

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND  
POR CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-ACÚCAR NA RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO DE SOLO-CIMENTO**

**Douglas Lara Afonso<sup>1</sup>**

**Carlos Humberto Martins<sup>2</sup>**

**Juliana Azoia Lukiantchuki<sup>3</sup>**

**RESUMO**

A mistura de solo e cimento após compactada torna-se resistente e durável. Diversos estudos são realizados com o objetivo de adicionar resíduos a tal mistura. Um dos principais é a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC). Tal resíduo é interessante para substituição parcial do cimento Portland pois contém sílica e pode originar reações pozolânicas. Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi verificar a influência da substituição parcial do cimento Portland por CBC. Concluiu-se que os teores de CBC adotados diminuiram a resistência mecânica à compressão dos corpos de prova moldados com a substituição parcial de cimento por CBC.

**Palavras-chave:** Solo-cimento. Cinzas. Pozolanas. Resíduos. Sustentabilidade.

<sup>1</sup> Mestrando, Universidade Estadual de Maringá-UEM, Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana-PEU, douglas.laraf@gmail.com

<sup>2</sup> Prof. Dr., Universidade Estadual de Maringá-UEM, Departamento de Engenharia Civil-DEC, chmartins@uem.br

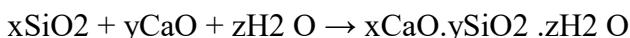
<sup>3</sup> Profª. Drª., Universidade Estadual de Maringá-UEM, Departamento de Engenharia Civil-DEC, jazoia@yahoo.com.br

## **1. INTRODUÇÃO**

O material composto por solo e cimento quando compactado em umidade ótima torna-se durável e resistente. É denominado solo-cimento e tem sido estudado como matriz de aproveitamento de resíduos. Um dos principais resíduos é a cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

O composto químico da CBC de grande interesse é a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), encontrada em quantidades superiores a 60% em massa para CBC em condições normais (CORDEIRO, FILHO E FAIRBAIRN, 2006). A sílica é responsável por possibilitar a substituição parcial do cimento Portland por CBC graças à sua capacidade de originar reações pozolânicas.

A reação da sílica amorfa com íons  $\text{Ca}^{+2}$  dá origem a silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), composto responsável pela resistência mecânica do cimento Portland (MEHTA E MONTEIRO, 1994). O produto de hidratação do cimento Portland hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) é, segundo Cordeiro, Filho e Fairbairn (2006), a principal fonte de cálcio para as reações pozolânicas. A equação 1 ilustra a reação pozolânica.



A possibilidade de utilização da CBC em substituição parcial ao cimento está ligada com as condições de queima, uma vez que a temperatura altera o índice de atividade pozolânica do material. Cordeiro diz que a temperatura de queima ideal é de 600 C° (CORDEIRO, FILHO E FAIRBAIRN, 2006).

Borja (2011) explica que o alto teor de silício presente na CBC origina-se no solo, uma vez que a cana-de-açúcar absorve acido monossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), e na transpiração do vegetal há a retenção de silício na parede das células sob a forma de sílica gel.

Assim sendo, o uso de CBC em substituição parcial ao cimento Portland apresenta vantagens do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Sob a perspectiva técnica, é possível que a CBC, devido a reação pozolânica, mantenha ou aumente a resistência do compósito, o que permite substituições parciais sem acarretar prejuízos à resistência mecânica. Em consequência, há o benefício financeiro, uma vez que a CBC é um resíduo gerado em grandes quantidades e pode ser adquirido por baixos valores. Há também a contribuição com o ambiente, pois tal resíduo pode sofrer destinações finais inadequadas, e dando uma utilização nobre para tal há a liberação de áreas que seriam utilizadas para o acondicionamento da CBC, além de evitar algum tipo de poluição que tal resíduo poderia gerar.

Valenciano e Freire (2004) obtiveram aumento na resistência à compressão ao substituir 20% de cimento Portland por CBC. Os melhores resultados foram conseguidos com rompimento realizado 60 dias após a moldagem.

Mendonça Tenório e Marques (2012) obtiveram um considerável aumento na resistência à compressão aos 14 dias após substituírem 2% de cimento Portland por CBC em tijolos de solo-cimento.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho é verificar a influência da CBC em substituição parcial ao cimento Portland na resistência à compressão de solo-cimento.

## **2. DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 Características do solo**

O solo utilizado neste estudo foi coletado na cidade de Mandaguaçu-PR. Para evitar a presença de matéria orgânica, coletou-se o material cerca de 300 cm abaixo da superfície.

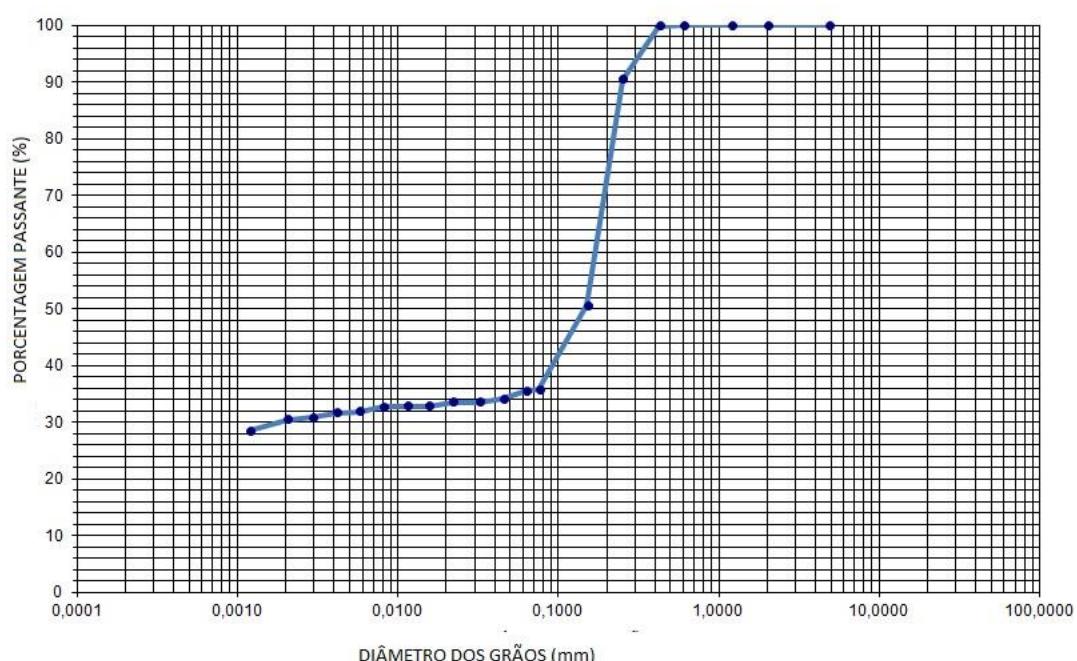
Para a secagem, o solo foi espalhado em lona plástica até atingir umidade higroscópica, posteriormente foi acondicionado em tambor até a realização dos ensaios.



**Figura 1 – Secagem do solo**

Fonte: Autores, 2016.

Para fins de complementação, realizou-se ensaios de granulometria, limites de consistência e massa específica dos grãos. Na Figura 2 encontra-se a curva granulométrica obtida.



**Figura 2 – Granulometria do solo**

Fonte: Autores, 2016.

Os valores obtidos nos ensaios de limite de consistência encontram-se na Tabela 1.

**Tabela 1 – Limites de liquidez e plasticidade**

Ensaio	Valor (%)
Limite de liquidez	25
Limite de plasticidade	15
Índice de plasticidade	10

Fonte: Autores, 2016.

A determinação da massa específica dos grãos foi feita de acordo com a NBR 6508. Na Tabela 2 encontra-se o valor obtido.

**Tabela 2 – Massa específica dos grãos**

Ensaio	Valor (g/cm <sup>3</sup> )
Massa específica dos grãos	2,75

Fonte: Autores, 2016.

## 2.2 Características do cimento

O cimento utilizado foi o CPII-Z 32, devido a facilidade de obtenção e também por atender aos requisitos de resistência necessários para confecção de tijolos de solo-cimento-CBC. A descrição da quantidade de cimento utilizada nos ensaios realizados para a elaboração deste trabalho encontram-se detalhados na Tabela 3.

## 2.3 Características da CBC

As cinzas utilizadas neste trabalhos foram coletadas na usina Renuka, de São Pedro do Ivaí-PR. Estavam acondicionadas em monte, com elevada umidade e aspecto de lodo. Após a coleta, a CBC foi colocada em bandejas para secagem por um período de 15 dias.



**Figura 3 – Secagem da CBC**

Fonte: Autores, 2016.

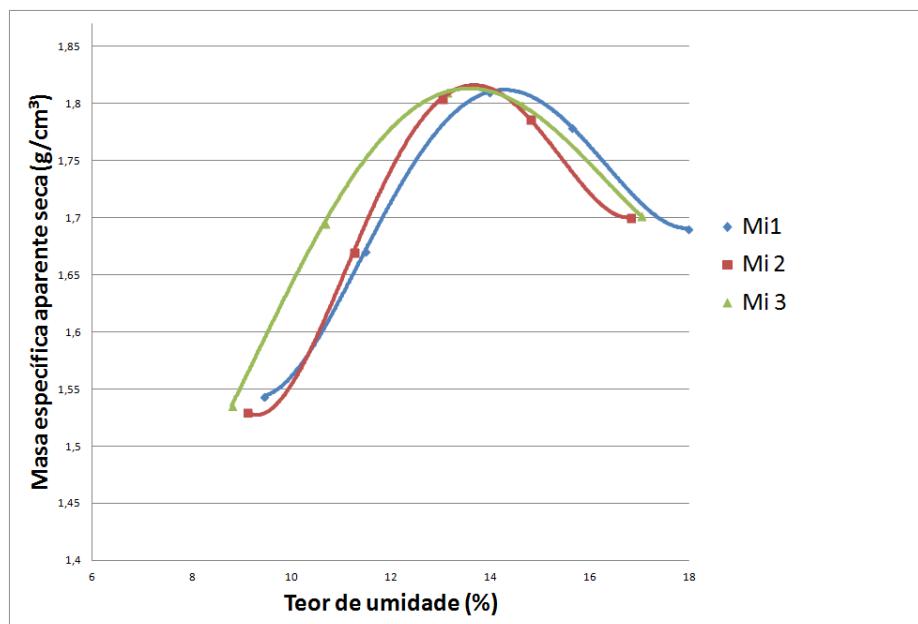
Após atingir a umidade higroscópica, a CBC foi passada na peneira 0,15 mm. Descartou-se o retido e utilizou-se a CBC passante.

## 2.4 Ensaio de pozolanicidade

A fim de caracterizar a CBC quanto a atividade pozolânica, o IPT-SP (Instituto de pesquisas tecnológicas de São Paulo) realizou o ensaio de acordo com a NBR 15895/2010 em amostra de CBC passante na peneira 0,15mm. O resultado obtido foi de 612 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g amostra.

## 2.5 Preparação dos corpos de prova

A partir da curva de compactação foi possível obter a massa específica aparente seca máxima e respectiva umidade ótima. A curva de compactação pode ser vista na Figura 4. A partir desses dados, calculou-se a massa total que o corpo de prova deveria ter. Os CPs foram moldados em três camadas. Cada camada foi compactada de forma a ter o valor de massa específica aparente seca máxima determinado na curva de compactação.



**Figura 4 – Curva de compactação para 6% de ligante.**

Fonte: Autores, 2016.

A fôrma escolhida para a moldagem dos corpos de prova tinha 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Como havia a possibilidade da altura do corpo de prova variar, mediu-se a altura com paquímetro para cada corpo de prova moldado. O resultado de altura considerado foi obtido pela média de 3 medições. Na Figura 5a é possível observar o cilindro metálico usado como molde para confecção dos corpos de prova.



**Figura 5a – Cilindro metálico para moldagem dos CPS;**  
**Figura 5b- Corpo de prova ensacado.**

Fonte: Autores, 2016.

Os traços utilizados estão detalhados na Tabela 3. Utilizou-se um traço de referência com solo e 6% de cimento Portland, e para a verificação da influência da CBC na resistência a compressão substituiu-se 25 e 50% do cimento Portland por CBC.

**Tabela 3 – Traços utilizados**

Traço Mi (Solo,Cimento, Cinzas)	Composição da mistura			Equivalente em Massa			Soma	
	Solo	Cimento	Resíduo	Soma	Solo	Cimento		
	g						%	
Mi 1 (94;6;0)	470	30	0	500	94	6	0	100
Mi 2 (94;4,5;1,5)	470	22,5	7,5	500	94	4,5	1,5	100
Mi 3 (94;3;3)	470	15	15	500	94	3	3	100

Fonte: Autores, 2016.

A mistura dos materiais foi feita na seguinte ordem: solo, cimento e CBC. Homogeneizou-se até que a mistura apresentasse a aparência da Figura1. Posteriormente, adicionou-se a quantidade de água para atingir a umidade necessária. Observa-se na Tabela 3 que a quantidade total foi maior do que a mínima necessária para confecção do corpo de prova, pois pode haver perdas durante a moldagem, assim sendo, optou-se por 500 g para confeccionar um corpo de prova.



**Figura 6 – Mistura solo-cimento-CBC**

Fonte: Autores, 2016.

É importante observar que todos os corpos de provas com a designação CP-6-0 foram moldados com o traço denominado Mi 1, os CP-4,5-1,5 com o traço Mi 2 e os CP-3-3 com o Mi 3 (Ver Tabela 4 e 5).

Após a moldagem, os CPs foram colocados em sacos plásticos. Posteriormente vedou-se tais sacos para que não houvesse perda de umidade. Todos os CPs foram levados para câmara úmida. O rompimento ocorreu após 7 e 28 dias. Para maior controle e qualidade deste trabalho, determinou-se a umidade no momento da moldagem e após a ruptura, desta forma foi possível saber se não houve perda de umidade durante o processo de cura. A massa dos corpos de prova logo após a moldagem e momentos antes do rompimento também foi determinada.



**Figura 7 – Equipamento utilizado para moldagem dos CPs.**

Fonte: Autores, 2016.

Na Tabela 4 encontra-se índices físicos dos corpos de prova rompidos aos 7 dias.

**Tabela 4 – Índices físicos dos CPs rompidos aos 7 dias.**

CP	M (g)	h	w (%)	V (cm <sup>3</sup> )	P (g/cm <sup>3</sup> )	Pd (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	□w (%) (%)	e	n	Sr (%)
CP-6-0-1	414,63	10,00	14,24%	196,28	2,112	1,849	102%	-0,09%	0,487	32,7 6%	80,36 %
CP-6-0-2	414,07	10,00	15,00%	196,41	2,108	1,833	101%	0,67%	0,500	33,3 4%	82,48 %
CP-6-0-3	412,95	10,00	15,47%	196,35	2,103	1,821	100%	1,14%	0,510	33,7 7%	83,45 %
CP-4,5-1,5-1	407,1	10,00	16,05%	196,35	2,073	1,787	98%	1,72%	0,539	35,0 3%	81,85 %
CP-4,5-1,5-2	411,13	9,92	15,29%	194,71	2,111	1,831	101%	0,96%	0,502	33,4 0%	83,83 %
CP-4,5-1,5-3	411,42	9,95	15,41%	195,37	2,106	1,825	100%	1,08%	0,507	33,6 5%	83,57 %
CP-3-3-1	414,29	10,00	14,73%	196,35	2,110	1,839	101%	0,40%	0,495	33,1 3%	81,78 %
CP-3-3-2	415,75	10,00	14,61%	196,35	2,117	1,847	102%	0,28%	0,489	32,8 2%	82,24 %
CP-3-3-3	413,73	10,00	14,58%	196,35	2,107	1,839	101%	0,25%	0,495	33,1 3%	80,94 %

Fonte: Autores, 2016.

Na Tabela 5 encontram-se os dados de índices físicos dos corpos de prova rompidos aos 28 dias.

**Tabela 5 – Índices físicos dos CPs rompidos aos 28 dias.**

CP	M (g)	h	w (%)	V (cm <sup>3</sup> )	P (g/cm <sup>3</sup> )	Pd (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	□w (%) (%)	e	n	Sr (%)
CP-6-0-4	418,08	10,00	13,78%	196,35	2,129	1,871	103%	-0,55%	0,469	31,9 5%	80,71 %
CP-6-0-5	416,2	10,00	13,98%	196,35	2,120	1,860	102%	-0,35%	0,479	32,3 8%	80,32 %
CP-6-0-6	417,8	10,00	14,38%	196,35	2,128	1,860	102%	0,05%	0,478	32,3 5%	82,69 %
CP-4,5-1,5-4	416,08	10,00	14,56%	196,35	2,119	1,850	102%	0,23%	0,487	32,7 4%	82,29 %
CP-4,5-1,5-5	416,35	9,99	14,40%	196,15	2,123	1,855	102%	0,07%	0,482	32,5 3%	82,13 %
CP-4,5-1,5-6	414,88	10,00	14,83%	196,35	2,113	1,840	101%	0,50%	0,494	33,0 9%	82,47 %
CP-3-3-4	415,52	10,00	14,36%	196,35	2,116	1,850	102%	0,03%	0,486	32,7 1%	81,25 %
CP-3-3-5	413,78	10,00	14,05%	196,35	2,107	1,871	102%	-0,28%	0,488	32,8 1%	79,13 %
CP-3-3-6	415,24	10,00	14,76%	196,35	2,115	1,843	101%	0,43%	0,492	32,9 9%	82,47 %
CP-3-3-7	417,17	9,99	14,01%	196,15	2,127	1,901	102%	-0,32%	0,474	32,1 7%	81,25 %

Fonte: Autores, 2016.

Após moldados e passado o devido tempo de cura, os corpos de prova foram rompidos em prensa calibrada ou seja, a partir da deformação de um anel metálico, obteve-se a força aplicada. A Figura 8 mostra um corpo de prova sendo rompido.



**Figura 8 – Prensa utilizada para rompimento.**

Fonte: Autores, 2016.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6 mostra os dados obtidos a ruptura dos corpos de prova.

**Tabela 6 – Dados dos CPs rompidos aos 7 dias.**

Teor de substituição	CP	Massa na moldagem	Massa na Ruptura	Teor de umidade na moldagem	Teor de umidade na ruptura	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	Coeficiente variação
0,00	CP-6-0-1	414,63	413,88	14,24%	13,45%	3,70	3,68	0,16	0,04
	CP-6-0-2	414,07	413,40	15,00%	13,54%	3,83			
	CP-6-0-3	412,95	412,33	15,47%	14%	3,51			
0,25	CP-4,5-1,5-1	407,10	403,41	16,05%	14,9%	3,20	3,29	0,09	0,03
	CP-4,5-1,2-2	411,13	410,43	15,29%	14,8%	3,38			
	CP-4,5-1,5-3	411,42	410,65	15,41%	14,52%	3,29			
0,50	CP-3-3-1	414,29	413,72	14,73%	14,29%	2,82	2,82	0,05	0,02
	CP-3-3-2	415,75	415,23	14,61%	14,08%	2,77			
	CP-3-3-3	413,73	413,24	14,58%	13,54%	2,87			

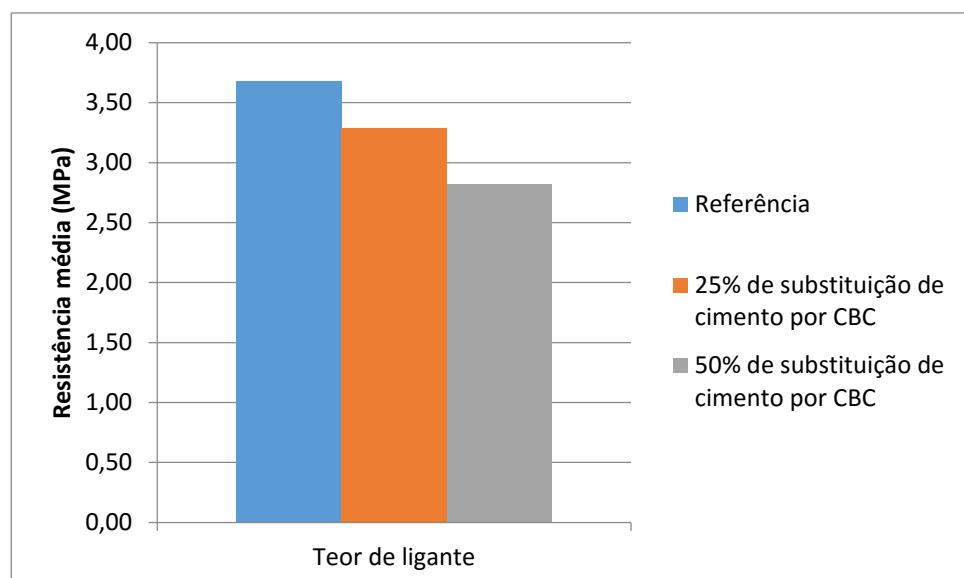
Fonte: Autores, 2016.

**Tabela 7 – Dados dos CPs rompidos aos 28 dias.**

Teor de substituição	CP	Massa na moldagem	Massa na Ruptura	Teor de umidade na moldagem	Teor de umidade na ruptura	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	Coeficiente variação
0,00	CP-6-0-4	418,08	417,09	13,78%	12,63%	5,96	6,44	0,61	0,10
	CP-6-0-5	416,2	415,07	13,98%	12,72%	6,23			
	CP-6-0-6	417,8	416,89	14,38%	13,00%	7,13			
0,25	CP-4,5-1,5-4	416,08	414,40	14,56%	12,90%	6,10	6,09	0,54	0,09
	CP-4,5-1,2-5	416,35	414,98	14,40%	12,50%	6,62			
	CP-4,5-1,5-6	414,88	413,20	14,83%	13,00%	5,55			
0,50	CP-3-3-4	415,52	413,64	14,36%	12,93%	4,50	4,57	0,05	0,01
	CP-3-3-5	413,78	412,07	14,05%	13,45%	4,55			
	CP-3-3-6	415,24	413,30	14,76%	13,70%	4,60			
	CP-3-3-7	417,17	414,9	14,01%	13,67%	4,63			

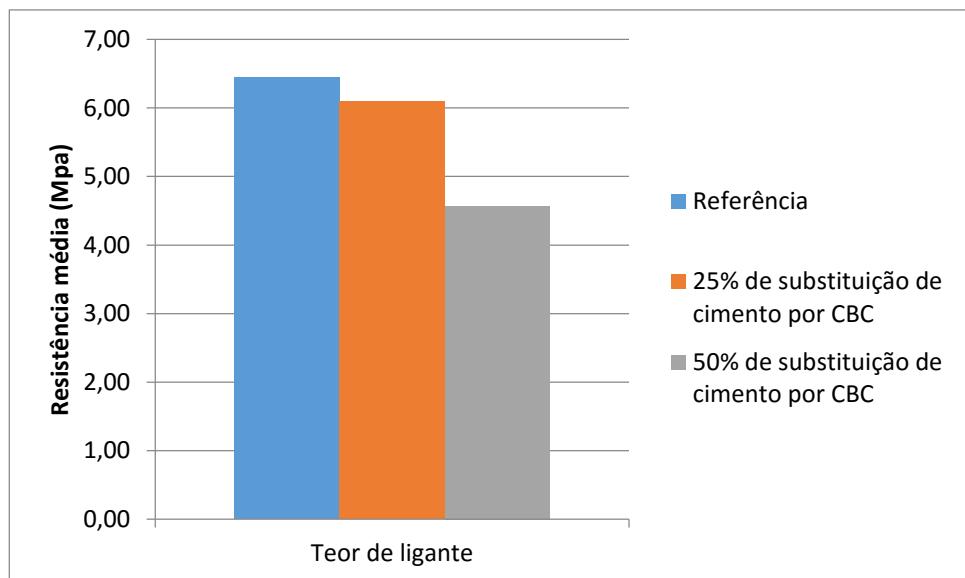
Fonte: Autores, 2016.

Foi possível observar que houve uma pequena redução na massa dos corpos de prova após o período de cura. Tal observação nos leva a crer que os procedimentos de cura bem como o ensacamento dos corpos de prova permitem uma pequena perda de umidade.



**Figura 9 – Resistência à compressão aos 7 dias.**

Fonte: Autores, 2016.



**Figura 10 – Resistência à compressão aos 28 dias.**

Fonte: Autores, 2016.

Como fica evidenciado na Figura 9 e também na Tabela 6, conforme substitui-se o cimento Portland por CBC houve diminuição da resistência à compressão, ou seja, mesmo o material apresentando atividade pozolânica, os teores de substituição utilizados neste trabalho não apresentaram melhoria na resistência mecânica do material.

#### 4. CONCLUSÃO

Conclui-se que os teores de substituição de 25 e 50% de cimento Portland por CBC diminuíram os valores da resistência do material. Conclui-se também que o procedimento de ensacamento adotado acarretou em pequena perda de umidade.

#### REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 12023:** Solo-cimento – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6459:** Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6508:** Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- \_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- FILHO, G. C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Quim. Nova**, v.32, n.1, 82-86, 2009.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** – São Paulo: Pini, 1994. 573p.

**BORJA, E. V. Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis.** Tese de Doutorado, 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

VALENCIANO, M. D. C. M.; FREIRE, W.J.; Características físicas e mecânicas de mistura de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal v.24, n.3, p.484-492, 2004.

MENDONÇA, S. F., TENÓRIO, T.M., MARQUES, S. K . J.; Estudo da incorporação de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em formulações para fabricação de tijolos de solo-cimento. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 2012, Tocantins.