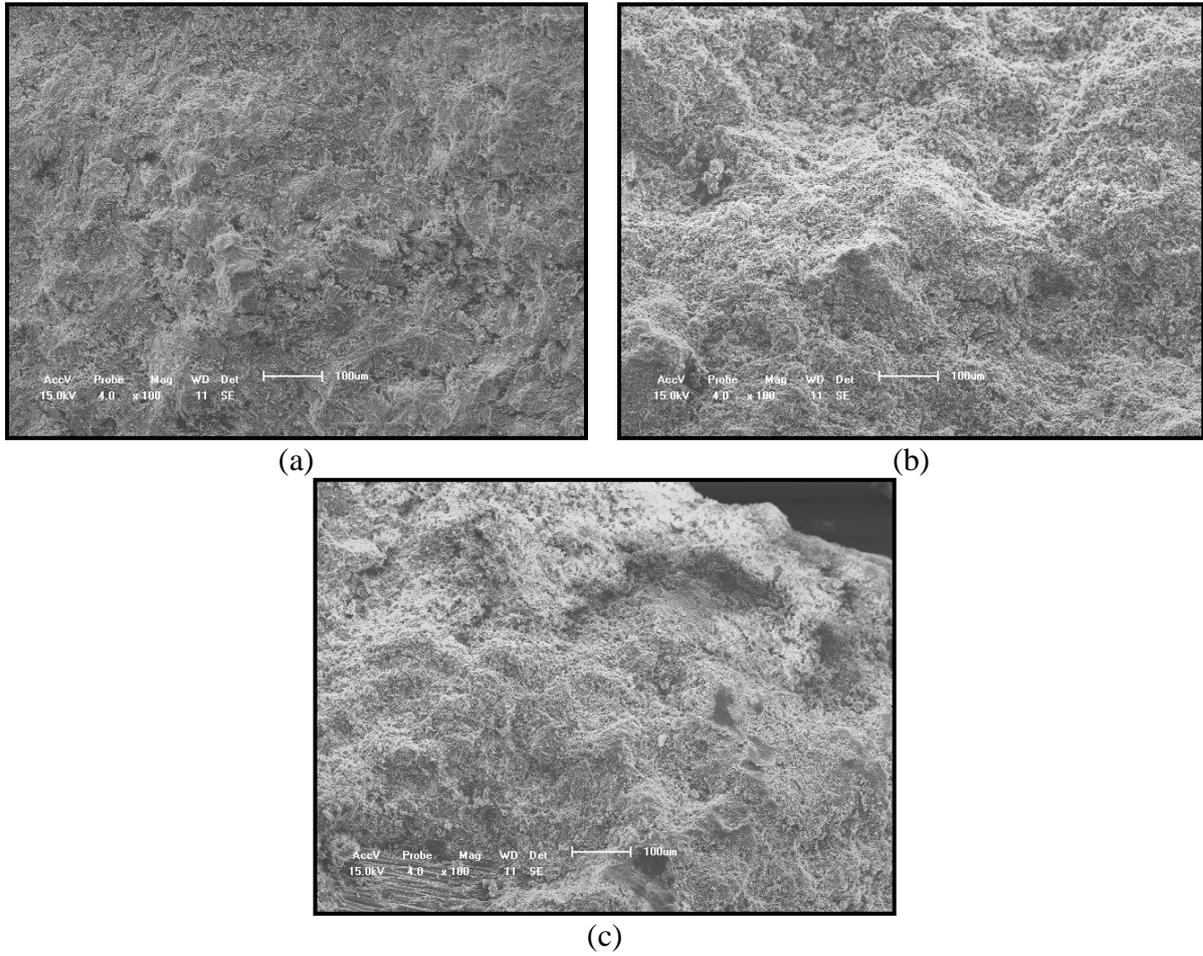
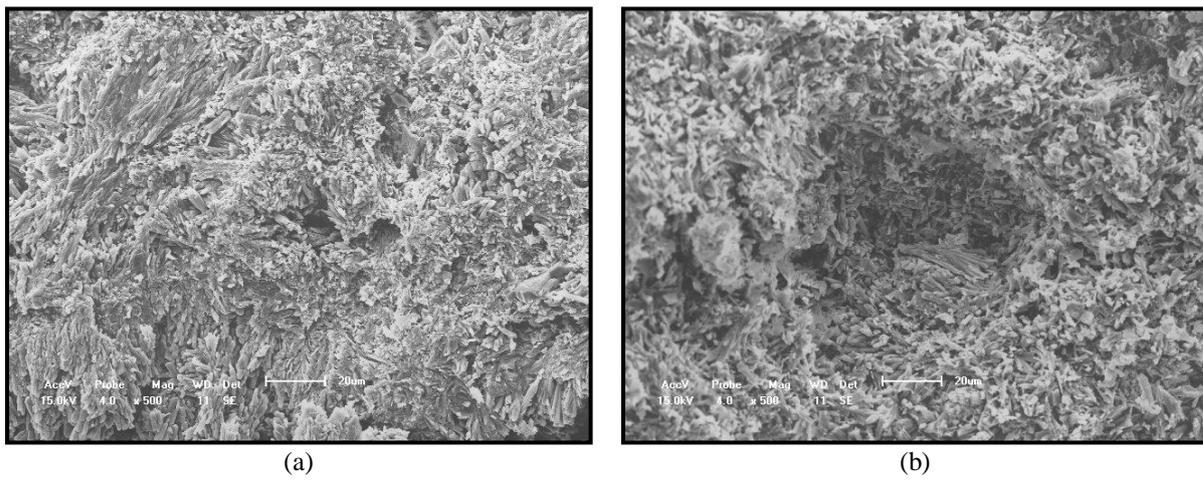
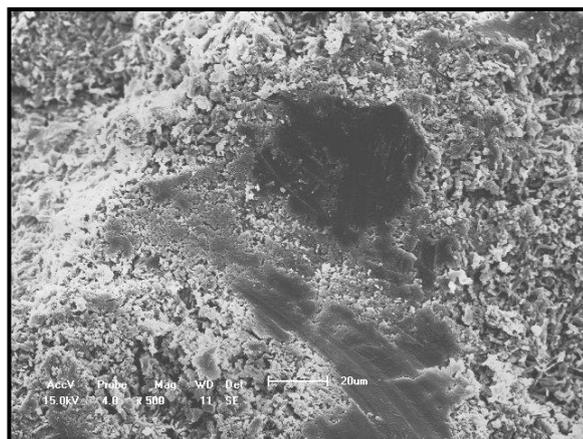


Figura 31. Microscopias eletrônicas de varredura em SE 100x para as amostras conformadas (a) apenas com gesso comercial, (b) 20% de adição de resíduo e (c) 20% de adição de resíduo e 25% de poliuretana.





(c)

Figura 32. Microscopias eletrônicas de varredura em SE 500x para as amostras conformadas (a) apenas com gesso comercial, (b) 20% de adição de resíduo e (c) 20% de adição de resíduo e 25% de poliuretana.

Ao se aumentar a ampliação, pode ser verificado na Figura 33a, onde apenas gesso comercial hemihidratado é utilizado como matéria-prima, que os cristais formados em forma de agulha são longos e com forte grau de entrelaçamento. Ao se comparar o aspecto morfológico do gesso comercial, exposto na Figura 34, com o aspecto final após conformação pelo método UCOS (Figura 33a), verifica-se que a morfologia é totalmente distinta, não se verificando presença de gesso hemihidratado, atestando a eficiência do método e parâmetros de conformação adotados.

Já quando adicionamos o resíduo de gesso dihidratado ao sistema, de aspecto inicialmente exposto na Figura 35, verifica-se que podem ser encontrados os cristais dihidratados inicialmente acrescido ao meio acompanhados dos cristais formados em função dos 80% em massa de gesso comercial hemihidratado adicionado ao meio. Esses cristais, que podem possuir até dimensões entre 2 e 5µm (Figura 35), provavelmente interferem na termodinâmica de crescimento dos cristais de gesso conformados pelo método UCOS. Em comparação com a Figura 33a, a micrografia exposta na Figura 33b apresenta cristais finais bem menores e visivelmente a presença dos cristais dihidratados do resíduo de gesso adicionado ao sistema.

Ainda verifica-se que na Figura 33a os cristais crescem em molhos orientados, o que confere maior compactidade, menor porosidade e maior resistência ao meio. Já na Figura 33b pode ser visualizado que não há um crescimento preferencial e as distâncias espaciais e volumétricas entre os cristais são maiores, de forma a elevar a porosidade e permeabilidade do sistema.

Com relação a essa discussão, ao se adicionar a poliuretana, verifica-se uma maior tendência de crescimento alinhamento dos cristais, embora cristais dihidratados de resíduo de gesso possam também ser observados. O alongamento dos cristais, nesse caso, pode ter relação com o efeito lubrificante do polímero ao redor das partículas de gesso durante a hidratação associado ao emprego de tensão por conformação.

A formação de cristais mais alongados ao se adicionar polímero concomitantemente com resíduo pode explica a tendência de a resistência a compressão ser maior do que quando adicionamos apenas resíduo, uma vez que a presença de cristais mais alongados está intimamente relacionada com a possibilidade de formação de água confinada, conforme explica Kanno (2009). Além disso, Kanno (2009) e Silva (2010) ressaltam a possibilidade de adesão mecânica por parte do polímeros, contribuindo para incremento da resistência final do sistema.

Nesse cenário, a redução de resistência a compressão com a adição de resíduos está relacionada não só ao fato da maior porosidade do meio, mas também como o tamanho reduzido dos cristais formados após hidratação.

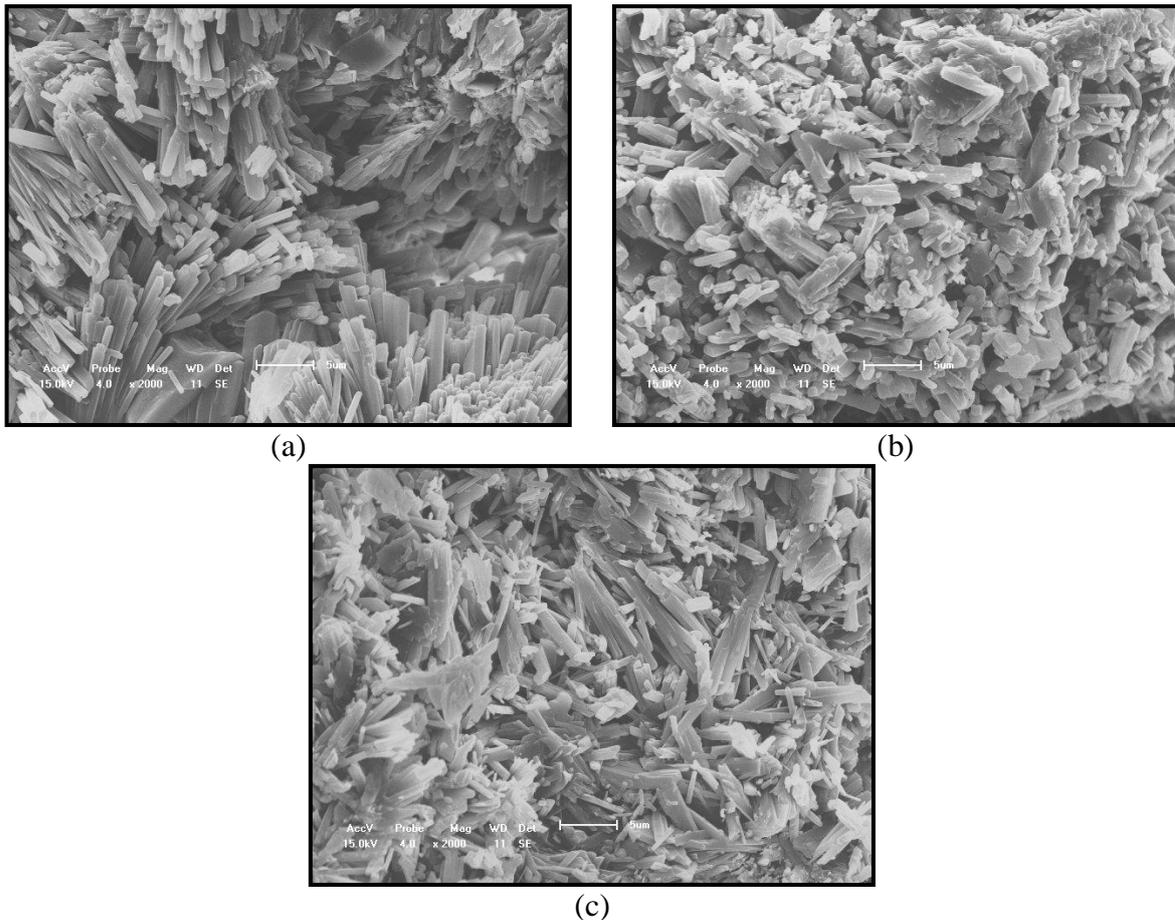


Figura 33. Microscopias eletrônicas de varredura em SE 2000x para as amostras conformadas (a) apenas com gesso comercial, (b) 20% de adição de resíduo e (c) 20% de adição de resíduo e 25% de poliuretana.

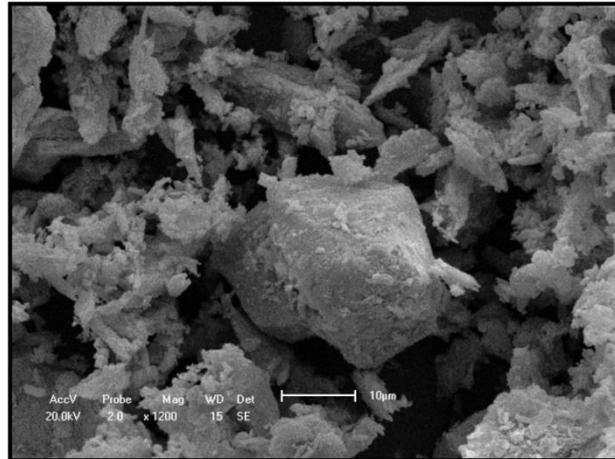


Figura 34. Microscopias eletrônicas de varredura do gesso comercial SE 1200x.

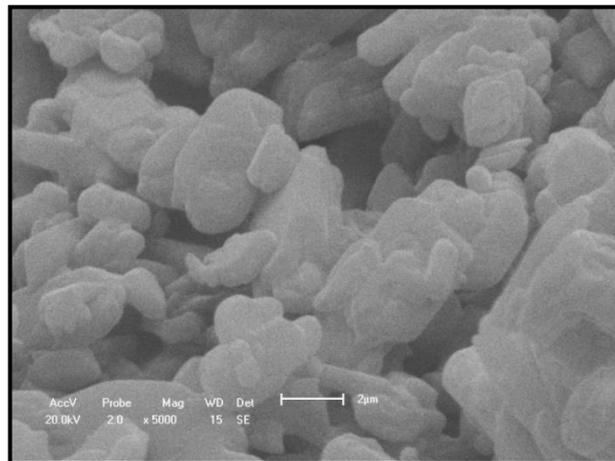


Figura 35. Microscopias eletrônicas de varredura do resíduo de gesso moído SE 5000x.

## 5 CONCLUSÕES

Em função de cada grupo de resultados e de acordo com os objetivos específicos da pesquisa, formularam-se as seguintes conclusões:

- Sobre a caracterização físico-quimicamente o resíduo de gesso da construção civil a ser utilizado:
  - i. O DRX indica que o resíduo é sulfato de cálcio hidratado.
  - ii. Não foram encontradas, em termos de análise química por FRX, variações significativas quando comparados o gesso comercial e o resíduo de gesso.
  - iii. Semelhança foi ratificada pelo fato de nenhum pico representativo de composto secundário formado por possíveis contaminantes do resíduo de gesso moído foi determinado por DRX.
  - iv. Composição foi ainda ratificada pela semelhança entre os espectros de infravermelho.
  - v. O gesso comercial e o resíduo de gesso, devido ao último ser dihidratado, apresentam morfologias de superfície distintas, detectadas pelo MEV.
  
- Desenvolver a dosagem dos compósitos de gesso/resíduo de gesso-poliuretana aquosa não-iônica
  - i. De uma forma geral, é possível a dosagem de compósitos com resíduos de gesso com 300µm de diâmetro máximo pelo método UCOS.
  - ii. Dentre os traços avaliados, visando alocar mais resíduo, a adição concomitante de 20% de resíduo e 25% de poliuretana apresenta propriedades adequadas para as aplicações desejadas.
  - iii. O sistema é capaz de absorver quantidades maiores de resíduos, desde que as absorções sejam devidamente corrigidas para um máximo de 10% e a resistência de 8,4 MPa resguardada.

- Avaliar resistência mecânica, densidade de massa no estado endurecido, porosidade por imersão total e por capilaridade dos compósitos de gesso moldados utilizando o processo de conformação proposto: UCOS (Umedecimento Compactação e Secagem)
  - i. De uma forma geral, foram obtidas resistências da ordem de 20MPa a 30MPa quando da adição de até 20% de resíduo.
  - ii. A adição do resíduo tende a reduzir a resistência ao mesmo tempo em que aumenta a absorção por imersão e por capilaridade. Com o aumento de resíduo, o material possui uma maior dificuldade de se empacotar, gerando corpos menos compactos e com uma maior população de defeitos.
  - iii. A adição da poliuretana ao gesso hemidratado comercial mantém o patamar de resistência até adições de 15%, tendendo a reduzi-la a partir de 20%.
  - iv. A poliuretana mostra-se eficiente na redução das absorções de água, seja com ou sem a adição de resíduos.
  - v. Existe um ponto ótimo de adição de poliuretana de acordo com a porcentagem de resíduo.
  
- Caracterizar microestruturalmente os compósitos:
  - i. As avaliações microestruturais por microscopia eletrônica de varredura foram importantes para auxiliar no entendimento mecanístico dos fenômenos.
  - ii. Em magnitudes de ampliação mais baixas, morfologias de superfície indicando como porosidade e compacidade do sistema auxiliam na explicação dos fenômenos envolvendo resistência a compressão e absorção de água.
  - iii. Em magnitudes de ampliação médias, pode-se visualizar a alocação da poliuretana, bem como ratificar questões de porosidade e compacidade do meio.
  - iv. Em magnitudes de ampliação mais altas, a morfologia de crescimento e tamanho dos cristais auxilia na explicação da possibilidade de água confinada no sistema.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Problemas operacionais e de infraestrutura, maximizados pelo curto tempo disponível para o desenvolvimento de um trabalho de conclusão de curso, aliados a necessidade de adequação de moldes metálicos, seja para trabalhar com dimensões de corpos padrão de 5x10cm, seja para realizar medidas extrapoladas para escala real em blocos, geraram demandas não solucionadas do presente TCC.

Além disso, alguns ensaios e caracterizações dos compósitos curados não foram realizados, ficando aqui, portanto, a sugestão de que tais ensaios e adequações sejam realizados posteriormente:

- Realizar medidas de energia de fratura e tenacidade;
- Realizar o ensaio de Distribuição de Tamanho de Grãos (DTG);
- Avaliar a relação ótima de resíduo de gesso – poliuretano, de forma a maximizar o primeiro e minimizar o segundo, embasados em custo-benefício dos sistemas;
- Efetuar medidas com corpos-de-prova de 5x10cm;
- Extrapolar medidas para blocos;
- Adequar o método UCOS metodologicamente, com mais precisão, a adição de resíduos dihidratados com granulometrias maiores e a ação do polímero.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13.207/1994 – Gesso para construção civil**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15259 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6136 - Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7173 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria**. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

AGUIAR, G.; **Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção**. São Paulo, 2004. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

ANTUNES, R.P.N.; **Estudo da influência da cal hidratada nas pastas de gesso**. São Paulo, 1999. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

BRADT, R. C. **Fracture mechanics of ceramics: Microstructure, Materials and Applications**. New York: Plenum Press, 1974. v. 2, p. 555-565.

CANUT, M.M.C.; **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. Belo Horizonte, 2006. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

CAVALCANTI, L.B.; **Determinação de condições operacionais adequadas na desidratação do minério de gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável**. Recife, 2006. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP).

ÇOLAK, A., **Physical and mechanical properties of polymer-plaster composites**. Materials letters, v. 60, p. 1977-1982, 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2002. **Resolução Conama nº 307**. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>> Acesso em 01/05/2011.

DAVIDGE, R. W. **Mechanical behavior of ceramics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1979. 165 p. ISBN 0521219159.

JOHN, V.M.; CINCOTTO.M.A. **Alternativas de gestão dos resíduos de gesso**. Disponível em:<<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Alternativas%20para%20gest%C3%A3o%20de%20residuos%20de%20gesso%20v2.pdf>> Acesso em 01/05/2011.

KANNO, W.M.; **Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho**. São Carlos, 2009. Dissertação de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interinidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo.

MONÇÃO JÚNIOR, A.R.; **Otimização das condições experimentais na desidratação da gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável**. Recife, 2008. Dissertação de Mestrado apresentada ao Mestrado de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP).

MOURA, F. S., **Bloco de Gesso a Construção Civil**. São Cristovão, 2009. Dissertação de Graduação apresentada à Universidade Federal de Sergipe (UFSE).

NASCIMENTO, J.H.O.; **Adição de Poliuretana não iônica a cimento Portland especial para Cimentação de Poços de Petróleo**. Natal, 2006. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

PIRES SOBRINHO, C.W.A.; **Vedações verticais em alvenaria de blocos de gesso para Estruturas aporricadas de concreto armado-projeto, Execução e desempenho**. Documento Técnico 001-09/LTH/ITEP, Recife, 2009.

RIBEIRO, A.S.; **Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da construção civil**. João Pessoa, 2006. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

ROSSIGNOLO, J.A., **Avaliação da porosidade e do teor de CH da pasta de cimento portland com sílica ativa e látex SBR**, Revista Matéria, v. 10, p.437-422, 2005

RUBIO-AVALOS, J. C. et al;. **Flexural behavior and microstructure analysis of a gypsum-SBR composite material.** Materials Letters, v. 59, n. 2-3 ,p. 230-233, 2005.

SANTOS, R.D.; **Estudo térmico e de materiais de um composto a base de gesso e EPS para construção de casas populares.** Natal, 2008. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SILVA, M.G.S.; **Desenvolvimento de compósitos à base de gesso e pó de fibras de coco.** São Cristóvão, 2010. Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Sergipe.

SILVA, R.M.S.; **Estudo de alvenarias e revestimentos de gesso reciclado destinado à habitação popular.** Goiânia, 2008. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

SINDUSGESSO (Brasil) (Org.) - **SINDUSGESSO – Sindicato das Indústrias de Extração e Beneficiamento de Gipsita, Calcário, Derivados de Gesso e de Minerais Não-Metálicos do estado de Pernambuco.** Disponível em: <[www.sindusgesso.org.br](http://www.sindusgesso.org.br)>. Acesso em: 01/05/2011.

SINGH , J. P. **Effect of flaws on the fracture behavior of structural ceramics: a review.** *Advanced Ceramic Materials*, v. 3, n. 1, p. 18-27, 1988.