



**Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil**

Amanda Marques Lopes Estolano

**Efeitos do metacaulim sobre Blocos Intertravados de Concreto (Pavers)**

Recife, PE

2018



**Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil**

Amanda Marques Lopes Estolano

**Efeitos do metacaulim sobre Blocos Intertravados de Concreto (Pavers)**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Católica de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia civil.

Área de concentração: Engenharia das Construções

Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira

Coorientadora: Profa. Dra. Nathália Bezerra de Lima

Recife, PE

2018

E81e Estolano, Amanda Marques Lopes  
Efeitos do metacaulim sobre blocos intertravados de concreto  
(pavers) / Amanda Marques Lopes Estolano, 2018.  
112 f. : il.

Orientador: Romilde Almeida de Oliveira  
Coorientador: Nathália Bezerra de Lima  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco.  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Mestrado em  
Engenharia Civil, 2018.

1. Concreto. 2. Resistência à compressão. 3. Pavimentação.  
4. Materiais de construção. I. Título.

CDU 666.972

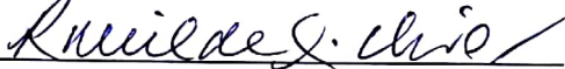
Ficha catalográfica elaborada por Mércia Maria R. do Nascimento – CRB-4/788

Amanda Marques Lopes Estolano

**Efeitos do metacaulim sobre Blocos Intertravados de Concreto (Pavers)**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Orientador:**



Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira

Universidade Católica de Pernambuco

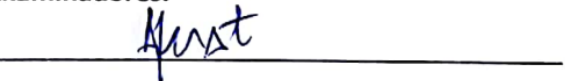
**Coorientador:**



Profa. Dra. Nathália Bezerra de Lima

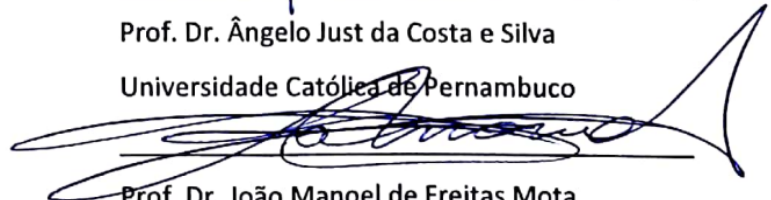
Universidade Federal de Pernambuco

**Examinadores:**



Prof. Dr. Ângelo Just da Costa e Silva

Universidade Católica de Pernambuco



Prof. Dr. João Manoel de Freitas Mota

Instituto Federal de Pernambuco

Recife, PE

2018

## **Dedicatória**

Aos meus pais, Marinalva e Manoel (*in memoriam*),  
e ao meu marido Victor

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu força, coragem e sabedoria durante toda a caminhada.

Ao professor Romilde Almeida de Oliveira pela orientação, pela disponibilidade, pela paciência, e por todo o conhecimento transmitido, tornando possível a conclusão dessa pesquisa.

À parceria da UFPE *Campus Agreste*, em especial à professora Giuliana Franco, e aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Construção civil, Fabiola Franca e Everton Rodrigues, pelo auxílio na realização dos ensaios de abrasão.

Aos professores do mestrado, que contribuíram com os ensinamentos nas disciplinas.

À Nathalia Lima, por toda a orientação, incentivo, pela parceria na análise química e por todo o suporte para a conclusão desta pesquisa.

Ao engenheiro Luis Arede e a empresa parceira Lajes Timbi, que deram todo o apoio na fabricação dos blocos e ensaios de compressão e pela disponibilização dos materiais.

Ao amigo Nathan Lima pelo grande auxílio no acompanhamento dos processos de fabricação e ensaios e por nos apresentar a empresa parceira Premofort, que nos forneceu material e toda a estrutura para a confecção dos blocos e realização dos ensaios de compressão.

À Rogério, Márcia, Anderson e Nathalia, do Departamento de Química Fundamental da UFPE, pelo suporte na realização dos ensaios de análise química.

À empresa Metacaulim do Brasil, pela disponibilização de amostra para o início da pesquisa.

À CAPES, pela bolsa durante o curso de mestrado.

A todos os meus amigos e familiares que me ajudaram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

Ao amigo Carlos Fernando, aluno de engenharia civil na UNICAP, pelo auxílio na realização dos ensaios de agregados.

ESTOLANO, Amanda Marques Lopes. **Efeitos do Metacaulim sobre Blocos Intertravados de Concreto para pavimentação (pavers)**. Recife: UNICAP, 2018. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

## Resumo

Nesta dissertação foram avaliados os efeitos do metacaulim nas propriedades mecânicas de resistência à compressão e de abrasão dos blocos intertravados de concreto, bem como nas etapas de fabricação. Foram preparados blocos de concreto com adições de 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de metacaulim, como também sem esta adição. Em todos estes seis casos, foram utilizados 50 kg de cimento Portland tipo II, 50 kg de brita, 80 kg pó de pedra, 140 kg de areia e 15L de água, cuja relação água cimento foi de 0,3. Os resultados das propriedades mecânicas destes materiais revelaram que as peças de concreto para pavimentação com adição de metacaulim (entre 10% e 30%) apresentaram, em média, valores maiores de resistência à compressão (~37 MPa) quando comparado ao valor correspondente do bloco sem adição de metacaulim (~30 MPa), ou seja, houve uma intensificação de 24% na resistência à compressão. Embora essa propriedade nos teores com 20%, 25% e 30% de adição, não apresentou variação significativa. A adição de metacaulim também levou a uma intensificação de cerca de 10% no desgaste por abrasão em relação aos blocos de referência. Adicionalmente, foi realizada uma interpretação química das etapas envolvidas na fabricação destes blocos de concreto. Os resultados mostram que para o caso com a maior adição de metacaulim (30%) a quantidade de água utilizada na fabricação dos blocos de concreto não é suficiente para uma reação com rendimento total de conversão dos óxidos de cálcio e alumínio em seus respectivos hidróxidos. Os resultados de microscopia de fluorescência evidenciaram que o teor com 10% de metacaulim apresentou rendimento elevado quanto às reações de hidratação do cimento. Em todos os outros casos, foi verificado que houve sobra de cimento anidro. Também foi avaliado nesta dissertação o uso do metacaulim como um substituinte parcial ao cimento Portland. Os resultados mostraram que os blocos de concreto sem metacaulim apresentaram os maiores valores de resistência à compressão quando comparado aos casos onde o cimento foi substituído por metacaulim. Finalmente, ao avaliar todos os diferentes tipos de blocos de concreto fabricados nesta dissertação, a adição de 10% de metacaulim leva ao concreto de maior potencialidade para aplicações na construção civil.

**Palavras-chave:** concreto; pavimentação; metacaulim; resistência à compressão; abrasão.

ESTOLANO, Amanda Marques Lopes. **Effects of Metakaolin on concrete interlocking blocks (pavers)** Recife: UNICAP, 2018. Dissertation (Master). Universidade Católica de Pernambuco. Graduate Program in Civil Engineering.

### **Abstract**

The effects of the metakaolin on the mechanical properties of the of compressive strength and abrasion of concrete interlocking blocks, as well as on the processing steps were evaluated. The pavers were carried out with 0%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% metakaolin additions. All these materials were fabricated by employing the following precursors: 50 kg of Portland cement type II; 50 kg of gravel; 80 kg of stone powder; 140 kg of sand; and 15 L of water, whose water cement ratio was 0.3. In addition, the mechanical properties revealed that all metakaolin pavers presented larger values of compressive strength (~ 37 MPa) when compared to the corresponding value of the blocks with absence of metakaolin (~30 MPa), i.e., the metakaolin addition enhanced the compressive strength property in 24%. Although the contents with 20%, 25% and 30% of addition, this property did not show significant variation. Further, a chemical rationalization of the steps associated with the fabrication of the concrete pavers was carried out. The results indicated that for the metakaolin pavers with 30% addition of the metakaolin, the water quantity is not capable to transform both calcium oxide and aluminum oxide in their corresponding hydroxide compounds in an efficient manner. These experiments by fluorescence microscopy indicated that the metakaolin addition of 10% presented a high yield as regards the hydration reactions of the cement. Furthermore, for the other cases the anhydrous cement was left over. This is evidenced by the exacerbated fluorescence in the blue region. On the other hand, it was also evaluated in this work, the usage of the metakaolin as a partial substitute for the Portland cement. The results showed that the concrete blocks with absence of the metakaolin had the largest values of compressive strength when compared to the cases where the cement was replaced by metakaolin. Finally, when it was evaluated all different types of concrete studied in this work, the metakaolin addition of 10% in the precursor mixture leads to the concrete with larger potentiality for applications in civil constructions.

**Keywords:** concrete; paving; metakaolin; compressive strength; abrasion.



## Lista de figuras

Figura 1. Via Ápia em Roma (MARÉ, 2011) .....	19
Figura 2. Pavimento de paralelepípedo .....	19
Figura 3. Pavimento com severo desgaste superficial por abrasão .....	21
Figura 4- Estrutura típica do pavimento intertravado (ABCP, 2010).....	21
Figura 5. Tipos de arranjos do pavimento intertravado de concreto (ABCP 2010) .....	22
Figura 6. Formatos usuais dos blocos (ABCP 2010).....	23
Figura 7. As três possíveis movimentações dos blocos submetidos à ação de forças no pavimento (ABCP 2010).....	23
Figura 8. Relação entre Resistência à abrasão e compressão obtida por Cruz (2003) ...	28
Figura 9. Equipamento utilizado na fabricação dos <i>pavers</i> .....	31
Figura 10. Etapas de fabricação dos <i>pavers</i> de concreto (com teores de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%) para pavimentação estudada nesta dissertação: (a) preparação das misturas precursoras; (b) adição da mistura precursora para prensagem; (c) prensagem dos <i>pavers</i> de concreto; (d) saída das peças de concreto do equipamento de prensagem; (e) armazenamento dos <i>pavers</i> e (f) etapa de realização do tempo de cura. ....	34
Figura 11. Curva granulométrica dos agregados .....	41
Figura 12. Abrasímetro utilizado nos ensaios de resistência à abrasão .....	45
Figura 13. Procedimento de verificação da dimensão da cavidade dos <i>pavers</i> .....	46
Figura 14. Cura dos <i>pavers</i> com utilização de lona plástica. ....	47
Figura 15. Etapas de fabricação dos <i>pavers</i> (com teores de metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10%) para pavimentação estudada nesta dissertação: (a) adição da mistura precursora para prensagem; (b) saída dos <i>pavers</i> do equipamento de prensagem; (c) armazenamento dos <i>pavers</i> e (d) etapa de realização do tempo de cura.....	48
Figura 16. Curva granulométrica dos agregados utilizados. ....	52
Figura 17. Relação entre a Resistência à compressão dos <i>pavers</i> de concreto com os valores dos teores de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. ....	60
Figura 18. Relação entre o diâmetro da cavidade dos <i>pavers</i> de concreto com os valores dos teores de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% .....	62
Figura 19. Relação obtida entre a Resistência à compressão e a abrasão .....	63
Figura 20 - Densidade média dos teores .....	64

Figura 21. Imagens dos experimentos de microscopia de fluorescência dos precursores e dos produtos na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm...	70
Figura 22. Imagens dos experimentos de microscopia de fluorescência dos precursores e dos produtos na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.....	70
Figura 23. Imagens dos experimentos de microscopia de fluorescência dos precursores e dos produtos na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.....	71
Figura 24- Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 10% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.	72
Figura 25- Imagem da microscopia de fluorescência do precursor CII na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm. ....	73
Figura 26 - Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 30% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.	73
Figura 27. Relação entre o diâmetro da cavidade dos <i>pavers</i> de concreto com os valores dos teores de metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10%.....	76
Figura 28. Relação entre o diâmetro da cavidade dos <i>pavers</i> com os valores dos teores de metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10% .....	77
Figura 29. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor CII na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm. ....	98
Figura 30. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor CII na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm. ....	98
Figura 31. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor CII na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.....	99
Figura 32. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor areia na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm. ....	99
Figura 33. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor areia na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm. ....	100
Figura 34. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor areia na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.....	100
Figura 35. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor pó de pedra na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm. ....	101
Figura 36. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor pó de pedra na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm. ....	101
Figura 37. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor pó de pedra na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.....	102
Figura 38. Imagem da microscopia de fluorescência do aditivo metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm. ....	102

Figura 39. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm. ....	103
Figura 40. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.....	103
Figura 41. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 0% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm. ....	104
Figura 42. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 0% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm. ....	104
Figura 43. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 0% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm. ....	105
Figura 44. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 10% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm. ....	105
Figura 45. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 10% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm. ....	106
Figura 46. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 10% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm. ....	106
Figura 47. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 15% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm. ....	107
Figura 48. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto com 15% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm. ....	107
Figura 49. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 15% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm. ....	108
Figura 50. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 20% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm. ....	108
Figura 51. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto com 20% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm. ....	109
Figura 52. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 20% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm. ....	109

Figura 53. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 25% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm. ....	110
Figura 54. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto com 25% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm. ....	110
Figura 55. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 25% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm. ....	111
Figura 56. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 30% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm. ....	111
Figura 57. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto com 30% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm. ....	112
Figura 58. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 30% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm. ....	112

## Lista de tabelas

Tabela 1. Características recomendadas para agregados graúdos e miúdos empregados na produção de <i>pavers</i> (OLIVEIRA, 2004) .....	26
Tabela 2. Resistência característica à compressão do <i>paver</i> .....	28
Tabela 3. Critérios para a resistência à abrasão do <i>paver</i> .....	30
Tabela 4 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado na pesquisa .....	35
Tabela 5 - Propriedades químicas do cimento utilizado na pesquisa .....	36
Tabela 6. Massa por amostra de ensaio (Ensaio de material pulverulento) .....	37
Tabela 7. Porcentagem retida acumulada dos agregados.....	40
Tabela 8. Classificação das areias (SELMO, 1989) .....	40
Tabela 9. Valores do teor de material pulverulento.....	41
Tabela 10. Massa específica dos agregados .....	42
Tabela 11. Traços utilizados para a fabricação dos <i>pavers</i> com teores de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.....	42
Tabela 12. Valores da absorção de água pelos agregados.....	43
Tabela 13. Abrasão Los Angeles .....	43
Tabela 14. Análise química da composição química metacaulim utilizado .....	44
Tabela 15. Propriedades gerais do metacaulim utilizado nesta pesquisa.....	44
Tabela 16. Espessura nominal dos <i>pavers</i> .....	45
Tabela 17. Ensaio químicos do cimento CPV-ARI.....	49
Tabela 18. Ensaio físicos do cimento CPV ARI .....	49
Tabela 19. Ensaio de resistência do cimento CPV ARI .....	50
Tabela 20. Porcentagem retida acumulada dos agregados .....	51
Tabela 21. Teor de material pulverulento .....	52
Tabela 22. Massa específica dos agregados .....	53
Tabela 23. Traços utilizados para a fabricação de <i>pavers</i> de concreto com teores substituição parcial de cimento por metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10% .....	53
Tabela 24. Absorção dos agregados.....	54
Tabela 25. Abrasão Los Angeles .....	54
Tabela 26. Especificações do metacaulim utilizado nesta pesquisa .....	55

Tabela 27. Propriedades físicas do metacaulim utilizado nesta pesquisa .....	55
Tabela 28. Dimensão e quantidade de <i>pavers</i> por tábua .....	57
Tabela 29. Valores da resistência à compressão, da resistência à compressão média, da resistência característica, desvio padrão e do coeficiente de variação de todos os tipos de <i>pavers</i> de concreto com teores de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%....	59
Tabela 30. Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de resistência à compressão .....	61
Tabela 31. Valores do diâmetro da cavidade dos <i>pavers</i> de concreto com teores de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% e dos desvios padrões e dos coeficientes de variância após um tempo de cura de 28 dias. ....	62
Tabela 32. Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de resistência à abrasão dos teores de adição pura com 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% .....	63
Tabela 33. Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de densidade ..	64
Tabela 34. Valores das massas molares dos principais sólidos inorgânicos presentes nas misturas precursoras dos <i>pavers</i> .....	67
Tabela 35. Valores das energias de Gibbs de formação ( $\Delta_f G$ ) e das entalpias de formação ( $\Delta_f H$ ) dos principais sólidos inorgânicos presentes nas misturas precursores dos <i>pavers</i> .....	67
Tabela 36. Valores das energias de Gibbs de reação ( $\Delta_r G$ ) e das entalpias de formação ( $\Delta_r H$ ) das etapas de formação das misturas precursoras dos <i>pavers</i> dos lotes TA0' - TA30' .....	68
Tabela 37. Valores da resistência à compressão, da resistência à compressão média, da resistência característica, desvio padrão e do coeficiente de variância de todos os tipos de blocos de concreto com teores de metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10%. ....	75
Tabela 38. Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de resistência à compressão dos teores de substituição de 0%, 4%, 8% e 10% .....	76
Tabela 39. Valores do diâmetro da cavidade dos <i>pavers</i> com teores de metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10%. e dos desvios padrões e dos coeficientes de variância após um tempo de cura de 28 dias .....	77
Tabela 40. Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de resistência à abrasão dos teores de substituição de 0%, 4%, 8% e 10% .....	78

## Sumário

Capítulo 1 – Introdução e Objetivos .....	15
1.1 Introdução .....	15
1.2. Importância do tema .....	16
1.3 Objetivos .....	17
1.3.1 Objetivos gerais.....	17
1.3.2. Objetivos específicos.....	17
1.4 Conteúdos do texto .....	17
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica .....	18
2.1. Histórico.....	18
2.2. Características operacionais e estruturais .....	20
2.2.1. Estrutura do pavimento intertravado de concreto .....	20
2.2.2. Arranjos e formatos .....	22
2.2.3. Intertravamento .....	23
2.3 Propriedade dos materiais normalmente utilizados na fabricação de blocos intertravados de concreto ( <i>pavers</i> ) .....	24
2.3.1. Cimento Portland .....	24
2.3.2. Agregados .....	25
2.3.3. Concreto seco.....	26
2.4. Propriedades analisadas .....	27
2.5. Equipamentos .....	30
2.6. Efeitos da adição de pozolana no concreto .....	31
Capítulo 3 – Metodologia.....	34
3.1. Metodologia de fabricação dos blocos intertravados de concreto ( <i>pavers</i> ) com teores de adição pura de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% .....	34
3.1.1. Características dos materiais utilizados.....	35
3.1.2 Ensaio de Resistência à compressão .....	44
3.1.3. Ensaio de Resistência à abrasão .....	45
3.1.4. Procedimento de cura .....	46
3.1.5. Experimentos de Microscopia de Fluorescência.....	47

3.2. Metodologia de fabricação dos blocos intertravados de concreto ( <i>pavers</i> ) com teores de substituição parcial de cimento por metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10% .....	47
3.2.1. Características dos materiais utilizados .....	48
3.2.2 Ensaio de caracterização dos agregados .....	56
3.2.3 Ensaio de Resistência à compressão .....	56
3.2.4. Ensaio de Resistência à abrasão .....	56
3.2.5 Caracterização do equipamento de fabricação dos blocos .....	56
3.2.6 Procedimento de cura .....	57
Capítulo 4 - Resultados e Discussão .....	58
4.1 Efeitos do metacaulim como adição pura em blocos intertravados de concreto ( <i>pavers</i> ) .....	58
4.1.2 Propriedades mecânicas dos <i>pavers</i> de concreto .....	58
4.1.3 O papel do metacaulim nas etapas de fabricação dos blocos intertravados e nas propriedades termodinâmicas das reações de hidratação .....	65
4.1.4 Experimentos de microscopia de fluorescência .....	69
4.2 - Efeitos da substituição parcial de cimento por metacaulim em blocos intertravados de concreto ( <i>paver</i> ) .....	74
4.2.1 Propriedades mecânicas .....	74
Capítulo 5 – Conclusões .....	79
5.1. Conclusões principais .....	79
5.2. Propostas para futuras pesquisas .....	80
Referências .....	82
APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS LOTES .....	88
APÊNDICE B – REAÇÕES ENVOLVIDAS NA FABRICAÇÃO DOS BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO .....	92
APÊNDICE C – IMAGENS DA MICROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA .....	97



## Capítulo 1 – Introdução e Objetivos

### 1.1 Introdução

O pavimento intertravado de concreto de acordo com a ABNT NBR 9781:2013 é um material flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças<sup>1</sup> de concreto justapostas em uma camada de assentamento. As juntas entre as peças deste tipo de material, geralmente, são preenchidas por rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção.

A crescente utilização desse pavimento no Brasil está associada à disponibilidade de equipamentos e materiais, além da fácil manutenção (CRUZ, 2003). Usualmente não utiliza mão de obra especializada tanto para a execução da base do pavimento, quanto para o assentamento da camada principal composta pelos blocos de concreto. Portanto, estes sistemas demandam uma maior atenção dos órgãos públicos responsáveis pela pavimentação de vias. Adicionalmente, estes sistemas poderão proporcionar melhorias estéticas e técnicas, além de reduzirem os custos. A execução deste tipo de pavimento geralmente utiliza de forma intensa a mão de obra local, o que proporciona um aumento da receita familiar com a geração de novos empregos, como foi reportado por Muller (2005).

Por outro lado, entre as décadas de 1970 e 1980 foram observadas várias patologias de desgaste nos pisos, independentemente do tipo de clima do país e da resistência à compressão do bloco intertravado de concreto (SHACKEL, 1990). A partir disto, foram realizadas várias revisões das normas internacionais. Isto tem resultado na necessidade de realização de ensaios de abrasão em materiais deste tipo. Neste contexto, a adição de componentes no concreto para *pavers* tende a afetar as propriedades mecânicas dos mesmos, como a resistência à abrasão e a resistência à compressão (ROSSIGNOLLO; OLIVEIRA, 2007). Um exemplo de adição que vem sendo amplamente utilizado pela construção civil é o metacaulim.

---

<sup>1</sup> Neste trabalho o termo “peças” será tratado como *pavers* ou blocos

## 1.2. Importância do tema

O pavimento intertravado de concreto, além de apresentar facilidade na instalação e na manutenção, não necessita de mão de obra especializada. Esse tipo de pavimento é amplamente utilizado no Brasil, que além de suas características estruturais, apresentam vantagens estéticas. Esse intenso uso gera a necessidade de aperfeiçoamento na sua fabricação, para melhorar o seu desempenho em diferentes locais e finalidades.

O bloco não possui revestimento como forma de acabamento, e é afetado por um severo desgaste abrasivo, seja utilizado em tráfego de pedestres e veículos leves, quanto em tráfegos mais intensos. Há poucos estudos que tratam do ensaio de resistência à abrasão e da relação desse parâmetro com a resistência à compressão do bloco. A NBR 9781:2013 trata como facultativo o ensaio de abrasão, de forma a não exigir dos fabricantes uma análise dessa propriedade mesmo sendo uma patologia muito comum nesse tipo pavimento. Portanto, é válido avaliar o comportamento abrasivo que é diretamente relacionado à durabilidade do pavimento. Além disso, neste estudo buscou-se outro método de avaliação, a análise química, que pode fornecer informações importantes para analisar a qualidade do bloco.

Em geral, os estudos contemplam a substituição em massa de cimento por metacaulim. Isso pode ser justificado no âmbito ambiental, em que o processo de produção do metacaulim consome menos energia dado a baixa temperatura de queima comparada ao cimento (LACERDA; HELENE, 2005). Visto por esse lado, há um maior interesse pela busca por materiais e métodos que minimizem o impacto ambiental. Além desse aspecto, segundo Hong e Glasser (2002), o emprego de material pozolânico no concreto reduz a reação álcali-agregado devido a diminuição da relação Cálcio/Silício das pastas, além de formar mais C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado) que parece adsorver os álcalis da solução dos poros. Nesta pesquisa trataremos além da substituição parcial de cimento por metacaulim, a adição desse material no concreto. Mesmo este último sendo um estudo pouco explorado, devido ao usual conceito de proporcionalidade entre o metacaulim e a resistência à compressão do concreto, buscou-se analisar se esse conceito é válido para diferentes teores.

### **1.3 Objetivos**

#### 1.3.1 Objetivos gerais

O objetivo geral desta dissertação consiste no entendimento dos efeitos físicos (mecânicos) e químicos do uso de vários teores de metacaulim (tanto como adição quanto como substituinte do cimento) nas propriedades mecânicas de resistência à compressão, de resistência à abrasão de *pavers* de concreto.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Análise das propriedades mecânicas dos *pavers*.
- Realização de interpretações químicas, avaliação das propriedades termodinâmicas e realização de microscopia de fluorescência;
- Escolha do bloco de concreto com metacaulim de maior potencialidade de aplicação na construção civil.

### **1.4 Conteúdos do texto**

A pesquisa está dividida em cinco capítulos:

No capítulo 1, uma breve introdução, importância do tema e objetivos.

No segundo capítulo, a fundamentação teórica sobre a história, estrutura e características do pavimento intertravado de concreto, bem como sobre a adição utilizada na pesquisa.

O capítulo 3 descreve toda a metodologia utilizada.

O quarto capítulo aborda todos os resultados e discussões.

No capítulo 5, as conclusões gerais e propostas para futuras pesquisas.

## Capítulo 2 – Fundamentação Teórica

### 2.1. Histórico

A importância da pavimentação ao longo da história revela a necessidade dos povos de interligar-se de forma a facilitar a comunicação e locomoção entre eles. O pavimento intertravado de concreto foi uma das alternativas utilizadas. A sua evolução foi reportada por Cruz (2003), Godinho (2009), Muller (2005) e Maré (2011). Neste contexto, os povos etruscos foram os pioneiros na construção de caminhos com a finalidade de transportar pessoas e cargas entre vilas e colônias da época. Por sua vez, os romanos, que herdaram esse conhecimento, utilizaram as técnicas para facilitar o deslocamento de tropas militares, conquistando novas regiões e expandindo o Império. Utilizavam também esses caminhos com propósitos civis e de cunho econômico.

Enquanto os etruscos utilizavam pedra de mão com um material mais fino, os romanos aprimoraram essas técnicas misturando a areia juntamente com cal ou calcário, formando um tipo de argamassa para juntar ao seixo rolado ou pedra de mão. Iniciou-se uma preocupação com a capacidade estrutural das camadas, para garantir a estabilidade ao passar pelo caminho construído. No século 150 a.C. na cidade italiana de Puzzuoli foi descoberto um material denominado “puzzolana”, que misturado a argamassa de cal e areia, apresentava certa resistência mecânica. As evoluções deste material levaram ao desenvolvimento do cimento Portland. Os romanos tinham uma preocupação com os caminhos que eram mais utilizados, usando pedras talhadas manualmente em forma retangular, devido à maior resistência ao desgaste.

A construção de um dos caminhos mais importantes do império romano foi a Via Ápia, criada em 312 a.C., durou quase 120 anos com trechos chegando a 10 metros de largura. Essa via foi construída com a finalidade de unir Roma e a cidade de Cápua, mas foi ampliada com o decorrer dos anos, e no século II a.C., o seu traçado chegava a Brindisi, principal ponto de ligação marítimo com as províncias orientais. A Figura 1 reportada por Maré (2011) mostra um pavimento construído na Via Ápia em Roma.



Figura 1. Via Ápia em Roma (MARÉ, 2011)

No decorrer dos anos, a finalidade foi modificando e exigindo ainda mais dos pavimentos. Precisavam construir caminhos que suportassem maior carga e tivessem uma maior durabilidade. Assim, os materiais e técnicas utilizadas foram otimizadas, dos blocos de tijolos às peças de concreto. Algumas cidades brasileiras, como Rio Branco no Acre, ainda utilizam pavimentos com blocos de tijolos devido à maior disponibilidade de material na região. Outra forma bastante utilizada no Brasil, principalmente em cidade interioranas, são os pavimentos de paralelepípedo (Figura 2), peças que possuem dimensões aproximadas de 120 milímetros de largura, 200 milímetros de comprimento e 200 milímetros de altura, assentados sobre uma espessa camada de areia com juntas de até 20 milímetros.

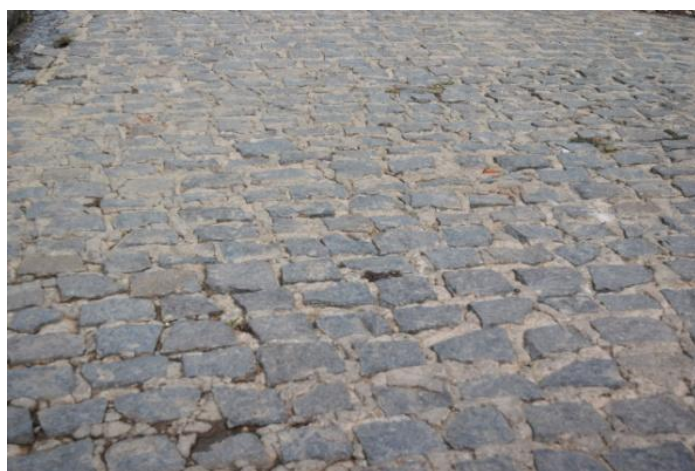


Figura 2. Pavimento de paralelepípedo

Fonte: A autora (2018)

A evolução significativa dos blocos intertravados de concreto ocorreu na Holanda e na Alemanha no período da reconstrução desses países após a Segunda Guerra Mundial. Inicialmente, as peças eram similares aos tijolos e pedras aparadas na época, depois houve um maior refinamento nos modelos e formas. A mão de obra pouco especializada no assentamento dos blocos foi um dos atrativos para a utilização desse pavimento. Na década de 70 e 80 eram comercializados pelo menos 200 tipos de formas, diversos equipamentos, e a produção anual já ultrapassava 45 milhões de metros quadrados.

Desde a necessidade de unir povos e transportar mercadorias, o pavimento já era visto como uma forma de expansão e desenvolvimento. O pavimento intertravado de concreto, além das características estéticas, começou a ganhar espaço principalmente pelas suas propriedades mecânicas e facilidade no assentamento dos blocos.

## **2.2. Características operacionais e estruturais**

### **2.2.1. Estrutura do pavimento intertravado de concreto**

A camada de rolamento, formada por *pavers*, recebem diretamente a tensão advinda do tráfego de pessoas e/ou veículos, e precisam apresentar uma resistência à compressão que suporte essa solicitação sem comprometer sua funcionalidade. Além dessa propriedade, o desgaste por abrasão está diretamente relacionado à durabilidade, sendo uma patologia muito comum nesse tipo de pavimento.

A Figura 3 mostra um pavimento com severo desgaste superficial na área externa de um supermercado na cidade do Recife, em Pernambuco. Diversos fatores influenciam no dimensionamento do bloco e das camadas que compõem o pavimento. De acordo com a ABCP (1999), irá depender da intensidade do tráfego que circulará sobre o pavimento, características do terreno de fundação e a qualidade dos materiais constituintes das demais camadas.



Figura 3. Pavimento com severo desgaste superficial por abrasão

Fonte: A autora (2017)

Abaixo da camada de rolamento e da areia de assentamento dos blocos existe a camada de base que recebe as tensões distribuídas da camada superior. Tem a função de proteger estruturalmente a camada de subleito, evitando deformações permanentes que possam influenciar na deterioração do pavimento. A Figura 4 mostra a disposição de cada camada.

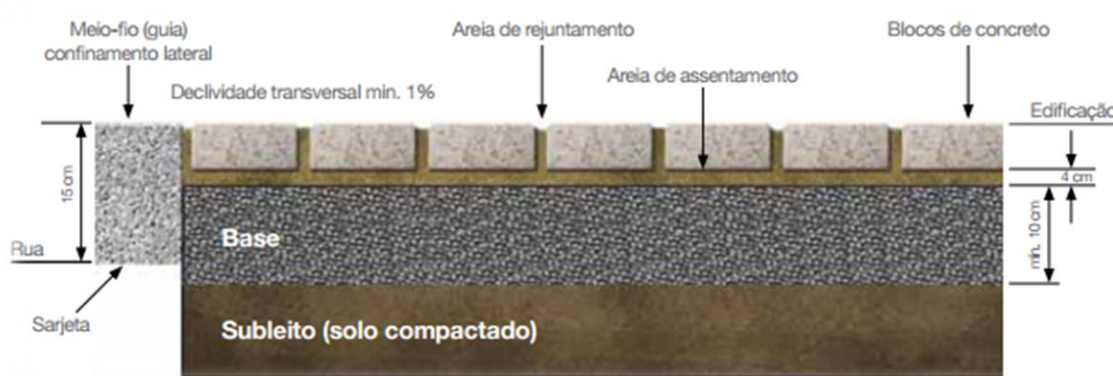


Figura 4- Estrutura típica do pavimento intertravado (ABCP, 2010)

### 2.2.2. Arranjos e formatos

Segundo Cruz (2003), o arranjo define tanto a aparência estética quanto no seu desempenho, embora este último ele afirme que ainda não há um consenso entre os pesquisadores, porém há uma concordância em relação à influência na durabilidade. A Figura 5 mostra os tipos de arranjos mais utilizados.



Figura 5. Tipos de arranjos do pavimento intertravado de concreto (ABCP 2010)

Os *pavers* de lados segmentados, de acordo com alguns ensaios, se comportam melhor do que as de lados retos ou suavemente curvados, proporcionando menores deformações permanentes na trilha de roda (“*rutting*”) e deformações horizontais (ondulações) muito menores, como foram comentados por Shackel (1979) e Godinho (2009).

O formato do bloco utilizado nesta pesquisa é do tipo 1 (Figura 6). Normalmente possuem dimensão de 200 mm de comprimento e 100 mm de largura e suas faces laterais podem ser retas, curvilíneas ou poliédricas. O tipo 2 tem formato em “I”, pode ser apenas montado em fileiras travadas e suas dimensões também são usualmente as mesmas do tipo 1. Os blocos do tipo 3 apresentam maiores dimensões, pelo menos 200 mm por 200 mm, e diferente dos outros tipos, não podem ser apanhados apenas com uma só mão.



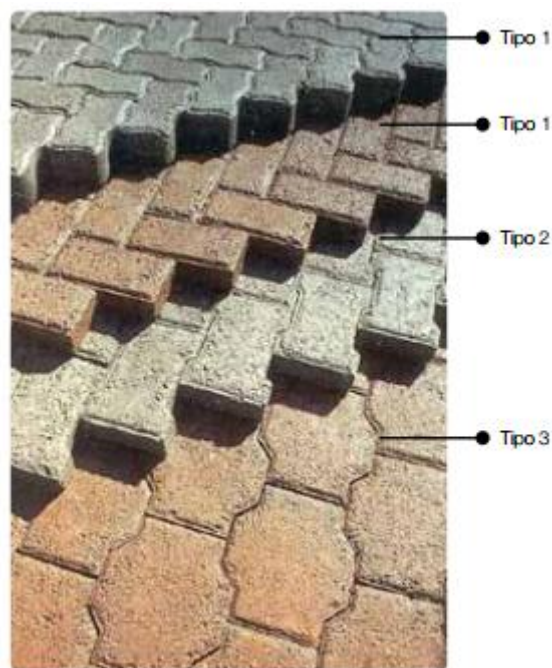


Figura 6. Formatos usuais dos blocos (ABCP 2010)

### 2.2.3. Intertravamento

De acordo com o “Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público” da ABCP (2010), o intertravamento é a capacidade que cada bloco tem em resistir a movimentos de deslocamentos verticais, horizontal ou de rotação em relação a seus vizinhos (Figura 7). Ainda segundo esse Manual, o desempenho e a durabilidade do pavimento dependem do adequado intertravamento dos blocos, que por sua vez depende de duas condições indispensáveis e necessárias: a contenção lateral e a junta preenchida com areia.



Figura 7. As três possíveis movimentações dos blocos submetidos à ação de forças no pavimento (ABCP 2010)

De acordo com Knapton (1996), o intertravamento vertical é a incapacidade da peça de se mover em sentido vertical em relação às peças vizinhas. Deve-se aos esforços de cisalhamento absorvidos pelo rejuntamento da areia entre as peças e a capacidade estrutural das camadas inferiores do pavimento. Muller (2005) ainda complementa que os desenhos que melhor impedem esse movimento são as de encaixes reentrantes, pois quando se aplica o contato macho-fêmea há a distribuição dos esforços para as peças vizinhas.

O intertravamento horizontal é a capacidade que as peças adquirem de não se deslocarem horizontalmente em relação às peças vizinhas. Se preenchidas com material adequado, as juntas são as principais responsáveis pelo impedimento desse movimento. O formato e arranjo contribuem na distribuição dos esforços de cisalhamento horizontal principalmente em áreas de aceleração e frenagem. (MULLER, 2005)

Godinho (2009) afirma que a frequência no tráfego é o principal responsável pelo movimento giratório dos blocos, principalmente nas áreas de frenagem, aceleração e tensões radiais dos pneus, curvas, além de regiões de confinamento lateral duvidoso. Como no intertravamento vertical, esse movimento acontece principalmente devido a natureza das juntas entre as peças, isto é, da sua largura, do tipo de areia e rejuntamento.

### **2.3 Propriedade dos materiais normalmente utilizados na fabricação de blocos intertravados de concreto (*pavers*)**

#### **2.3.1. Cimento Portland**

No caso dos *pavers*, para obter maior resistência nas primeiras idades, as indústrias de pré-fabricados utilizam o cimento de Alta Resistência Inicial (ARI). Essa característica é devida a utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento. Dessa forma, ao reagir com a água, ele adquire resistências mais elevadas, com uma maior velocidade. (ABCP 2002).

Esse tipo de cimento possui uma moagem mais fina que o cimento comum, além de uma composição diferente com maior teor de C<sub>3</sub>S (Silicato de cálcio), que é um composto bastante reativo, contribuindo com o calor de hidratação do cimento e importante na resistência inicial do concreto. Essa característica também facilita na

desforma dos blocos (retirada do bloco da chapa metálica onde é produzida) e a paletização mais rápida dos produtos.

Além da ligação do consumo de cimento com a resistência mecânica dos blocos, de acordo com Pettermann (2006), a regulagem e o tipo do equipamento de vibro-compressão, o tempo e a forma de vibração também influenciam na resistência do bloco. Ainda, segundo ele, um consumo muito elevado de cimento pode dificultar a produção dos blocos, devido a altos níveis de coesão.

Os cimentos Portland utilizados na fabricação dos blocos intertravados de concreto devem atender às especificações brasileiras NBR 5732:1991, NBR 5733:1991, NBR 5735:1991, NBR 11578:1992, NBR 5737:1992 quanto aos limites mínimos de qualidade.

### 2.3.2. Agregados

Cruz (2003) afirma que os agregados são, dentre os materiais que compõem o *paver*, os que merecem maior atenção no controle de recebimento na fábrica, e análise das suas características físicas. Ele recomenda os seguintes ensaios de controle de produção:

- ✓ Granulometria
- ✓ Massa Específica Real
- ✓ Material Pulverulento
- ✓ Umidade da areia pelo menos duas vezes ao dia, ou quando ocorrer o recebimento de novos materiais.

Segundo Oliveira (2004), os agregados miúdos utilizados na fabricação dos blocos variam o módulo de finura entre 2,5 e 3,2 para facilitar a compactação. Estes, segundo Oliveira (2004), poderá ser natural (de rio ou de cava), ou artificial (pó de pedra *in natura* ou beneficiado – areia natural). As areias naturais são as mais utilizadas devido a sua disponibilidade e forma mais arredondada, facilitando a moldagem dos blocos.

Quanto aos agregados graúdos, Pettermann (2006) afirma que os provenientes do britamento de rochas estáveis (britas “0”, com dimensão entre 2,36 a 12,5mm, e brita “1”, com dimensão entre 4,75 e 25 mm) são os mais indicados para a fabricação de

*pavers*, pois apresentam usualmente uma melhor aderência com a pasta de cimento, influenciando no aumento da resistência mecânica do bloco. Oliveira (2004) recomenda algumas características dos agregados na Tabela 1.

Tabela 1. Características recomendadas para agregados graúdos e miúdos empregados na produção de *pavers* (OLIVEIRA, 2004)

<b>Características</b>	<b>Tolerância (agregado graúdo)</b>	<b>Tolerância (agregado miúdo)</b>
Material pulverulento	< 1,0%	< 3,0%
Teores de argila	-	< 1,5%
Partículas friáveis	< 2,0%	-
Material carbonoso	< 1,0%	< 1,0%
Impurezas orgânicas	-	< 300ppm
Índice de forma	< 3,0	-
Abrasão" Los Angeles"	< 50%	-

### 2.3.3. Concreto seco

Segundo Frasson Junior (2000) *apud* Melo (2011), o termo “concreto seco” se deve ao fato de o concreto possuir abatimento de tronco de cone zero, e no caso de *pavers*, utilizam-se máquinas vibro prensas que retiram o ar aprisionado conferindo compacidade.

Em contrapartida, os concretos plásticos seguem a “Lei de Abrams” onde a resistência do concreto é proporcional a relação água/cimento. No concreto seco, dentro de um limite máximo, quanto mais água for adicionada, maior será a resistência alcançada. A maior quantidade de água melhora a trabalhabilidade da mistura, diminuindo o atrito interno dos grãos e facilitando a sua compactação. (OLIVEIRA, 2004 *apud* MARCHIONI, 2012). Porém esse limite máximo não pode ser ultrapassado, para não dificultar a desforma dos blocos, como descrito por Pirola (2011). Segundo ele, existe uma umidade ótima, onde as misturas conseguem alcançar maior

compacidade. Para concretos secos, essa umidade é menor que a dos concretos plásticos e se situa em torno de 6% a 8%.

Ainda segundo Pirola (2011), as principais propriedades dos *pavers* no estado endurecido são: Resistência à compressão, textura superficial do bloco e resistência à abrasão. A NBR 9781:2013 apresenta, além dessas propriedades, a absorção do bloco.

#### **2.4. Propriedades analisadas**

O controle de qualidade mais utilizado e o dimensionamento de amostras de concreto é o ensaio de *resistência à compressão axial*. A realização desse ensaio apresenta importantes características do concreto, pois se trata de um material heterogêneo macroestruturalmente, com inúmeras variáveis de constituição e composição, e uma microestrutura, muitas vezes de difícil determinação. (BEZERRA, 2007).

No estudo de Cruz (2003), foram obtidas algumas conclusões acerca da resistência à compressão do concreto. Dentre elas, fatores que influenciam nessa propriedade, como o tipo de cura, o tipo de vibroprensa, o módulo de finura do cimento e a umidade.

A norma NBR 9781:2013, por exemplo, tem a resistência à compressão como principal parâmetro de desempenho mecânico dos blocos, assumindo que todas as outras características estão relacionadas com essa capacidade estrutural de receber esses esforços. A resistência característica à compressão foi determinada de acordo com os parâmetros na Tabela 2.

Tabela 2. Resistência característica à compressão do *paver*

Solicitação	Resistência característica à compressão aos 28 dias (MPa)
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	$\geq 35$
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	$\geq 50$

Fonte: ABNT NBR 9781:2013

Outra propriedade analisada foi o *desgaste por abrasão*, que é provocada em geral pelo tráfego de pessoas e veículos, bem como o impacto e atrito causado pelo arrastamento de partículas e objetos soltos (ALMEIDA, 2000 *apud* VIECILLI, 2004).

Segundo Humpola (1996) os aspectos mais importantes que influenciam no desgaste por abrasão dos pavimentos de concreto são: Inadequada resistência à compressão, agregado de baixa resistência, processo de cura inadequado e período de cura insuficiente.

Bullen (1992) e Cruz (2001) estudaram a correlação entre a resistência à compressão e à abrasão, e obtiveram conclusões diferentes acerca dos resultados. O primeiro, dentro de uma produção controlada de blocos, utilizando o mesmo processo de cura, obteve uma linha de tendência entre as duas propriedades mecânicas. O segundo, porém, obteve nos resultados uma baixa correlação entre as propriedades, como mostra a Figura 8.

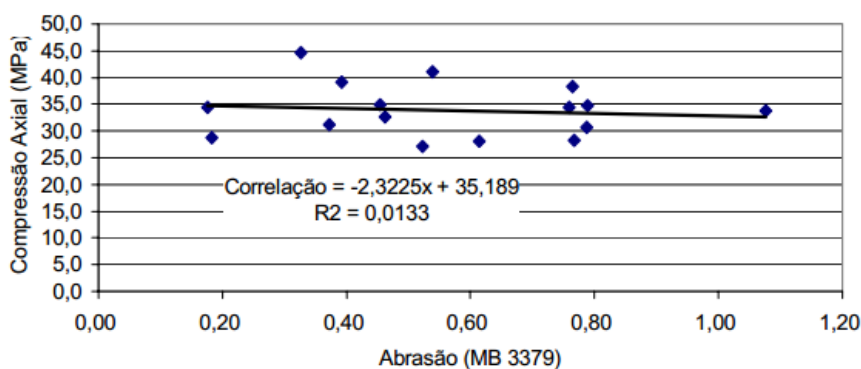


Figura 8. Relação entre Resistência à abrasão e compressão obtida por Cruz (2003)

Aslantas (2004) concluiu em seus estudos que a resistência à abrasão dos blocos de concreto para pavimentação é fortemente afetada pela proporção de cimento da mistura. A alteração na relação do cimento tem uma maior influência na abrasão do que na resistência à compressão e tração do pavimento.

Shackel (1994) citado por Aslantas (2004) sintetizou os fatores que influenciam na resistência à abrasão do pavimento:

- ✓ A resistência à abrasão aumenta com o aumento do cimento na mistura;
- ✓ O aumento da relação água/cimento provoca uma redução na resistência à abrasão;

A dosagem inadequada do concreto também é um dos fatores que influenciam diretamente no seu comportamento diante de agentes e esforços externos. Especificamente, o concreto utilizado em pisos fica vulnerável à ação do atrito e desgaste superficial, visto que não possui nenhum tipo de revestimento como forma de acabamento para evitar o contato direto com o material. Dessa forma, qualquer deficiência na dosagem, na cura ou mesmo na execução do piso, pode diminuir a vida útil do pavimento, aumentando os custos com manutenção.

O processo de cura irá influenciar inúmeras propriedades do concreto endurecido, em especial a resistência à abrasão (FONSECA, 2009 *apud* SILVA, 2011). Esse processo adequado permite a diminuição da porosidade do concreto, evitando a evaporação da água de amassamento.

De acordo com a ABNT NBR 9781, o ensaio de resistência à abrasão do *paver* de concreto para pavimentação é facultativo. Quando especificada deve ser ensaiada de acordo com o procedimento relatado nessa Norma, seguindo as especificações da Tabela 3.

Tabela 3. Critérios para a resistência à abrasão do *paver*

Solicitação	Cavidade máxima (mm)
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	$\leq 23$
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	$\leq 20$

Fonte: ABNT NBR 9781:2013

## 2.5. Equipamentos

As vibroprensas, máquinas utilizadas na fabricação de *paver*, tem essa denominação devido ao tipo de mecanismo empregado para fazer com que o material de dosagem penetre e preencha as fôrmas de aço do equipamento. Além de produzirem em escala, interferem na homogeneidade das resistências mecânicas, textura e dimensões. (FIORITI, 2007 *apud* WIEBBELLING, 2015).

De acordo com a descrição do funcionamento de uma máquina na produção de *paver* feita por Pirola (2011), o concreto do misturador é armazenado no silo de armazenamento, como mostra a Figura 9. Logo em seguida, a gaveta é preenchida com concreto. Esse material é colocado sobre a forma, e acionado agitadores e vibradores para melhor acomodação do concreto. Após o recolhimento da gaveta, ocorre a descida das sapatas, juntamente com a vibração, responsáveis pela compactação dos blocos bem como sua definição geométrica. O tempo dessa etapa chama-se *tempo de vibrocompressão* e termina quando o bloco atinge a altura desejada. Finalizando o ciclo, a fôrma juntamente com a sapata sobe e é realizada a desforma dos blocos.





Figura 9. Equipamento utilizado na fabricação dos *pavers*

Fonte: Da autora (2016)

## 2.6. Efeitos da adição de pozolana no concreto

Segundo Mehta e Monteiro (1994), pozolanas são materiais silicosos ou sílico aluminosos, podendo ser de origem natural ou artificial. No primeiro caso, possuem atividade pozolânica em estado natural, ou podem ser convertidos facilmente por britagem, moagem, classificação por tamanho e ativação térmica. O segundo são subprodutos das indústrias de transformação e beneficiamento, que requerem ou não processamento (secagem e pulverização) antes do emprego como adição mineral.

A ABNT NBR 12653 descreve que os materiais pozolânicos, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Essa capacidade de reação, segundo Medina (2011), favorece a melhoria das propriedades ligantes, produzindo hidratos semelhantes aos do cimento hidratado, melhorando as propriedades mecânicas e diminuindo sua porosidade.

O metacaulim, adição estudada nesta pesquisa, é constituído basicamente por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na fase amorfa. De acordo com a ABNT NBR 15894-1:2010, que determina os limites da quantidade de cada componente, o teor de sílica deve estar entre 44% e 65%, e no caso da alumina entre 32% e 46%. Capaz de reagir com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) gerado durante a hidratação do cimento Portland e formar produtos hidratados similares aos decorrentes da hidratação direta do clínquer (MEDINA, 2011).

De acordo com o conceito apresentado pela ABNT NBR 15894-1 – o metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, é um produto de calcinação e moagem de argilominerais cauliníticos, de estrutura predominantemente cristalina. O metacaulim é um tipo de pozolana de alta reatividade que, interagindo química e fisicamente com o cimento Portland, confere propriedades importantes relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido.

De acordo com Rocha (2005) *apud* Mota (2015), a adição de metacaulim no concreto e argamassas preenche os pequenos espaços, melhorando as propriedades mecânicas e reduzindo a porosidade do material. Assim, aumenta a resistência a agentes agressivos, como a carbonatação, lixiviação, eflorescência e salinidade, por exemplo. Segundo Mota (2015), essa é uma das principais vantagens da utilização de pozolana, pois enquanto não se iniciam as reações, os espaços que seriam ocupados pelo ar, passam a ser ocupados pelas finas partículas inertes.

Nesses espaços, segundo Carneiro (2005) e Mota (2006) *apud* Nascimento Junior (2011), os hidróxidos de cálcio se combinam com a sílica da pozolana, resultando em C-S-H (silicato de cálcio hidratado) adicional, responsável pela resistência da pasta de cimento, o efeito químico, seguido também do efeito físico, chamado efeito *filler*, caracterizado pelo preenchimento dos poros.

De acordo com Barata (1998) citado por Mota (2015), o metacaulim quando utilizado como substituição parcial de cimento, contribui para a resistência à compressão pelo preenchimento dos vazios, pela celeridade na hidratação do cimento, reação pozolânica com o CH (Hidróxido de cálcio) produzindo C-S-H. Nas primeiras 24 horas a hidratação do cimento alcança o máximo, e entre o 7º e 14º dia, o efeito máximo de reação pozolânica. Após esse período, não é observado aumento de resistência significativa em relação às misturas de cimento Portland sem a adição.

Alguns autores avaliaram o uso do metacaulim como substituinte parcial do cimento. Rezende et. al. (2012), por exemplo, abordou o uso do metacaulim em concreto seco, e mostrou que os melhores resultados dentro dos parâmetros estabelecidos poderão ser encontrados com o uso de metacaulim em percentuais de 10% a 20% de substituição da massa do cimento aos 49 dias de cura.

Chkheiwier (2016) testou três tipos de adições em *pavers*: sílica ativa, metacaulim e cinza volante. Os teores utilizados foram: 5%, 10%, 15% e 20% de substituição parcial de cimento pelas adições. Em relação às demais, o metacaulim apresentou melhor trabalhabilidade. Houve também um aumento na resistência à abrasão e compressão à medida que se aumentou o teor de metacaulim na mistura. Em geral, o teor com 20% apresentou melhores resultados, semelhante aos resultados do teor com 15% de substituição.

Petterman (2006) estudou a substituição parcial de cimento por metacaulim e sílica ativa com teor de 10% em *pavers*. Os resultados mostraram que o metacaulim, diferente da sílica, apresentou resultados semelhantes ao concreto de referência (sem adição). Concluindo que, mesmo com esse resultado, apresentou vantagem no custo-benefício, embora percentualmente baixo. Em relação a este parâmetro, Lacerda e Helene (2005) avaliaram o teor de 8% de substituição e concluíram que a utilização do metacaulim reduz os custos na ordem de 10% em relação ao concreto de referência, além das vantagens ambientais.

Finalmente, Rossignollo e Oliveira (2007) analisaram o efeito do metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural, e obtiveram bons resultados. Os autores concluíram que o teor de 10% de substituição de cimento por metacaulim apresentou melhoria no desempenho da resistência à compressão, na resistência à tração por compressão diametral, da absorção de água por imersão e da reação de carbonatação.

## Capítulo 3 – Metodologia

### 3.1. Metodologia de fabricação dos blocos intertravados de concreto (*pavers*) com teores de adição pura de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%

Este capítulo apresenta a descrição dos procedimentos de fabricação e ensaios dos *pavers* de concreto estudados nesta dissertação. A primeira etapa consistiu na avaliação dos materiais e procedimentos adotados pela empresa colaboradora. Essa etapa foi muito importante para conhecer o ambiente de produção, os equipamentos e materiais utilizados, o processo de cura e a forma de estocagem dos blocos. A segunda etapa consistiu na coleta de amostras para análise em laboratório. Após a definição dos teores de adição, que foram de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, os blocos foram fabricados e estocados (de forma coberta com lona preta) nas primeiras 24 horas para acelerar a cura. Passadas às 24 horas, todos os blocos foram estocados na parte externa da fábrica, ao ar livre, de acordo com o procedimento padrão da empresa colaboradora. As etapas de fabricação realizadas são mostradas na Figura 10.



Figura 10. Etapas de fabricação dos *pavers* de concreto (com teores de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%) para pavimentação estudada nesta dissertação: (a) preparação das misturas precursoras; (b) adição da mistura precursora para prensagem; (c) prensagem dos *pavers* de concreto; (d) saída das peças de concreto do equipamento de prensagem; (e) armazenamento dos *pavers* e (f) etapa de realização do tempo de cura.

Após o tempo de cura de 28 dias os blocos foram removidos do local de armazenamento e as propriedades mecânicas de resistência à compressão e de abrasão foram analisadas.

### 3.1.1. Características dos materiais utilizados

Os ensaios dos agregados foram realizados no Laboratório de Construção Civil da Universidade Católica de Pernambuco (LCC/UNICAP), e algumas especificações fornecidas pelo fabricante. Todo material foi cedido pela empresa Premofort Indústria e Comércio. O equipamento utilizado na fabricação dos blocos foi a máquina de blocos de concreto da marca Menegotti MBP-4 semiautomática.

#### 3.1.1.1. Aglomerante

O cimento utilizado foi o CII F 40 da marca Zebu. As Tabelas 4 e 5 apresentam as informações cedidas pelo fornecedor, com as características físicas, mecânicas e químicas do cimento utilizado nessa pesquisa. Assim como os demais cimentos Portland compostos, o CP II F é um tipo de cimento para uso e aplicação em geral. Ideal para utilização em estruturas de concreto armado, pavimentos de concreto, argamassa de chapisco, assentamento de blocos, revestimento, pisos e contrapisos, grautes, concreto protendido, pré-moldados e artefatos de concreto. Caracteriza-se por possuir materiais carbonáticos ou fíler em sua composição. Também é indicado, semelhante ao CP V ARI, para as aplicações que exigem desforma rápida, como é o caso dos *pavers* de concreto.

Tabela 4 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado na pesquisa

	Finura			Tempo de pega (min)		Resistência à compressão (Mpa)		
	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	#200 (%)	#325 (%)	Início de pega	Fim de pega	3 dias	7 dias	28 dias
<b>Exigência</b>	≥ 2800	≤ 10,0	-	≥ 60	≤ 600	≥ 15	≥ 25	≥ 40
<b>Média</b>	4210	1,1	8,1	195	266	32,8	40,1	49,4
<b>Desvio máximo</b>	70,68	0,2	1,7	6,65	10,58	1,37	1,37	1,01
<b>Quantidade de dados</b>	23	23	23	23	23	22	22	20

Tabela 5 - Propriedades químicas do cimento utilizado na pesquisa

	<b>MgO (%)</b>	<b>SO3 média (%)</b>	<b>Perda ao fogo média (%)</b>	<b>Resíduo insolúvel (%)</b>
<b>Exigência</b>	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 6,5	≤ 2,5
<b>Média</b>	2,1	3	5,2	2,2
<b>Desvio máximo</b>	0,24	0,22	0,49	0,17
<b>Quantidade de dados</b>	22	23	23	23

### 3.1.1.2. Agregados

Foram utilizados como agregados miúdos a areia e o pó de pedra, e como agregado graúdo a brita 0, que é comumente utilizada na fabricação de *pavers*.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Construção Civil da Universidade Católica de Pernambuco (LCC/UNICAP).

Os ensaios de *granulometria* dos agregados foram realizados de acordo com a norma NBR NM 248:2003 (Agregados – Determinação da composição granulométrica).

Os equipamentos utilizados para a execução do ensaio foram:

- ✓ Balança - com resolução de 0,1% da massa da amostra de ensaio.
- ✓ Estufa – Na temperatura de 105°C
- ✓ Peneiras da série Normal e Intermediária, de acordo com a tabela
- ✓ Bandejas
- ✓ Escova
- ✓ Fundo avulso de peneira

Após a separação das amostras, de acordo com a NM 27, foram colocadas na estufa para secagem, na temperatura de 105°C por 24 horas, e após esse período as amostras esfriaram em temperatura ambiente.

As peneiras foram ordenadas de acordo com a Série de peneiras normal, incluindo um fundo para a retenção de material passante na peneira de menor abertura. O processo foi feito manualmente, e executado duas vezes para cada agregado. Após a realização do ensaio, adotou-se a média de cada um com a distribuição granulométrica para o traçado da curva.

O ensaio de determinação de teor de *materiais pulverulentos* foi executado de acordo com a norma NBR NM 46:2003 – Determinação do material fino que passa através da peneira de 75  $\mu\text{m}$  por lavagem.

Os equipamentos utilizados para a execução do ensaio foram:

- ✓ Balança;
- ✓ Jogo de peneiras, onde a inferior tem abertura de malha de 75 mm e a superior corresponde à peneira de 1,18 mm
- ✓ Recipiente de tamanho suficiente para conter a amostra coberta com água;
- ✓ Tanque com torneira;
- ✓ Estufa;
- ✓ Recipiente em vidro transparente

De acordo com a exigência da Norma, foram separadas as amostras mínimas de cada agregado de acordo com a dimensão máxima nominal. As massas utilizadas estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Massa por amostra de ensaio (Ensaio de material pulverulento)

<b>Agregado</b>	<b>Dimensão máxima nominal (mm)</b>	<b>Massa mínima (g)</b>	<b>Massa utilizada no ensaio (g)</b>
Brita	12,5	2500	2500
Pó de pedra	4,75	500	1000
Areia	4,75	500	500

Após a separação das amostras com massa superior à mínima, foi feita a secagem até a massa constante, respeitando a temperatura de 105°C. Pesou-se novamente para obter a massa mínima exigida. O processo foi o mesmo para cada tipo de agregado. A amostra foi colocada em um recipiente transparente adicionando água até cobri-lo. Agitou-se a amostra vigorosamente para obter a completa separação de todas as partículas mais finas que 75  $\mu\text{m}$  das maiores e para que o material fino fique em suspensão. Posteriormente, verter a água de lavagem contendo os sólidos suspensos sobre as peneiras de 1,18mm e 75  $\mu\text{m}$ , dispostas de forma que a malha de maior

abertura esteja na parte de cima. Foi adicionada novamente uma segunda quantidade de água, repetindo todo o procedimento. Esse processo foi repetido até que a água ficasse clara, quando comparada antes da lavagem. Após essa observação, todo o material retido foi misturado a amostra lavada, colocada na estufa à temperatura de 105°C por 24 horas, e foi determinada a massa da amostra seca, finalizando o ensaio.

A realização do ensaio de *absorção do agregado miúdo* foi realizada em conformidade com a norma NBR NM 30:2000 (Agregado miúdo – Determinação da absorção de água).

A primeira etapa do procedimento consiste em separar a amostra e colocá-la na estufa à 105°C até a constância de massa. Logo após essa etapa, o agregado é colocado em um recipiente com água, submerso, por um período de 24 horas. Após esse procedimento, as amostras são submetidas a uma fonte de ar quente. Retirado a maioria da água na amostra, colocou-se o agregado miúdo em um molde, sem comprimi-lo, aplicando suavemente 25 golpes com a haste de compactação. Ao levantar o molde, observou-se que o agregado não se conservou na forma do molde. Este foi o momento exato da condição de saturado superfície seca. Por fim, determinou-se a massa da amostra.

O procedimento do ensaio de determinação da *massa específica* foi feito em conformidade com a norma NBR 52:2009 (Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente).

Para este ensaio do agregado deve estar saturado superfície seca, portanto foi executado logo após o ensaio de absorção. Inicialmente foi pesado 500 gramas de amostra. Foi colocada no frasco e registrada a massa do conjunto. Encheu-se o frasco com água até a marca de 500 ml. Movimentou-se o conjunto para eliminar as bolhas de ar e acomodar a mistura. Foi colocado o frasco em um banho, mantido a temperatura ambiente de 22°C. Após 1 hora, completou-se até a marca de 500 cm<sup>3</sup> e foi determinada a massa na balança de precisão. Após o procedimento, retirou-se o agregado miúdo do frasco para secar na estufa a 105°C por 24 horas. Finalizou-se o ensaio com a pesagem da amostra seca.



A realização do *ensaio de absorção e massa específica do agregado graúdo* foi realizada em conformidade com a norma NBR NM 53:2002 (Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água).

O agregado graúdo foi lavado completamente para remover o pó ou outro material da superfície. A amostra foi seca a uma temperatura de 105°C. Foi utilizada a massa mínima determinada na Norma, 2 kg, de acordo com a dimensão máxima característica do agregado.

A amostra foi submergida em água por um período de 24 horas. Após esse procedimento, a amostra foi envolvida em pano absorvente até que toda a água visível fosse eliminada. Imediatamente após ser enxugada, a amostra foi pesada para obtenção da massa do agregado saturado com superfície seca.

Para obter a massa em água, a amostra foi submergida em água a uma temperatura de 23°C e pesada para obtenção da massa em água. Após esse procedimento, o agregado foi colocado na estufa até massa constante e foi pesado em balança com precisão de 1g para a obtenção da massa do agregado seco.

O *ensaio de perda de abrasão dos agregados* oferece um indicativo da qualidade do material a ser utilizado na produção do concreto. Por meio deste determina-se a resistência à fragmentação por choque e atrito das partículas de agregado graúdo. (PRADO, 2006)

O ensaio foi baseado na NBR NM 51 – Agregado graúdo – Ensaio de abrasão Los Angeles. A massa utilizada para a realização do ensaio foi de 5000g. Resumidamente, o ensaio foi executado da seguinte forma:

- ✓ Separação da amostra
- ✓ Pesar, com precisão de 1 g, a amostra, secá-la em estufa e colocá-la, juntamente com a carga abrasiva, dentro do tambor. Fazer o tambor girar a uma velocidade compreendida entre 30 rpm e 33 rpm
- ✓ Retirar o material do tambor e peneirá-lo na peneira com abertura de malha de 1,7 mm
- ✓ Lavar e secar em estufa a fração retida na peneira
- ✓ Calcular a porcentagem de perda por abrasão

### 3.1.1.3. Análise granulométrica

Na Tabela 7, os resultados da análise de granulometria dos agregados e sua curva granulométrica (Figura 11). Esse ensaio foi executado de acordo com a NBR NM 248. A areia apresentou um módulo de finura de 2,06, sendo classificada como areia média de acordo com a Tabela 8.

Tabela 7. Porcentagem retida acumulada dos agregados

<b>Peneira</b>	<b>Brita</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Areia Média</b>
19,0 mm	0,00	0,00	0,00
12,5 mm	1,18	0,00	0,00
9,5 mm	12,50	0,00	0,00
6,3 mm	63,38	0,20	0,00
4,8 mm	86,69	4,34	1,37
2,4 mm	99,57	33,86	4,13
1,2 mm	99,96	58,57	11,49
600 µm	100,0	72,45	24,91
300 µm	100,0	82,87	64,30
150 µm	100,0	88,96	100,00
Diâmetro máximo característico	12,5 mm	4,8 mm	4,8 mm
Módulo de finura (MF)	6,63	3,41	2,06

Tabela 8. Classificação das areias (SELMO, 1989)

<b>Módulo de finura</b>	<b>Classificação</b>
MF < 2.0	Areia fina
2.0 < MF < 3.0	Areia média
MF > 3.0	Areia grossa

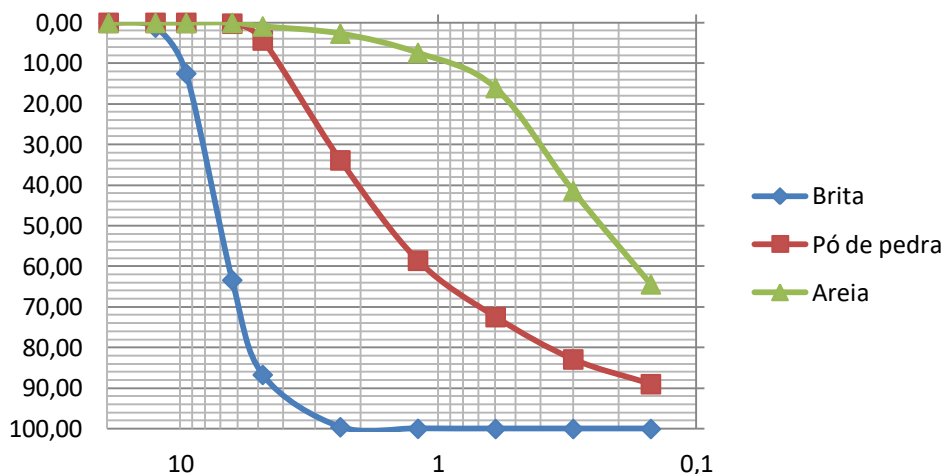


Figura 11. Curva granulométrica dos agregados

#### 3.1.1.4. Material pulverulento (MP)

Dentre os agregados, nenhum apresentou resultado satisfatório de acordo com a NBR 7211:2005 (Tabela 9). Embora apresentem não conformidades, buscou-se utilizar os agregados comumente utilizados nas fábricas da região, para se aproximar do real processo de produção dos blocos.

Tabela 9. Valores do teor de material pulverulento

Agregado	Teor de MP	Limites (NBR 7211:2005)	Alteração
Brita	1,31%	$\leq 1\%$	Não conforme
Pó de pedra	11,50%	$\leq 10\%$	Não conforme
Areia média	6,00%	$\leq 3\%$	Não conforme

#### 3.1.1.5. Massa específica

A definição da massa específica dos agregados graúdo e miúdo foi feita a partir dos ensaios especificados pelas normas NBR NM 53:2003 para agregado graúdo, e a NBR NM 52:2003 para agregado miúdo. Os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Massa específica dos agregados

<b>Agregado</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Brita	2,54
Pó de pedra	2,52
Areia média	2,61

### 3.1.1.6. Definição de traços e adições

Foram escolhidos a mesma quantidade de agregados e aglomerante comumente utilizados pela empresa colaboradora, como apresentados na Tabela 11. O aditivo plastificante, que é utilizado para facilitar a homogeneização da mistura e desforma dos blocos, e a relação água cimento permaneceram constantes, apenas variou-se a quantidade de metacaulim no traço.

Tabela 11. Traços utilizados para a fabricação dos *pavers* com teores de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%

<b>Lote</b>	<b>Traço unitário em massa (cimento: pó de pedra: areia: brita)</b>	<b>Aditivo Plastificante</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Consumo de adição - metacaulim (% da massa de cimento)</b>
TA0'	1:1,6:2,8:1	150ml	0,30	0
TA10'	1:1,6:2,8:1	150ml	0,30	10
TA15'	1:1,6:2,8:1	150ml	0,30	15
TA20'	1:1,6:2,8:1	150ml	0,30	20
TA25'	1:1,6:2,8:1	150ml	0,30	25
TA30'	1:1,6:2,8:1	150ml	0,30	30

### 3.1.1.7. Absorção

O pó de pedra apresentou maior absorção em relação aos demais agregados, como mostra a Tabela 12. Esse ensaio foi executado de acordo com a NBR NM 53:2003 para agregado graúdo e a NBR NM 30:2001 para agregado miúdo.

Tabela 12. Valores da absorção de água pelos agregados.

<b>Agregado</b>	<b>Absorção (%)</b>
Brita	0,67
Pó de pedra	0,72
Areia média	0,41

### 3.1.1.8. Abrasão Los Angeles

O limite máximo estabelecido pela NBR 7211:2009 é de 50%. Portanto, a brita utilizada na pesquisa atende as exigências nesse quesito, de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13. Abrasão Los Angeles

<b>Material</b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Massa final</b>	<b>Abrasão</b>
Brita 0	5000	3596,2	28,08%

### 3.1.1.9. Adição

A adição utilizada foi o metacaulim da marca Soleminas. A análise química e as propriedades gerais fornecidas pelo fabricante estão dispostas nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14. Análise química da composição química metacaulim utilizado

<b>Composto</b>	<b>Típico</b>	<b>Limite (NBR 15.894)</b>
SiO <sub>2</sub>	54,87%	44,0% a 65,0%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39,38%	32,0% a 46,0%
CaO + MgO	0,59%	< 1,5%
SO <sub>3</sub>	0,15%	< 1,0%
Eq. Alcalino Na <sub>2</sub> O	-	< 1,5%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,04%	-
TiO <sub>2</sub>	0,64%	-
Na <sub>2</sub> O	0,15%	< 0,5%

*\*Dados cedidos pelo fabricante*

Tabela 15. Propriedades gerais do metacaulim utilizado nesta pesquisa

<b>Cor</b>	<b>Nome químico</b>	<b>Estabilidade</b>	<b>Reatividade</b>
Laranja	Silicato de alumínio	Estável	Inerte

*\*Dados cedidos pelo fabricante*

### 3.1.2 Ensaio de Resistência à compressão

O ensaio de compressão foi realizado aos 14 e 28 dias, utilizando 6 exemplares para cada dia e lote. O ensaio de compressão foi realizado pelo Instituto Alcides D'Andrade Lima, e a prensa utilizada foi a PHI-3025 da Contenco, com capacidade de 100 toneladas.

De acordo com a ABNT NBR 9781, a resistência à compressão do bloco, expressa em megapascals (MPa), é obtida dividindo-se a carga de ruptura, expressa em newtons (N), pela área de carregamento, expressa em milímetros quadrados (mm<sup>2</sup>), multiplicando-se o resultado pelo fator  $p$ , função da espessura do bloco, conforme Tabela 16.

Tabela 16. Espessura nominal dos *pavers*

Espessura nominal dos blocos (mm)	<i>p</i>
60	0,95
80	1,00
100	1,05

### 3.1.3. Ensaio de Resistência à abrasão

A determinação da resistência à abrasão dos blocos foi realizada através do abrasímetro (Figura 12), equipamento disponibilizado pela Universidade Federal de Pernambuco, *Campus Agreste*. O *paver*, fixado por um suporte de madeira e puxada por um contrapeso, de modo que durante 60 segundos fosse pressionada contra um disco rotativo de aço com diâmetro de 200mm e espessura de 70mm. Entre o *paver* e o disco, havia um escoamento de material abrasivo, o óxido de alumínio fundido branco (grana F80). Após esse procedimento, o bloco é retirado do suporte e medido o comprimento da cavidade.

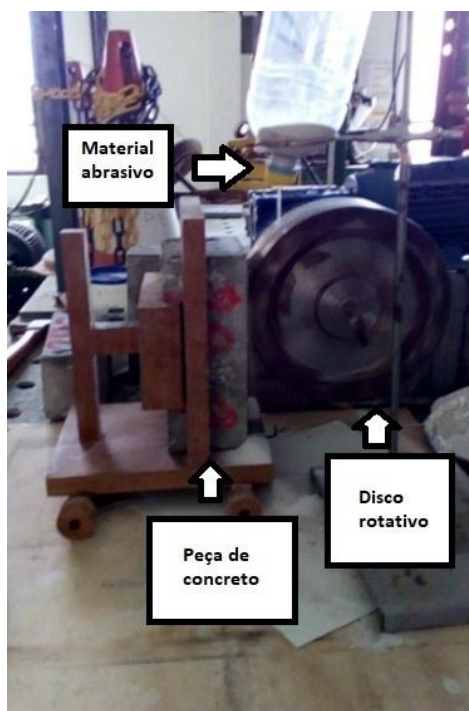


Figura 12. Abrasímetro utilizado nos ensaios de resistência à abrasão

O procedimento consistiu em desenhar uma linha perpendicular ao eixo do bloco e em seguida desenhar os limites longitudinais da cavidade de acordo com a Figura 13a. Posicionar o paquímetro nos pontos da linha perpendicular ao eixo até os limites longitudinais da cavidade e registrar a medida com precisão de 0,1mm (Figura 13b).



Figura 13. Procedimento de verificação da dimensão da cavidade dos *pavers*.

#### 3.1.4. Procedimento de cura

As amostras foram colocadas em paletes e, após 1 hora de moldagem, foram cobertas por lona plástica (Figura 14). Esse processo tem por finalidade aumentar a temperatura, e evitar a prematura perda de água necessária à hidratação do cimento como acontece na cura ao ar. Esse procedimento permite que as reações químicas aconteçam mais rapidamente e com um rendimento maior. Porém, diferentemente da cura úmida à vapor, essa temperatura e o tempo necessário do processo não são controlados. Segundo Cruz (2003), que comparou os três tipos mais comuns de cura em *pavers*, mostrou que os blocos que apresentaram maior resistência à compressão foram os colocados na câmara úmida, seguidos da lona plástica e por último, cura ao ar. Passadas às 24 horas, os blocos foram estocados ao ar livre, fora do galpão coberto, e permaneceram nesse local até a retirada pelo laboratório de ensaios.





Figura 14. Cura dos *pavers* com utilização de lona plástica.

### 3.1.5. Experimentos de Microscopia de Fluorescência

As amostras de cada um dos tipos de *paver* foram preparadas a partir da utilização de um almofariz e de um pistilo para triturar. Em seguida alguns grãos das diferentes amostras foram colocados e fixados entre lâminas com fita adesiva. As lâminas foram colocadas em um microscópio Axion Vision com Campo Claro e DIC para a obtenção das imagens de fluorescência nas regiões do vermelho, do verde e do azul, em que foram utilizados os comprimentos de onda 546 nm, 488 nm e 366 nm, respectivamente quando havia emissão nesses diferentes comprimentos de onda. Nestes experimentos foi utilizado o sistema ApoTome.

### 3.2. Metodologia de fabricação dos blocos intertravados de concreto (*pavers*) com teores de substituição parcial de cimento por metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10%

Esta parte da dissertação se baseou na descrição dos procedimentos e análises dos materiais e algumas propriedades mecânicas do pavimento intertravado de concreto com substituição parcial do cimento por metacaulim. Foram definidas as porcentagens de substituição, 0% (TS0), 4% (TS4), 8% (TS8) e 10% (TS10). Após a fabricação, os blocos foram estocados no interior do galpão, e cobertos por lona plástica nas primeiras 24 horas. Em seguida os blocos que seriam rompidos com 2,7, 14, 21 e 28 dias (romper os blocos em todas estas idades é um procedimento padrão utilizado pela empresa colaboradora) foram transportados para o laboratório a fim de realizar os ensaios de resistência à compressão. Nesse ensaio foram utilizados 6 exemplares para cada lote e tempo de cura. Todos permaneceram estocados em um ambiente interno até o momento do rompimento. Os demais blocos permaneceram na área externa da fábrica aguardando os 28 dias para o ensaio de abrasão. Nesse ensaio foram utilizados 9 exemplares para

cada lote. A Figura 15 mostra as etapas de fabricação dos blocos estudados nesse estudo.



Figura 15. Etapas de fabricação dos *pavers* (com teores de metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10%) para pavimentação estudada nesta dissertação: (a) adição da mistura precursora para prensagem; (b) saída dos *pavers* do equipamento de prensagem; (c) armazenamento dos *pavers* e (d) etapa de realização do tempo de cura

### 3.2.1. Características dos materiais utilizados

Neste item serão apresentadas as características dos materiais utilizados na fabricação dos *pavers*. Os ensaios para obtenção das características dos agregados foram feitos no laboratório de materiais de construção da Universidade Católica de Pernambuco. Os demais foram fornecidos pelos fabricantes.

#### 3.2.1.1 Aglomerante

O aglomerante empregado na fabricação dos blocos foi o cimento CPV-ARI, da empresa Nacional, material normalmente utilizado pela empresa colaboradora. Esse tipo de cimento é largamente utilizado em empresa de pré-moldados a artefatos de concreto, onde é necessário o aumento de produtividade associado a resistências extremamente elevadas nas primeiras horas de aplicação. As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam algumas informações sobre esse produto.

Tabela 17. Ensaio químicos do cimento CPV-ARI

<b>Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Un.</b>	<b>Resultado</b>	<b>Exigências</b>
Resíduo Insolúvel	ABNT NM 15/12	%	0,89	≤ 1,0
Perda ao fogo	ABNT NM 18/12	%	2,51	≤ 4,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NM 14/12	%	1,41	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre – SO <sub>3</sub>	ABNT NM 16/12	%	3,33	≤ 4,5
Anidrido Carbônico – CO <sub>2</sub>	ABNT NM 20/12	%	1,77	≤ 3,0

*\*Dados cedidos pelo fabricante*

Tabela 18. Ensaio físicos do cimento CPV ARI

<b>Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Un.</b>	<b>Resultado</b>	<b>Exigências</b>
Área específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm <sup>2</sup> /g	4.623	≥ 3000
Massa específica	ABNT NM 23/01	g/cm <sup>3</sup>	3,10	Não aplicável
Índice de finura - # 75µm (nº200)	ABNT NBR 11579/13	%	0,17	≤ 6,0
Resíduo da peneira #325	ABNT NBR 9202/85	%	0,95	Não aplicável
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	30,1	Não aplicável
Início de pega	ABNT NM 65/03	Minutos	156	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	Minutos	212	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/12	mm	0,02	≤ 5,0

*\*Dados cedidos pelo fabricante*

Tabela 19. Ensaio de resistência do cimento CPV ARI

Ensaio – ABNT NBR 7215/96	Un.	Desvio padrão	Resultado	Exigências
Resistência à compressão – 1 dia	MPa	1,70	29,0	14,0
Resistência à compressão – 3 dias	MPa	2,40	42,9	24,0
Resistência à compressão – 7 dias	MPa	1,28	50,2	34,0
Resistência à compressão – 28 dias	MPa	0,85	59,2	Não aplicável

*\*Dados cedidos pelo fabricante*

### 3.2.1.2 Agregados

Os *agregados miúdos* utilizados na fabricação dos blocos foram: Areia média e pó de pedra. A justificativa da empresa para a escolha desses materiais é obter uma granulometria variada que possibilite a melhor acomodação das partículas na mistura. O *agregado graúdo* utilizado foi a brita “0”. Todos os materiais utilizados na pesquisa com adição pura são de origem diferente desses. Em seguida, os ensaios e resultados.

#### *Análise granulométrica*

Foi realizado o ensaio de análise granulométrica dos agregados com o principal objetivo de conhecer a distribuição e representá-la através de uma curva (Figura 16). Possibilitando a determinação de suas características físicas. Na Tabela 20 observa-se a porcentagem dos materiais retidos parciais em cada peneira.

Tabela 20. Porcentagem retida acumulada dos agregados

<b>Peneira</b>	<b>Brita (%)</b>	<b>Pó de pedra (%)</b>	<b>Areia Média (%)</b>
19,0 mm	0,00	0,00	0,00
12,5 mm	0,20	0,00	0,00
9,5 mm	18,32	0,00	0,00
6,3 mm	71,38	0,40	0,00
4,8 mm	91,95	7,06	0,28
2,4 mm	99,43	37,51	5,68
1,2 mm	99,64	56,95	19,17
600 $\mu$ m	99,78	68,90	36,75
300 $\mu$ m	99,92	80,39	63,77
150 $\mu$ m	99,98	92,23	83,53
Diâmetro Máximo Característico	12,5 mm	6,3 mm	4,8 mm
Módulo de finura (MF)	6,81	3,43	2,09

A Tabela 20 apresenta o Diâmetro Máximo Característico dos agregados (DMC) e o módulo de finura. Percebe-se que a areia média apresenta uma granulometria mais fina que o pó de pedra.

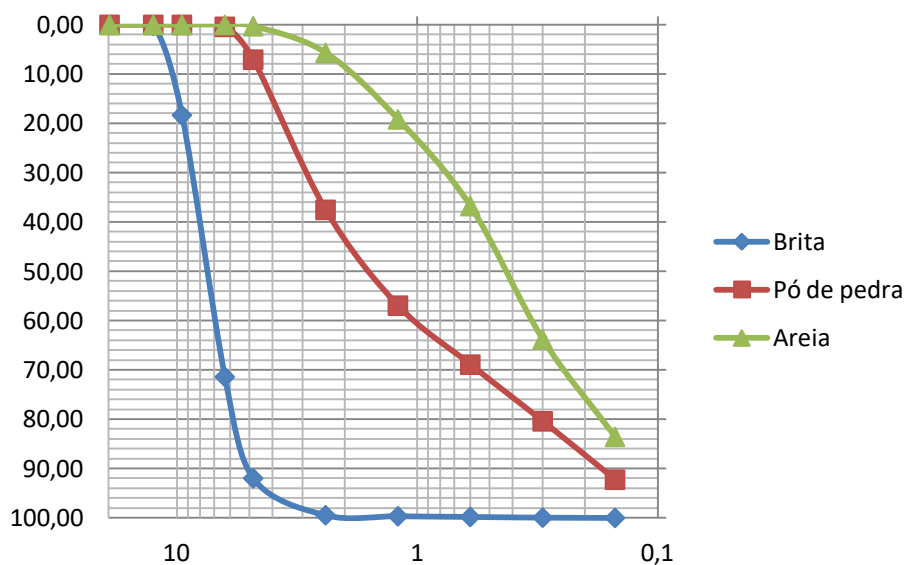


Figura 16. Curva granulométrica dos agregados utilizados.

#### *Material pulverulento (MP)*

O limite estabelecido pela norma NBR 7211:2005 é de até 1% para agregados graúdos e 3% para agregados miúdos. De acordo com a Tabela 21, dentre os agregados, o único que apresentou teor de material pulverulento de acordo com os limites da norma foi a brita, com 0,18%. O pó de pedra e a areia média apresentaram teores acima dos limites, o primeiro apresentou o teor mais elevado, com 7,16%. Porém, como são materiais comumente utilizados pelas empresas da região, optou-se por permanecer com o uso desses agregados na fabricação dos blocos.

Tabela 21. Teor de material pulverulento

Agregado	Teor de MP	Limites (NBR 7211:2005)	Alteração
Brita	0,18%	$\leq 1\%$	Conforme
Pó de pedra	7,16%	$\leq 3\%$	Não conforme
Areia média	5,75%	$\leq 3\%$	Não conforme

### *Massa específica*

Analisando os resultados apresentados na Tabela 22, a massa específica dos agregados miúdos está de acordo com a literatura, dentro do intervalo de 2,5 e 2,7 g/cm<sup>3</sup>. A brita também apresentou massa específica de acordo com a normalidade.

Tabela 22. Massa específica dos agregados

<b>Agregado</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Brita	2,73
Pó de pedra	2,69
Areia média	2,56

### *Definição de traços e substituições*

A Tabela 23 apresenta os traços utilizados nessa parte da pesquisa, quantidade de aditivo plastificante utilizado, relação água/cimento e consumo de metacaulim em cada lote.

Tabela 23. Traços utilizados para a fabricação de *pavers* de concreto com teores substituição parcial de cimento por metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10%

<b>Lote</b>	<b>Traço unitário em massa (cimento: pó de pedra: areia: brita)</b>	<b>Aditivo Plastificante</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Consumo de adição - metacaulim (% da massa de cimento)</b>
TS0	1: 1,01: 2,34: 0,54	120ml	0,30	0
TS4	1: 1,01: 2,34: 0,54	120ml	0,30	4
TS8	1: 1,02: 2,44: 0,57	120ml	0,30	8
TS10	1: 1,08: 2,5: 0,58	120ml	0,30	10

### *Absorção*

De acordo com a Tabela 24, os resultados apresentam baixa taxa de absorção. O pó de pedra apresentou uma absorção maior que os outros agregados, devido à maior presença de finos na sua composição.

Tabela 24. Absorção dos agregados

<b>Agregado</b>	<b>Absorção (%)</b>
Brita	0,62
Pó de pedra	0,70
Areia	0,39

### *Abrasão Los Angeles*

A Tabela 25 mostra os resultados de abrasão Los Angeles para o agregado graúdo. O agregado utilizado na fabricação dos BCP obteve valor menor que o limite máximo estabelecido pela norma, que é de 50%.

Tabela 25. Abrasão Los Angeles

<b>Material</b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Massa final</b>	<b>Abrasão</b>
Brita 0	5000	3697,6	26,1%

#### 3.2.1.3 Superplastificante

Na pesquisa, foi utilizado um superplastificante normalmente empregado em concretos e argamassas que é usado na indústria de pré-fabricados. A utilização de superplastificantes em concretos possibilita o aumento da trabalhabilidade do concreto sem precisar aumentar a relação a/c. Desta forma, pode-se obter concretos de alta resistência e também de alta trabalhabilidade.



## 3.2.1.4 Adição

A adição utilizada foi o Metacaulim HP Ultra, da empresa Metacaulim Brasil. As propriedades físicas e químicas do produto estão especificadas nas Tabelas 26 e 27. Com o objetivo de melhorar o desempenho mecânico dos *pavers*, optou-se por avaliar a substituição de cimento pelo produto em 0%, 4%, 8% e 10%.

Tabela 26. Especificações do metacaulim utilizado nesta pesquisa

<b>Elemento</b>	<b>Típico</b>	<b>Limite (NBR 15.894)</b>
SiO <sub>2</sub>	55,5%	44,0% a 65,0%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,5%	32,0% a 46,0%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,0%	-
TiO <sub>2</sub>	1,0%	-
CaO	0,5%	CaO+MgO < 1,5%
MgO	0,5%	CaO+MgO < 1,5%
K <sub>2</sub> O	1,5%	0,658 K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O < 1,5%
Na <sub>2</sub> O	0,1%	< 0,5%
SO <sub>3</sub>	0,1%	< 1,0%
Perda ao fogo	2,0%	< 4,0%

*\*Dados cedidos pelo fabricante*

Tabela 27. Propriedades físicas do metacaulim utilizado nesta pesquisa

<b>Propriedades</b>	<b>Típico</b>	<b>Limite (NBR 15.894)</b>
Finura (< #325 - 44µm)	5,0 %	< 10,0%
Área específica (cm <sup>2</sup> /g)	230000	> 150000
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,55	-
Massa unitária	0,60	-

*\*Dados cedidos pelo fabricante*

### 3.2.2 Ensaio de caracterização dos agregados

Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados no Laboratório de Construção Civil da Universidade Católica de Pernambuco (LCC/UNICAP), no laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Universidade de Pernambuco (UPE) e no laboratório da empresa Cimento Nacional. Os procedimentos adotados nos ensaios estão descritos no item 3.1.2.

### 3.2.3 Ensaio de Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão até os 28 dias foi executado em prensa hidráulica da marca Solotest com capacidade de 100 toneladas. O ensaio foi realizado no laboratório da empresa Cimento Nacional, em parceria com a empresa Lajes Timbi, com sede em São Lourenço da Mata. Foram utilizadas placas metálicas auxiliares de espessura 20 mm, confeccionadas em aço. Os procedimentos adotados neste ensaio estão descritos no item 3.1.3.

### 3.2.4. Ensaio de Resistência à abrasão

O ensaio de Resistência à abrasão foi realizado aos 140 dias, na Universidade Federal de Pernambuco, *Campus* Agreste. Os procedimentos adotados neste ensaio estão descritos no item 3.1.4.

### 3.2.5 Caracterização do equipamento de fabricação dos blocos

Os dados técnicos listados a seguir e apresentados na Tabela 28 foram disponibilizados pela empresa colaboradora da pesquisa.

- ✓ Dimensões: 7800\*1950\*2900 mm
- ✓ Pressão hidráulica: 21 MPa
- ✓ Vibração principal: Tábua vibração
- ✓ Frequência de vibração: 2800-4500 rpm
- ✓ Dimensões de Palhete: 880\*850 mm
- ✓ Ciclo de produção – 13-18 s
- ✓ Potência elétrica total: 42.5 KW
- ✓ Voltagem: 220 / 380 / 440 V Trifásico
- ✓ Peso: Aproximadamente 10800 kg

Tabela 28. Dimensão e quantidade de *pavers* por tábua

<b>Tipo</b>	<b>Dimensão</b>	<b>Por tábua</b>	<b>Produção por hora</b>
<b>Blocos para alvenaria</b>	390*190*190	6	1200-1440
	390*140*190	10	1800-2000
<b><i>Pavers</i></b>	240*115*53	36	7600-9252

### 3.2.6 Procedimento de cura

As amostras foram colocadas em paletes e, após 1 hora de moldagem, foram cobertas por lona plástica. Passadas 24 horas, os blocos foram estocados ao ar livre, fora do galpão coberto, e permaneceram nesse local até a retirada pelo laboratório de ensaios.

## Capítulo 4 - Resultados e Discussão

### 4.1 Efeitos do metacaulim como adição pura em blocos intertravados de concreto (*pavers*)

Neste capítulo foi avaliado o uso do metacaulim como uma adição na mistura precursora de bloco intertravado de concreto com os teores de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. As propriedades mecânicas estudadas foram a resistência à compressão e a resistência à abrasão. Mais ainda, foi avaliado o papel do metacaulim nas etapas de fabricação dos diferentes tipos de blocos à luz de seus efeitos na termoquímica das etapas de processamento, de forma a escolher a composição que resulta no material de concreto de maior qualidade. Finalmente, experimentos de microscopia de fluorescência foram realizados para avaliar a qualidade destas interpretações químicas.

#### 4.1.2 Propriedades mecânicas dos *pavers* de concreto

O ensaio de compressão foi realizado aos 14 e 28 dias. Foram utilizadas 6 amostras para cada dia e adição. Os teores de adição de metacaulim utilizados foram: 0% (TA0'), 10% (TA10'), 15% (TA15'), 20% (TA20'), 25% (TA25'), 30% (TA30'). Na tabela 27 são apresentadas a resistência média, resistência característica, desvio padrão e coeficiente de variação.

A partir dos dados da Tabela 29, apresentados graficamente pela Figura 17, é possível verificar que todos os blocos dos lotes com adição de metacaulim apresentaram valores maiores de resistência à compressão (37,3 MPa em média após um tempo de cura de 14 dias e 39,2 MPa em média após um tempo de cura de 28 dias) quando comparado ao valor correspondente do bloco sem adição de metacaulim (26,5 MPa após um tempo de cura de 14 dias e 29,8 MPa após um tempo de cura de 28 dias). Em média, após 28 dias o metacaulim aumentou em cerca de 24% a resistência à compressão dos blocos de concreto fabricados.

De acordo com a NBR 9781, a resistência característica estimada é calculada pela seguinte equação:

$$f_{pk,est} = f_p - t * s \quad \text{Sendo, } \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n-1}}$$

Onde:

$f_p$  é a resistência média das peças, expressa em megapascals (MPa)

$f_{pk,est}$  é a resistência característica estimada à compressão, expressa em Megapascal (MPa)

$n$  é o número de peças da amostra

$s$  é o desvio padrão da amostra, expresso em megapascals (MPa)

$t$  é o coeficiente de Student, em função do tamanho da amostra

Tabela 29. Valores da resistência à compressão, da resistência à compressão média, da resistência característica, desvio padrão e do coeficiente de variação de todos os tipos de *pavers* de concreto com teores de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

Tempo de cura (dias)	Lote	Número de corpos de prova	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Resistência Característica ( $f_{pk}$ )	Coefficiente de variação (%)
14	TA0'	6	26,44	1,97	24,47	7,4
	TA10'	6	35,95	2,60	33,35	7,23
	TA15	6	36,47	1,53	34,94	4,19
	TA20	6	38,02	2,07	35,95	5,4
	TA25	6	38,68	4,02	34,66	10,3
	TA30	6	37,19	1,31	35,88	3,52
28	TA0'	6	29,79	1,65	28,14	5,53
	TA10'	6	37,25	1,86	35,39	4,99
	TA15	6	36,65	1,93	34,72	5,26
	TA20	6	40,46	3,47	36,99	8,57
	TA25	6	40,49	3,91	36,58	9,65
	TA30	6	40,80	2,38	38,42	5,83

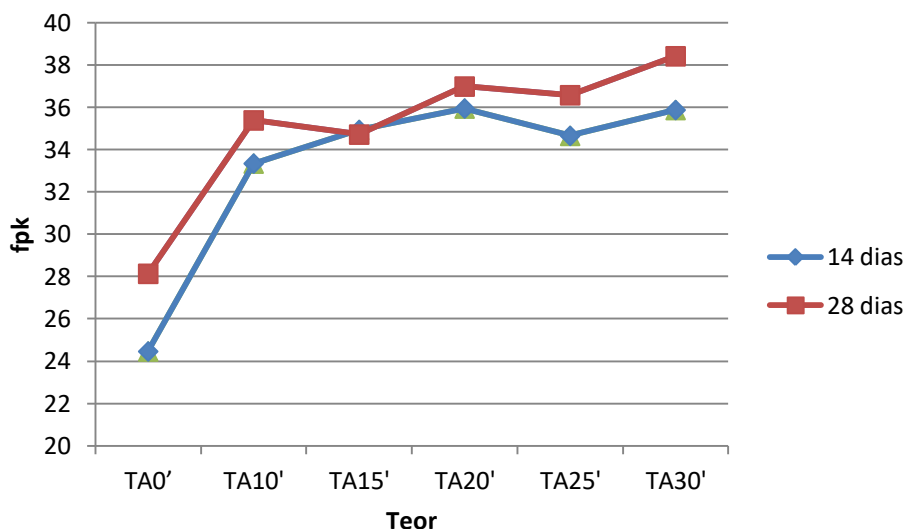


Figura 17. Relação entre a Resistência à compressão dos pavers de concreto com os valores dos teores de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%.

De acordo com a ABNT NBR 9781 um valor aceitável de resistência à compressão para blocos intertravados de concreto destinados a tráfegos de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha é de no mínimo 35 MPa de resistência característica. Portanto, todos os teores com metacaulim apresentaram resultados satisfatórios para este tipo de solicitação.

O aumento mais expressivo de resistência à compressão foi identificado entre o teor de referência e o teor com 10% de adição. Pois a partir dele a resistência não apresenta um crescimento tão significativo. A partir dos dados apresentados na Tabela 29, esse aumento pode ser explicado em se tratando de concreto seco, de acordo com Kanno (2009) *apud* Nascimento (2016), independente do processo de conformação a resistência à compressão tende a aumentar de acordo com um melhor empacotamento dos grãos (maior densidade), além das ligações intercristalinas que se formam nas superfícies de contato entre as partículas.

Porém, essa resistência apresentou valores semelhantes entre os teores com adição, não melhorando significativamente segundo a análise estatística apresentada na Tabela 28. Deve-se considerar também o uso de uma pequena quantidade de amostras para essa avaliação. Como esse tipo de concreto utiliza um menor teor de água em relação ao convencional para facilitar a prensagem dos blocos, por exemplo, e adicionamos um

teor maior de finos no sistema com quantidade de água constante, podendo ter influenciado nas reações de hidratação do cimento e surgido assim o efeito fíler, de preenchimento dos poros.

Duas amostras, apesar de terem médias com valores diferentes, podem não ser estatisticamente diferentes. Para isso, foi necessária a realização de dois testes: uma análise de variância (ANOVA), que através do valor  $F$  calculado, verificaram-se as hipóteses de que duas amostras possuem evidências estatísticas que suas variâncias são ou não diferentes.

De acordo com os testes dessa análise, mostrados na Tabela 30, houve semelhanças entre as amostras. Em geral, analisando todos os teores com metacaulim, as amostras são estatisticamente iguais nas duas idades avaliadas. Houve apenas diferenças estatísticas em dois casos: entre os traços TA0' e TA10' nas duas idades e entre os traços TA10' e TA30' com 28 dias.

Tabela 30. Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de resistência à compressão

Idade	Referência	Conclusão	F crítico	F calculado
14 dias	TA0' - TA10'	Amostras diferentes	4,964	42,378
	TA10' - TA15'	Amostras iguais	4,964	0,147
	TA15' - TA20'	Amostras iguais	4,964	1,855
	TA20' - TA25'	Amostras iguais	4,964	0,115
	TA25' - TA30'	Amostras iguais	4,964	0,676
	TA10' - TA30'	Amostras iguais	4,964	0,915
	Todos os teores com Metacaulim	Amostras iguais	2,758	1,046
28 dias	TA0' - TA10'	Amostras diferentes	4,964	44,927
	TA10' - TA15'	Amostras iguais	4,964	0,728
	TA15' - TA20'	Amostras iguais	4,964	1,966
	TA20' - TA25'	Amostras iguais	4,964	0,000
	TA25' - TA30'	Amostras iguais	4,964	0,050
	TA10' - TA30'	Amostras diferentes	4,964	6,920
	Todos os teores com Metacaulim	Amostras iguais	2,758	2,458

Além de avaliar os resultados de resistência à compressão dos blocos, a Tabela 31 mostra mais uma propriedade analisada a fim de verificar o desgaste por abrasão em cada um dos teores estudados.

Tabela 31. Valores do diâmetro da cavidade dos *pavers* de concreto com teores de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% e dos desvios padrões e dos coeficientes de variância após um tempo de cura de 28 dias.

Lote	Número de corpos de prova	Média do diâmetro da cavidade (mm)	Desvio padrão (mm)	Coefficiente de variação (%)
TA0'	4	11,05	1,97	17,85
TA10'	4	13,65	2,74	20,08
TA15'	4	11,95	2,75	22,97
TA20'	4	12,15	1,02	8,38
TA25'	4	11,10	1,33	12,02
TA30'	4	12,2	0,98	8,06

Observando a Figura 18, todos os blocos com adição de metacaulim apresentaram um desgaste maior (média de 12,21 mm) em relação ao de referência (11,05 mm). De acordo com a análise de variância (ANOVA), as amostras são estatisticamente iguais como indicado na Tabela 32.

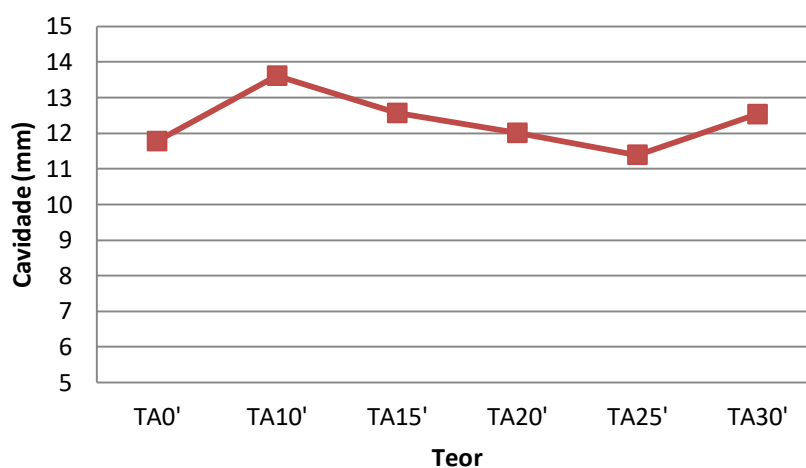


Figura 18. Relação entre o diâmetro da cavidade dos *pavers* de concreto com os valores dos teores de metacaulim de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%



Tabela 32. Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de resistência à abrasão dos teores de adição pura com 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%

Idade	Referência	Conclusão	F crítico	F calculado
28 dias	TA0' - TA10'	Amostras iguais	5,987	1,184
	TA10' - TA15'	Amostras iguais	5,987	0,291
	TA15' - TA20'	Amostras iguais	5,987	0,144
	TA20' - TA25'	Amostras iguais	5,987	0,536
	TA25' - TA30'	Amostras iguais	5,987	1,889
	TA10' - TA30'	Amostras iguais	5,987	0,517
	Todos os teores com Metacaulim	Amostras iguais	2,772	0,639

A Figura 19 mostra a baixa correlação entre a Resistência à compressão e abrasão dos blocos nesse estudo. Bullen (1992) e Cruz (2003) também observaram em seus estudos sobre blocos intertravados de concreto que, ao contrário do que normalmente se espera, não há uma tendência bem definida entre essas duas propriedades.

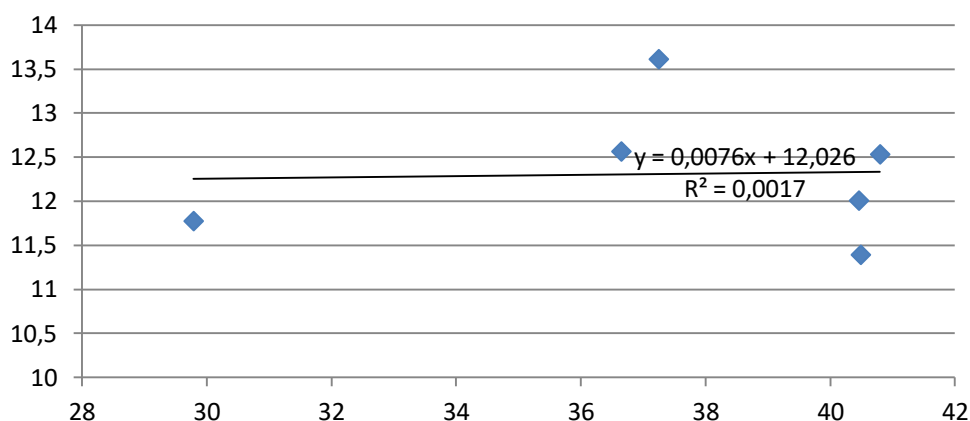


Figura 19. Relação obtida entre a Resistência à compressão e a abrasão

A fim de avaliar o grau de adensamento, importante parâmetro para analisar a compactação que o equipamento ofereceu à mistura, foi determinada a densidade média de cada lote. Analisando os dados percebe-se que o teor com menor densidade é o de referência (TA0'), que também obteve o menor valor médio de resistência à compressão em relação aos demais teores, ressaltando a influência do empacotamento dos grãos na resistência do bloco. De maneira análoga, o TA15' apresentou menor valor de resistência e densidade entre os teores com adição como evidenciado na Figura 20. Por

sua vez, a Tabela 33 apresenta a análise estatística ANOVA com a finalidade de identificar se os valores apresentam diferenças significativas. Essa análise mostrou que os dados são estatisticamente iguais.

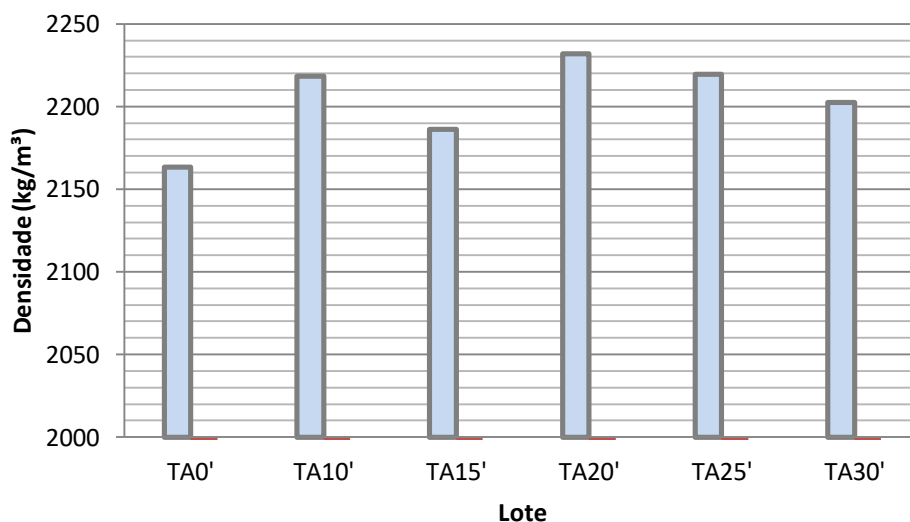


Figura 20 - Densidade média dos teores

Tabela 33. Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de densidade

Referência	Conclusão
TA0' - TA10'	Amostras iguais
TA10' - TA15'	Amostras iguais
TA15' - TA20'	Amostras iguais
TA20' - TA25'	Amostras iguais
TA25' - TA30'	Amostras iguais
TA10' - TA30'	Amostras iguais
Todos os teores com Metacaulim	Amostras iguais

Com a finalidade de complementar a análise dos teores propostos nessa pesquisa, e verificar o que apresenta melhor aplicabilidade, optou-se por uma interpretação química das etapas de fabricação dos blocos de forma a compreender melhor o papel do metacaulim no concreto.

#### 4.1.3 O papel do metacaulim nas etapas de fabricação dos blocos intertravados e nas propriedades termodinâmicas das reações de hidratação

Reações do estado sólido acontecem a partir da junção de sólidos inorgânicos precursores pela adição de grande quantidade de calor, por exemplo, pelo uso de altas temperaturas. Compostos inorgânicos formados a partir de tais reações tendem a se decompor nos reagentes iniciais de forma espontânea ( $\Delta_r G < 0$ ) e de forma energeticamente favorecida ( $\Delta_r H < 0$ ), onde  $\Delta_r G$  indica a energia de Gibbs e  $\Delta_r H$  a entalpia de reação. Isto significa que para estabilizar sistemas formados via reações do estado sólido, um ambiente de temperatura elevada pode ser importante. Um exemplo de reações do estado sólido na Engenharia Civil é a formação do clínquer Portland a uma temperatura de 1450 °C. Neste contexto, já foram reportados vários polimorfos dos sólidos que compõem o cimento Portland em altas temperaturas (SAKURADA; SINGH, 2007; JEFFERY, 1952). No entanto, na construção civil muitas vezes o cimento é utilizado em uma temperatura ambiente, o que pode favorecer a decomposição dos sólidos que compõem o clínquer em sólidos mais estáveis. Tal decomposição acontece devido à instabilidade energética dos sólidos formados após as reações do estado sólido, sendo um exemplo o caso da alita (Li et. al., 2014) em que ocorre a seguinte decomposição:  $\text{alita(s)} \rightarrow 3\text{CaO(s)} + \text{SiO}_2\text{(s)} + \text{calor}$ . Esta decomposição ocorre com liberação de calor, e, portanto, a entalpia desta reação necessariamente deve ser negativa ( $\Delta_r H < 0$ ). Assim, é possível considerar que ao decorrer do tempo, as espécies presentes no clínquer de cimento passam a ser seus respectivos sólidos inorgânicos na forma mais estável energeticamente, ou seja, na forma decomposta.

Sendo a decomposição de sólidos inorgânicos formados via reações do estado sólido, como os principais componentes do cimento Portland  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$ , favorecida pelas propriedades de energia de Gibbs de entalpia de reação ( $\Delta_r G$  e  $\Delta_r H < 0$ ), é possível considerar que uma vez formado tais sistemas, seu não armazenamento em locais de temperatura elevada pode favorecer sua decomposição. É importante ressaltar que os termos C, S, A e F usualmente escritos na nomenclatura do cimento, são, respectivamente, óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

O cimento Portland utilizado na fabricação dos lotes de *pavers* foi do tipo II. Isto significa que em média a sua composição é 46% de  $C_3S$ , 29% de  $C_2S$  (Neville, 2011), 6% de  $C_3A$  (Neville, 2011), e 12% de  $C_4AF$  (Neville, 2011). Em conjunto, estes sólidos inorgânicos correspondem a 93% da composição do cimento utilizado. Os demais componentes são sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ , 2,8%) (Neville, 2011), óxido de cálcio livre ( $CaO$ , 0,6%) (Neville, 2011), e óxido de magnésio ( $MgO$ , 3,0%) (Neville, 2011). Considerando as espécies  $C_2S$ ,  $C_3A$  e  $C_4AF$  em relação ao sólido inorgânico  $C_3S$  esta composição majoritária, em média é  $1C_3S/0,63C_2S/0,13C_3A/0,26C_4AF$ .

É possível reescrever a composição média do cimento utilizado neste trabalho da seguinte forma:  $1(3CaO + SiO_2)/0,63(2CaO + SiO_2)/0,13(3CaO + Al_2O_3)/0,26(4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ , ou seja,  $3CaO + 1SiO_2/1,26CaO + 0,63SiO_2/0,39CaO + 0,13Al_2O_3/1,04CaO + 0,26Al_2O_3 + 0,26Fe_2O_3$ . Isto é equivalente a  $5,69 CaO/1,63 SiO_2/0,39 Al_2O_3/ 0,26 Fe_2O_3$ .

Com o objetivo de fabricar os blocos, foram utilizados 50 kg de cimento Portland II, 80 kg de pó pedra, 50 kg de brita, 140 kg de areia fina e 15 L de água. O que diferenciou os 6 lotes de blocos fabricados (TA0', TA10', TA15', TA20', TA25' e TA30') foi a quantidade de metacaulim utilizada. No caso, foram adicionados 0 kg, 5,0 kg, 7,5 kg, 10,0 kg, 12,5 kg e 15,0 kg de metacaulim na mistura precursora dos blocos dos lotes TA0', TA10', TA15', TA20', TA25' e TA30', respectivamente. Desta forma, foram avaliadas as composições químicas de cada uma das misturas precursoras dos diferentes tipos de blocos fabricados (Apêndice A). Todas as transformações de massa em quilograma para número de mols foram realizadas a partir da utilização dos valores das massas molares das principais espécies inorgânicas presentes nas misturas precursoras dos diferentes tipos de blocos. Tais valores podem ser vistos na Tabela 34.

Tabela 34. Valores das massas molares dos principais sólidos inorgânicos presentes nas misturas precursoras dos *pavers*

Composto	MM (g.mol <sup>-1</sup> )
CaO	56,07
Ca(OH) <sub>2</sub>	74,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101,96
Al(OH) <sub>3</sub>	78,0
SiO <sub>2</sub>	60,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	159,69
H <sub>2</sub> O	18,015
CaCO <sub>3</sub>	100,09

A partir da composição química das espécies inorgânicas presentes nas misturas precursoras dos lotes TA0' - TA30' é possível avaliar a termodinâmica das reações de hidratação associadas aos processos de fabricação e de tempo de cura das peças de concreto. Note que as propriedades termodinâmicas de energia de Gibbs de formação ( $\Delta_f G$ ) e entalpia de formação ( $\Delta_f H$ ) de todas as espécies envolvidas nas etapas em questão são conhecidas (MATTARELLA et. al., 2014), como pode ser visto na Tabela 35.

Tabela 35. Valores das energias de Gibbs de formação ( $\Delta_f G$ ) e das entalpias de formação ( $\Delta_f H$ ) dos principais sólidos inorgânicos presentes nas misturas precursoras dos *pavers*

Composto	$\Delta_f G$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )	$\Delta_f H$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )
CaO	-603,3	-634,9
Ca(OH) <sub>2</sub>	-897,5	-985,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1582,3	-1675,7
Al(OH) <sub>3</sub>	-1149,8	-1287,4
SiO <sub>2</sub>	-855,9	-909,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-742,2	-824,2
H <sub>2</sub> O	-237,1	-285,8
CaCO <sub>3</sub>	-1128,8	-1206,9

A Tabela 36 apresenta os valores de das seis reações de hidratação globais estudadas neste trabalho. Detalhes das reações de hidratação estão dispostas no Apêndice B.

Tabela 36. Valores das energias de Gibbs de reação ( $\Delta_r G$ ) e das entalpias de formação ( $\Delta_r H$ ) das etapas de formação das misturas precursoras dos *pavers* dos lotes TA0' - TA30'.

Lote	Reação de Hidratação	$\Delta_r G$ (kJ)	$\Delta_r H$ (kJ)
TA0'	$1,00\text{CaO(s)} + 0,03 \text{Al}_2\text{O}_3\text{(s)} + 1,09 \text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 1,00 \text{Ca(OH)}_2\text{(s)} + 0,06 \text{Al(OH)}_3\text{(s)}$	-57,3	-65,8
TA10'	$1,00\text{CaO(s)} + 0,07 \text{Al}_2\text{O}_3\text{(s)} + 1,21 \text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 1,00 \text{Ca(OH)}_2\text{(s)} + 0,14 \text{Al(OH)}_3\text{(s)}$	-57,5	-67,4
TA15'	$1,00\text{CaO(s)} + 0,08 \text{Al}_2\text{O}_3\text{(s)} + 1,24 \text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 1,00 \text{Ca(OH)}_2\text{(s)} + 0,16 \text{Al(OH)}_3\text{(s)}$	-57,6	-67,8
TA20'	$1,00\text{CaO(s)} + 0,10 \text{Al}_2\text{O}_3\text{(s)} + 1,30 \text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 1,00 \text{Ca(OH)}_2\text{(s)} + 0,20 \text{Al(OH)}_3\text{(s)}$	-57,7	-68,7
TA25'	$1,00\text{CaO(s)} + 0,12 \text{Al}_2\text{O}_3\text{(s)} + 1,36 \text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 1,00 \text{Ca(OH)}_2\text{(s)} + 0,24 \text{Al(OH)}_3\text{(s)}$	-57,8	-69,5
TA30'	$1,00\text{CaO(s)} + 0,14 \text{Al}_2\text{O}_3\text{(s)} + 1,41 \text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 1,00 \text{Ca(OH)}_2\text{(s)} + 0,27 \text{Al(OH)}_3\text{(s)} + 0,01 \text{Al}_2\text{O}_3\text{(s)}$	-64,6	-77,10

A partir dos resultados apresentados na Tabela 36, é possível constatar que adições de metacaulim entre 10% e 25% apresentam tanto valores de  $\Delta_r G$  (média de -57,58 kJ) quanto de  $\Delta_r H$  (média de -67,84 kJ) bastante similares entre si. Isto acontece porque em todos os casos havia uma quantidade em excesso de água suficiente para que, em uma situação ideal, todo o óxido de cálcio e o óxido de alumínio reagissem. No entanto, para o caso com a maior adição de metacaulim (30%) a quantidade de água utilizada na fabricação dos blocos não é suficiente para uma reação com rendimento total de conversão dos óxidos de cálcio e alumínio em seus respectivos hidróxidos. Embora os valores de  $\Delta_r G$  (-64,6 kJ) quanto de  $\Delta_r H$  (média de -77,10 kJ) tenham sido os mais negativos, os mesmos não refletem a qualidade da fabricação dos blocos de concreto por esta rota. Na realidade, ambos os valores das propriedades termodinâmicas de energia de Gibbs e de entalpia das reações de hidratação dos óxidos de cálcio e alumínio em seus respectivos hidróxidos, reflete uma possível sobra de óxido de alumínio. Esta sobra é prejudicial, principalmente, no que diz respeito à possibilidade de manifestações

patológicas que possam vir a se desenvolver, uma vez que os reagentes que sobraram com o tempo podem vir a reagir com agentes externos. E claro, dependendo de como estas reações acontecem no material após a sua aplicação, pode haver a formação de novos componentes, bem como pode haver a formação de problemas físicos, por exemplo, de fissuras. Assim, de forma não-intuitiva a maior adição de metacaulim (30%), em uma perspectiva química, pode ser considerada a pior dentre as possibilidades estudadas.

Com o objetivo de avaliar a qualidade das derivações químicas propostas nesta dissertação, foram realizados experimentos de microscopia de fluorescência dos seis tipos de *pavers* para pavimentação estudadas neste capítulo.

#### 4.1.4 Experimentos de microscopia de fluorescência

Foram avaliadas as fluorescências em três regiões do visível: vermelho, verde e azul, cujos respectivos comprimentos de onda de excitação foram 546 nm, 488 nm e 366 nm. É importante ressaltar que o fenômeno da fluorescência consiste na transformação de uma luz incidente, em uma luz com um comprimento de onda diferente do inicial. Para as três regiões de emissão de luz consideradas (vermelho, verde e azul) foram utilizados feixes de luz com comprimentos de onda na região do ultravioleta. As imagens detalhadas da microscopia de fluorescência estão dispostas no Apêndice C.

De forma ilustrativa, as Figuras 21-23, e de forma mais detalhada no Apêndice C, apresentam fluorescências tanto dos precursores quanto dos produtos por cada uma das regiões do visível avaliadas.

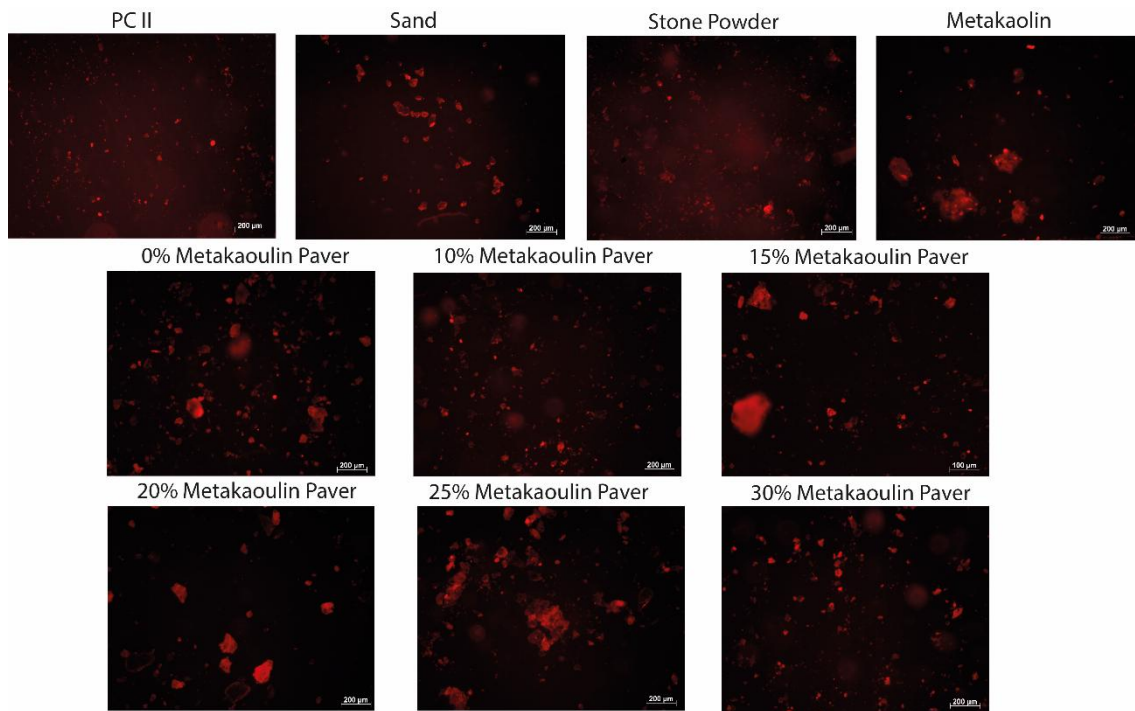


Figura 21. Imagens dos experimentos de microscopia de fluorescência dos precursores e dos produtos na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm.

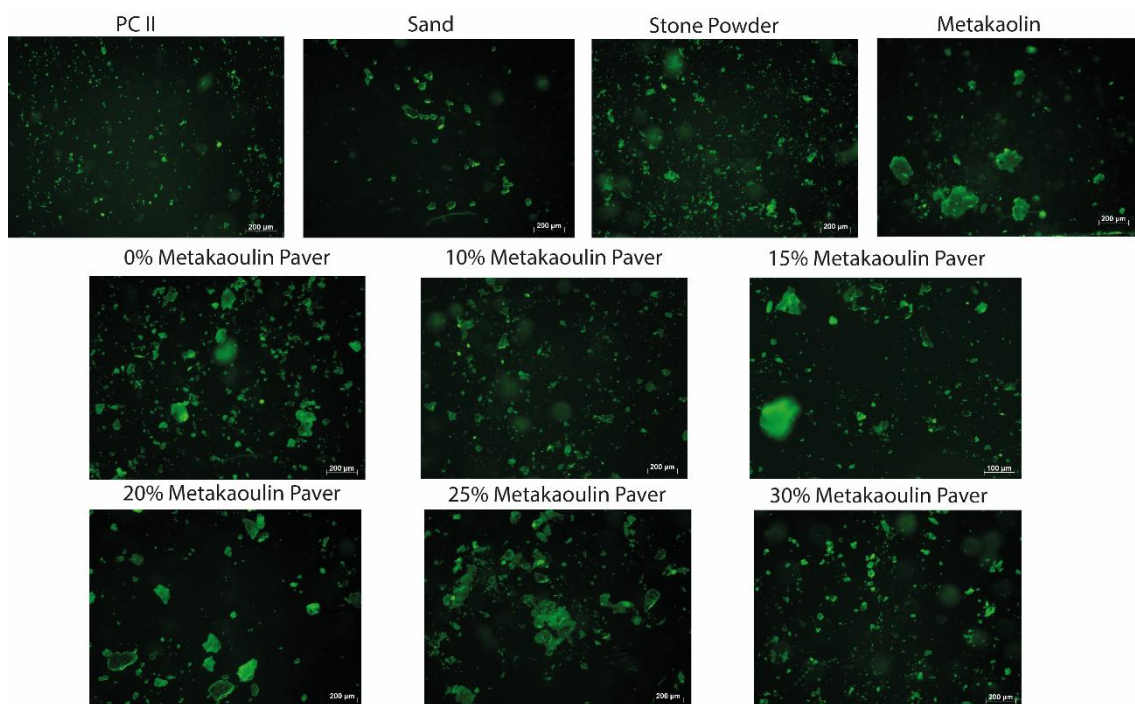


Figura 22. Imagens dos experimentos de microscopia de fluorescência dos precursores e dos produtos na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.



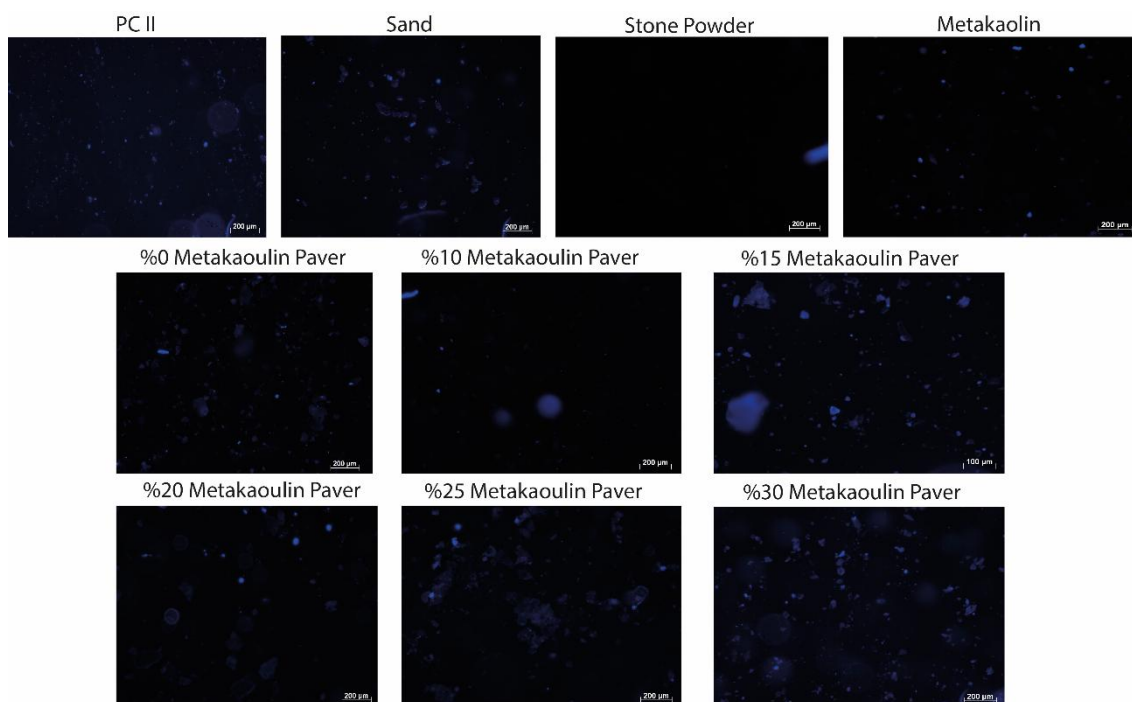


Figura 23. Imagens dos experimentos de microscopia de fluorescência dos precursores e dos produtos na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

Como pode ser visto nas Figuras 21-23, todos os sistemas estudados apresentam fluorescência tanto na região do vermelho quanto na região do verde. Porém, quando a fluorescência na região do azul é avaliada, tanto o metacaulim quanto o pó de pedra apresentam fraca luminescência nesta região. Esta pouca emissão de luz na região de luz pode, à princípio, ser uma estratégia de avaliação da qualidade das reações de hidratação envolvidas na transformação tanto do óxido de cálcio em hidróxido de cálcio, quanto do óxido de alumínio em hidróxido de alumínio. Neste contexto, é possível perceber que o bloco do lote com adição de 10% de metacaulim foi o que apresentou a menor fluorescência na região do azul (Figura 24), de forma muito semelhante ao pó de pedra e ao metacaulim, ambos em sua forma livre. Estes resultados sugerem que as reações de hidratação do cimento que ocorreram durante as etapas de fabricação destes blocos foram realizadas com rendimento muito alto.

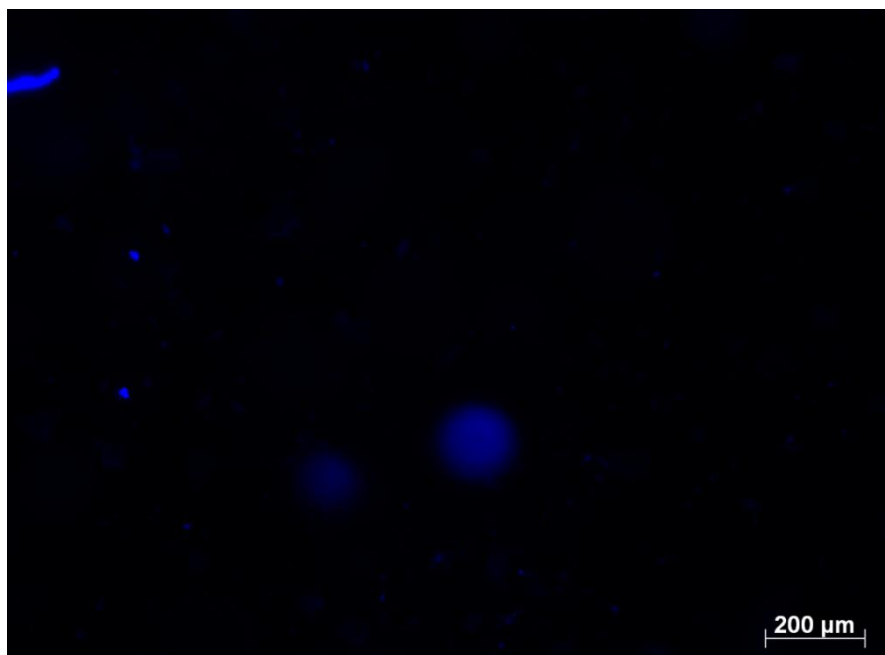


Figura 24- Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 10% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

Em todos os outros casos, é possível constatar que houve sobra de cimento Portland que, aparentemente, não reagiu completamente. Esta pouca eficiência nas reações de hidratação do cimento pode ser facilmente percebida pela fluorescência na região do azul. Como previsto pela derivação química exposta nesta dissertação, os blocos de concreto com adição de 30% de metacaulim apresentaram uma fluorescência exacerbada na região do azul. É possível identificar na Figura 25 indicada pelas setas, pontos com sombras semelhantes aos encontrados no cimento (Figura 26). Este resultado indica que as reações de hidratação se tornam ineficiente quando uma grande quantidade de metacaulim é adicionada a mistura precursora do bloco.

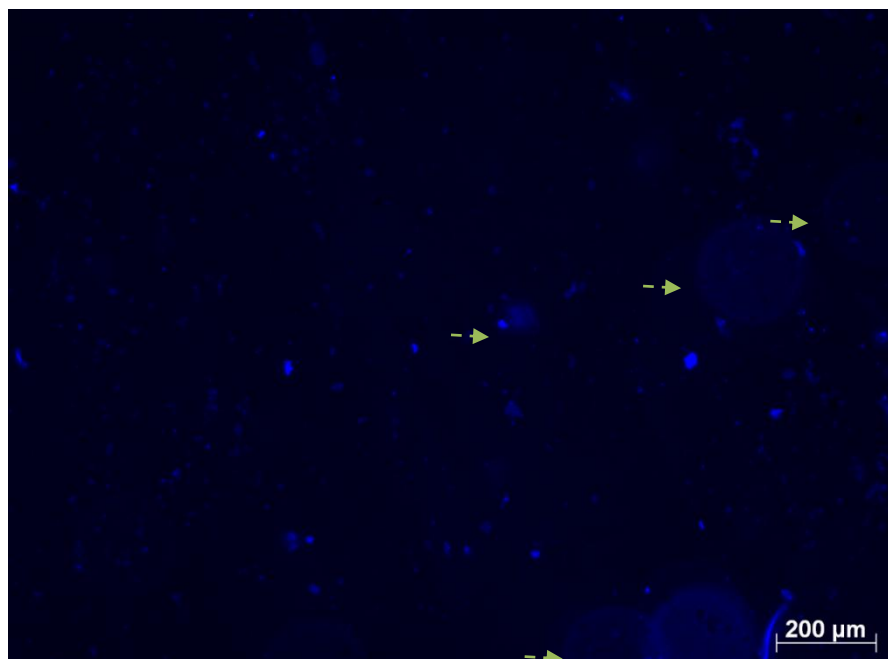


Figura 25- Imagem da microscopia de fluorescência do precursor CII na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

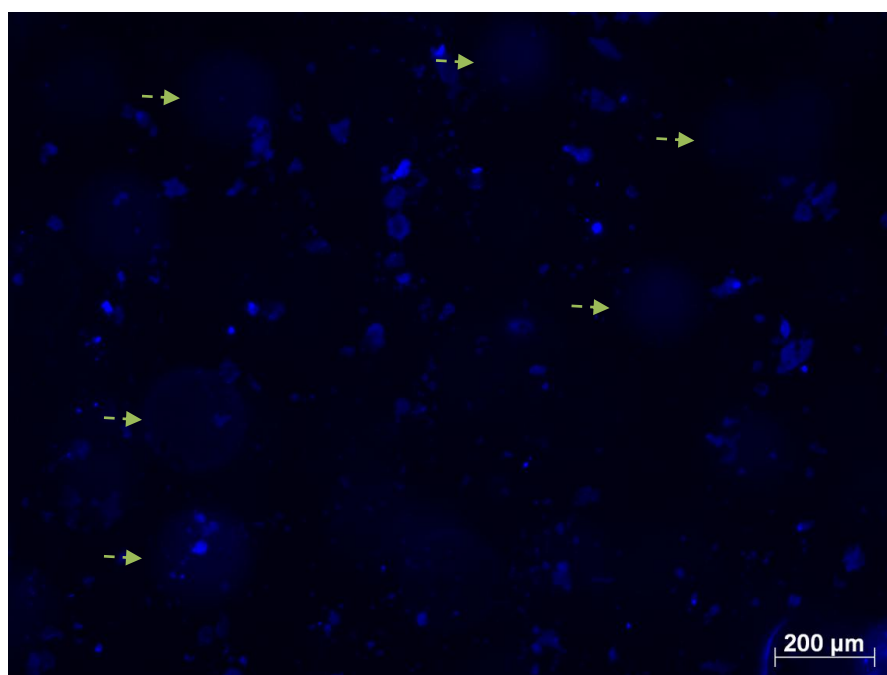


Figura 26 - Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 30% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

Como visto na análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão, os teores com metacaulim apresentaram resultados estatisticamente iguais, indicando que a partir de 15% a adição de metacaulim no paver de concreto não influencia nessa propriedade. Em relação ao de referência, o teor de 10% de adição

apresentou um aumento significativo. Desta forma, considerando também como critério de escolha do bloco de concreto a qualidade da reação de hidratação do cimento Portland evidenciado na análise química, dentre os sistemas estudados, o lote com adição de 10% de metacaulim (resistência à compressão de 37,2 MPa e diâmetro da cavidade de 13,6 mm) é o que apresenta maior potencialidade para aplicações na construção civil considerando as particularidades desse estudo, como materiais empregados e procedimentos adotados.

#### **4.2 - Efeitos da substituição parcial de cimento por metacaulim em blocos intertravados de concreto (*paver*)**

Nesta parte da dissertação foi avaliado o uso do metacaulim como um substituinte ao cimento Portland. Foram analisados os teores com 0%, 4%, 8% e 10% de substituição. Mais uma vez, as propriedades mecânicas consideradas foram tanto a resistência à compressão e quanto a resistência à abrasão.

##### **4.2.1 Propriedades mecânicas**

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados após 2,7, 14 e 28 dias. Foram utilizadas 6 amostras em cada um dos experimentos de resistência à compressão. Os teores de metacaulim em substituição parcial ao cimento utilizado foram: 0% (TS0), 4% (TS4), 8% (TS8) e 10% (TS10). Na Tabela 37 são apresentados os valores da resistência à compressão individual, da resistência à compressão média, da resistência característica, desvio padrão e do coeficiente de variação.

Tabela 37. Valores da resistência à compressão, da resistência à compressão média, da resistência característica, desvio padrão e do coeficiente de variância de todos os tipos de blocos de concreto com teores de metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10%.

<b>Tempo de cura (dias)</b>	<b>Lote</b>	<b>Número de corpos de prova</b>	<b>Resistência à compressão média (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>	<b>Resistência Característica (<math>f_{pk}</math>)</b>	<b>Coeficiente de variação (%)</b>
2	TS0	6	41,9	1,06	40,9	2,5
	TS4	6	29,5	0,86	28,7	2,9
	TS8	6	38,2	0,85	37,5	2,2
	TS10	6	37,7	0,72	37,0	1,9
7	TS0	6	46,3	2,68	43,8	5,8
	TS4	6	31,1	1,89	29,4	6,1
	TS8	6	40,3	3,49	37,0	8,7
	TS10	6	40,1	2,63	37,6	6,6
14	TS0	6	46,3	0,94	45,5	2,0
	TS4	6	31,3	0,33	31,0	1,0
	TS8	6	41,9	1,08	40,9	2,6
	TS10	6	41,2	0,73	40,5	1,8
21	TS0	6	47,2	1,36	46,0	2,9
	TS4	6	34,6	2,37	32,4	6,8
	TS8	6	44,1	2,82	41,5	6,4
	TS10	6	45,7	2,04	43,8	4,5
28	TS0	6	49,4	0,84	48,6	1,7
	TS4	6	35,0	0,87	34,2	2,5
	TS8	6	43,7	1,33	42,5	3,0
	TS10	6	46,7	2,66	44,2	5,7

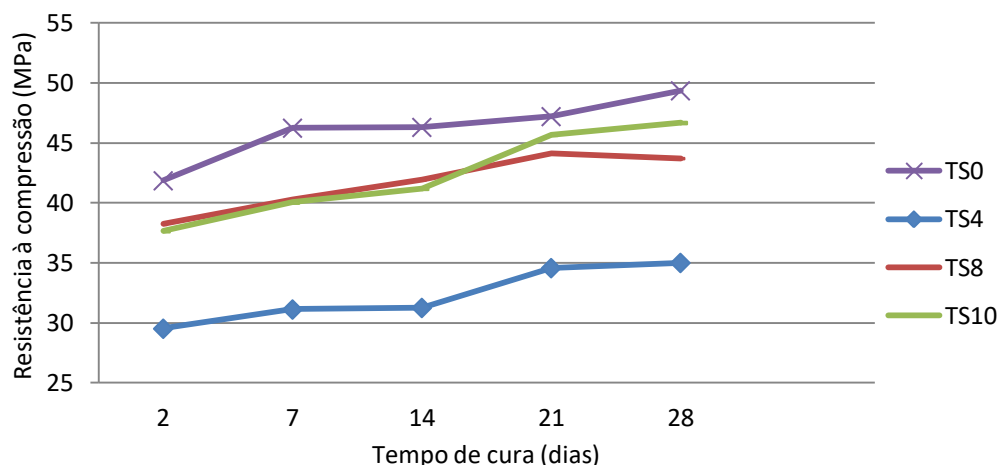


Figura 27. Relação entre o diâmetro da cavidade dos *pavers* de concreto com os valores dos teores de metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10%.

A partir da Tabela 37 e da Figura 27, o bloco sem metacaulim apresentou os maiores resultados de resistência à compressão em todas as idades. Seguido do bloco de concreto com teor de 10%, que diminuiu em média, 5,46% em relação ao caso sem metacaulim. Em geral, as resistências dos teores com adição aumentaram à medida que se adicionou metacaulim à mistura. Embora nenhum deles alcançou os resultados do teor sem adição. De acordo com a NBR 9781, todos os teores estudados estão adequados para o uso em tráfegos de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha, que exige no mínimo 35 MPa de resistência característica.

De acordo com a análise estatística apresentada na Tabela 38, os resultados de resistência à compressão aos 28 dias foram diferentes entre todos os teores estudados. Portanto, considerando os traços utilizados nessa pesquisa e os procedimentos adotados, a substituição parcial de cimento por metacaulim com teores de 4%, 8% e 10% não se mostraram satisfatórios em relação ao de referência.

Tabela 38. Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de resistência à compressão dos teores de substituição de 0%, 4%, 8% e 10%

Idade	Referência	Conclusão	F crítico	F calculado
28 dias	TS0 – TS4	Amostras diferentes	4,964	834,633
	TS4 – TS8	Amostras diferentes	4,964	177,44
	TS8 – TS10	Amostras diferentes	4,964	5,933
	TS0 – TS10	Amostras diferentes	4,964	5,524
	Todos os teores com Metacaulim	Amostras diferentes	3,098	89,72

O desgaste superficial por abrasão é uma patologia bastante comum em pavimentos sem nenhum tipo de revestimento. Por isso, foi avaliada essa propriedade a fim de verificar melhor o comportamento do metacaulim no concreto sujeito a esses esforços. O ensaio de abrasão foi realizado após 28 dias da fabricação dos mesmos. Foram utilizadas 9 amostras para cada dia e adição. Na Tabela 39, representado graficamente na Figura 28, é apresentada a cavidade média de cada teor, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 39. Valores do diâmetro da cavidade dos *pavers* com teores de metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10%. e dos desvios padrões e dos coeficientes de variância após um tempo de cura de 28 dias

Tempo de cura (dias)	Lote	Número de corpos de prova	Cavidade (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de variação (%)
28	TS0	9	11,01	1,27	11,53
	TS4	9	10,38	1,59	15,35
	TS8	9	10,91	0,89	8,20
	TS10	9	11,70	1,97	16,88

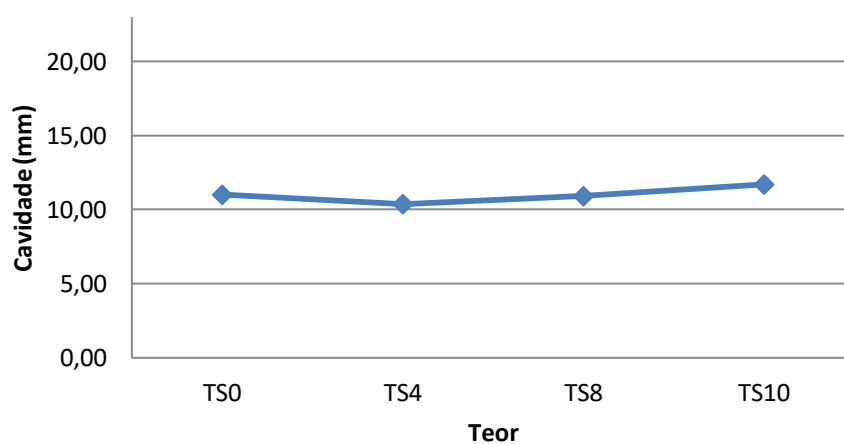


Figura 28. Relação entre o diâmetro da cavidade dos *pavers* com os valores dos teores de metacaulim de 0%, 4%, 8% e 10%

A partir dos dados apresentados na Tabela 40 através da análise de variância (ANOVA), os resultados são estatisticamente iguais entre os teores estudados. Os valores encontrados estão de acordo com a NBR 9781, que trata os limites máximos da cavidade: 23mm para tráfegos de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha e 20 mm para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.

Tabela 40. Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de resistência à abrasão dos teores de substituição de 0%, 4%, 8% e 10%

Idade	Referência	Conclusão	F crítico	F calculado
28 dias	TS0 – TS4	Amostras iguais	4,493	0,853
	TS4 – TS8	Amostras iguais	4,493	0,755
	TS8 – TS10	Amostras iguais	4,493	1,200
	TS0 – TS10	Amostras iguais	4,493	0,786
	Todos os teores com Metacaulim	Amostras iguais	2,901	1,199

Analisando as duas propriedades, os teores com metacaulim e traços avaliados nesse estudo não melhoram o desempenho do *paver*, ou como no caso da resistência à abrasão, não altera significativamente essa propriedade.



## Capítulo 5 – Conclusões

### 5.1. Conclusões principais

Foi verificado que os blocos intertravados de concreto com teores de metacaulim entre 10% e 30% apresentaram valores maiores de resistência à compressão (~ 37 MPa) quando comparado ao valor correspondente do bloco sem adição de metacaulim (~ 30 MPa). Em média, após 28 dias a adição de metacaulim intensifica em cerca de 24% a resistência à compressão dos blocos de concreto fabricados, cujo a relação água/cimento é de 0,3. De acordo com a análise de variância, os blocos com adição apresentaram resultados estatisticamente iguais, não melhorando de forma significativa a resistência à compressão nos teores estudados acima de 10%. Todos os blocos estão de acordo com a ABNT NBR 9781 no que diz respeito à sua aplicabilidade para a pavimentação destinada à tráfegos de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

No que diz respeito à resistência à abrasão, a adição de metacaulim não alterou significativamente essa propriedade. Todos os resultados estão de acordo com a NBR 9781, o que torna estes blocos com potencialidade para aplicação em pavimentações para tráfegos de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha, bem como para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.

Foi realizada uma interpretação química das etapas envolvidas na fabricação dos blocos de concreto, bem como a avaliação do papel da adição do metacaulim na termoquímica das reações de hidratação associadas em tais etapas. Neste contexto, foi verificado que adições de metacaulim entre 10% e 25% apresentam tanto valores de  $\Delta_r G$  (média de -57,58 kJ) quanto de  $\Delta_r H$  (média de -67,84 kJ) bastante similares entre si. No entanto, para o caso com a maior adição de metacaulim (30%) a quantidade de água utilizada na fabricação dos blocos não é suficiente para uma reação com rendimento total de conversão dos óxidos de cálcio e alumínio em seus respectivos hidróxidos. Assim, a maior adição de metacaulim (30%), em uma perspectiva química, pode ser considerada a pior dentre as possibilidades estudadas.

Experimentos de microscopia de fluorescência revelaram que a pouca emissão de luz na região do azul pode ser uma estratégia de avaliação da qualidade das reações de hidratação envolvidas nas etapas de fabricação dos blocos intertravados de concreto.

Neste contexto, foi verificado que a adição de 10% de metacaulim apresentou a menor fluorescência na região do azul, de forma muito semelhante ao pó de pedra e ao metacaulim. Estes resultados indicam que as reações de hidratação do cimento que ocorreram durante as etapas de fabricação destes blocos foram realizadas com rendimento elevado. Em todos os outros casos, foi verificado que houve sobra de cimento Portland que, aparentemente, não reagiu completamente. Este resultado indica que as reações de hidratação se tornam ineficiente quando uma grande quantidade de metacaulim é adicionada na mistura precursora do bloco.

Também foi avaliado nesta dissertação o uso do metacaulim como um substituinte ao cimento Portland em teores  $\leq 10\%$ . Os resultados mostraram que os blocos de concreto sem metacaulim apresentaram os maiores valores de resistência à compressão quando comparado aos casos onde o cimento foi substituído pela adição. Adicionalmente, a substituição parcial de cimento por metacaulim não altera a resistência à abrasão do material.

Finalmente, ao avaliar todos diferentes tipos de blocos fabricados nesta dissertação, considerando também como critério de escolha do *paver* a qualidade da reação de hidratação do cimento Portland, dentre os sistemas estudados, o lote com adição de 10% de metacaulim (que apresentou resistência à compressão de 37,25 MPa, diâmetro da cavidade de 13,65 mm e relação água cimento de 0,30) é o *paver* de concreto de maior potencialidade para aplicações na construção civil neste estudo.

## 5.2. Propostas para futuras pesquisas

- A otimização da quantidade de água para a preparação dos blocos de alta qualidade. É importante que a partir deste estudo haja uma alta eficiência no que diz respeito às reações de hidratação envolvidas nas etapas de fabricação destes materiais. Para isto serão importantes estudos focando na variação do fator água cimento, a fim de encontrar o ponto ótimo da água de empacotamento, e os procedimentos de cura do material.
- As interações entre a água (que não reage durante as etapas de fabricação) e os sólidos inorgânicos que compõem o concreto podem ser estudadas a partir da utilização de química quântica computacional, por exemplo, com uso de métodos semi empíricos. Dentre estes métodos, é possível citar o PM7 que foi parametrizado

para estudos de sólidos, como são os casos dos óxidos e dos hidróxidos que fazem parte da composição dos blocos avaliados nesta dissertação. Para a execução desta perspectiva o *software* MOPAC, que é disponibilizado de forma gratuita e demanda de poucos recursos computacionais pode ser uma estratégia viável de utilização.

- Estudar a microestrutura dos blocos através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- A otimização do uso da microscopia de fluorescência para a avaliação da qualidade de materiais de concreto (não apenas de blocos para pavimentação).
- O entendimento do comportamento abrasivo de pavimentos com os blocos de concreto propostos nesta dissertação em um trecho experimental, analisando desta forma, o desempenho do *paver* em condições reais de tráfego.
- Avaliação da resistência à compressão dos blocos em idades avançadas.

## Referências

- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland (1999) “ET-27. **Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto**. 4a Edição. São Paulo – SP.
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland (2010) – **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público**, São Paulo, 2010, 36p.
- ABITANTE, A.L.R. **Estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- ALBUQUERQUE, R.T.O; LIMA N. L. A. **Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade**. Revista interdisciplinar da Universidade Veiga de Almeida, 2014.
- ARY JÚNIOR, I. J. **Pavimento intertravado como ferramenta de moderação do tráfego nos centros comerciais de travessias urbanas: estudo de caso Guaiúba**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.
- ASLANTAS, O. **A study on abrasion resistance of concrete paving blocks**. Dissertação (Mestrado). The graduate school of natural and applied sciences – Middle East Technical University. Ankara, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **ET-27 - Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto**. 4. ed. São Paulo, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7223 – Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1982.
- \_\_\_\_\_. **NBR EB-208 – Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 27 – Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 30– Agregado miúdo: Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 46 – Determinação do material fino que passa através da peneira de 75 µm por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 51 – Agregado graúdo – Ensaio de abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NBR NM 52 - Agregado miúdo – **Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 53 – **Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_.NM 65 – **Cimento Portland: determinação do Tempo de Pega**. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_.NBR NM 67 – **Concreto fresco: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**.Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. NBR NM 248 – **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_.NBR 5732 – **Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_.NBR 5733 – **Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_.NBR 5737 – **Cimento Portland resistente a sulfatos: especificação**. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_.NBR 5739 – **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. NBR 7211 – **Agregado para concreto**. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_.NBR 7215 - **Cimento Portland: determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_.NBR 9781 – **Peças de concreto para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_.NBR 9833 – **Concreto fresco: determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_.NBR 11578 – **Cimento Portland composto: especificação**. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_.NBR 15894-3 – **Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2010.

BABA, T., YAGINUMA, H., KASAHARA, A., 2000, “**Evaluation of Bearing Capacity of Interlocking Block Pavements Using HFWD**”, Sixth International Concrete Block Paving Conference, Japão, 2000

BARDELLA, P.S.; BARBOSA D.C.; CAMARINI,G. **Sistemas de cura em concretos produzidos com Cimento Portland de Alto Forno com utilização de sílica ativa**. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em concreto pré moldado, São Carlos, 2005.

BEATY, A. N. S.; “**Interlocking Concrete Block Pavements for cold climates**”, Sixth International Concrete Block Paving Conference, Tóquio, 2000.

BELTRÃO, F. C. M.; ZENAIDE, J. C. **A influência do Metacaulim nas propriedades do concreto**. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – Universidade da Amazônia – Belém, 2010.

BIGARÉ, M.; GUINIER, A.; MAZIÈRES, C.; REGOURD, M.; YANNAQUIS, N.; EYSBL, W.; HAHN, T.; WOERMANN, E. **Polymorphism of Tricalcium Silicate and Its Solid Solutions**. *J. Am. Ceram. Soc.* **1967**, 50 (11), 609–619.

BULLEN, F. **The Variation in Durability of Concrete Segmental Paving Units**, Fourth International concrete Block Paving Conference, Vol. 1, pp. 219-228, Auckland, February 1992.

OLIVEIRA E SOUZA, Eduardo Bezerra. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de dosagem de concreto de cimento Portland**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BULLEN, F., 1992, “**The Variation in Durability of Concrete Segmental Paving Units**”, Fourth International concrete Block Paving Conference, Vol. 1, Auclanda, 1992.

CACHEPA, M.M. **Mitigação da reação Álcali-Agregado em concreto com o emprego de resíduo de cerâmica vermelha e metacaulim**. São Leopoldo, 2017. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil, Unisinos, São Leopoldo. 2017.

CARVALHO, M. D. **Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto: ET-27**, 1998. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, 1998.

CASSAGNABÈRE, F. et al. **Use of flash matakaolin in a slip-forming concrete for the precast industry**. Magazine of Concrete Research, v. 61, n. 10, p. 767-778, dez. 2009

CHKHEIWER, A.H. **Improvement of Concrete Paving Blocks Properties by Mineral Additions**, Basrah University /Engineering College /Civil Eng. Department – Iraque, 2017.

CHODOUNSKY, M. A., VIECILI, F. A. **Pisos industriais de concreto: aspectos teóricos e construtivos**. São Paulo, 2007.

COOK, I. D., KNAPTON, J., 1996, “**A Design Method for Lightly Trafficked and Pedestrian Pavements**”, Fifth International Concrete Block Paving Conference, Israel, June, 1996.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 2003. 281 f. Tese (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

**Estudo da influência do metacaulim HP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland**. <http://www.metacaulim.com.br/pdf/metacaulim-hp-usp.pdf> (accessed Jan 1, 2018).

FIORITI, Cesar F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

FRASSON JUNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2000.

GODINHO, D. P. **Pavimento intertravado: uma reflexão sob a ótica da durabilidade e sustentabilidade**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Escola de Arquitetura, UFMG, Belo Horizonte, 2009.

HALLACK, A. **Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais**. 1998. Tese (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998

HONG, Sung Yoon; GLASSER, F.P. **Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels Part II**. Role of alumina. *Cement and Concrete Research*, v.32, p. 1101-1111, 2002.

HUMPOLA, B. **Some Aspects of Concrete Block Pavers Quality**, Fifth International Concrete Block Paving Conference, Israel, Junho, 1996.

HUMPOLA, B., BULLEN F., 1996, **Quick Quality Control of Concrete Pavers in Australia**, Fifth International Concrete Block Paving Conference, Israel, Junho, 1996.

KNAPTON, J. **Romans and their roads: the original small element pavement technologists**. INTERNATIONAL CONCRETE BLOCK PAVING CONFERENCE, Israel, 1996.

LACERDA, C.S., HELENE P.R.L., **Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos**. Departamento de Engenharia de Construção civil – Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2005.

LIDUÁRIO, A.S; FARIAS L.A.; ANDRADE M.A.S; BITTENCOURT, R.M. **Estudo da influência de adições pozolânicas e minerais no concreto**. Laboratório de concreto de Furnas Centrais Elétricas S.A.

MARCHIONI, M.L. **Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada.** Departamento de Engenharia de Construção civil da EPUSP. São Paulo, 2012.

MARÉ, F.L. **História das Infraestruturas rodoviárias.** 2011. Tese (Mestrado) – Especialização em vias de comunicação – Universidade do Porto, Portugal.

MATTARELLA, M.; BERSTIS, L.; BALDRIDGE, K. K.; SIEGEL, J. S. **Synthesis of Bioconjugated Sym -Pentasubstituted Corannulenes: Experimental and Theoretical Investigations of Supramolecular Architectures.** *Bioconjug. Chem.* **2014**, 25 (1), 115–128.

MEDINA, E.A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio.** 2011. Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

MELO, J.V.S. **Desenvolvimento de peças pré moldadas de concreto fotocatalíticas para pavimentação e purificação do ar.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, 2008.

MOTA, J. M. F.; **Reforço de alvenaria resistente com argamassa armada com adição de metacaulim,** Tese (doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia civil, Centro de tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

MULLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto.** 2005. Tese (Mestrado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

NASCIMENTO JUNIOR, **Avaliação da resistência à compressão de concreto utilizando adição de resíduos de cerâmica vermelha.** Departamento de tecnologia - Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia, 2011.

NASCIMENTO, M.V.L.A.; **Estudos de blocos intertravados de concreto para pavimentação com incorporação de resíduo do polimento do porcelanato.** Tese (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

NETTO, R.M. **Materiais pozolânicos.** Curso de especialização em Construção civil – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2006.

NEVILLE, A. M. **Cementitious Materials of Different Types.** In *Properties of Concrete*; Pearson, 2011



- OLIVEIRA, A. L. de. **Contribuição para a Dosagem e Produção de Peças de Concreto para Pavimentação.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004
- PERIM, J.R. **Influência do Metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada.** Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção civil – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.
- PETTERMANN, R. **Avaliação do Desempenho de Blocos de Concreto Para Pavimentação Com Metacaulim e Sílica Ativa.** Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006
- PIROLA, F.C. **Contribuição para o estudo de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação de 50MPA.** Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil (PPGEC) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.
- ROSSIGNOLO, J.A., Oliveira I. L. **Efeito do metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural.** Acta Scientiarum. Technology, vol. 29, num. 1, 2007, PP. 55-60, Universidade Estadual de Maringá, Maringá.
- REZENDE, M.L.S.; Nascimento J.W.B.; Neves G.A.; Silva F.L.H.; Leal A.F.; Ferreira H.C. **Uso de Metacaulim em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta.** Ambiente Construído, Porto Alegre, 2012.
- SAKURADA, R.; SINGH, a K. **Crystal Structure Analysis of Dicalcium Silicates By AB-Initio Calculation.** *32nd Conf. Our World Concr. Struct.* 2007, 1–6.
- SHACKEL, B. **Design and construction of interlocking concrete block pavement.** 5. ed. New York: Elsevier, 1990.
- SILVA, C.V, **Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- SILVEIRA A.A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali-agregado.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- WIEBBELLING, P.O.G. **Pavimento com blocos intertravados de concreto: Estudo de caso na Univates.** Centro Universitário Univates. Lajeado, 2015.

## **APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS LOTES**

### Peças de concreto do loteTA0’:

**Parte do cimento Portland** – como foi derivado anteriormente, a composição do cimento corresponde à 5,69 CaO/1,63 SiO<sub>2</sub>/0,39 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ 0,26 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Tais sistemas constituem 93% do material (Neville, 2011), portanto em 50 kg de massa utilizada cerca de 46,5 kg é formada pelos mesmos. Assim, a partir desta proporção, por simples transformações algébricas vem que em 46,5 kg de cimento, existem em média 33,20 kg de CaO, 9,51 kg de SiO<sub>2</sub>, 2,28 kg de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 1,52 kg de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A partir da utilização dos valores das massas molares de cada um destes compostos, estas massas em quilogramas correspondem a  $0,59 \times 10^3$  mol de CaO,  $0,16 \times 10^3$  mol de SiO<sub>2</sub>,  $0,02 \times 10^3$  mol de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e  $0,01 \times 10^3$  mol de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Parte do pó pedra** - foi utilizado 80 kg de pó de pedra o que corresponde à  $0,80 \times 10^3$  mol de CaCO<sub>3</sub>.

**Parte da brita** - foi utilizado 50 kg de brita o que pode ser traduzido como  $0,50 \times 10^3$  mol de CaCO<sub>3</sub>.

**Parte da areia** – foi utilizado 140 kg de areia fina, o que é  $2,33 \times 10^3$  mol de SiO<sub>2</sub>.

**Parte da água** – foi utilizado 15 L de água o que é equivalente à  $0,83 \times 10^3$  mol de H<sub>2</sub>O.

Somando as contribuições de todas as partes da mistura precursora para a fabricação das peças de concreto sem adição de metacaulim vem que a composição química da mesma é  $0,59 \times 10^3$  mol de CaO +  $0,16 \times 10^3$  mol de SiO<sub>2</sub> +  $0,02 \times 10^3$  mol de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $0,01 \times 10^3$  mol de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $0,80 \times 10^3$  mol de CaCO<sub>3</sub> +  $0,50 \times 10^3$  mol de CaCO<sub>3</sub> +  $2,33 \times 10^3$  mol de SiO<sub>2</sub> +  $0,83 \times 10^3$  mol de H<sub>2</sub>O. Este somatório é equivalente a  $0,59 \times 10^3$  mol de CaO +  $2,49 \times 10^3$  mol de SiO<sub>2</sub> +  $0,02 \times 10^3$  mol de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $0,01 \times 10^3$  mol de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $1,30 \times 10^3$  mol de CaCO<sub>3</sub> +  $0,83 \times 10^3$  mol de H<sub>2</sub>O. Colocando todas as espécies em termos de 1,00 mol de CaO a composição química é 1,00 CaO/4,22 SiO<sub>2</sub>/0,03 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/0,02Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/2,20CaCO<sub>3</sub>/1,41H<sub>2</sub>O.

**Peças de concreto do lote TA10':**

A composição química das peças de concreto do lote TA10' é a composição das peças de concreto do lote TA0' com a adição de 5 kg de metacaulim. Este composto é formado essencialmente por  $\text{SiO}_2$ (54,87%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (39,38%), portanto, 5 kg de metacaulim corresponde a 2,74 kg de  $\text{SiO}_2$  e 1,97 kg de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Tais massas equivalem a  $0,04 \times 10^3$  mol de  $\text{SiO}_2$  +  $0,02 \times 10^3$  mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Assim, a composição química das peças de concreto deste lote é  $0,59 \times 10^3$  mol de  $\text{CaO}$  +  $2,53 \times 10^3$  mol de  $\text{SiO}_2$  +  $0,04 \times 10^3$  mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $0,01 \times 10^3$  mol de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  +  $1,30 \times 10^3$  mol de  $\text{CaCO}_3$  +  $0,83 \times 10^3$  mol de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Colocando todas as espécies em termos de 1,00 mol de  $\text{CaO}$  a composição química é 1,00  $\text{CaO}$ /4,29  $\text{SiO}_2$ /0,07  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /0,02 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ /2,20 $\text{CaCO}_3$ /1,41 $\text{H}_2\text{O}$ .

**Peças de concreto do lote TA15':**

A composição química das peças de concreto do lote TA15' é a composição das peças de concreto do lote TA0' com a adição de 7,5 kg de metacaulim ( $0,07 \times 10^3$  mol de  $\text{SiO}_2$  +  $0,03 \times 10^3$  mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Desta forma a composição química das peças de concreto deste lote é  $0,59 \times 10^3$  mol de  $\text{CaO}$  +  $2,56 \times 10^3$  mol de  $\text{SiO}_2$  +  $0,05 \times 10^3$  mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $0,01 \times 10^3$  mol de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  +  $1,30 \times 10^3$  mol de  $\text{CaCO}_3$  +  $0,83 \times 10^3$  mol de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Colocando todas as espécies em termos de 1,00 mol de  $\text{CaO}$  a composição química é 1,00  $\text{CaO}$ /4,34  $\text{SiO}_2$ /0,08  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /0,02 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ /2,20  $\text{CaCO}_3$ /1,41 $\text{H}_2\text{O}$ .

**Peças de concreto do lote TA20':**

A composição química das peças de concreto do lote TA20' é a composição das peças de concreto do lote TA0' com a adição de 10,0 kg de metacaulim ( $0,09 \times 10^3$  mol de  $\text{SiO}_2$  +  $0,04 \times 10^3$  mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Desta forma a composição química dos blocos deste lote é  $0,59 \times 10^3$  mol de  $\text{CaO}$  +  $2,58 \times 10^3$  mol de  $\text{SiO}_2$  +  $0,06 \times 10^3$  mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $0,01 \times 10^3$  mol de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  +  $1,30 \times 10^3$  mol de  $\text{CaCO}_3$  +  $0,83 \times 10^3$  mol de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Colocando todas as espécies em termos de 1,00 mol de  $\text{CaO}$  a composição química é 1,00  $\text{CaO}$ /4,37  $\text{SiO}_2$ /0,10  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /0,02 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ /2,20  $\text{CaCO}_3$ /1,41 $\text{H}_2\text{O}$ .

**Peças de concreto do lote TA25':**

A composição química dos blocos do lote TA25' é a composição dos blocos do lote TA0' com a adição de 12,5 kg de metacaulim ( $0,11 \times 10^3$  mol de  $\text{SiO}_2$  +  $0,05 \times 10^3$  mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Desta forma a composição química dos blocos deste lote é  $0,59 \times 10^3$  mol de  $\text{CaO}$  +  $2,60 \times 10^3$  mol de  $\text{SiO}_2$  +  $0,07 \times 10^3$  mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $0,01 \times 10^3$  mol de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  +  $1,30 \times 10^3$  mol de  $\text{CaCO}_3$  +  $0,83 \times 10^3$  mol de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Colocando todas as espécies em termos de 1,00 mol de  $\text{CaO}$  a composição química é 1,00  $\text{CaO}/4,41 \text{ SiO}_2/0,12 \text{ Al}_2\text{O}_3/0,02\text{Fe}_2\text{O}_3/2,20 \text{ CaCO}_3/1,41\text{H}_2\text{O}$ .

**Peças de concreto do lote TA30':**

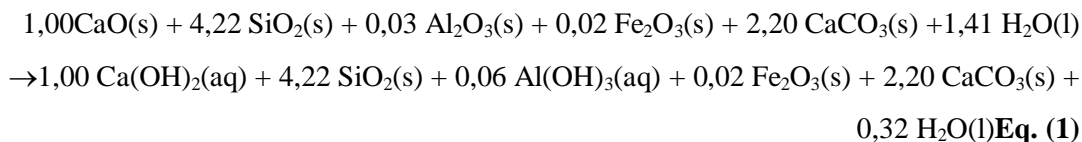
A composição química dos blocos do lote TA30' é a composição dos blocos do lote TA0' com a adição de 15,0 kg de metacaulim ( $0,14 \times 10^3$  mol de  $\text{SiO}_2$  +  $0,06 \times 10^3$  mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Desta forma a composição química das peças deste lote é  $0,59 \times 10^3$  mol de  $\text{CaO}$  +  $2,63 \times 10^3$  mol de  $\text{SiO}_2$  +  $0,08 \times 10^3$  mol de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $0,01 \times 10^3$  mol de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  +  $1,30 \times 10^3$  mol de  $\text{CaCO}_3$  +  $0,83 \times 10^3$  mol de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Colocando todas as espécies em termos de 1,00 mol de  $\text{CaO}$  a composição química é 1,00  $\text{CaO}/4,46 \text{ SiO}_2/0,14 \text{ Al}_2\text{O}_3/0,02\text{Fe}_2\text{O}_3/2,20 \text{ CaCO}_3/1,41 \text{ H}_2\text{O}$ .

**APÊNDICE B – REAÇÕES ENVOLVIDAS NA FABRICAÇÃO DOS  
BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO**

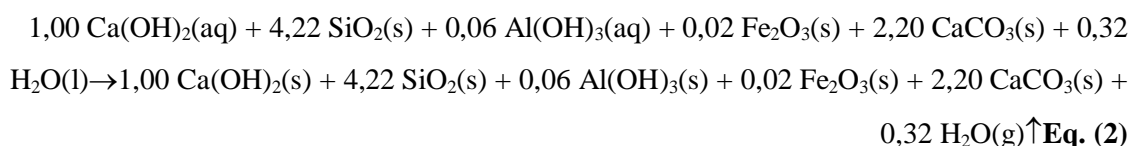
### Reações envolvidas na fabricação dos blocos do lote TA0’:

A Eq. 1 apresenta a reação de hidratação que ocorre durante as etapas de fabricação dos blocos do lote TA0’.



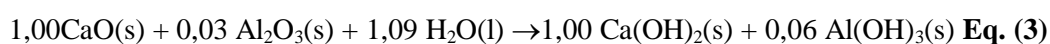
A Eq. (1) representa a etapa de preparação da pasta grossa precursora que é moldada no formato dos blocos, que em seguida sofre processos de prensagem para a obtenção dos mesmos. Nesta pasta, apenas o óxido de cálcio e o óxido de alumínio são capazes de reagir com a água, levando a formação de seus respectivos hidróxidos. Os demais sólidos ficam apenas molhados, provavelmente, interagindo com esta água por efeitos de solvatação via interações fracas, como as ligações de hidrogênio.

A etapa seguinte da formação dos blocos já moldados e colocadas em um local apropriado é a perda da água, que pode levar até 28 dias, sendo este um tempo de cura aceitável para materiais baseados em concreto. A Eq. (2) mostra a reação química associada ao tempo de cura das peças do lote TA0’.



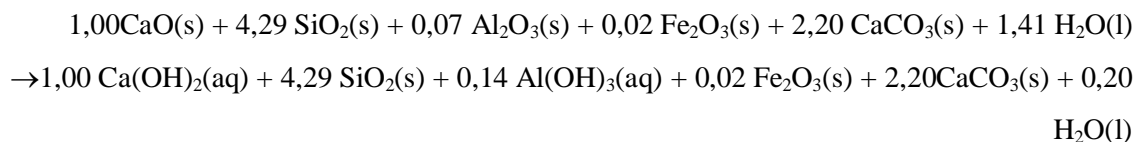
O concreto das peças deste lote é um sólido diferente do inicial, em que a composição química apresenta a seguinte proporção estequiométrica: 1,00 Ca(OH)<sub>2</sub>:4,22 SiO<sub>2</sub>: 0,06Al(OH)<sub>3</sub>:0,02 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:2,20 CaCO<sub>3</sub>.

Uma vez que apenas o óxido de cálcio e o óxido de alumínio reagem com água, a qual está em excesso em relação a estes óxidos. Tal excesso parece contribuir para um rendimento reacional alto ao longo da fabricação dos blocos. Assim, considerando um rendimento de reação total, a reação de hidratação global para a fabricação destas peças é a transformação dos óxidos de cálcio e alumínio em seus respectivos hidróxidos:

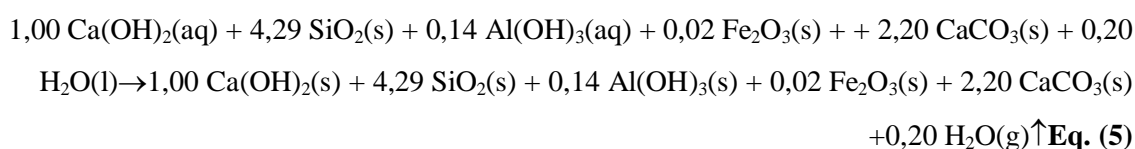


### Reações envolvidas na fabricação dos blocos do lote TA10':

As Eqs. (4) e (5) correspondem à reação de hidratação e à reação associada ao tempo de cura dos blocos fabricadas no lote com adição de 10% de metacaulim em relação ao cimento.

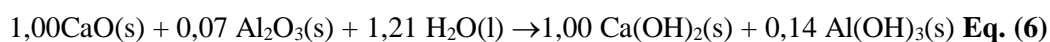


**Eq. (4)**



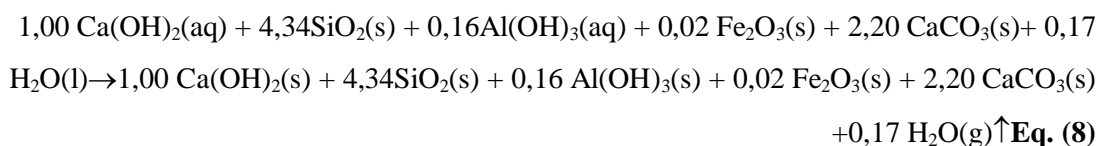
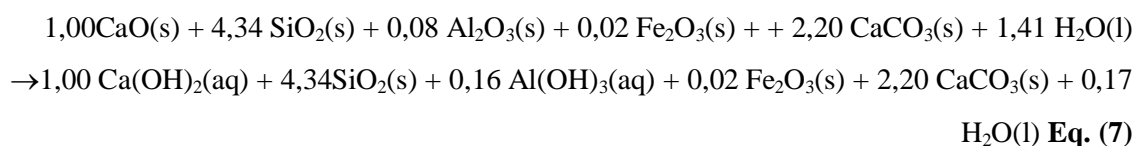
O concreto dos blocos apresenta a proporção estequiométrica de 1,00 Ca(OH)<sub>2</sub>:4,29 SiO<sub>2</sub>: 0,14 Al(OH)<sub>3</sub>:0,02 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:2,20 CaCO<sub>3</sub>.

De uma forma global as Eqs. (4) e (5) podem ser reescritas como sendo:



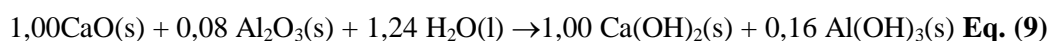
### Reações envolvidas na fabricação dos blocos do lote TA15':

As Eqs. (7) e (8) correspondem à reação de hidratação e à reação associada ao tempo de cura dos blocos fabricados no lote com adição de 15% de metacaulim em relação ao cimento.



O concreto dos blocos deste apresenta a seguinte proporção estequiométrica: 1,00 Ca(OH)<sub>2</sub>:4,34 SiO<sub>2</sub>: 0,16 Al(OH)<sub>3</sub>:0,02 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:2,20 CaCO<sub>3</sub>.

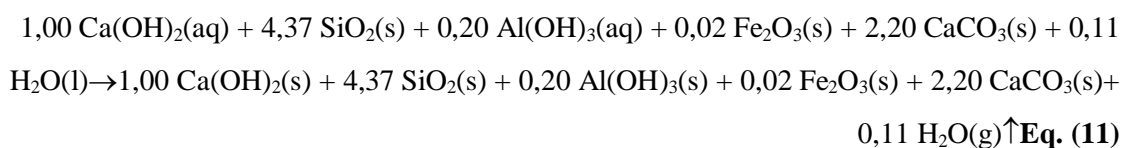
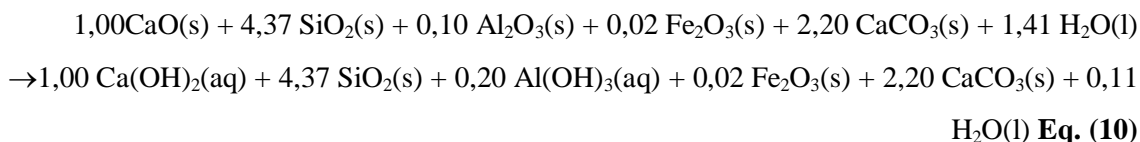
De uma forma global as Eqs. (7) e (8) podem ser interpretadas como sendo:





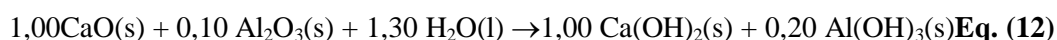
### Reações envolvidas na fabricação dos blocos do lote TA20':

As Eqs. (10) e (11) correspondem à reação de hidratação e à reação associada ao tempo de cura dos blocos fabricados no lote com adição de 20% de metacaulim em relação ao cimento.



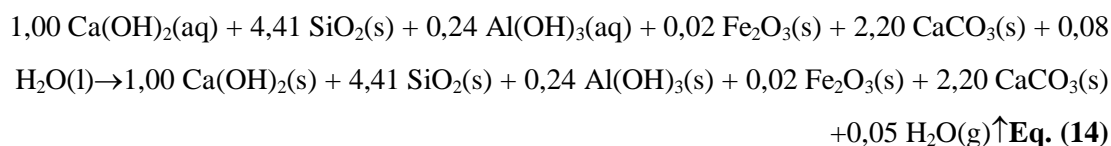
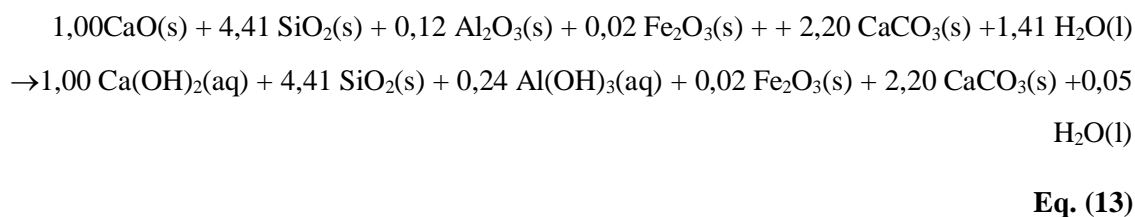
O concreto dos blocos deste apresenta a seguinte proporção estequiométrica: 1,00 Ca(OH)<sub>2</sub>:4,37 SiO<sub>2</sub>: 0,20 Al(OH)<sub>3</sub>:0,02 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:2,20 CaCO<sub>3</sub>.

De uma forma global as Eqs. (10) e (11) é:



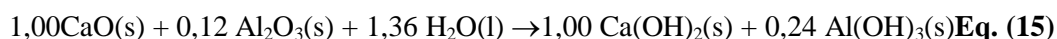
### Reações envolvidas na fabricação dos blocos do lote TA25':

As Eqs. (13) e (14) correspondem à reação de hidratação e à reação associada ao tempo de cura dos blocos fabricados no lote com adição de 25% de metacaulim em relação ao cimento.



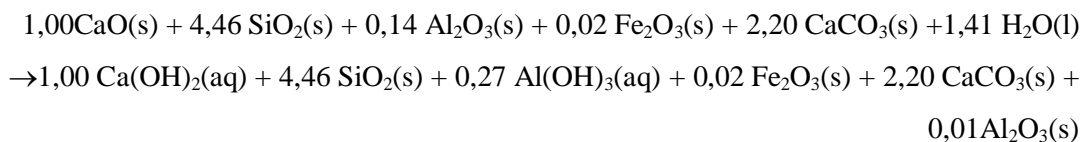
O concreto dos blocos deste apresenta a seguinte proporção estequiométrica: 1,00 Ca(OH)<sub>2</sub>:4,41 SiO<sub>2</sub>: 0,24 Al(OH)<sub>3</sub>:0,02 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:2,20 CaCO<sub>3</sub>.

A reação global associada às Eqs. (14) e (15) é:

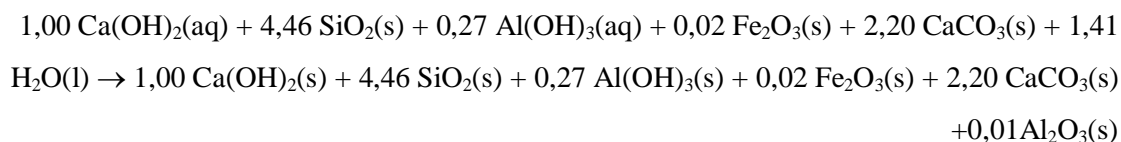


### Reações envolvidas na fabricação dos blocos do lote TA30':

As Eqs. (16) e (17) correspondem à reação de hidratação e à reação associada ao tempo de cura dos blocos fabricados no lote com adição de 30% de metacaulim em relação ao cimento.



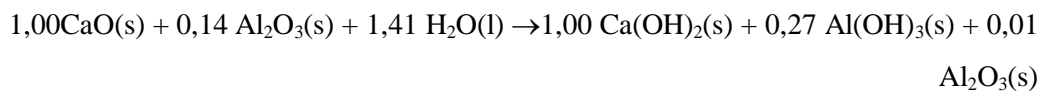
**Eq. (16)**



**Eq. (17)**

O concreto dos blocos deste apresenta a seguinte proporção estequiométrica: 1,00 Ca(OH)<sub>2</sub>:4,46 SiO<sub>2</sub>: 0,27 Al(OH)<sub>3</sub>: 0,02 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:2,20 CaCO<sub>3</sub>.

Por sua vez, a reação global associada às Eqs. (16) e (17) é:



**Eq. (18)**

**APÊNDICE C – IMAGENS DA MICROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA**

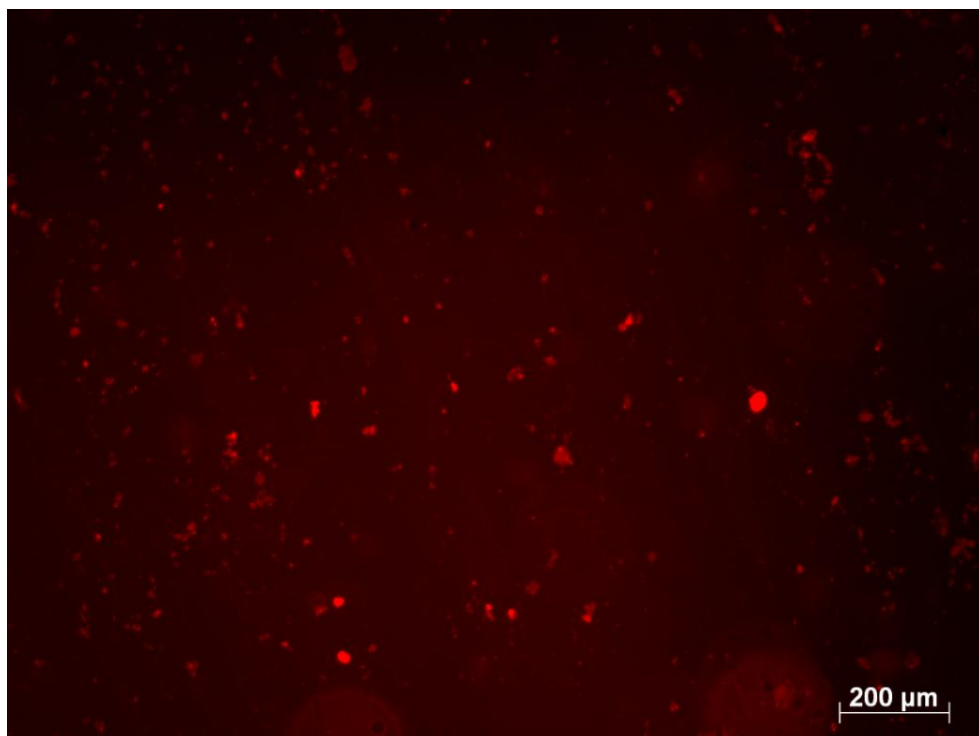


Figura 29. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor CPlI na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm.

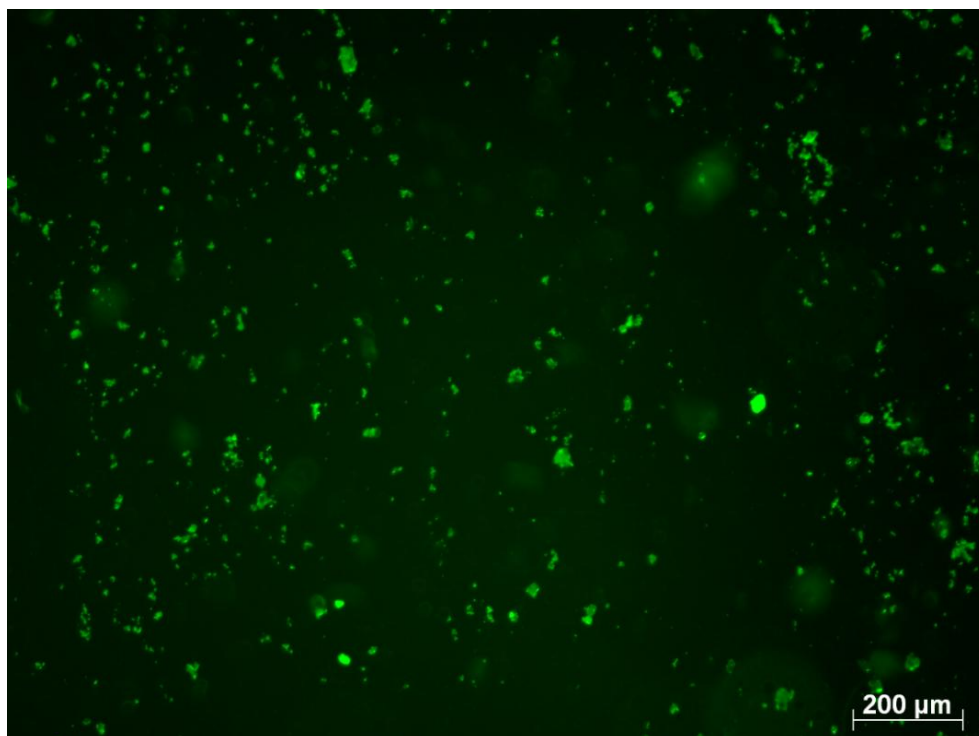


Figura 30. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor CPlI na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.

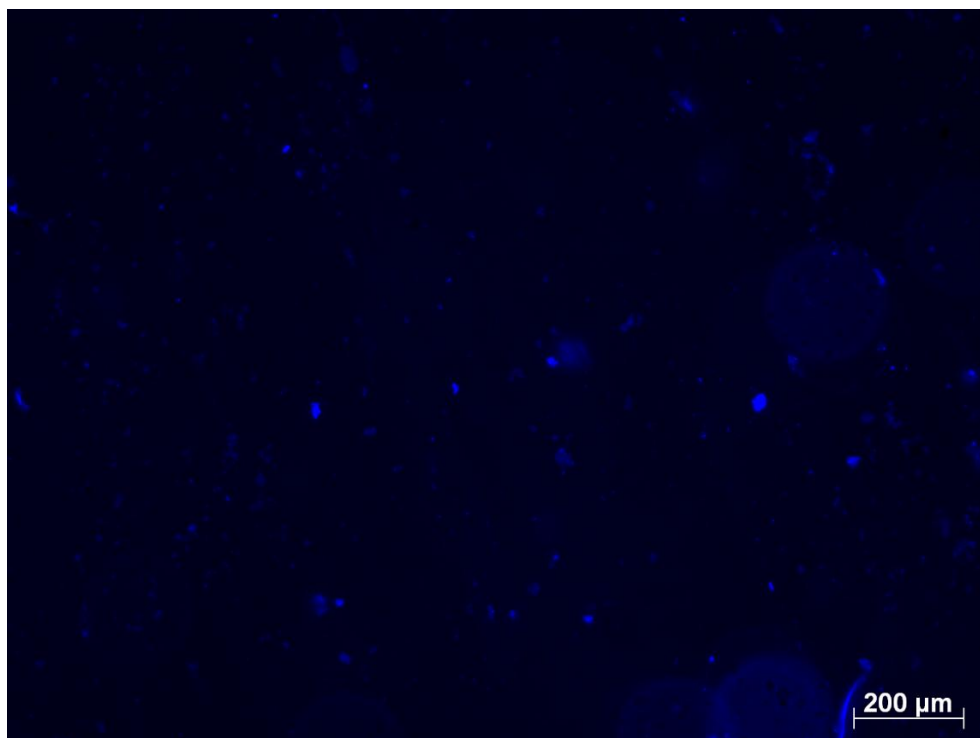


Figura 31. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor CII na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

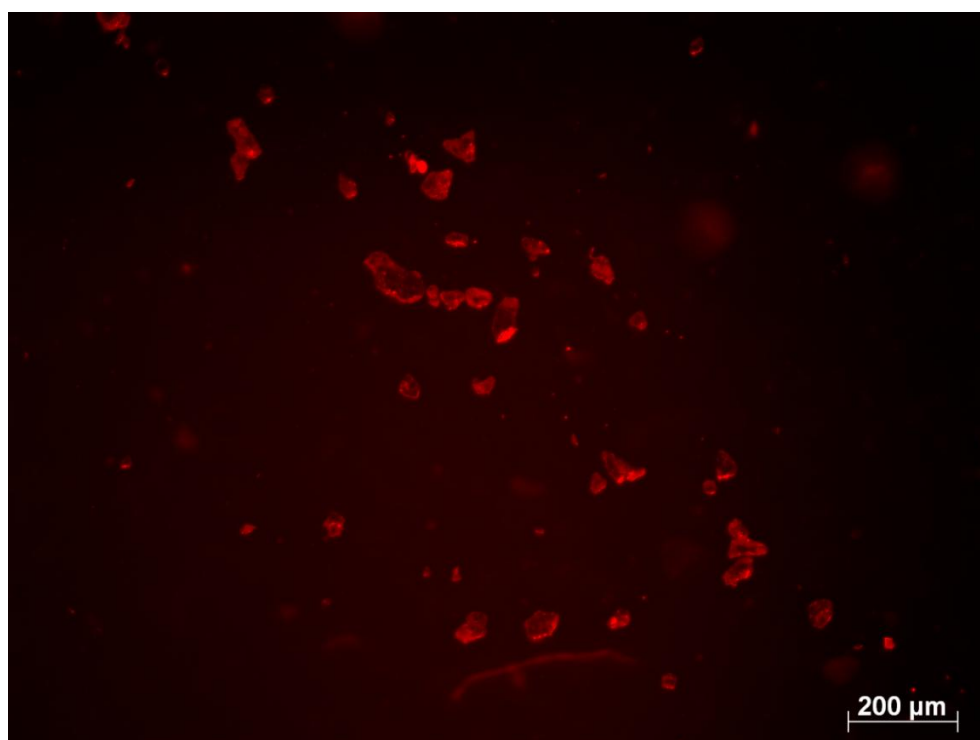


Figura 32. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor areia na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm.

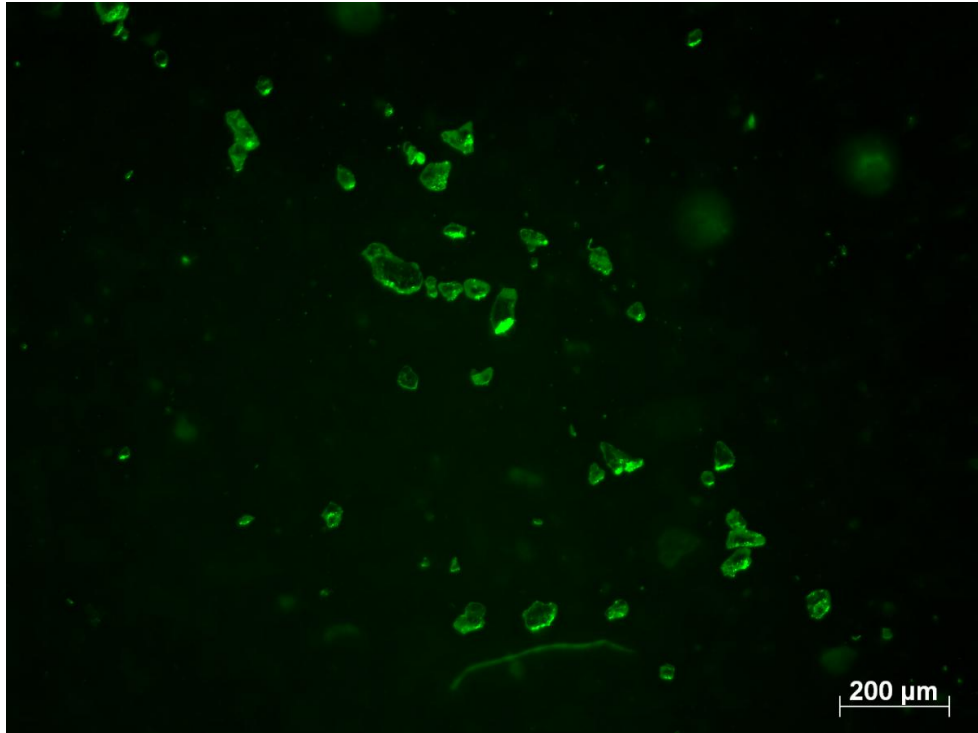


Figura 33. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor areia na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.

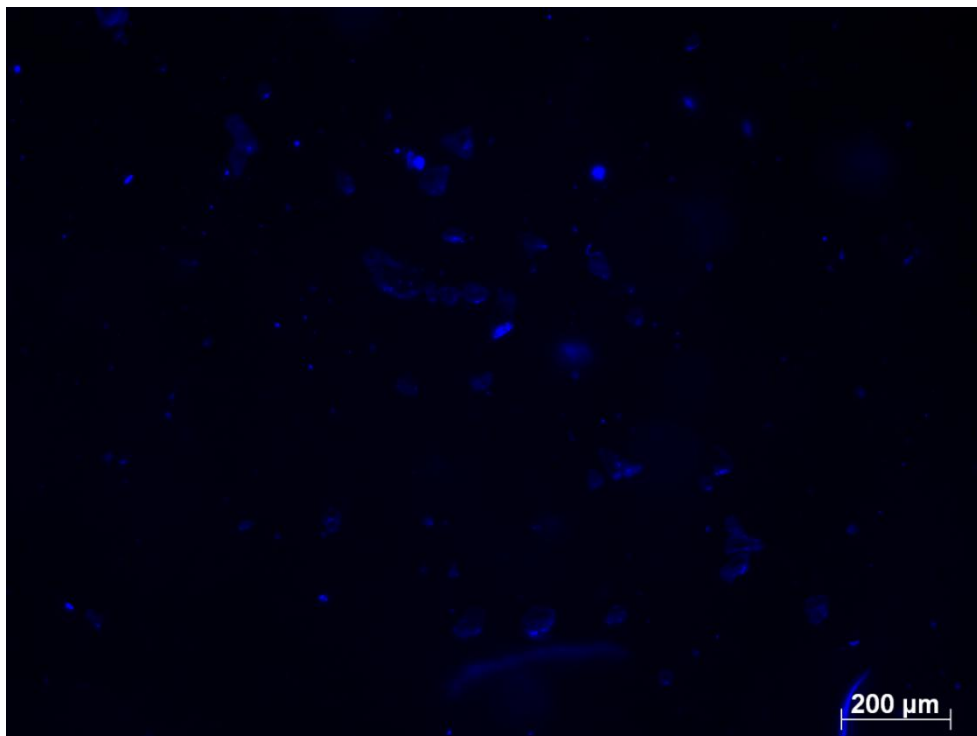


Figura 34. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor areia na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

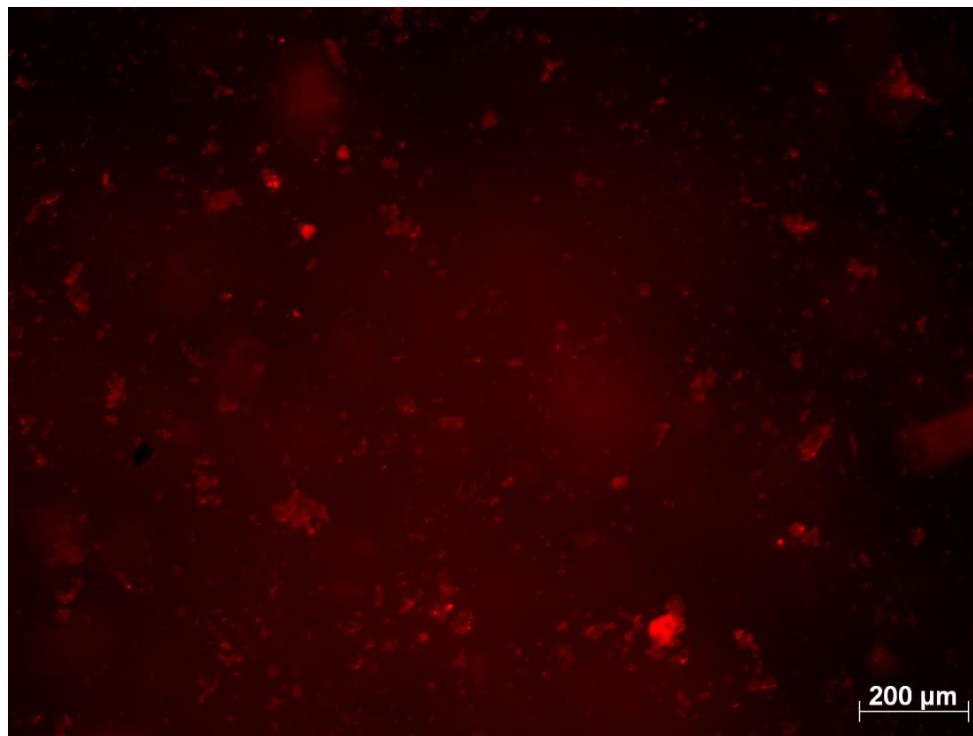


Figura 35. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor pó de pedra na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm.

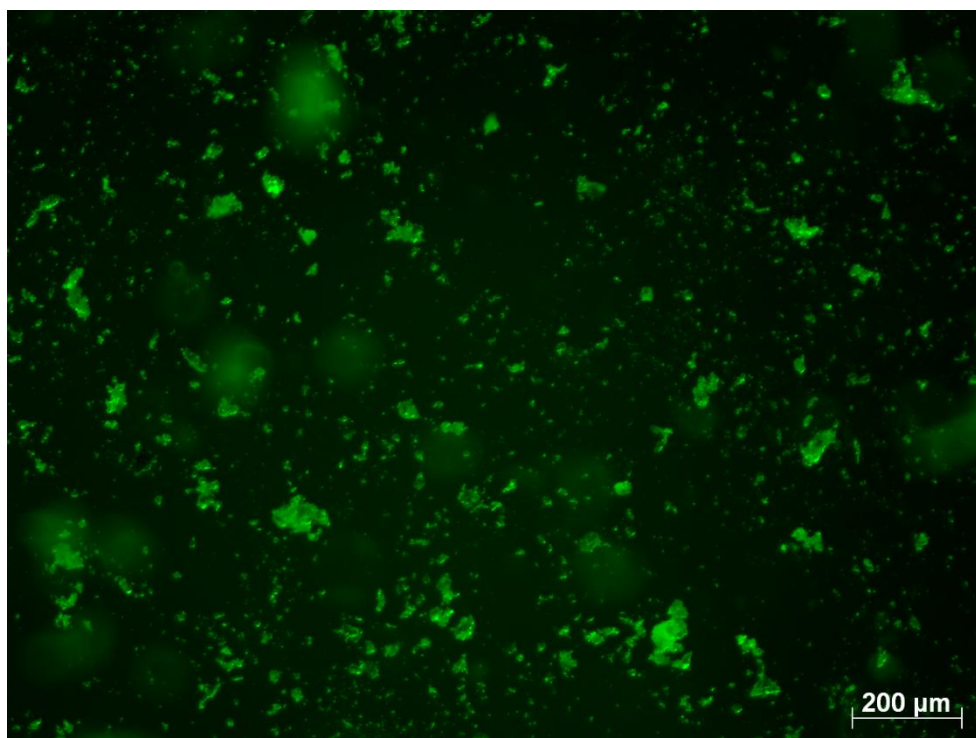


Figura 36. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor pó de pedra na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.

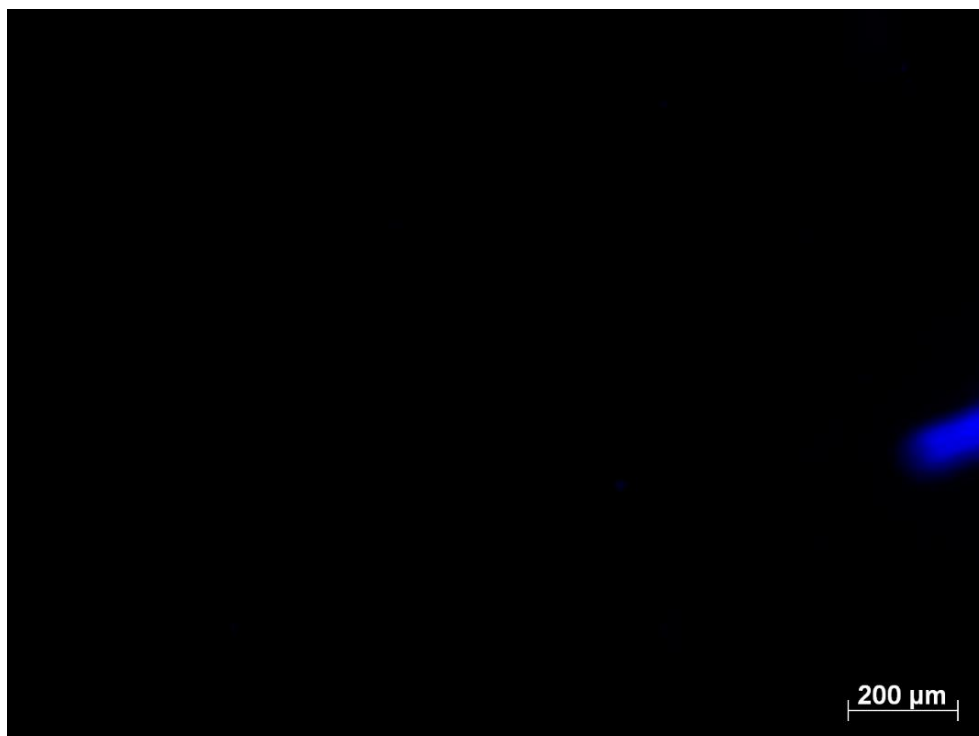


Figura 37. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor pó de pedra na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

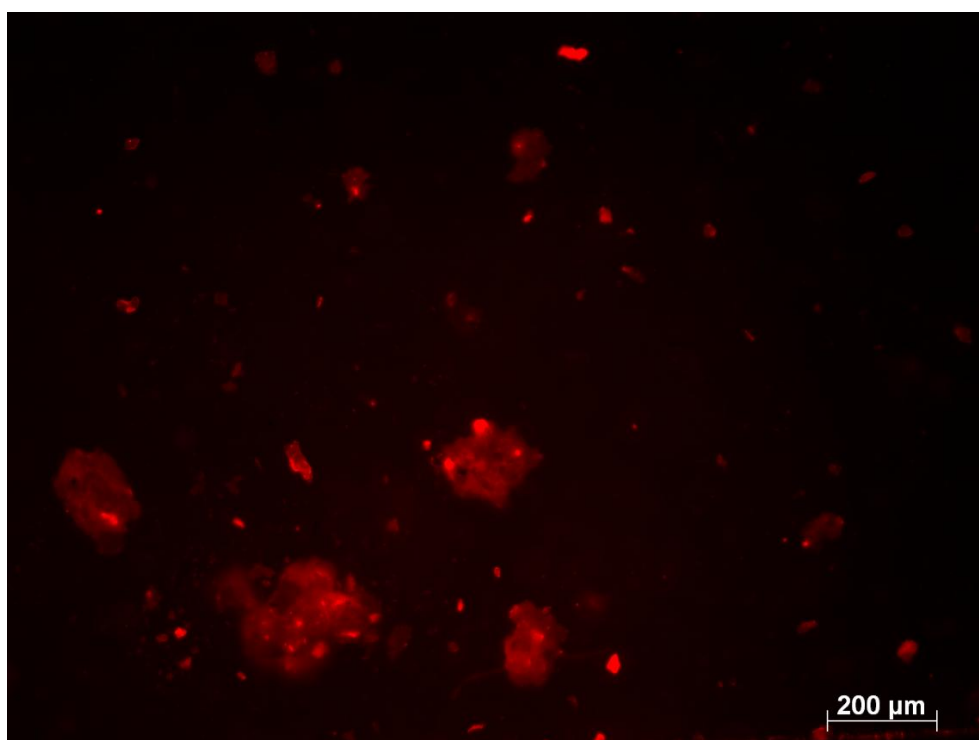


Figura 38. Imagem da microscopia de fluorescência do aditivo metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm.



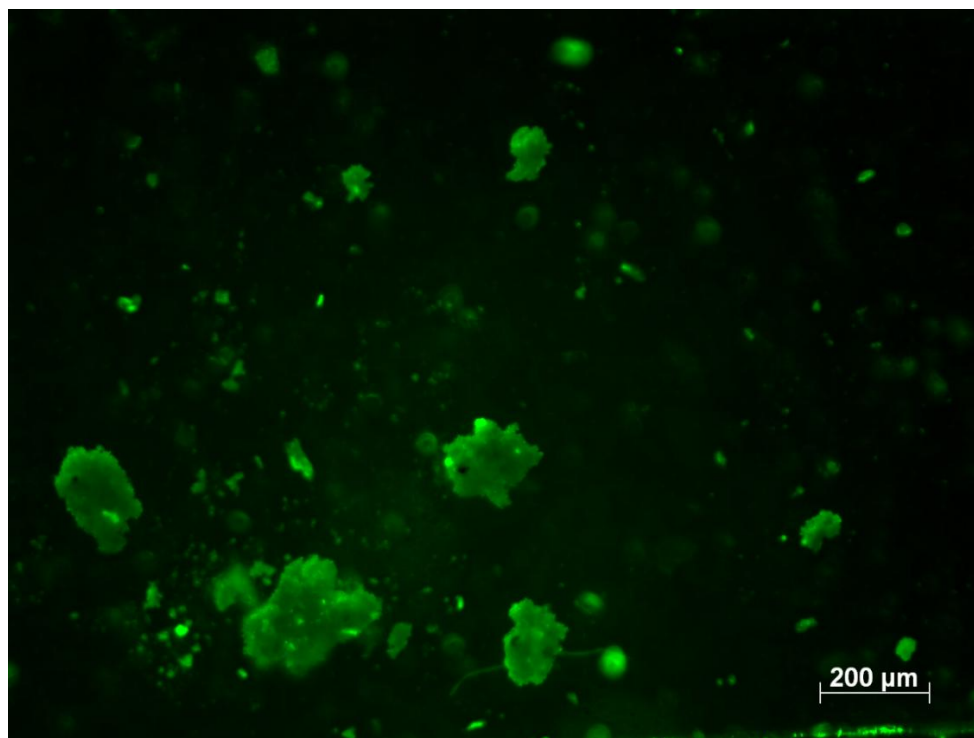


Figura 39. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.

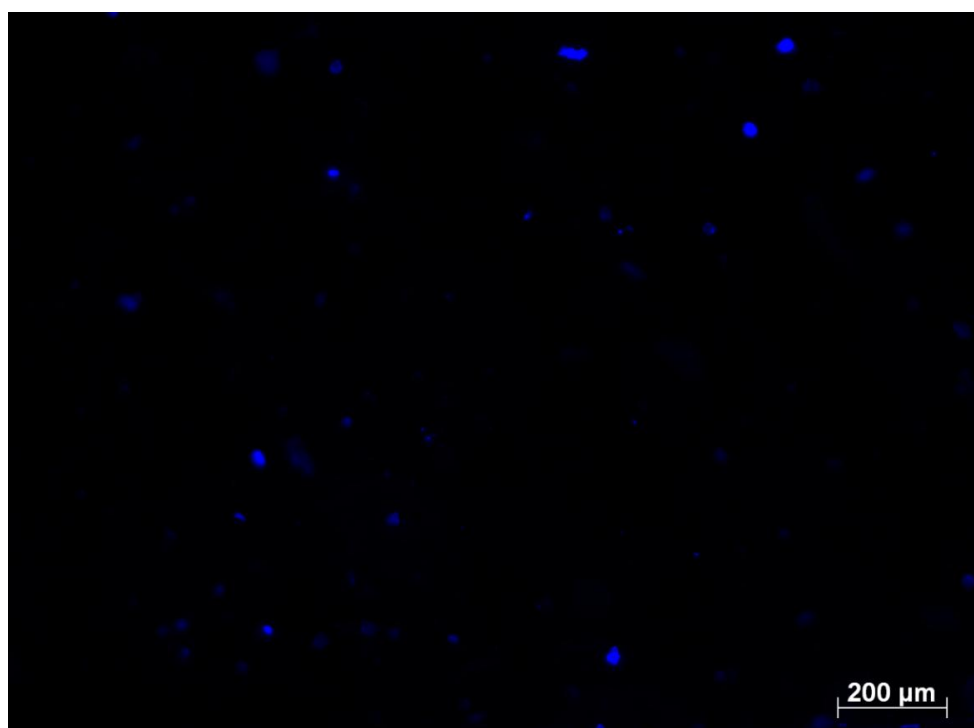


Figura 40. Imagem da microscopia de fluorescência do precursor metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm

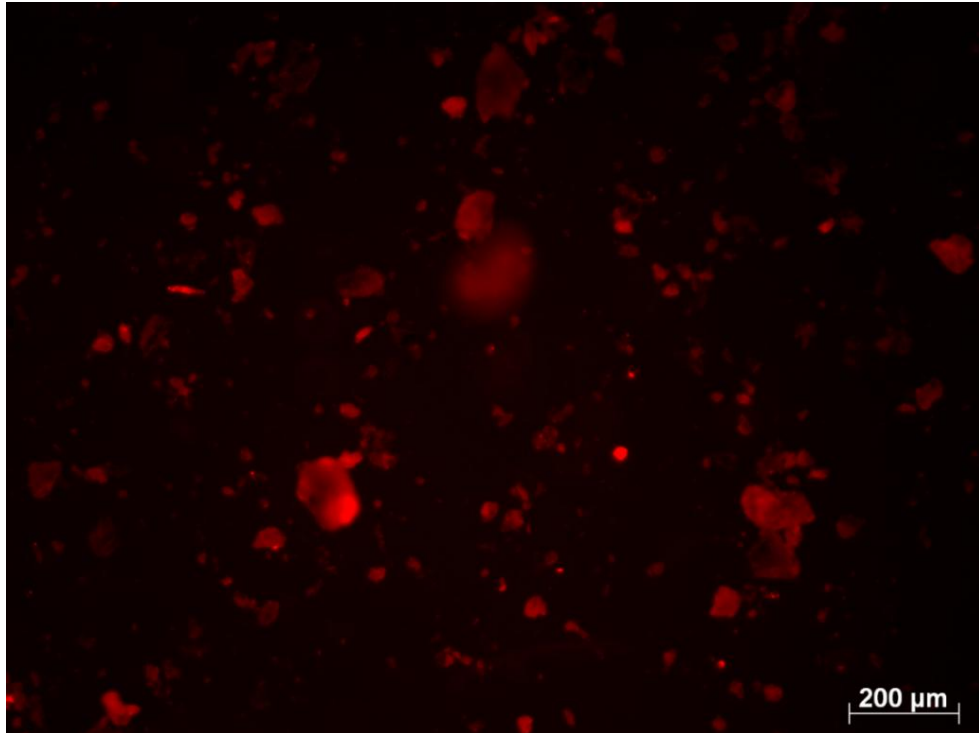


Figura 41. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 0% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm.

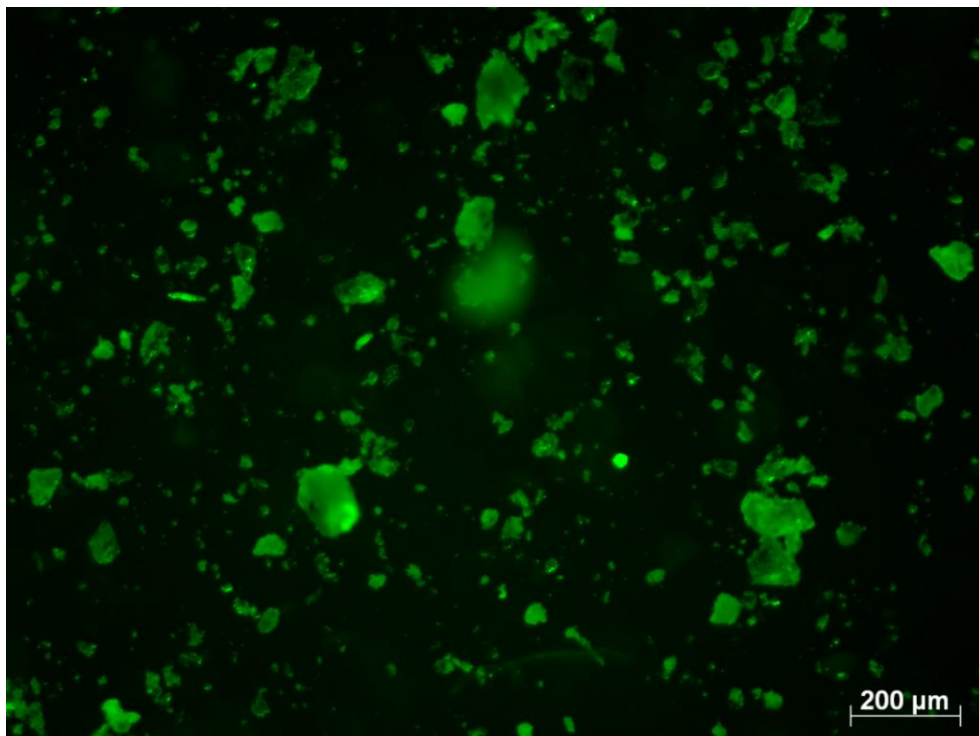


Figura 42. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 0% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.

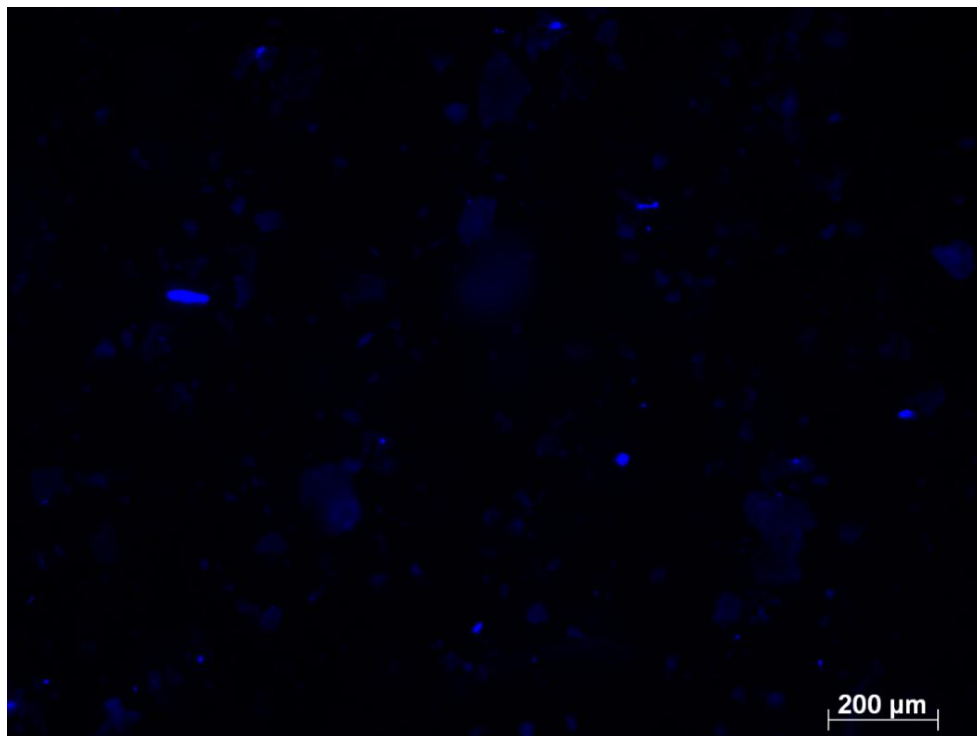


Figura 43. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 0% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

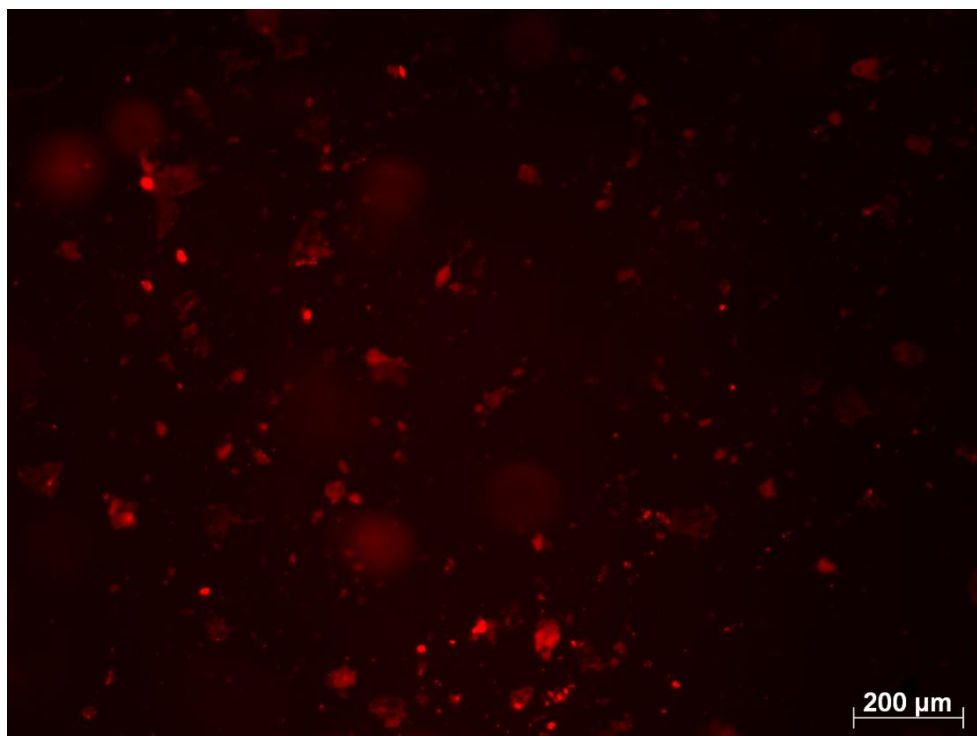


Figura 44. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 10% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm.

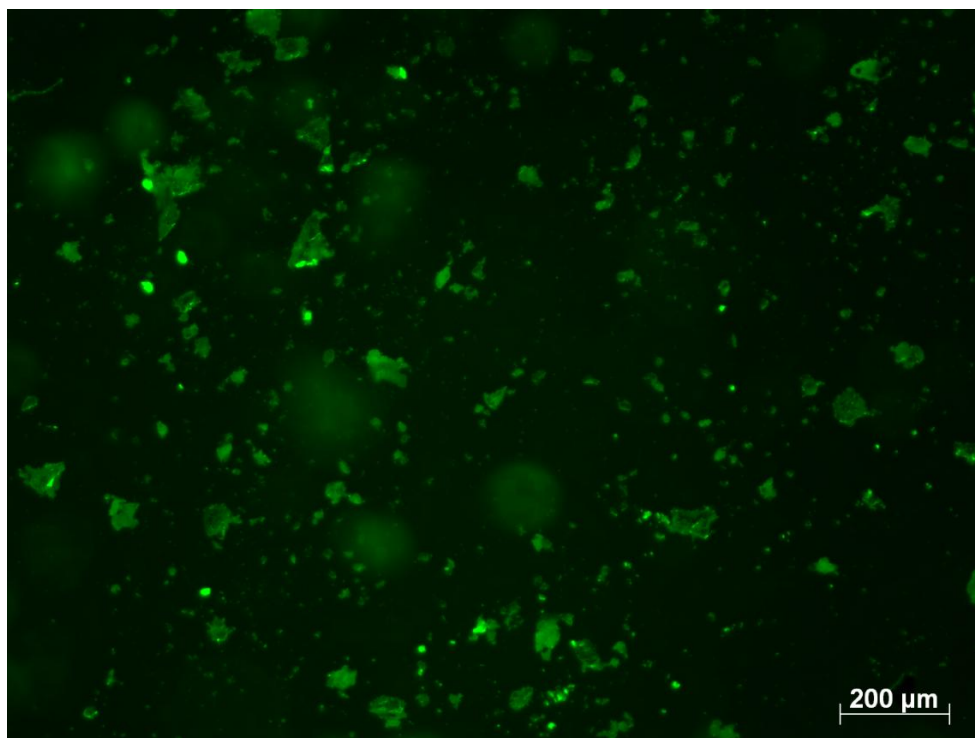


Figura 45. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 10% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.

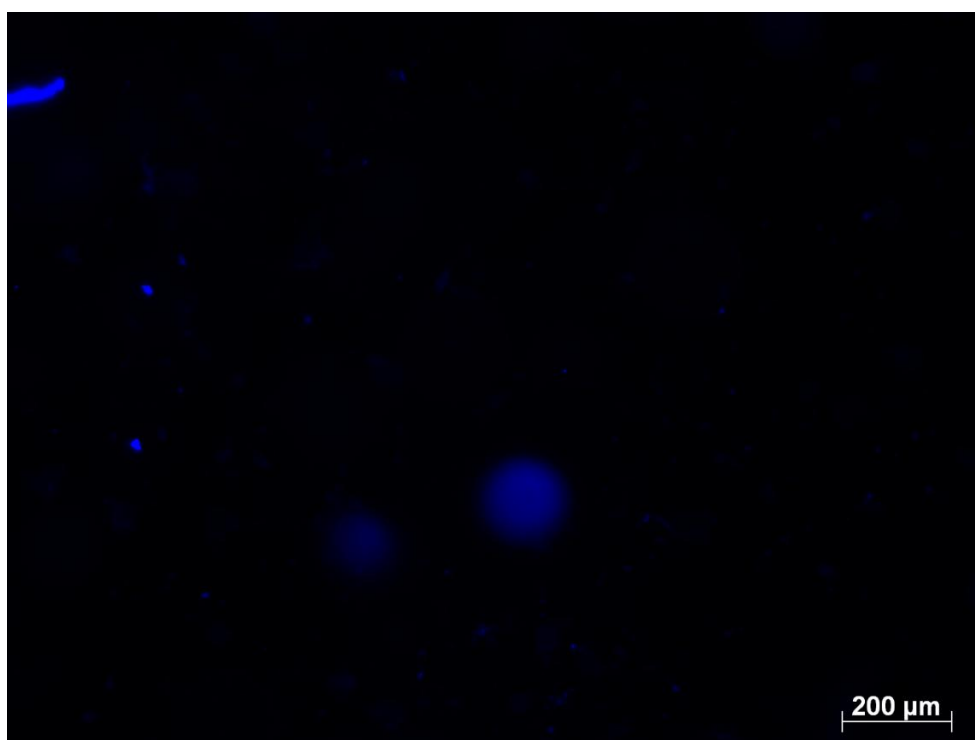


Figura 46. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 10% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

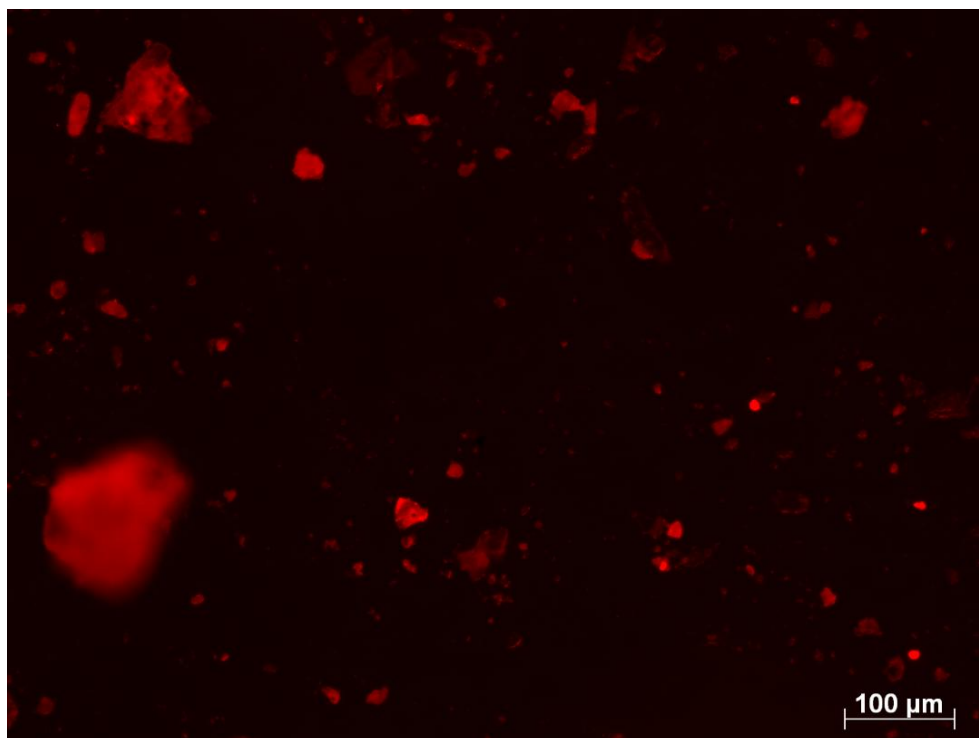


Figura 47. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 15% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm.

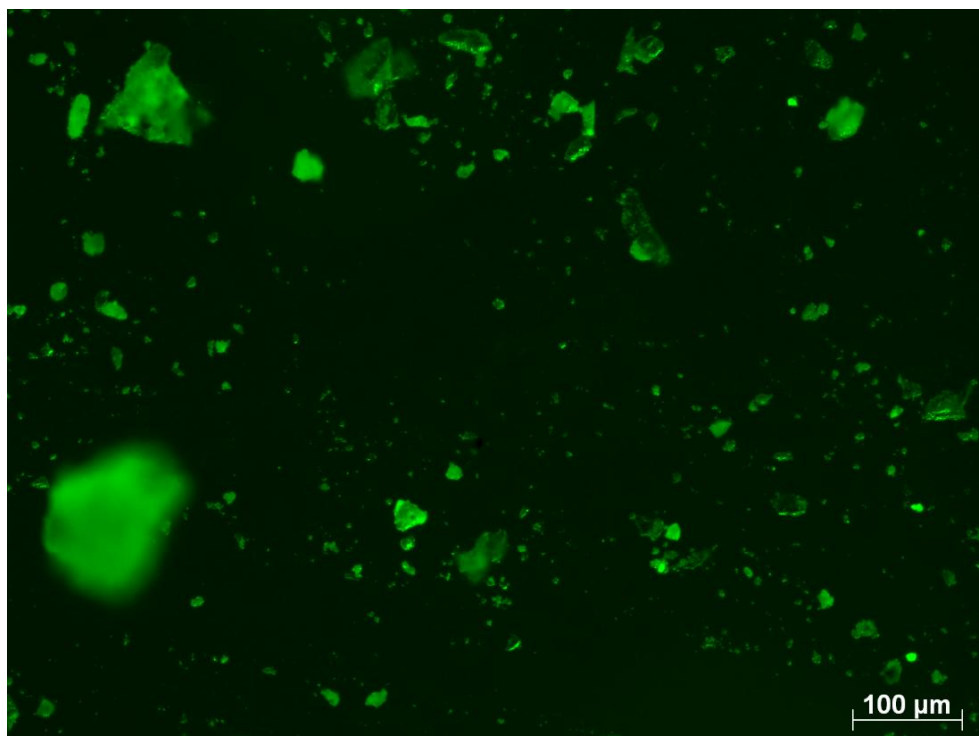


Figura 48. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto com 15% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.

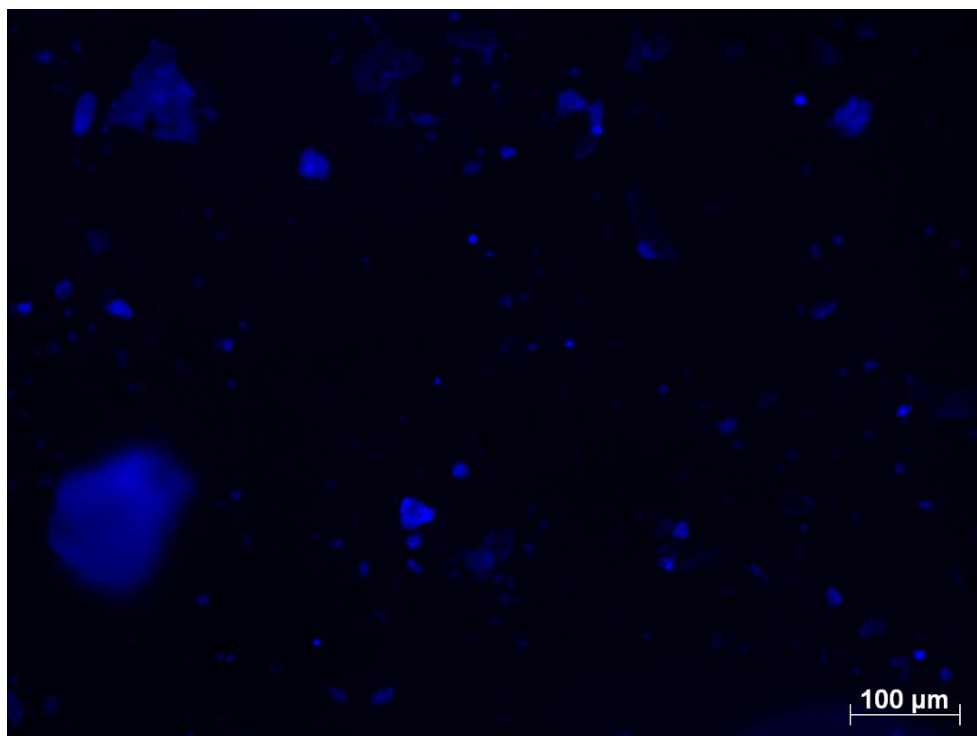


Figura 49. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 15% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

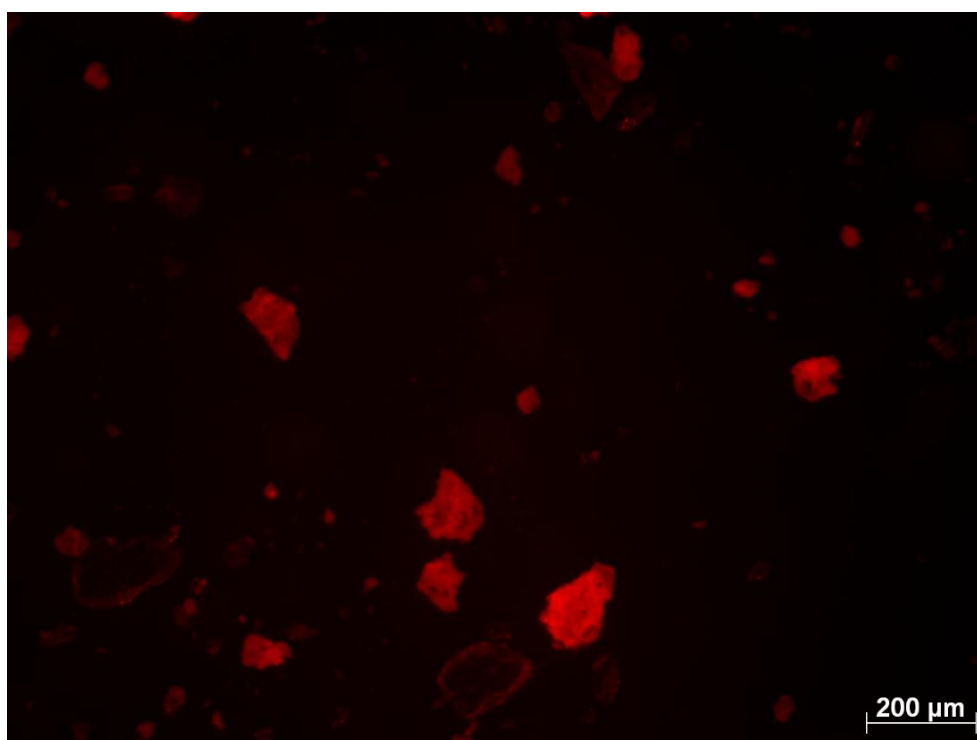


Figura 50. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 20% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm.

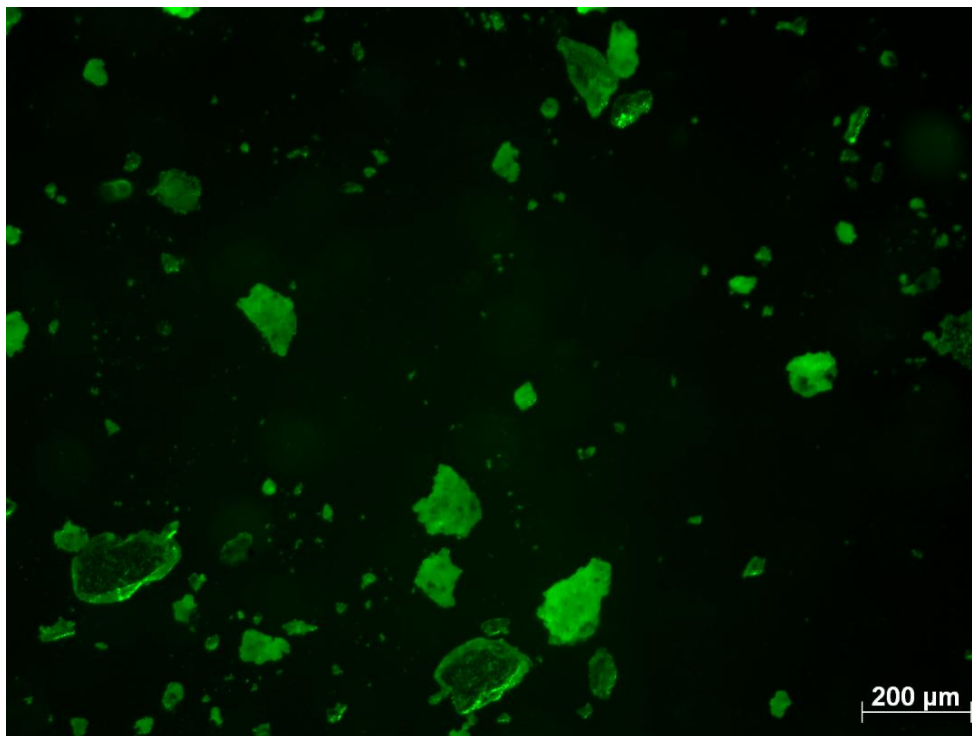


Figura 51. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto com 20% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.

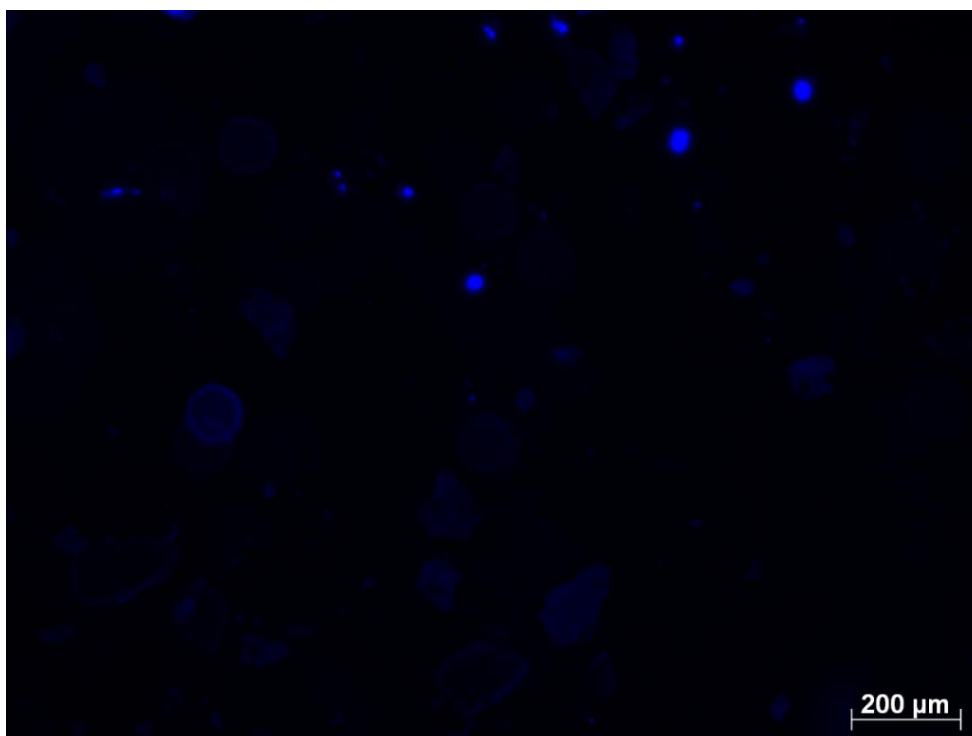


Figura 52. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 20% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

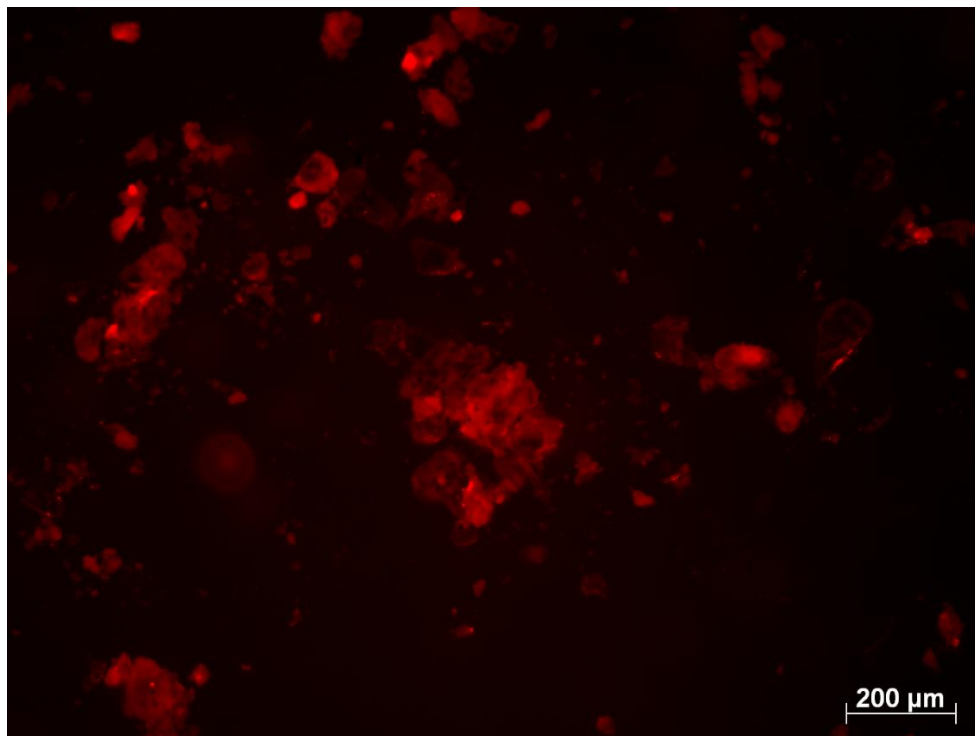


Figura 53. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 25% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm.

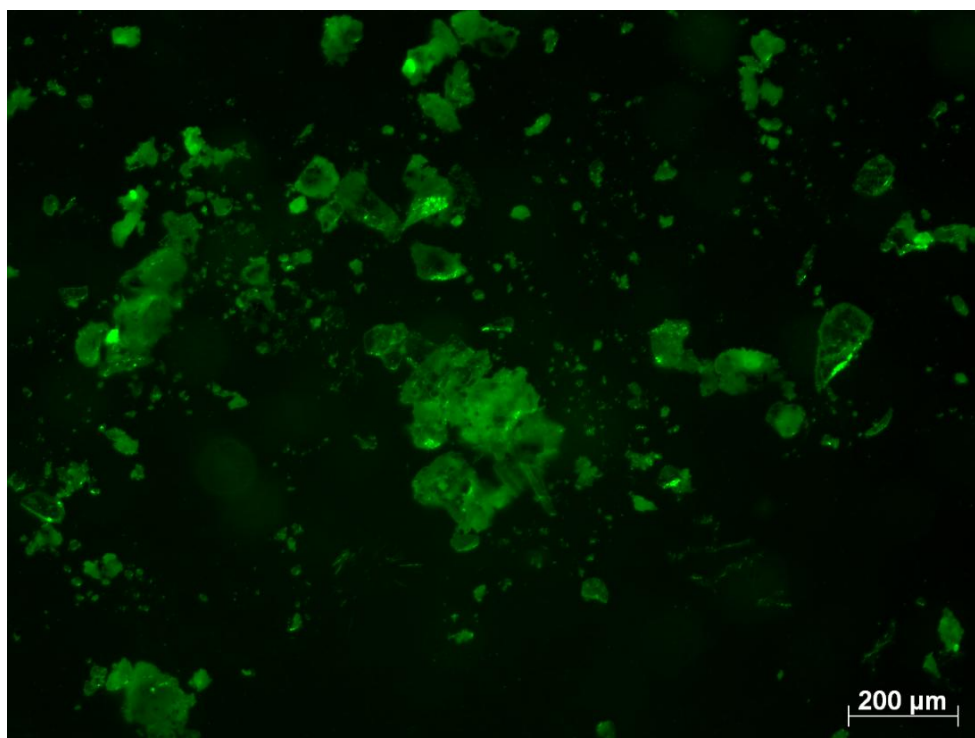


Figura 54. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto com 25% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.



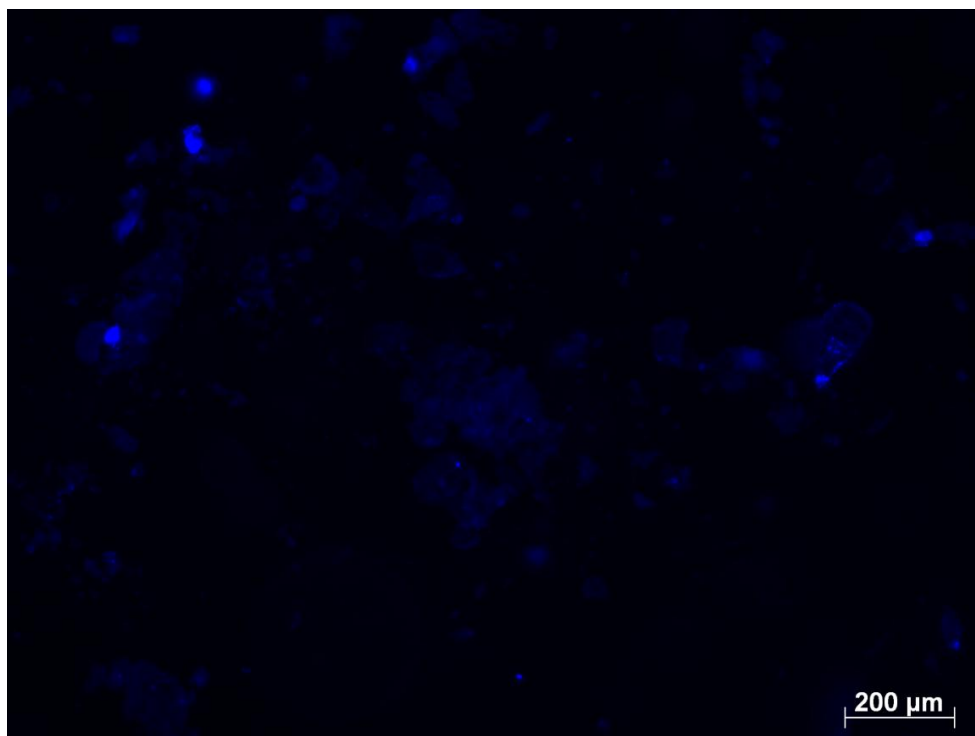


Figura 55. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 25% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.

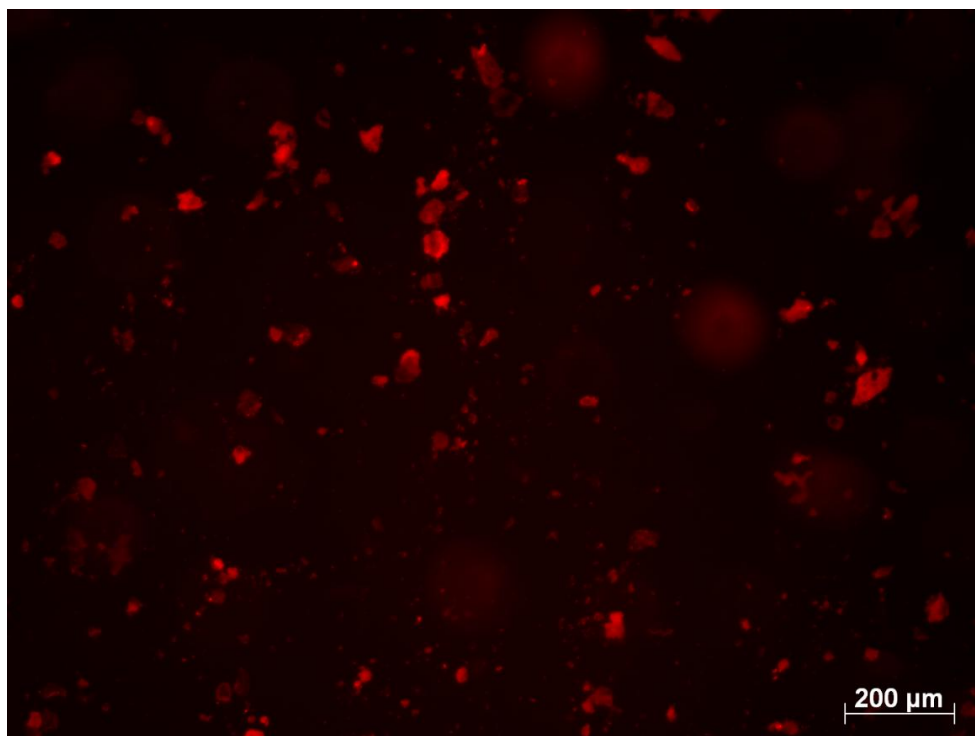


Figura 56. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 30% de metacaulim na região do vermelho. Comprimento de onda de excitação de 546 nm.

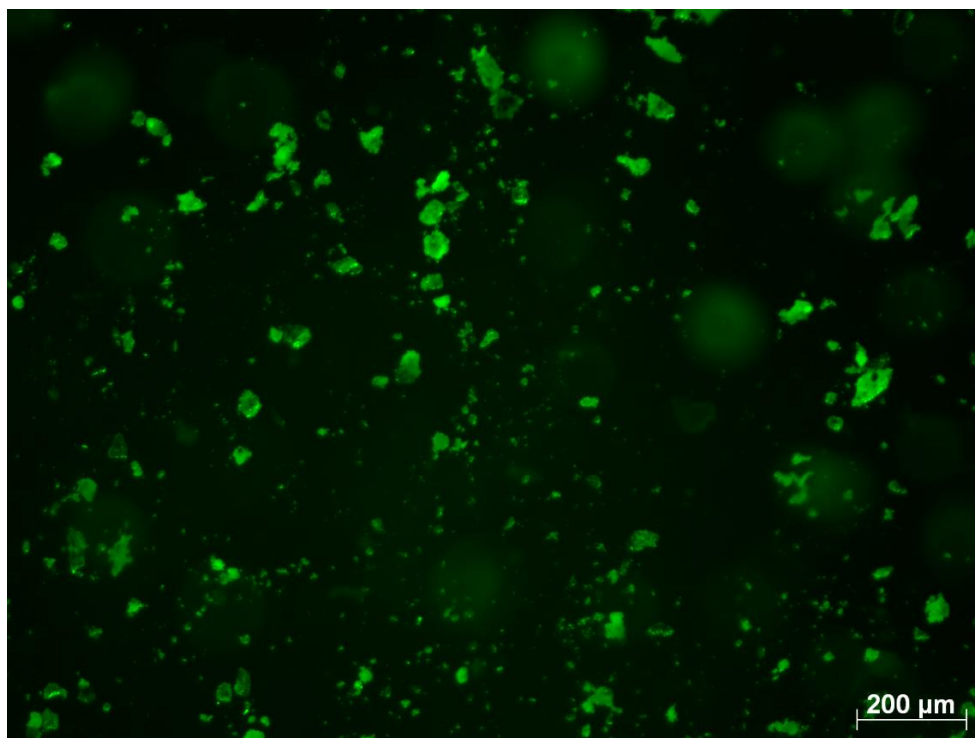


Figura 57. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto com 30% de metacaulim na região do verde. Comprimento de onda de excitação de 488 nm.

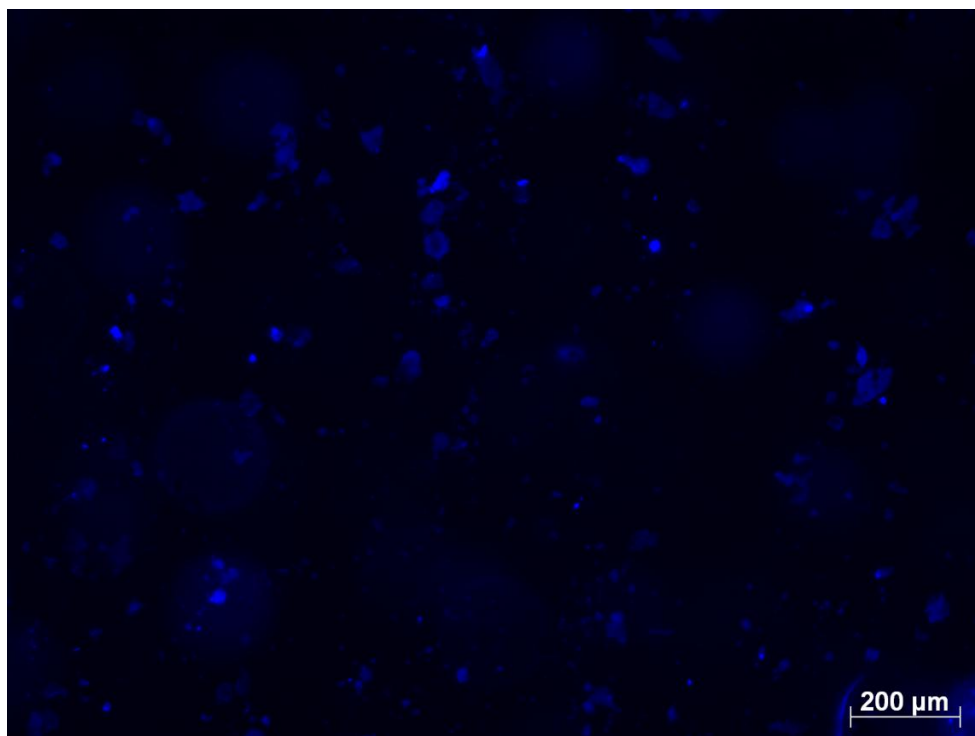


Figura 58. Imagem da microscopia de fluorescência da peça de concreto do lote com 30% de metacaulim na região do azul. Comprimento de onda de excitação de 366 nm.