

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMERO COM ÓXIDO DE MAGNÉSIO E  
CARBONATO DE CÁLCIO**

ADRIANO JOAQUIM BIRNFELD JUNIOR

Uberlândia – MG

Junho – 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMERO COM ÓXIDO DE MAGNÉSIO E  
CARBONATO DE CÁLCIO

ADRIANO JOAQUIM BIRNFELD JUNIOR

Trabalho apresentado à Coordenação do  
Curso de Engenharia Civil, da Universidade  
Federal de Uberlândia, para a obtenção do  
Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Uberlândia – MG  
Junho – 2018

## **FOLHA DE ASSINATURAS**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMERO COM ÓXIDO DE MAGNÉSIO E  
CARBONATO DE CÁLCIO

---

Adriano Joaquim Birnfeld Junior

---

Prof. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi

Faculdade de Engenharia Civil

Uberlândia – MG

Junho – 2018

A minha família e amigos que  
sempre me incentivaram e apoiaram a  
minha trajetória pessoal e acadêmica.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Adriano e Elizabeth, à minha avó Lacy e ao meu irmão Vitor por serem uma parte essencial da minha vida e por formarem um lar onde pude me desenvolver da melhor maneira possível, de forma pessoal e acadêmica.

Aos meus professores que puderam passar à frente seus conhecimentos, desde o ensino fundamental até o ensino superior.

Aos meus amigos, em especial Gabriel, João Luis, Vitor e João Lucas, que desde sempre estiveram presentes em minha vida e sempre me apoiaram; Nathália, Victor Hugo e Gabriel, cuja presença sempre alegrava meus dias de aula; e ao Raphael, meu amigo de infância que está sempre no meu coração.

À minha namorada Ana Laura, que me acompanhou durante toda a minha caminhada no curso, por me ajudar a ir sempre em frente e a me desenvolver como pessoa, e pelo amor que temos um pelo outro.

## RESUMO

Diante da sempre renovação tecnológica na construção, há uma busca por novos materiais que possam ter um desempenho tão bom quanto dos materiais convencionais. Assim, esse trabalho teve como objetivo de analisar o comportamento do geopolímero formado pelo óxido de magnésio ativado pelo carbonato de cálcio, realizando ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão, e determinando características do material. Ao final, foi realizado um estudo comparativo entre dois materiais com a proporção de óxido de magnésio em relação ao calcário diferentes, que são de 85% de calcário e 15% de óxido de magnésio e 75% de calcário e 25% de óxido de magnésio, em que foi constatado que uma maior quantidade de óxido de magnésio foi responsável por dar uma maior resistência à compressão e à tração na flexão.

**Palavras-chave:** geopolímero; carbonato de cálcio; óxido de magnésio; resistência à compressão; resistência à tração na flexão.

## SUMÁRIO

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                         | 12 |
| 2. OBJETIVOS.....                                                                           | 13 |
| 2.1. Objetivo geral .....                                                                   | 13 |
| 2.2. Objetivos específicos .....                                                            | 13 |
| 3. METODOLOGIA .....                                                                        | 13 |
| 3.1. Preparação do geopolímero.....                                                         | 14 |
| 3.2. Ensaio – Estado fresco .....                                                           | 15 |
| 3.2.1. Determinação do Índice de consistência .....                                         | 15 |
| 3.2.2. Determinação da Massa Específica no estado fresco.....                               | 16 |
| 3.3. Ensaio – Estado endurecido .....                                                       | 18 |
| 3.3.1. Determinação da Massa específica – Amostra seca e saturada; e absorção da água ..... | 18 |
| 3.3.2. Determinação da Resistência à compressão axial .....                                 | 20 |
| 3.3.3. Determinação da Resistência à tração na flexão .....                                 | 21 |
| 4. RESULTADOS.....                                                                          | 22 |
| 4.1. Índice de consistência .....                                                           | 22 |
| 4.2. Massa específica – Estado fresco.....                                                  | 22 |
| 4.3. Massa específica – Amostra seca e saturada e capacidade de absorção .....              | 23 |
| 4.4. Resistência à compressão axial .....                                                   | 24 |
| 4.5. Resistência à tração na flexão.....                                                    | 27 |
| 5. DISCUSSÃO .....                                                                          | 29 |
| 6. CONCLUSÃO .....                                                                          | 32 |
| REFERÊNCIAS .....                                                                           | 33 |
| ANEXOS .....                                                                                | 34 |
| ANEXO A - Relatórios de ensaio de resistência à tração na flexão .....                      | 34 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| ANEXO B - Relatórios de ensaio de resistência à compressão axial..... | 36 |
|-----------------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Geopolímero no estado fresco.....                                                         | 14 |
| Figura 2 – Mesa cadente para ensaio.....                                                             | 15 |
| Figura 3 – Mistura após as 30 quedas preconizadas pela ABNT NBR 13276:2002.....                      | 16 |
| Figura 4 – Corpo de prova prismático moldado.....                                                    | 17 |
| Figura 5 – Corpo de prova cilíndrico .....                                                           | 17 |
| Figura 6 – Corpos de prova prismáticos.....                                                          | 18 |
| Figura 7 – Corpos de prova cilíndricos .....                                                         | 18 |
| Figura 8 – Corpos de prova imersos em água .....                                                     | 19 |
| Figura 9 – Ensaio de resistência à compressão axial.....                                             | 20 |
| Figura 10 – Posicionamento do corpo de prova .....                                                   | 21 |
| Figura 11 – Ensaio de tração na flexão.....                                                          | 21 |
| Figura 12 – Amostra após o ensaio de resistência à compressão com mistura de proporção 1:0,176.....  | 25 |
| Figura 13 – Amostra após o ensaio de resistência à compressão com mistura de proporção 1:0,333 ..... | 25 |
| Figura 14 – Corpo de prova no momento da ruptura na máquina.....                                     | 27 |
| Figura 15 – Corpo de prova após a ruptura .....                                                      | 27 |
| Figura 16 – Índice de consistência .....                                                             | 29 |
| Figura 17 - Massas específicas .....                                                                 | 30 |
| Figura 18 - Capacidade de absorção.....                                                              | 31 |
| Figura 19 - Resistência à compressão e à tração na flexão .....                                      | 31 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Proporções da mistura.....                                            | 15 |
| Tabela 2 – Índice de consistência.....                                           | 22 |
| Tabela 3 – Massa específica para o geopolímero 1 (1:0,176) .....                 | 22 |
| Tabela 4 - Massa específica para o geopolímero 2 (1:0,333).....                  | 22 |
| Tabela 5 – Massa das amostras após secagem em estufa a 95° C por 24 horas .....  | 23 |
| Tabela 6 – Massa das amostras saturadas e imersas em água .....                  | 23 |
| Tabela 7 – Massa específica seca e saturada e capacidade de absorção.....        | 24 |
| Tabela 8 – Massa específica seca e saturada e capacidade de absorção final ..... | 24 |
| Tabela 9 – Dados obtidos para o geopolímero 1 (1:0,176) .....                    | 26 |
| Tabela 10 – Dados obtidos para o geopolímero 2 (1:0,333) .....                   | 26 |
| Tabela 11 – Dados obtidos para o geopolímero 1 (1:0,176) .....                   | 28 |
| Tabela 12 – Dados obtidos para o geopolímero 2 (1:0,333) .....                   | 28 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| (1) Massa específica no estado fresco .....  | 16 |
| (2) Massa específica no estado seco .....    | 19 |
| (3) Massa específica no estado saturado..... | 20 |
| (4) Capacidade de absorção .....             | 20 |

## 1. INTRODUÇÃO

São de grande importância para a engenharia civil, o desenvolvimento de novas tecnologias e a descoberta de novos materiais como alternativas para os processos que são utilizados nos dias de hoje. Com o enfoque na descoberta de novos materiais, a utilização do óxido de magnésio (MgO) pode ser uma boa opção em relação aos materiais tradicionais utilizados na construção civil, como por exemplo o cimento Portland.

O magnésio é o oitavo elemento mais abundante na crosta terrestre (cerca de 2,3% em massa) e o terceiro elemento mais abundante nos oceanos, com concentrações de cerca de 1300 p.p.m. O óxido de magnésio é principalmente retirado da calcinação da magnesita, e possui uma produção global de aproximadamente 14 milhões de toneladas por ano, custando cerca de 350 reais por tonelada (AL-TABBAA, 2013).

O MgO na construção civil foi primeiramente utilizado por Stanislas Sorel em 1867, com a adição do óxido de magnésio e cloreto de magnésio na mistura do cimento Portland, que foram chamados de cimento Sorel. Atualmente, a utilização deste óxido é comum na adição do concreto utilizado na construção de barragens na China, como um aditivo que diminui a formação de trincas no concreto (MO, 2013).

Nessa pesquisa, o óxido de magnésio tem como função atuar como aglomerante na formação de um geopolímero. Segundo Vassalo (2013), geopolímeros são compostos sintetizados a partir de uma mistura de duas partes, constituído por uma solução alcalina (frequentemente silicato solúvel) e materiais sólidos de aluminossilicato. A geopolimerização ocorre à temperatura ambiente ou ligeiramente elevada constituída de duas fases. Segundo Qiao (2014) o geopolímero adquire, em condições normais de temperatura (25° a 30° C), 80% da sua resistência máxima dentro de 24 horas, assim, a estufa foi utilizada para maximizar o ganho de resistência dentro desse intervalo de tempo.

No caso do presente trabalho, o óxido de magnésio é ativado por meio de uma base forte, que é a solução salina formada por água e sulfato de magnésio. A utilização do geopolímero neste trabalho, teve por finalidade estudar o material MgO simplesmente, mas, em estudos futuros, pretende-se estudar a adição de cimento Portland, agregados, fibras, etc. levando em conta o seu uso em argamassas e concretos. Para tanto, estudou-

se o comportamento do geopolímero em relação às resistências à compressão axial e à tração na flexão para, assim, se obter os primeiros parâmetros.

A vantagem da utilização do óxido de magnésio em substituição ao cimento Portland são o potencial de endurecimento mais rápido, a menor quantidade de gás carbônico na manufatura do MgO em relação ao cimento e a maior expansão e retração sem a formação de trincas (AL-TABBAA, 2013).

Este trabalho visa analisar o comportamento do óxido de magnésio ativado por sulfato de magnésio em dois teores diferentes de calcário: 75% e 85% em massa. Essa adição de calcário visa viabilizar economicamente o uso do MgO em diversas aplicações sem a presença do cimento Portland. Foram determinadas a consistência, as resistências à compressão, tração na flexão com 3 pontos, e a massa específica e capacidade de absorção.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento do geopolímero constituído por óxido de magnésio, carbonato de cálcio (calcário) e uma solução salina composta por água e sulfato de magnésio.

### 2.2. Objetivos específicos

- Analisar a resistência à compressão do corpo de prova do geopolímero;
- Analisar a resistência à tração na flexão com 3 pontos do geopolímero;
- Analisar a consistência, a massa específica e capacidade de absorção do geopolímero.

## 3. METODOLOGIA

O estudo do desempenho do óxido de magnésio como aglomerante no geopolímero é realizado em conjunto ao estudo realizado pelo Professor Doutor Carlos Eduardo Marmorato Gomes da Universidade de Campinas (UNICAMP). No trabalho original, realizado na UNICAMP, foi considerado apenas o MgO como aglomerante no geopolímero ativado pela solução salina. Porém, devido ao custo do MgO ser mais elevado que o do cimento Portland (aglomerante a ser substituído), vislumbrou-se na adição do carbonato de cálcio na mistura com óxido de magnésio uma forma de viabilizar economicamente esse geopolímero.

Assim, para a execução deste trabalho, foram utilizadas duas misturas diferentes de calcário e óxido de magnésio, uma com 85% de calcário e 15% de MgO e outra com 75% de calcário e 25% de MgO. A utilização dessas proporções foi escolhida com o fim de analisar se a maior ou menor presença do óxido de magnésio na mistura afetaria positivamente ou negativamente sua resistência, viabilizando economicamente seu uso. O calcário utilizado na mistura é o industrial sem uma granulometria definida e o óxido de magnésio utilizado é o puro da marca Ibar.

### 3.1. Preparação do geopolímero

O geopolímero foi preparado com o uso de uma argamassadeira, misturando primeiramente os elementos secos, que são o calcário e o óxido de magnésio e, depois, adicionando a solução salina (água e sulfato de magnésio) até que ele adquirisse a consistência desejada de pasta, na qual pode ser trabalhada com uma colher de pedreiro. A solução salina era composta de 70% de água e 30 % de sulfato de magnésio, que era diluído até a dissolução de todas partículas sólidas. A figura 1 ilustra a consistência da mistura.

Figura 1 – Geopolímero no estado fresco



Fonte: Autor (2018)

As proporções de calcário e MgO, mistura seca e solução salina, e MgO e solução salina; estão descritos na tabela 1.

Tabela 1 – Proporções da mistura

| Mistura   | Proporções     |                               |                      |
|-----------|----------------|-------------------------------|----------------------|
|           | Calcário e MgO | Mistura seca e Solução salina | MgO e Solução salina |
| Mistura 1 | 1: 0,176       | 1:0,333                       | 1:2,222              |
| Mistura 2 | 1:0,333        | 1:0,333                       | 1:1,333              |

Fonte: Autor (2018)

### 3.2. Ensaaios – Estados fresco

#### 3.2.1. Determinação do Índice de consistência

O ensaio foi feito de acordo com a ABNT NBR 13276:2002, utilizando um molde tronco-cônico colocado de forma centralizado sobre a mesa, como mostra a figura 2.

Figura 2 – Mesa cadente para ensaio



Fonte: Autor (2018)

O processo consistiu no preenchimento do molde em três etapas sucessivas, realizando 15, 10 e 5 golpes com o soquete metálico, nessa ordem. Após o rasamento do molde, o mesmo foi retirado e a manivela da mesa foi acionada de forma que a mesma girasse, subisse e descesse por 30 vezes. Foram efetuadas três medidas de diâmetro com uma trena. A figura 3 indica o geopolímero após o procedimento.

Figura 3 – Mistura após as 30 quedas preconizadas pela ABNT NBR 13276:2002



Fonte: Autor (2018)

### 3.2.2. Determinação da Massa Específica no estado fresco

O ensaio foi feito de acordo com a ABNT NBR 9833:1987. Inicialmente, foi pesado um recipiente vazio cujo volume é de 196 cm<sup>3</sup>, e foi preenchido pelo geopolímero em seu estado fresco dentro do mesmo recipiente e rasado. Na equação 1 a seguir descreve a equação utilizada para o cálculo da massa específica do polímero.

$$\gamma_{GF} = \frac{M_{GF} - M_R}{V_R} \quad (1)$$

Onde:

$\gamma_{GF}$  = massa específica do geopolímero fresco em kg/dm<sup>3</sup>;

$M_{GF}$  = massa do geopolímero fresco em kg;

$M_R$  = massa do recipiente em kg;

$V_R$  = volume do recipiente em dm<sup>3</sup>.

Após a finalização do processo de mistura na argamassadeira, foram moldados os corpos de prova em que os moldes foram previamente untados com óleo como desmoldante. Para o ensaio de tração na flexão com 3 pontos foram utilizados corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm, ilustrado na figura 4. O adensamento dos corpos de prova foi realizado por meio de um soquete metálico, cujos golpes foram

realizados verticalmente, que foram de 10 golpes para cada um terço de mistura preenchida no molde, em média.

Figura 4 – Corpo de prova prismático moldado



Fonte: Autor (2018)

Para os ensaios de resistência à compressão, massa específica e capacidade de absorção foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm, como na figura 5. O adensamento dos corpos de prova foi realizado por meio de um soquete metálico, em que o adensamento foi feito verticalmente, com 10 golpes feitos pelo soquete a cada um terço preenchido pela mistura, em média.

Figura 5 – Corpo de prova cilíndrico



Fonte: Autor (2018)

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram levados à estufa a 95° C durante 24 horas, para que o processo de secagem, que leva ao ganho de resistência ocorresse de forma mais rápida. Após esse período foram realizadas as desmoldagens dos corpos de prova. Nas figuras 6 e 7 são ilustrados os corpos de prova secos.

Figura 6 – Corpos de prova prismáticos



Fonte: Autor (2018)

Figura 7 – Corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autor (2018)

### 3.3. Ensaaios – Estado endurecido

#### 3.3.1. Determinação da Massa específica – Amostra seca e saturada; e absorção da água

O ensaio de massa específica no estado endurecido e a absorção de água foram feitos com base na ABNT NBR 9778:1987 para argamassas e concretos endurecidos,

porém com algumas adaptações, como a diminuição do tempo de imersão para 24 horas e a eliminação da etapa de fervura.

Após a secagem em estufa, as amostras foram resfriadas até a temperatura ambiente e as suas massas determinadas em balança.

Em seguida, os corpos de prova foram submetidos à imersão em um recipiente coberto por água para que os mesmos atingissem a saturação. A figura 8 ilustra os corpos de prova cilíndricos na imersão realizada no período de 24 horas.

Figura 8 – Corpos de prova imersos em água



Fonte: Autor (2018)

A determinação da massa específica seca e saturada e a capacidade de absorção serão calculadas de acordo com as equações 2, 3 e 4 da ABNT NBR 9778:1987.

- Massa específica da amostra seca:

$$\gamma_s = \frac{M_s}{M_{Sat} - M_i} \quad (2)$$

Onde:

$M_s$  = Massa do corpo de prova seco em estufa;

$M_{Sat}$  = Massa do corpo de prova saturado;

$M_i$  = Massa do corpo de prova saturado, imerso em água.

- Massa específica da amostra saturada:

$$\gamma_{Sat} = \frac{M_{Sat}}{M_{Sat} - M_i} \quad (3)$$

- Capacidade de absorção de água:

$$\mu = \frac{M_{Sat} - M_s}{M_s} * 100 \quad (4)$$

### 3.3.2. Determinação da Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi feito de acordo com a ABNT NBR 13279:2005 utilizando corpos de prova cilíndricos. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados por uma máquina de marca Instron, na qual o corpo de prova fica posicionado entre uma prensa e um anteparo com um aumento de carga progressivo de 500 N/s até que haja a ruptura do corpo de prova.

Os corpos de prova foram dispostos de acordo com a figura 9.

Figura 9 – Ensaio de resistência à compressão axial



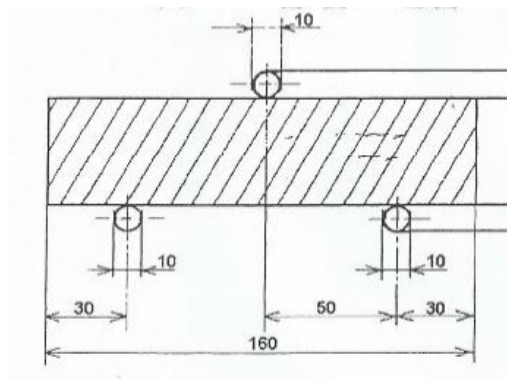
Fonte: Autor (2018)

### 3.3.3. Determinação da Resistência à tração na flexão

Esse ensaio foi feito de acordo com a ABNT NBR 13279:2005 de argamassas para assentamento, utilizando os corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm. Os ensaios de tração na flexão foram realizados numa máquina para ensaios universais da marca Instron, em três pontos (dois de apoio e um vertical onde a força é aplicada) e a taxa de carregamento foi de 50 N/s até que ocorresse a ruptura do corpo de prova. Os corpos de prova possuíam uma idade de 24 horas, logo após serem retirados da estufa.

Neste ensaio, os corpos de prova foram dispostos de acordo com as figuras 10 e 11.

Figura 10 – Posicionamento do corpo de prova



Fonte: ABNT (2005)

Figura 11 – Ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2018)

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Índice de consistência

Os índices de consistência do geopolímero foram medidos por meio da média das três medidas de diâmetro verificado em milímetros, relatado na tabela 2.

Tabela 2 – Índice de consistência

| Mistura     | Medida 1 | Medida 2 | Medida 3 | Índice de consistência |
|-------------|----------|----------|----------|------------------------|
| 1 (1:0,176) | 300 mm   | 310 mm   | 295 mm   | 302 mm                 |
| 2 (1:0,333) | 290 mm   | 280 mm   | 290 mm   | 287 mm                 |

Fonte: Autor (2018)

### 4.2. Massa específica – Estado fresco

Na tabela 3 e 4 são descritas as massas do geopolímero fresco, massa dos recipientes e volume dos recipientes, juntamente com a massa específica calculada por meio da equação 1.

Tabela 3 – Massa específica para o geopolímero 1 (1:0,176)

| Recipiente | Massa do geopolímero fresco (kg) | Massa do recipiente (kg) | Volume do recipiente (dm <sup>3</sup> ) | Massa específica do geopolímero fresco (Kg/ dm <sup>3</sup> ) |
|------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1          | 1,19                             | 0,80                     | 0,196                                   | 1,98                                                          |
| 2          | 1,19                             | 0,80                     | 0,196                                   | 1,98                                                          |

Fonte: Autor (2018)

Tabela 4 - Massa específica para o geopolímero 2 (1:0,333)

| Recipiente | Massa do geopolímero fresco (kg) | Massa do recipiente (kg) | Volume do recipiente (dm <sup>3</sup> ) | Massa específica do geopolímero fresco (kg/ dm <sup>3</sup> ) |
|------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1          | 1,19                             | 0,80                     | 0,196                                   | 1,99                                                          |
| 2          | 1,19                             | 0,80                     | 0,196                                   | 1,99                                                          |

Fonte: Autor (2018)

De acordo com a ABNT NBR 9833:1987, a massa específica é calculada por meio da média de pelo menos duas medidas diferentes. Então, tem-se:

$$\gamma_{GF1} = 1,982 \text{ kg/dm}^3 \quad \text{e} \quad \gamma_{GF2} = 1,991 \text{ kg/dm}^3$$

#### 4.3 Massa específica – Amostra seca e saturada e capacidade de absorção

A tabela 5 relata as massas obtidas após a secagem dos corpos de prova em estufa.

Tabela 5 – Massa das amostras após secagem em estufa a 95° C por 24 horas

|                  | <b>Mistura de proporção</b> |           | <b>Mistura de proporção</b> |           |
|------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|
|                  | <b>1:0,176</b>              |           | <b>1:0,333</b>              |           |
|                  | Amostra 1                   | Amostra 2 | Amostra 1                   | Amostra 2 |
| <b>Massa (g)</b> | 366,94                      | 360,77    | 366,29                      | 370,93    |

Fonte: Autor (2018)

Após a pesagem dos corpos de prova secos, os mesmos foram submetidos à imersão e foram saturados. Depois de um período de 24 horas, os corpos imersos foram pesados na forma saturada e imersa em água, pesados em uma balança hidrostática. A tabela 6 mostra as massas obtidas.

Tabela 6 – Massa das amostras saturadas e imersas em água

| <b>Amostra</b>      | <b>Mistura de proporção</b> |           | <b>Mistura de proporção</b> |           |
|---------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|
|                     | <b>1:0,176</b>              |           | <b>1:0,333</b>              |           |
|                     | Amostra 1                   | Amostra 2 | Amostra 1                   | Amostra 2 |
| <b>Saturado (g)</b> | 386,98                      | 375,57    | 391,46                      | 391,66    |
| <b>Imerso (g)</b>   | 198,00                      | 184,00    | 196,00                      | 200,00    |

Fonte: Autor (2018)

Por meio das equações 2, 3 e 4; as massas específicas seca e saturada, e a capacidade de absorção puderam ser calculadas e demonstradas na tabela 7.

Tabela 7 – Massa específica seca e saturada e capacidade de absorção

|                                  | <b>Mistura de proporção<br/>1:0,176</b> |           | <b>Mistura de proporção<br/>1:0,333</b> |           |
|----------------------------------|-----------------------------------------|-----------|-----------------------------------------|-----------|
|                                  | Amostra 1                               | Amostra 2 | Amostra 1                               | Amostra 2 |
| <b>Massa específica seca</b>     | 1,94                                    | 1,88      | 1,87                                    | 1,94      |
| <b>Massa específica saturada</b> | 2,05                                    | 1,96      | 2,00                                    | 2,04      |
| <b>Absorção</b>                  | 5,46%                                   | 4,10%     | 6,87%                                   | 5,59%     |

Fonte: Autor (2018)

Utilizando as médias das amostras relatadas acima, temos as massas específicas e capacidade de absorção finais das duas misturas, descritas na tabela 8.

Tabela 8 – Massa específica seca e saturada e capacidade de absorção final

|                                  | <b>Mistura de<br/>proporção<br/>1:0,176</b> | <b>Mistura de<br/>proporção<br/>1:0,333</b> |
|----------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Massa específica seca</b>     | 1,912                                       | 1,904                                       |
| <b>Massa específica saturada</b> | 2,004                                       | 2,023                                       |
| <b>Capacidade de absorção</b>    | 4,78%                                       | 6,23%                                       |

Fonte: Autor (2018)

#### 4.4 Resistência à compressão axial

Após a realização dos ensaios nas amostras de acordo com a ABNT NBR 13279:2005, foi constatado que o tipo de ruptura nos corpos de prova não foi de forma “brusca” e com uma trinca ou quebra bem definida, mas sim de forma gradual, com formação de várias fissuras verticais, como se ocorresse um desmanche. Esse tipo de ruptura foi constatada nas duas misturas com proporções diferentes. Os corpos de prova fissurados estão apresentados nas figuras 12 e 13.

Figura 12 – Amostra após o ensaio de resistência à compressão com mistura de proporção 1:0,176



Fonte: Autor (2018)

Figura 13 – Amostra após o ensaio de resistência à compressão com mistura de proporção 1:0,333



Fonte: Autor (2018)

Os dados obtidos no ensaio foram resistência à compressão axial, em MPa; carga aplicada axialmente, em kgf. Nas tabelas 9 e 10 constata-se os dados obtidos no ensaio para cada proporção de óxido de magnésio.

Tabela 9 – Dados obtidos para o geopolímero 1 (1:0,176)

|       | <b>Resistência à<br/>Compressão<br/>Axial [MPa]</b> | <b>Carga<br/>Máxima [kgf]</b> |
|-------|-----------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1     | 4.10                                                | 824.71                        |
| 2     | 3.86                                                | 766.12                        |
| 3     | 3.07                                                | 606.75                        |
| 4     | 3.02                                                | 611.71                        |
| 5     | 4.07                                                | 822.07                        |
| Média | <b>3.62</b>                                         | 726.27                        |

Fonte: Autor (2018)

Tabela 10 – Dados obtidos para o geopolímero 2 (1:0,333)

|       | <b>Resistência à<br/>Compressão<br/>Axial [MPa]</b> | <b>Carga<br/>Máxima [kgf]</b> |
|-------|-----------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1     | 7.03                                                | 1394.41                       |
| 2     | 5.50                                                | 1113.25                       |
| 3     | 7.04                                                | 1391.55                       |
| 4     | 5.56                                                | 1123.72                       |
| 5     | 6.01                                                | 1189.00                       |
| Média | <b>6.23</b>                                         | 1242.39                       |

Fonte: Autor (2018)

A partir dos resultados obtidos, notou-se que a resistência média à compressão dos corpos de prova com a proporção de 1:0,333 foi 58% maior do que a resistência à compressão dos corpos com a proporção 1:0,176.

#### 4.5 Resistência à tração na flexão

Após os ensaios realizados, foi constatado que a ruptura nos corpos de prova foi próxima de 90°, ou seja, aproximadamente na linha em que força vertical foi aplicada. Essa constatação pode ser verificada pelas figuras 14 e 15.

Figura 14 – Corpo de prova no momento da ruptura na máquina



Fonte: Autor (2018)

Figura 15 – Corpo de prova após a ruptura



Fonte: Autor (2018)

Os dados obtidos no ensaio foram resistência à tração na flexão, em MPa; carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em Newtons. Nas tabelas 11 e 12 constataam os dados obtidos no ensaio para cada proporção de óxido de magnésio.

Tabela 11 – Dados obtidos para o geopolímero 1 (1:0,176)

| <b>Amostra</b> | <b>Carga<br/>Máxima<br/>(N)</b> | <b>Resistência<br/>Máxima<br/>(MPa)</b> |
|----------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| 1              | 1183,54                         | 3,09                                    |
| 2              | 1482,50                         | 3,52                                    |
| 3              | 1300,76                         | 3,08                                    |
| 4              | 1223,95                         | 2,93                                    |
| 5              | 1528,89                         | 3,79                                    |
| Média          | 1.343,93                        | 3,28                                    |

Fonte: Autor (2018)

Tabela 12 – Dados obtidos para o geopolímero 2 (1:0,333)

|       | <b>Carga<br/>Máxima<br/>(N)</b> | <b>Resistência<br/>Máxima (MPa)</b> |
|-------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1     | 1939,24                         | 5,06                                |
| 2     | 2498,17                         | 6,33                                |
| 3     | 1863,95                         | 4,59                                |
| 4     | 2258,35                         | 5,73                                |
| 5     | 2154,85                         | 5,34                                |
| Média | 2142,91                         | 5,41                                |

Fonte: Autor (2018)

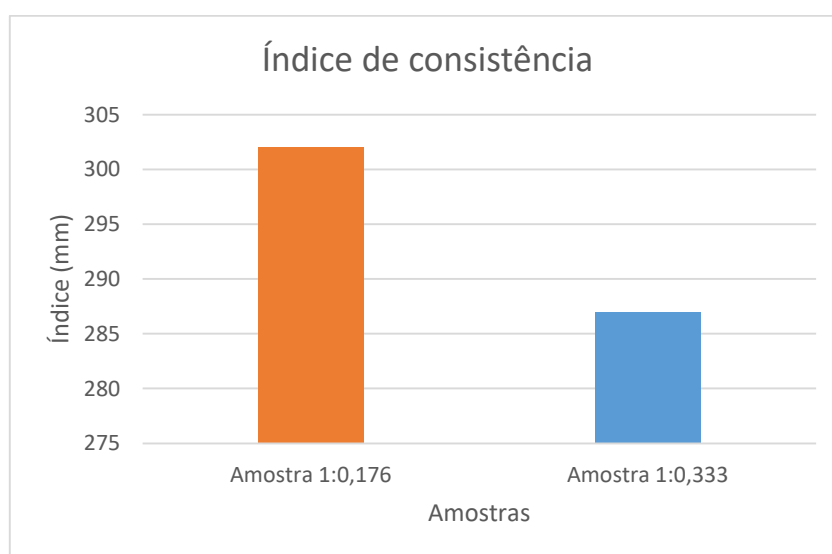
A partir dos resultados obtidos pelo aparelho, notou-se que a resistência média à tração na flexão dos corpos de prova com a proporção de 1:0,333 foi 61% maior do que a resistência à tração na flexão do corpo de prova com proporção de 1:0,176.

## 5. DISCUSSÃO

A partir dos ensaios realizados, foi possível comparar as duas misturas com as proporções diferentes de carbonato de cálcio e óxido de magnésio. Essa comparação pode ser visualizada pelos gráficos 16, 17, 18 e 19; que relatam os dados analisados nesse trabalho, que são: resistência à compressão, resistência à tração na flexão, massas específicas, capacidade de absorção e índices de consistência.

A figura 1 ilustra o índice de consistência nas amostras de proporções de 1:0,176 e 1:0,333.

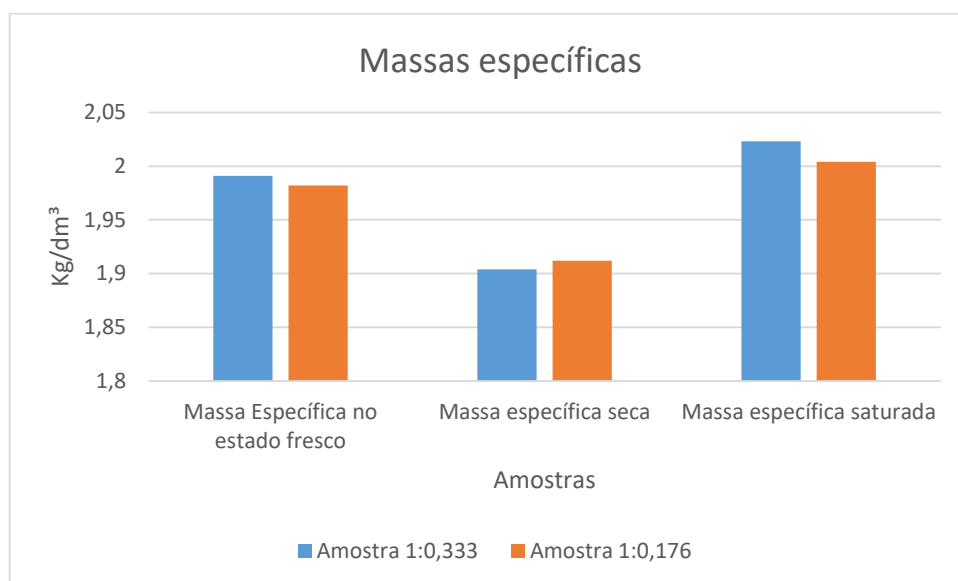
Figura 16 – Índice de consistência



Fonte: Autor (2018)

A figura 17 ilustra as massas específicas no estado fresco, no estado seco e saturado nos corpos de prova de proporções de 1:0,176 e 1:0,333.

Figura 17 - Massas específicas



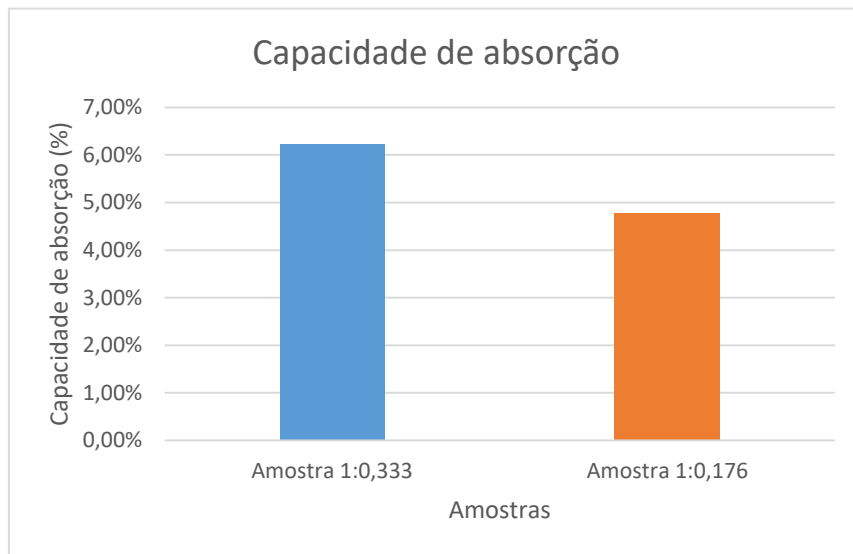
Fonte: Autor (2018)

A mistura com a menor proporção de óxido de magnésio apresentou uma massa específica no estado seco e saturado maior do que a mistura com maior proporção de MgO, o que não foi verificado no estado fresco, no qual aconteceu o inverso. A mistura de proporção 1:0,333 apresentou também uma maior capacidade de absorção de água do que a mistura de proporção 1:0,176. Esses resultados podem ser explicados pela presença maior do óxido de magnésio causar um aumento no índice de vazios na amostra, o que diminuiria a massa da mistura seca e também justificaria a maior capacidade de absorção, já que existiria mais espaços para que a infiltração da água.

A maior adição de óxido de magnésio pode ter causado a maior consistência nas pastas que foram analisadas, que pode ser verificado no ensaio de índice de consistência, já que a quantidade de solução salina foi a mesma para as duas misturas.

A figura 18 e 19 ilustram a capacidade de absorção e índice de consistência nos corpos de prova de proporções de 1:0,176 e 1:0,333.

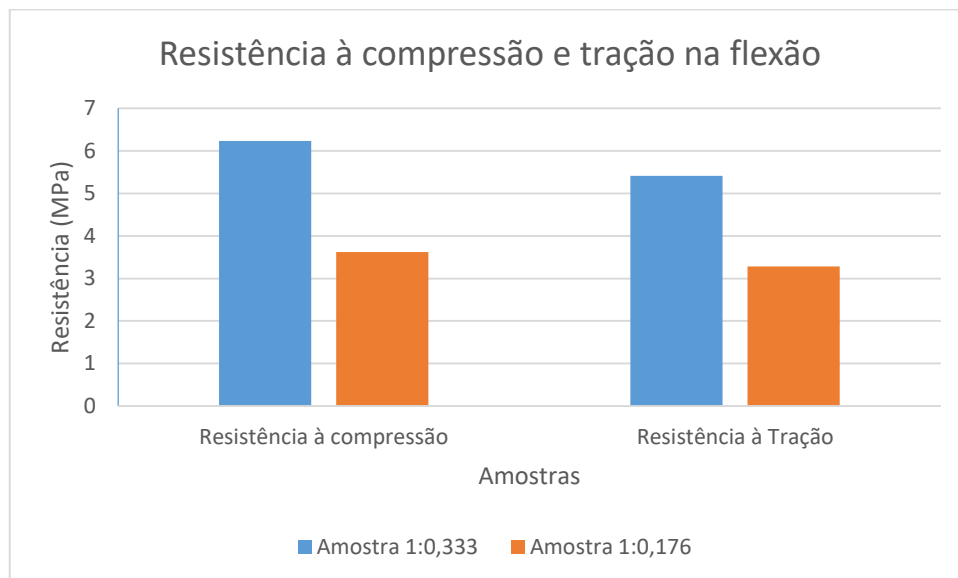
Figura 18 - Capacidade de absorção



Fonte: Autor (2018)

A figura 19 ilustra as resistências médias à tração na flexão e à compressão das proporções de 1:0,176 e 1:0,333 (proporção de calcário e óxido de magnésio).

Figura 19 - Resistência à compressão e à tração na flexão



Fonte: Autor (2018)

Analisando os resultados obtidos e os gráficos, conclui-se que, tal como esperado, a mistura que apresentava uma proporção maior de óxido de magnésio (na proporção de 1:0,333) obteve uma maior resistência à compressão e à tração na flexão que a mistura que apresentava a proporção menor de óxido de magnésio (proporção de 1:0,176). Por

outro lado, pôde-se constatar que a resistência à tração na flexão representa 87% e 90% da resistência à compressão axial, evidenciando que o material tem comportamento mais dúctil que aqueles com matrizes cimentícias, por exemplo. Esse valor mostra que o desempenho do geopolímero, nessa relação, mostra ser melhor do que o do concreto convencional e o concreto com fibras, que apresentam uma relação de 10% e 30%, respectivamente.

## **6. CONCLUSÃO**

Analisando os dados obtidos e comparando com cimento Portland, conclui-se que o óxido de magnésio não pode ser usado como uma substituição do cimento na argamassa cimentícia, já que os valores de resistência à compressão axial obtidos foram bem menores que os valores já conhecidos do cimento Portland. Para pesquisas futuras, a adição de cimento Portland na mistura estudada pode ser uma alternativa para que se obtenha uma maior resistência à compressão. A finalidade dessa mistura poderia ser então uma alternativa para o gesso, utilizando-o como revestimento de forros ou talvez na aplicação de drywall.

Uma das alternativas de pesquisa pode ser o estudo da expansibilidade e retração na adição de MgO em misturas cimentícias ou também no geopolímero, analisando a eficiência do óxido de magnésio nesse aspecto.

Por fim, os objetivos que foram traçados foram atendidos, que foram a análise da resistência à compressão, à tração na flexão e massa específica.

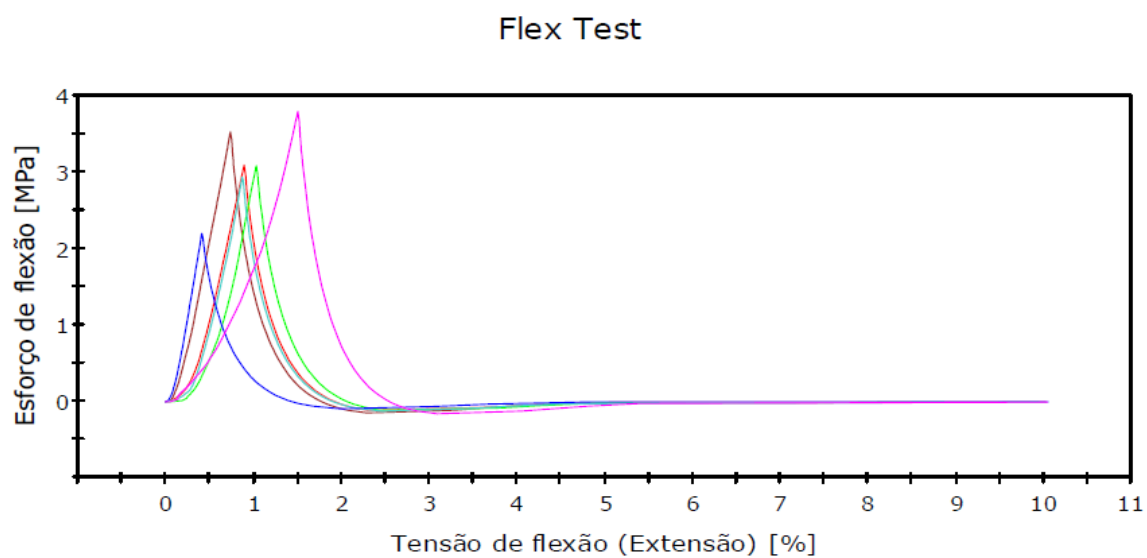
## REFERÊNCIAS

- AL-TABBAA, A. **Reactive magnesia cement**. Universidade de Cambrigde. Cambrigde. Reino Unido, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9.833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9.778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- MO, L. DENG, M. TANG, M. AL-TABBAA, A. **MgO expansive cement and concrete in China: Past, presente and future**. Elsevier. Nova Iorque, Estados Unidos. 2013.
- QIAO, H. CHENG, Q. JINLEI, W. YINGYING, S. **The application review of magnesium oxychloride cement**. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. China, 2014.
- VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado. Dissertação (mestrado)** – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2013.

## ANEXOS

### ANEXO A - Relatórios de ensaio de resistência à tração na flexão

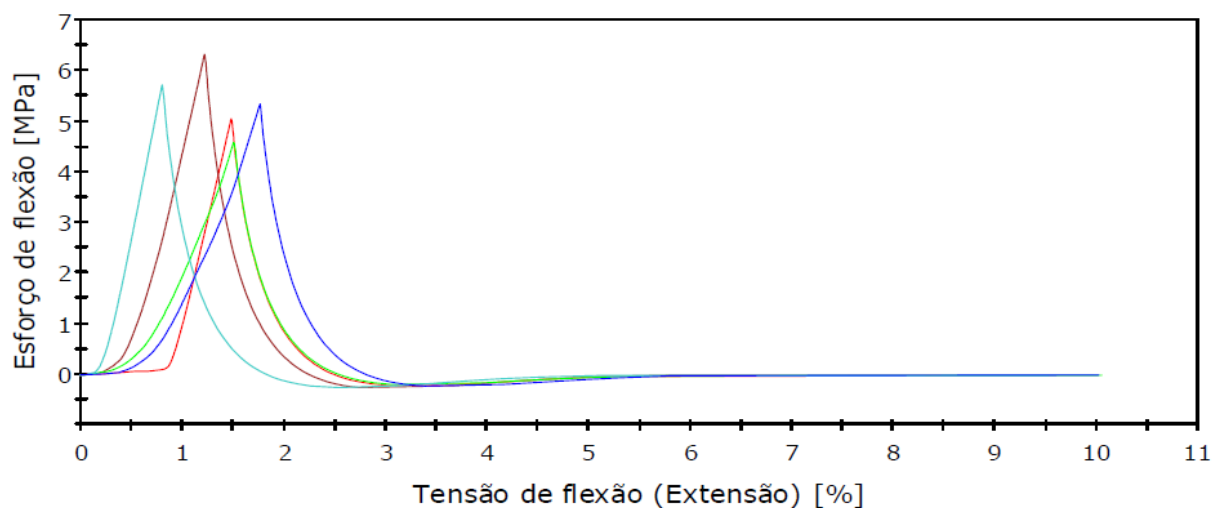
Resistência à tração na flexão para o geopolímero com proporções de 85% de calcário e 15% de óxido de magnésio (1:0,176)



|                         | Etiqueta do corpo de prova | Maximum Load [N] | Maximum Stress [MPa] | Flex Modulus [MPa] |
|-------------------------|----------------------------|------------------|----------------------|--------------------|
| 1                       |                            | 1.183,54         | 3,09                 | 538,81             |
| 2                       |                            | 1.482,50         | 3,52                 | 619,53             |
| 3                       |                            | 1.300,76         | 3,08                 | 590,97             |
| 4                       |                            | 1.223,95         | 2,93                 | 637,57             |
| 5                       |                            | 934,00           | 2,20                 | 685,31             |
| 6                       |                            | 1.528,89         | 3,79                 | 491,12             |
| Média                   |                            | 1.275,61         | 3,10                 | 593,89             |
| Desvio padrão           |                            | 216,99377        | 0,54750              | 70,03840           |
| Mínimo                  |                            | 934,00           | 2,20                 | 491,12             |
| Máximo                  |                            | 1.528,89         | 3,79                 | 685,31             |
| Coeficiente de variação |                            | 17,01103         | 17,65488             | 11,79322           |

Resistência à tração na flexão para o geopolímero com proporções de 75% de calcário e 25% de óxido de magnésio (1:0,333)

Flex Test

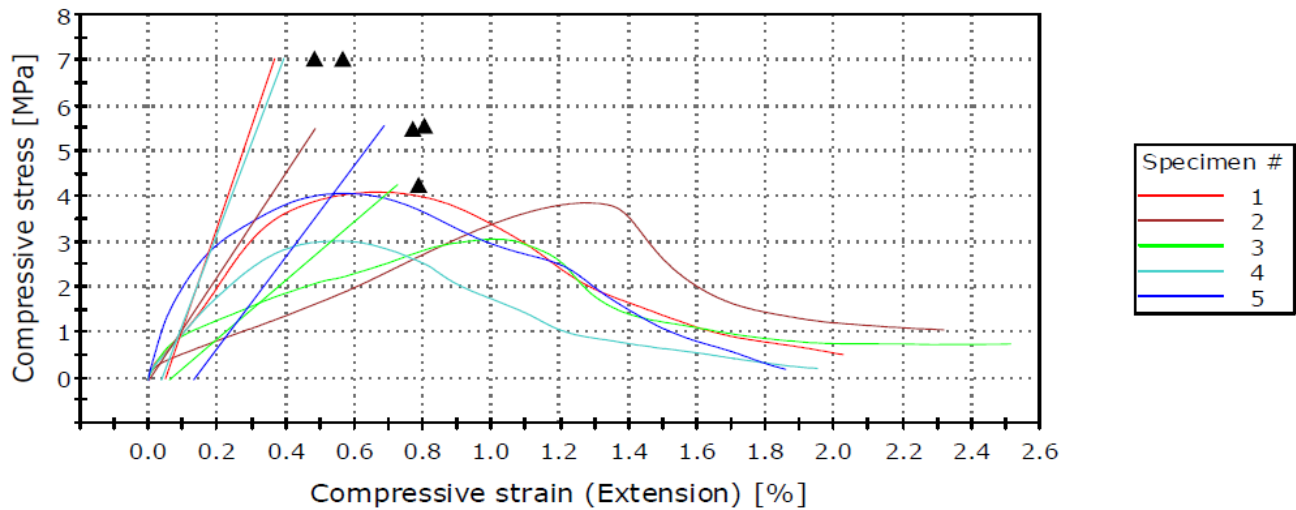


|                         | Etiqueta do corpo de prova | Maximum Load [N] | Maximum Stress [MPa] | Flex Modulus [MPa] |
|-------------------------|----------------------------|------------------|----------------------|--------------------|
| 1                       |                            | 1.939,24         | 5,06                 | 874,87             |
| 2                       |                            | 2.498,17         | 6,33                 | 901,47             |
| 3                       |                            | 1.863,95         | 4,59                 | 612,07             |
| 4                       |                            | 2.258,35         | 5,73                 | 1.012,91           |
| 5                       |                            | 2.154,85         | 5,34                 | 645,01             |
| Média                   |                            | 2.142,91         | 5,41                 | 809,26             |
| Desvio padrão           |                            | 254,45220        | 0,66001              | 173,30754          |
| Mínimo                  |                            | 1.863,95         | 4,59                 | 612,07             |
| Máximo                  |                            | 2.498,17         | 6,33                 | 1.012,91           |
| Coeficiente de variação |                            | 11,87413         | 12,20003             | 21,41543           |

## ANEXO B - Relatórios de ensaio de resistência à compressão axial

Resistência à compressão axial para o geopolímero com proporções de 85% de calcário e 15% de óxido de magnésio (1:0,176).

Specimen 1 to 5

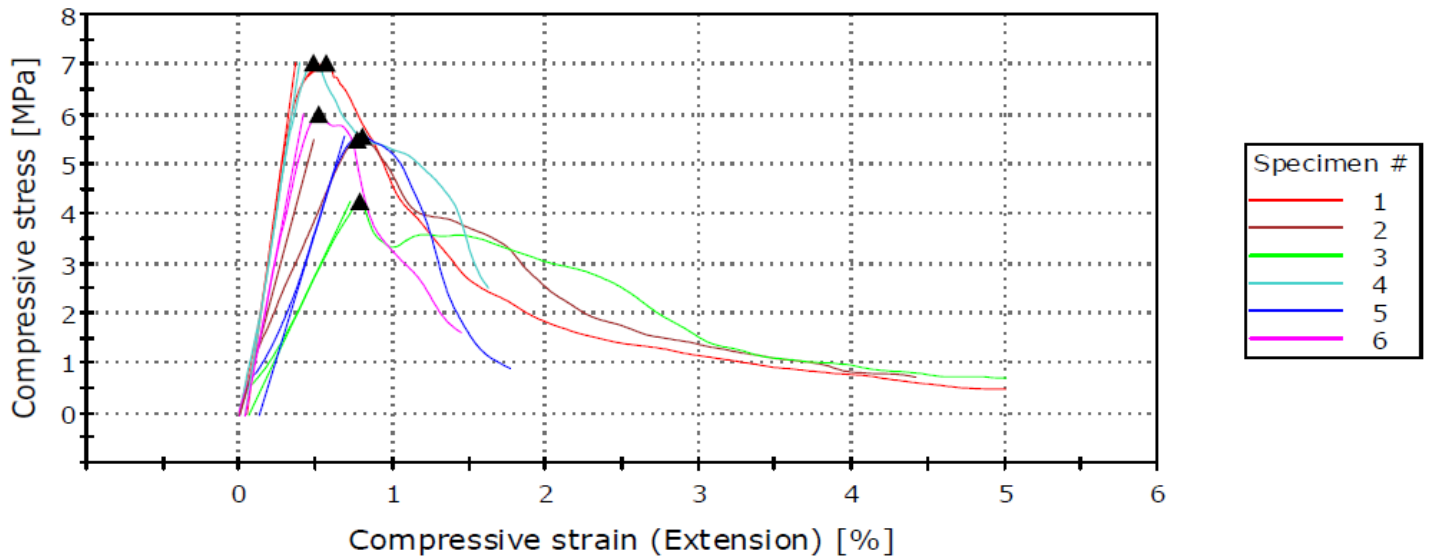


|                                | Modulus<br>(Automatic<br>Young's)<br>[MPa] | Compressive<br>stress at<br>Maximum Load<br>[MPa] | Compressive<br>strain<br>(Extension) at<br>Maximum Load<br>[%] |
|--------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1                              | 1095.86                                    | 4.10                                              | 0.67                                                           |
| 2                              | 363.20                                     | 3.86                                              | 1.27                                                           |
| 3                              | 1232.35                                    | 3.07                                              | 1.00                                                           |
| 4                              | 954.56                                     | 3.02                                              | 0.55                                                           |
| 5                              | 2666.22                                    | 4.07                                              | 0.58                                                           |
| Mean                           | 1262.44                                    | 3.62                                              | 0.81                                                           |
| Standard<br>deviation          | 851.86                                     | 0.53560                                           | 0.31055                                                        |
| Coefficient<br>of<br>variation | 67.48                                      | 14.77931                                          | 38.13213                                                       |

|                             | <b>Compressive<br/>extension at<br/>Maximum Load<br/>[mm]</b> | <b>Maximum Load<br/>[kgf]</b> |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1                           | 0.67                                                          | 824.71                        |
| 2                           | 1.27                                                          | 766.12                        |
| 3                           | 1.00                                                          | 606.75                        |
| 4                           | 0.55                                                          | 611.71                        |
| 5                           | 0.58                                                          | 822.07                        |
| Mean                        | 0.81                                                          | 726.27                        |
| Standard<br>deviation       | 0.31060                                                       | 109.38760                     |
| Coefficient of<br>variation | 38.14141                                                      | 15.06152                      |

Resistência à compressão axial para o geopolímero com proporções de 75% de calcário e 25% de óxido de magnésio (1:0,333).

Specimen 1 to 6



|                             | Modulus<br>(Automatic<br>Young's)<br>[MPa] | Compressive<br>stress at<br>Maximum Load<br>[MPa] | Compressive<br>strain<br>(Extension) at<br>Maximum Load<br>[%] |
|-----------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1                           | 2216.29                                    | 7.03                                              | 0.57                                                           |
| 2                           | 1142.81                                    | 5.50                                              | 0.77                                                           |
| 3                           | 644.57                                     | 4.26                                              | 0.79                                                           |
| 4                           | 1984.25                                    | 7.04                                              | 0.48                                                           |
| 5                           | 1004.78                                    | 5.56                                              | 0.80                                                           |
| 6                           | 1584.81                                    | 6.01                                              | 0.52                                                           |
| Mean                        | 1429.58                                    | 5.90                                              | 0.65                                                           |
| Standard<br>deviation       | 604.91                                     | 1.05370                                           | 0.14722                                                        |
| Coefficient of<br>variation | 42.31                                      | 17.86258                                          | 22.50571                                                       |

|                             | <b>Compressive<br/>extension at<br/>Maximum Load<br/>[mm]</b> | <b>Maximum Load<br/>[kgf]</b> |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1                           | 0.57                                                          | 1394.41                       |
| 2                           | 0.77                                                          | 1113.25                       |
| 3                           | 0.79                                                          | 844.74                        |
| 4                           | 0.48                                                          | 1391.55                       |
| 5                           | 0.80                                                          | 1123.72                       |
| 6                           | 0.52                                                          | 1189.00                       |
| Mean                        | 0.65                                                          | 1176.11                       |
| Standard<br>deviation       | 0.14728                                                       | 205.29959                     |
| Coefficient of<br>variation | 22.51787                                                      | 17.45578                      |