

ÁREA TEMÁTICA: Gestão Ambiental

## VALORIZAÇÃO DE LETA COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A FABRICAÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA

Maximiliano Bauer<sup>1</sup> ([eng.bauer@outlook.com](mailto:eng.bauer@outlook.com)), Elenize Ferreira Maciel<sup>2</sup> ([elenizefm@gmail.com](mailto:elenizefm@gmail.com)),  
Regina Célia Espinosa Modolo<sup>1</sup> ([reginaem@unisin.br](mailto:reginaem@unisin.br)), Feliciane Andrade Brehm<sup>1</sup>  
([felicianeb@unisin.br](mailto:felicianeb@unisin.br))

<sup>1</sup> Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Escola Politécnica – UNISINOS, 93022-750, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 90035-190, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

### RESUMO

Com o aumento do consumo de recursos não renováveis, formas de reutilização e reciclagem têm sido estudadas em busca de alternativas para a gestão de resíduos sólidos industriais com potencial de uso como matéria-prima na produção de novos materiais. Neste contexto este estudo tem como objetivo desenvolver um método, que permita a fabricação de argila expandida a partir da substituição de matéria-prima convencional (argila) por Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) e resíduo sólido da indústria de celulose (Lama de Carbonato de Cálcio - LCC). A metodologia envolveu as etapas de caracterização dos resíduos e da argila; definição formulações contendo diferentes percentuais de substituição (em massa) de argila por LETA com e sem cobertura de LCC e definição das condições de trabalho para a produção da argila expandida. Foram analisadas 3 condições de trabalho para o desenvolvimento da expansão do material, com rampa de aquecimento e patamares pré-definidos, assim como a temperatura máxima de operação. Os resultados obtidos mostraram que é possível substituir a argila em até 20% por LETA usando as mesmas condições de operação (rampa: 20°C/min; temperatura máxima: 1200°C em um ciclo total de 6 horas) para produzir um agregado leve com diâmetro, massa e forma semelhantes ao do agregado leve de referência.

**Palavras-chave:** Argila expandida; Lodo de estação de tratamento de água; Lama de carbonato de cálcio.

## VALUATION OF SWTP AS RAW MATERIAL FOR THE MANUFACTURE OF EXPANDED CLAY

### ABSTRACT

With the increase in the consumption of non-renewable resources, ways of reusing and recycling have been studied in search of alternatives for the management of solid waste with potential for use as raw material in the production of new materials. In this context, this study aims to develop a method, which allows the manufacture of expanded clay from the replacement of conventional raw material (clay) with waste of Sludge from Water Treatment Plant (SWTP) and inorganic waste from the cellulose industry (Calcium Carbonate Mud - CCM). For that, analyzes of the characterization of waste and clay were carried out. After that formulations were defined containing different percentages of substitution (in mass) of clay by SWTP with and without CCM coverage. Three operating conditions were analyzed for the development of material expansion, with heating ramp and controlled levels, as well as the maximum operating temperature. The results obtained showed that it is possible to replace the clay by up to 20% with SWTP using the same operating conditions (ramp: 20°C/min; maximum temperature: 1200°C in a total cycle of 6 hours) to produce a light aggregate with diameter, mass and shape similar to the light reference aggregate.

**Keywords:** Expanded clay; Sludge from water treatment plant; Calcium carbonate mud.

## 1. INTRODUÇÃO

Entre as várias argilas existentes, apenas algumas apresentam propriedades adequadas para serem aplicadas na fabricação de argila expandida, material de construção usado como agregado leve. Um exemplo disso é a necessidade de o material conter teores de compostos com potencial fundente adequados e limites químicos, para que seja possível a formação de uma fase vítrea, não ocasionando escapamento dos gases e ocorrendo a expansão da partícula de argila (MORAIVA *et al.*, 2006; MAYCÁ; CREMONINI; RECENA, 2008). Uma das grandes vantagens que a argila expandida proporciona é a variedade de aplicações que ela pode ser submetida. Podendo ser aplicada na construção civil no preparo de concreto leve, fabricação de blocos, lajes de concreto, pisos, enchimentos leves, lavanderias industriais, jardinagem, horticultura e paisagismo.

Devido ao impacto ambiental negativo da extração de recursos naturais não renováveis, a reciclagem tem sido uma das alternativas de gestão para resíduos sólidos com potencial de aplicação como matéria-prima na produção de novos materiais (SILVA, 2014). A Política Nacional de Resíduos Sólidos a partir da Lei 12.305 (BRASIL, 2010) define que gerenciamento de resíduos sólidos significa submeter os resíduos a todos os processos e estágios, desde a coleta até o setor de reciclagem, de forma a garantir um destino adequado e minimizando os impactos ambientais.

A área que contempla a fabricação de agregados leves possui altos índices de incorporação de resíduos sólidos industriais (SILVA, 2007). Sendo que a produção de agregados leves utilizando resíduos sólidos industriais pode gerar uma redução significativa no consumo e no custo da aquisição de matérias-primas, beneficiando tanto a indústria geradora do resíduo como a receptora, além de reduzir impactos ambientais negativos.

Lodos e lamas de processos industriais, lodos gerados em operações de drenagem, resíduos de madeira, papel e mineração, são alguns dos materiais já estudados como resíduos alternativos para a fabricação de agregado leve de argila expandida (PINTO, 2005). Presume-se que apenas no Brasil, sejam gerados 2.000 t/dia de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA), muitas vezes dispostos nos cursos d'água, sem qualquer tipo de tratamento (CORDEIRO, 1999; WOLFF, SCHWABE; CONCEIÇÃO, 2015). O LETA pode ser um substituto potencial para a argila, pois suas composições químicas são muito semelhantes (HEGAZY *et al.*, 2012). A Lama de Carbonato de Cálcio (LCC) é um resíduo sólido gerado em indústria de celulose, composto basicamente por  $\text{CaCO}_3$  (MODOLO *et al.*, 2013).

Contudo, tendo em conta a necessidade de minimizar o consumo de recursos naturais não renováveis e ao mesmo tempo, mitigar impactos ambientais provenientes da disposição inadequada de resíduos, este estudo propõe o uso de LETA e LC como matérias primas para a produção de argila expandida.

## 2. OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo geral, desenvolver um método que permita a fabricação de argila expandida a partir da substituição de matéria-prima convencional por resíduos de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) e resíduo inorgânico da indústria de celulose - Lama de Carbonato de Cálcio (LCC).

## 3. METODOLOGIA

As etapas que compuseram o programa experimental se dividem em: coleta do LETA e LCC, caracterização do LETA e LCC (tratamento, secagem e cominuição), preparação dos corpos de prova (umidificação, moldagem e cobertura), sinterização e arrefecimento dos corpos de prova.

Os ensaios realizados para a caracterização dos resíduos utilizados podem ser visualizados na Tabela 1, formulações e preparação dos corpos de prova, além de sua caracterização.

**Tabela 1.** Ensaios aplicados para a caracterização dos materiais

Material	Origem	Ensaio	Unidade	Norma/equipamento
Argila	Empresa de São Paulo/SP	Sedimentação	-	NBR 6457 (ABNT, 1986)
		Composição granulométrica	%	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
		Teor de umidade	%	Determinadora de umidade - Bel
		Superfície específica (BET)	g/cm <sup>2</sup>	Micromeritics, TriStar II Plus
		pH	Unidades de pH	pHmetro Digimed - DM - 20
		Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	Picnômetro a gás hélio, Accupyc II 1340 - Micromeritics
		Perda ao fogo	%	CEMP 120 (ABIFA, 2015)
		Fluorescência de raios X (qualitativa)	%	EDX 720 HS - Shimadzu
LETA	Empresa de Gravataí/RS	Difração de raios X (DRX)	%	Difratômetro Siemens D5000
		Granulometria por difração a laser	µm	Analizador de partículas - S3500, Microtrac
		Teor de umidade	%	Determinadora de umidade - Bel
		Superfície específica (BET)	g/cm <sup>2</sup>	Micromeritics, TriStar II Plus
		pH	Unidades de pH	pHmetro Digimed - DM - 20
		Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	Picnômetro a gás hélio, Accupyc II 1340 - Micromeritics
		Perda ao fogo	%	CEMP 120 (ABIFA, 2015)
LCC	Empresa de Guaíba/RS	Fluorescência de raios X (qualitativa)	%	EDX 720 HS - Shimadzu
		Composição granulométrica	%	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
		Teor de umidade	%	Determinadora de umidade - Bel
		Superfície específica (BET)	g/cm <sup>2</sup>	Micromeritics, TriStar II Plus
		pH	Unidades de pH	pHmetro Tecnal - TEC - 5
		Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	Picnômetro a gás hélio, Accupyc II 1340 - Micromeritics
		Perda ao fogo	%	CEMP 120 (ABIFA, 2015)

Fonte: Elaborada pelos autores.

A preparação da matéria-prima (argila), para uso nas formulações do agregado leve, foi realizada através de secagem em estufa a 105°C por 12 horas, moagem em moinho de bolas para homogeneização por 30 minutos e passada em peneira de malha 0,075 mm. Os resíduos que foram incorporados possuem grande quantidade de matéria orgânica, e esta libera gases durante a queima do material à temperatura de fusão. A LCC foi usada em algumas formulações como cobertura, pois melhora a impermeabilização do agregado (camada vítrea). A camada vítrea formada durante a sinterização é responsável pelo aprisionamento dos gases gerados pelos compostos da argila, que se assegurados no interior do agregado, garantem a expansão.

Todas as formulações desenvolvidas foram preparadas manualmente. A água foi adicionada até obtenção de um material com trabalhabilidade para a produção de esferas de tamanho padronizado (1,2 cm de diâmetro). A massa das esferas (corpos de prova) apresenta-se entre 2,5 e 2,8 g em base úmida.

### 3.1 Testes de expansividade

A metodologia desenvolvida nesta etapa do trabalho baseia-se no método usado por uma empresa localizada em São Paulo/SP (fornecedora da argila). Os testes de expansividade tiveram rampas de aquecimento e patamares controlados até atingirem a temperatura 1200°C, conforme apresentados na Tabela 2.

Foram realizados testes de redução de temperatura máxima (entre 1000 a 1150°C), rampas de aquecimento e tempo de permanência do material na mufla diferenciados, cujo objetivo foi encontrar as condições de trabalho mais eficientes para o processo de expansividade com o menor consumo de energia.

As formulações de referência (REF) e com resíduos (F) que não contêm adição de água evidenciam a utilização de LETA em seu estado natural, de modo a aproveitar a umidade intrínseca do resíduo. Os métodos testados, número de corpos de prova (CP) e respectivas condições de operação para a realização dos testes de expansão são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Testes de expansibilidade

(continua)

Testes			% em massa dos componentes						Sinterização
	Nº de CP	Formulação	Argila	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	LETA	LCC	Água	
Teste 1	6	REF	72	0	0	0	CP04 a CP06	28	TA: 20°C/min até 1100°C; Tmáx: 1100°C até completar ciclo de 6h
Teste 2	2	REF	73	0	0	0	Sim	27	TA: 20°C/min; P1: 30 min a 525°C; TA: 20°C/min; P2: 1h a 900°C; TA: 20°C/min; P3: 30 min a 1100°C
	2	F01	70	0	0	30	Sim	0	
	2	F02	50	0	0	50	Sim	0	
Teste 3	2	REF	80	0	0	0	Sim	20	TA: 15°C/min; P1: 30 min a 525°C; TA: 15°C/min; P2: 1h a 900°C; TA: 15°C/min; P3: 30 min a 1100°C
	2	F01	70	3	1	0	Não	26	
	2	F02	65	2	3	0	Não	30	
Teste 4	2	F01	68	4	1	0	Não	27	TA: 20°C/min; P1: 30 min a 525°C; TA: 20°C/min; P2: 1h a 900°C; TA: 20°C/min; P3: 30 min a 1100°C
	2	F02	69	3	3	0	Não	25	
Teste 5	2	REF	80	0	0	0	Não	20	TA: 20°C/min até 1200°C Tmáx: 1200°C até completar ciclo de 6h
	2	F01	65,4	5	5	0	Não	24,6	
	2	F02	67	3	2	0	Não	28	
Teste 6	2	REF	75	0	0	0	Não	25	TA: 20°C/min até 1000°C Tmáx: 1000°C até completar ciclo de 6h
	2	F01	70	5	5	0	Não	20	
	2	F02	73,8	3	2	0	Não	21,2	
Teste 7	2	REF	73,2	0	0	0	CP02	26,8	TA: 20°C/min até 1150°C Tmáx: 1150°C até completar ciclo de 6h
	2	F01	79,6	0	0	20,4	CP04	0	
	2	F02	75,35	0	0	24,65	CP06	0	
Teste 8	2	REF	80	0	0	0	CP02	20	TA: 20°C/min até 1200°C Tmáx: 1200°C até completar ciclo de 6h
	2	F01	76	0	0	4	CP04	20	
	2	F02	72	0	0	8	CP06	20	

(conclusão)

<b>Teste 9</b>	2	F01	65	0	0	15	Sim	20	TA: 20°/min até 1200°C Tmáx: 1200° até completar ciclo de 6h
	2	F02	60	0	0	20	Sim	20	
<b>Teste 10</b>	1	F01	65	0	0	15	Sim	20	TA: 20°/min até 1200°C Tmáx: 1200° até completar ciclo de 6h
	1	F02	60	0	0	20	Sim	20	

TA: Taxa de Aquecimento; P: Patamar; Tmáx: Temperatura máxima.

Fonte: Elaborada pelos autores.

No Teste 1 foram verificadas, exclusivamente, amostras de referência (REF), contendo argila, água, e cobertura com LCC.

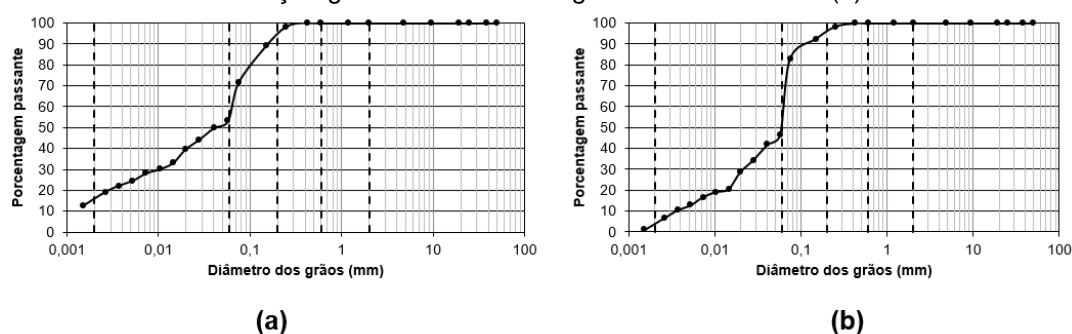
Os corpos de prova após moldagem foram secos ao ar em temperatura ambiente ( $\pm 23^{\circ}\text{C}$ ) por 12 horas. A seguir foram colocados em estufa por aproximadamente 2 horas a uma temperatura de  $105^{\circ}\text{C}$ . O arrefecimento dos corpos de prova foram foi efetuado imediatamente após o processo de sinterização, de modo a promover um choque térmico nos mesmos. Com o término do ciclo, a mufla foi aberta e os recipientes com as amostras foram retirados e postos em um local apropriado para resfriamento. Em seguida, foram armazenados em um dessecador, para posterior caracterização.

### 3.2 Caracterização dos materiais em estudo

#### 3.2.1 Sedimentação

Na Figura 1, pode-se observar as curvas de distribuição granulométrica das amostras de argila com defloculante(a) e sem defloculante(b).

Figura 1. Curva de distribuição granulométrica da argila com defloculante (a) e sem defloculante (b)



Fonte: Elaborada pelos autores.

Na Figura 1 verifica-se que cerca de 45% do material apresenta o tamanho de partícula inferior a 75 µm. De acordo com Bortoluzzi e Poletto (2013), os tamanhos e formas das partículas sólidas de solos e sedimentos podem ser associados a figuras geométricas simples, como esferas, no caso do quartzo. Logo, as partículas deste material podem apresentar forma esférica, uma vez que a argila possui propriedade quartzosa.

Na Tabela 3, pode-se visualizar os resultados obtidos no ensaio de granulometria por via laser do LCC que apresenta tamanho médio das partículas de 29,06 µm.

Tabela 3. Composição granulométrica do LCC

Amostra	Diâmetro equivalente			
	D10 µm	D50 µm	D90 µm	Dmédio µm
<b>LCC</b>	9,86	24,6	63,73	29,06

D10: diâmetro equivalente a 10% da massa acumulada; D50: diâmetro equivalente a 50% da massa acumulada; D90: diâmetro equivalente a 90% da massa acumulada; Dmédio: diâmetro médio.

Fonte: Adaptado de Metz (2016).

#### 3.2.2 Teor de umidade

Na Tabela 4 pode-se observar o teor de umidade apresentado pela argila, LETA e LCC.

**Tabela 4.** Teor de umidade dos materiais do estudo

<b>Materiais</b>	<b>Teor de umidade (%)</b>
Argila	11,33
LETA	76,30
LCC	1,63

Fonte: Elaborada pelos autores.

O teor de umidade apresentado pela argila, LETA e LCC foi 11,33%, 76,3% e 1,63%, respectivamente. É relevante considerar que o teor de umidade de um resíduo ou material pode influenciar nos custos de transporte. No entanto, especificamente na produção de agregado leve, havendo a necessidade de uso de água para tornar a mistura homogênea e ao mesmo tempo conferir maior facilidade de moldagem, a água presente no resíduo poderia ser aproveitada.

### 3.2.3 ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA (BET)

Segundo Reinert e Reichert (2006), quanto menor for a partícula de argila, maior será sua área superficial específica, que pode ser proporcional à sua capacidade de adsorção de água e outras substâncias. A partir desta afirmação pode-se afirmar que há coerência nos resultados obtidos, pois se verifica que a LCC apresenta tamanhos de partículas maiores, uma vez que a área superficial encontrada foi de 1,26 m<sup>2</sup>/g, enquanto que superfície específica da argila e do LETA foi de 27,61 m<sup>2</sup>/g e 72,38 m<sup>2</sup>/g, respectivamente. É importante ressaltar que tanto o tamanho de partículas como a superfície específica elevada influenciam na quantidade de água utilizada, quando se trabalha na produção de materiais de construção.

### 3.2.4 pH

A partir dos resultados foi verificado que o pH da argila é de 11,66 a uma temperatura de 25°C, ou seja, apresenta característica básica. Além disso, segundo Pereira (2006), este parâmetro pode ser um grande determinante na identificação da expansibilidade de um material, uma vez que materiais não expansivos possuem pH < 5. Logo, o pH desta argila se encontra nos parâmetros de materiais propícios à expansão. Analisando os resultados das amostras de LCC e do LETA, pode-se observar que ambos possuem também características básicas, com pH de 8,22 e de 5,60 a 25°C, respectivamente.

### 3.2.5 Fluorescência de raios X (FRX)

Na Tabela 5 pode-se visualizar a composição química da argila e do LETA.

**Tabela 5.** Fluorescência de raios X da argila e LETA

	<b>Argila</b>	<b>Lodo ETA</b>
Elementos majoritários (>50%)	SiO <sub>2</sub>	-
Menor quantidade (5% < x < 50%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe; Si; Al
Elementos Traços (<5%)	Na <sub>2</sub> O; MgO; P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; SO <sub>3</sub> ; K <sub>2</sub> O; CaO; TiO <sub>2</sub> ; MnO	Ti; Si; Ca; Ba; Tm; P; Mn; Br; Cr; Zr; Zn; Sr

Fonte: Elaborada pelos autores.

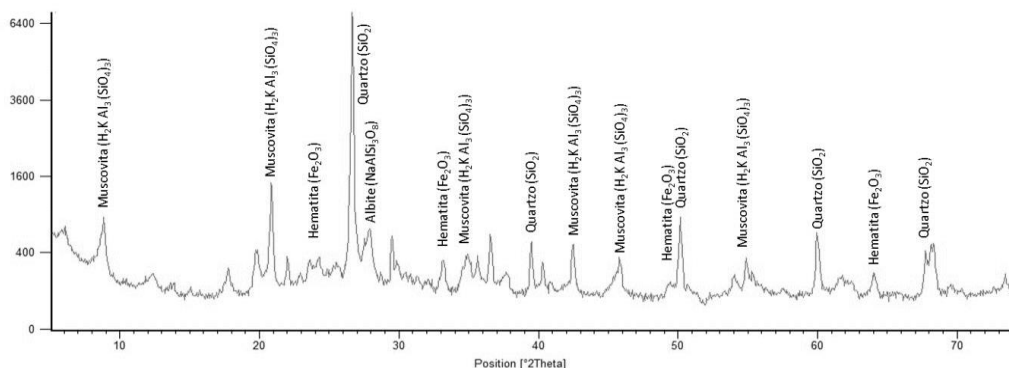
Os resultados obtidos no ensaio de FRX da argila podem ser comparados com os resultados apresentados por Moravia *et al.* (2006). Os autores descrevem composições e limites químicos da matéria-prima de argila, originária do recôncavo baiano para ser utilizada na fabricação de argila expandida. A argila analisada neste estudo apresenta características químicas e mineralógicas muito semelhantes às da argila analisada no estudo de Moravia *et al.* (2006). Segundo os mesmos autores, para o material fundir adequadamente, alguns limites de determinados compostos químicos, não devem ser ultrapassados, como a argila ter em torno de 50 a 65% de SiO<sub>2</sub>. Com

relação ao LETA, foram registrados resultados semelhantes aos de Wolff, Schwabe e Conceição (2015) em estudo de utilização de LETA em cerâmica vermelha.

### 3.2.6 Difração de raios X (DRX)

Na Figura 2 pode-se visualizar o difratograma da argila.

**Figura 2.** Difratograma da argila



Fonte: Elaborada pelos autores.

De acordo com Modolo *et al.* (2014) e Metz (2016), a lama gerada no processo de caustificação da indústria de celulose, é basicamente composta por  $\text{CaCO}_3$  e ainda apresenta vestígios de algumas impurezas de origem quartzosa ou outros carbonatos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Mg}(\text{CO})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ).

O difratograma apresentado na Figura 2 ilustra picos de elevada e reduzida intensidade, além de sobreposição de picos entre as fases indexadas. O difratograma sinaliza 4 fases cristalinas na amostra de argila, com predominância de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e outros minerais quartzosos, como por exemplo, a muscovita ( $\text{H}_2\text{K Al}_3 (\text{SiO}_4)_3$ ), albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), porém, em picos de baixa intensidade.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Teste de expansividade

No Teste 1, foi determinada temperatura máxima de  $1100^\circ\text{C}$ . Após a retirada das amostras, percebeu-se que os corpos de prova CP01, CP02 e CP03 encontravam-se sem vestígios de expansão, uma vez que apresentavam o mesmo tamanho, cor vermelha, e nenhum sinal de poros. Já o CP04, CP05 e CP06, que continham cobertura de LCC, apresentavam cor ligeiramente verde. A formulação F02 do Teste 2 não apresentou expansão. A cor e o tamanho das esferas se mantiveram, com exceção da dureza. Isso ocorreu pelo fato de as formulações não serem adequadas à temperatura da mufla.

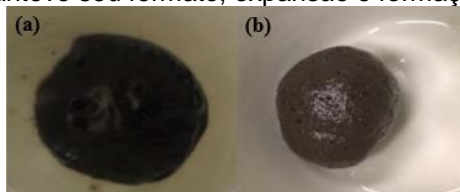
Na formulação REF do Teste 3 também não houve expansão, sendo que a cor e o tamanho das amostras se mantiveram, com exceção da dureza. Além disso, os corpos de prova foram rompidos e percebeu-se a ausência de poros. A falha da expansão nesse caso ocorreu pelo modo que as taxas de aquecimentos e patamares foram determinadas, uma vez que não houve a vitrificação da camada externa na partícula, impossibilitando o aprisionamento dos gases no interior dela.

No Teste 4, também não houve expansão. As características das amostras e os motivos da falha são os mesmos que os das amostras do Teste 3.

No Teste 5, houve expansão (Figura 3). Todas as formulações perderam o tom vermelho e passaram a ter tom verde. As formulações F01 e F02 perderam o formato de esfera (Figura 3a), como se estivessem “derretidos”, pois a utilização de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaCO}_3$  em sua composição ajudaram demasiadamente na fundição e liberação de gases, em conjunto com a taxa de aquecimento e temperatura máxima determinada neste ciclo. Por outro lado, a formulação REF (Figura 3b), que

continha apenas matéria-prima de argila e água, manteve seu formato esférico, além de apresentar aumento de tamanho e formação de poros.

**Figura 3.** Formulações com resultados de expansão, onde a formulação perdeu seu formato (a) e a formulação manteve seu formato, expansão e formação de poros (b)



Fonte: Registrada pelos autores.

No Teste 6 também não houve expansão ou sequer indícios do fenômeno. As características das amostras e os motivos da falha são os mesmos que do Teste 2. No Teste 7, ajustou-se a temperatura da mufla para 1150°C e manteve-se o tempo de ciclo de 6 horas. Duas das seis amostras apresentaram sinais de expansibilidade, CP05 e CP06. Observou-se que o CP05 obteve característica brilhosa na camada exterior, o que significa a formação da camada vítrea que serve como barreira para o escapamento dos gases. Nesse caso, este fenômeno ocorreu tardiamente, havendo assim a liberação desses gases. Já o CP 06, que estava coberto por LCC, perdeu a coloração vermelha, passando para verde. Isso significa a redução de  $Fe_2O_3$  durante a queima. No Teste 8, aumentou-se a temperatura da mufla para 1200°C e tempo de ciclo de 6 horas. Além disso, visando homogeneidade na expansão, substituiu-se  $Fe_2O_3$  e  $CaCO_3$  por LETA seco, moído finamente em gral de ágata, em porcentagens de 5 e 10%. Observou-se que todas as amostras expandiram de forma homogênea (Figura 4), este comportamento pode estar relacionado com a adição de  $Fe_2O_3$  excedente.

**Figura 4.** Corpos de prova expandidos



Fonte: Registrada pelos autores.

Nos Testes 9 e 10 mantiveram-se as condições de sinterização do Teste 8, diferenciando apenas o teor de resíduo utilizado nas formulações (Tabela 2). Verificou-se a expansão das amostras dos Testes 9 e 10. A diferença dimensional nas amostras, antes e depois da sinterização pode-se verificar nos resultados apresentados na Tabela 6.

De acordo com Pereira (2006), uma das características essenciais de agregado leve de argila expandida é a baixa densidade, que varia de acordo com o número de poros que o material apresenta em seu interior.

Na Tabela 6 pode-se visualizar os resultados dos diâmetros dos corpos de prova, a relação de antes e depois da sinterização, com as amostras em suas condições iniciais e expandidas. Foi possível verificar que a melhor expansibilidade foi referente ao Teste 8 (REF), onde houve aumento de tamanho de aproximadamente 30% na formulação F01 e aproximadamente 28% na formulação F02. Observa-se que todas as amostras que continham LETA em suas formulações expandiram em menor escala, com aumento em média, de aproximadamente 20%. No Teste 8, o CP01 apresentava 4 g e o CP02 8 g de LETA. Já nos Testes 9 e 10, o CP01 apresentava 15 g e o CP02 20 g de LETA. Dentre as formulações a que obteve maior expansibilidade foi o Teste 9, com aproximadamente 21% de expansão.



**Tabela 6.** Comparativo do diâmetro (mm) e massa das partículas antes e depois da sinterização nos Testes 8, 9 e 10

Testes	Amostra	Antes da sinterização		Depois da sinterização	
		CP - 01 (mm)	CP - 02 mm	CP - 01 mm	CP - 02 mm
Teste 8	REF	12,30	12,84	17,55	17,85
	F01	12,84	13,68	15,67	16,52
	F02	12,75	13,41	15,09	16,20
Teste 9	F01	12,30	-	15,55	-
	F02	12,84	-	15,67	-
Teste 10	<b>Amostra</b>	<b>CP - 01 mm</b>	<b>CP - 01 (g)</b>	<b>CP - 02 mm</b>	<b>CP - 02 (g)</b>
	F01	13,38	2,51	15,70	1,71
	F02	13,45	2,52	15,83	1,72

Fonte: Elaborada pelos autores.

De acordo com Rossignolo (2003), a textura e a forma das partículas dos agregados dependem do processo de fabricação. Agregados que são gerados pelo método de sinterização apresentam rugosidade, formas angulares e superfície porosa. Com relação a massa, verifica-se que no Teste 10, tanto a formulação F01 como a formulação F02, apresentaram redução de massa de 46%, devido à liberação de gases e a formação de poros no interior do agregado leve durante o processo de sinterização.

## 5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos foi possível identificar formulações e condições de sinterização que permitem o uso de resíduos sólidos na produção de argila expandida. A utilização de LETA em escala industrial para produção de argila expandida pode promover a redução de custos associados ao processo, uma vez que foi possível substituir a matéria-prima argila pelo resíduo LETA em até 20%. Em condições idênticas de sinterização, os resultados obtidos mostram que ambas formulações apresentam massa e forma semelhantes, tanto para a formulação de referência como para as formulações com LETA que sofreram expansão. Mais testes devem ser realizados visando a caracterização do material produzido em relação ao seu desempenho e lixiviação, no caso do uso em compósitos cimentícios.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq através do auxílio por meio da Bolsa de Produtividade em Pesquisa número 307755/2018-5.

## 1. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO (ABIFA). **Materiais para Fundição – Determinação da perda ao fogo nº 120**. São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BORTOLUZZI, E. C.; POLETO, C. **Metodologias para estudos de sedimentos: Ênfase na proporção e na natureza mineralógica das partículas**. In: MERTEN, G.H.; POLETO, C., org. Qualidade de sedimentos. Porto Alegre, ABRH, 2006. p.80-140.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 10 dez. 2019.

CORDEIRO, J. S. **Em noções gerais de tratamento de disposição final de lodos de ETA**. REALI, M. A. P., coord.; ABES/PROSAB: Rio de Janeiro, 1999, p. 1-19.

- HEGAZY, B. E.; FOUAD, H.A.; HASSANAIN, A. M. Incorporation of water sludge, sílica fume, and rice husk ash in brick making. **Advances in Environmental Research**, v.1, p. 83-96.
- MAYCÁ, J.; CREMONINI, R. A.; RECENA, F. A. P. Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais (CLE) (2008).
- METZ, J. C. **Avaliação do uso combinado de pó de aciaria elétrica (PAE) com resíduo do forno de cal (RFC) na hidratação de pastas de cimento**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.
- MODOLO, R.C.E.; SENFF, L.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M.; TARELHO, L. A. C. Lime mud from cellulose industry as raw material in cement mortars. **Materiales de Construcción**, v. 64, ed. 316, 2014.
- MODOLO, R.C.E.; FERREIRA, V. M.; TARELHO, L. A. C.; LABRINCHA, J.A.; SENFF, L.; SILVA, L. Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion. **Construction and Building Materials**, v. 45, 2013, p. 275-281.
- MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C. A. S.; GUMIERI, A. G.; VASCONCELOS, W. L. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Cerâmica**. 2006, v.52, n.322, p.193-199.
- PINTO, S. J. F. **Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves**. 2005. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2005.
- PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na indústria de celulose e papel – Estudo de caso**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia), Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades Físicas do Solo**. 2006.
- ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003.
- SILVA, B. M. M. **Betão leve estrutural com agregados de argila expandida**. 2007. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Construção Civil), Universidade do Porto, Porto, 2007.
- SILVA, M. B. L. **Novos materiais à base de resíduos de construção e demolição (RCD) e resíduos da produção de cal (RPC) para uso na construção civil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- WOLFF, E.; SCHWABE, W. K.; CONCEIÇÃO, S. V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, 2015, p. 282-289.