

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO  
CIVIL – PPGECC

ANDRESSA GOBBI

**ATIVIDADE POZOLÂNICA DE ADIÇÕES MINERAIS PELAS  
NBR 5751/2012 E NBR 5752/2012: UMA ANÁLISE CRÍTICA A  
PARTIR DE MÉTODOS COMPLEMENTARES**

CURITIBA  
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO  
CIVIL – PPGECC

ANDRESSA GOBBI

**ATIVIDADE POZOLÂNICA DE ADIÇÕES MINERAIS PELAS  
NBR 5751/2012 E NBR 5752/2012: UMA ANÁLISE CRÍTICA A  
PARTIR DE MÉTODOS COMPLEMENTARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de concentração em Materiais e Estruturas, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção de título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros.

Coorientador: Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho

CURITIBA  
2014

## TERMO DE APROVAÇÃO

ANDRESSA GOBBI

### **ATIVIDADE POZOLÂNICA DE ADIÇÕES MINERAIS PELAS NBR 5751/2012 E NBR 5752/2012: UMA ANÁLISE CRÍTICA A PARTIR DE MÉTODOS COMPLEMENTARES**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Materiais e Estruturas, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção  
Civil - UFPR

Coorientador:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho  
Departamento de Engenharia Civil - UFOB

Examinadores:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Nayara Soares Klein  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção  
Civil - UFPR

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Kleber Franke Portella  
Pesquisador LACTEC

Curitiba, 24 de abril de 2014

## **Agradecimentos**

No decorrer deste trabalho foram muitas as pessoas que apoiaram, incentivaram e colaboraram na sua realização, ajudando a compor cada linha desta dissertação. Expresso aqui os meus mais sinceros agradecimentos.

À meu orientador, Professor Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros, pelos conhecimentos transmitidos, pelo incentivo para completar o mestrado, pela orientação na realização deste trabalho e, principalmente, pela compreensão quanto a minha situação de mestranda e profissional durante o curso. Ao coorientador, Professor Dr. Juarez Hoppe Filho, pelas valiosas contribuições a este trabalho.

Aos professores avaliadores no exame de qualificação e de defesa – Profa. Dr<sup>a</sup>. Nayara Soares Klein, Prof. Dr. José Marques Filho e Prof. Dr. Kleber Franke Portella – por terem feito parte dessa história. Obrigada pela seriedade na leitura cuidadosa do meu trabalho e pela competência em mostrarem seus pontos de vista, ampliando os meus caminhos de interpretação.

Aos meus pais e irmã, pelo apoio e compreensão inestimáveis, pelos diversos sacrifícios suportados, pelo constante incentivo a trilhar novos caminhos e a realizar sonhos até então distantes.

Agradeço às minhas grandes amigas Giovana e Luise, irmãs de coração e que estão sempre presentes, obrigada por todo apoio dado durante este processo, pelo estímulo, pela disponibilidade e especialmente, pela amizade.

Aos colegas do Programa de Pós Graduação em Engenharia da Construção Civil - PPGECC, com quem dividi as ansiedades, angústias e principalmente as alegrias que surgiram ao longo do programa de mestrado e que transmitiram suas experiências tornando o curso mais descontraído. Aos técnicos de laboratório da UFPR, Ricardo e Douglas, pelo auxílio.

Aos amigos da VCCON Engenharia, Diego, Everton, Luciano e Arielly, agradeço por terem contribuído direta ou indiretamente para que eu atingisse o meu objetivo.

Agradeço aos que, mesmo sem saber, me auxiliaram a superar os obstáculos e a amadurecer: intelectual e pessoalmente. Reitero o meu apreço e a minha eterna gratidão mesmo que sem citá-los. Ninguém vence sozinho... OBRIGADA A TODOS!

*O importante é não parar de questionar*

(Albert Einstein)

*É preciso força pra sonhar e  
perceber que a estrada vai além do que se vê*

(Marcelo Camelo)

## Resumo

A incorporação de adições minerais na composição do cimento Portland é imprescindível, pois reduz o impacto ambiental da indústria cimenteira, além de destinar, adequadamente, resíduos de outros setores industriais, possibilitando vantagens econômicas e ambientais, além de interferir na microestrutura da matriz hidratada, alterando a durabilidade de concretos e argamassas. A hipótese deste trabalho é de que as normas brasileiras atualmente em vigor apresentam inconsistências, classificando erroneamente algumas pozolanas. Desta forma, o programa experimental consistiu na aplicação das técnicas de investigação de pozolanicidade de adições minerais, sendo elas normatizadas ou não no Brasil, utilizando adições minerais: cinza de casca de arroz, metacaulim, sílica ativa, fíler quartzoso, fíler calcário e material cerâmico com diferentes graus de moagem e calcinação em forno mufla. Foram realizados ensaios de caracterização das amostras e a atividade pozolânica foi determinada pelos ensaios de índice de atividade pozolânica (IAP) em argamassa com cimento Portland (NBR 5.752) e com cal hidratada (NBR 5.751), ensaio Chapelle modificado (NBR 15.895) e difração de raios - X (DRX) de pastas idênticas às utilizadas nas argamassas preconizadas pelas normas, que permitem analisar o consumo de portlandita, um indicativo imprescindível da atividade pozolânica. A análise conjunta do IAP com a DRX visou demonstrar que algumas pozolanas apresentam baixo desempenho quando avaliadas por intermédio da resistência à compressão de argamassas, porém são capazes de fixar grande quantidade de cal na formação de compostos hidratados. As normas não consideram parâmetros importantes para a atividade pozolânica, como a área específica, as características físico-químicas, o teor de materiais amorfos e a taxa de reação ao longo do tempo, os quais interferem na resistência da argamassa.

Palavras-Chave: atividade pozolânica, adições minerais, resistência à compressão.

## **Abstract**

The incorporation of mineral additions into the Portland cement composition is indispensable, because it reduces the environmental impact of the cement industry and also destine, properly, residues from others industrial segments. This measure brings environmental and economic advantages, apart from interfering in the microstructure of the hydrated matrix, altering the durability of concretes and mortars. The hypothesis of this work is that Brazilian norms currently in vigor present inconsistencies by misclassifying some pozzolanes. Therefore, the experimental program consisted in applying investigation techniques of pozzolanicity of mineral additions, these being normalized or not in Brazil, using: rice husk ashes, metakaolin, silica fume, quartzose filler, calcarium filler and ceramic materials with different milling degrees (0,5; 1,0; 1,5 hour) and calcination in mufla oven. Characterization trials of the samples were made and the pozzolanic activity was determined by tests of the index pozzolanic activity (IPA) in Portland cement mortars (NBR 5.752) and mortar with hydrated lime, modified Chapelle test (NBR 15.895) and X-ray diffraction (XDR) of pastes identic to those used in mortars recommended by standards, which allows analyzing portlandite consumption, a very important indicative of pozzolanic activity. The analysis of IPA and XDR aims to demonstrate that some pozzolanes present low performance when evaluated through mortar compressive strength but are able to fasten high quantities of lime through the formation of hydrated compounds. The standards ignore important for the pozzolanic activity parameters such as specific area, physicochemical characteristics, the amorphous content and reaction rate over time, which interfering in the mortar compressive strength.

Key words: pozzolanic activity, mineral additions, compressive strength.

## Sumário

Lista de figuras.....	vii
Lista de tabelas.....	x
1. Introdução.....	12
1.1. Hipótese.....	14
1.2. Objetivo.....	15
1.3. Justificativa.....	16
1.3.1. Justificativa ambiental.....	16
1.3.2. Justificativa social.....	18
1.3.3. Justificativa econômica.....	18
1.3.4. Justificativa tecnológica.....	19
2. Revisão bibliográfica.....	20
2.1. Adições para concreto.....	20
2.2. Adições que compõem este estudo.....	24
2.2.1. Fíler calcário.....	24
2.2.2. Fíler quartzoso.....	25
2.2.3. Material cerâmico.....	27
2.2.4. Cinza de casca de arroz.....	28
2.2.5. Metacaulim.....	29
2.2.6. Sílica ativa.....	32
3. Programa experimental.....	34
3.1. Variáveis do estudo.....	34
3.2. Materiais utilizados.....	36
3.2.1. Cimento.....	36
3.2.2. Hidróxido de cálcio.....	36
3.2.3. Agregado miúdo.....	37
3.2.4. Água de amassamento.....	37
3.2.5. Aditivo superplastificante.....	37
3.2.6. Fíler calcário.....	37
3.2.7. Fíler quartzoso.....	38
3.2.8. Material cerâmico.....	38
3.2.9. Cinza de casca de arroz.....	40
3.2.10. Metacaulim.....	40
3.2.11. Sílica ativa.....	40
3.3. Ensaio realizados.....	40
3.3.1. Caracterização físico-química das adições minerais.....	40
3.3.2. Métodos de avaliação da atividade pozolânica em argamassas.....	47
3.3.3. Estudo em argamassas com parâmetros pré-estabelecidos.....	56
4. Resultados e discussão.....	64
4.1. Caracterização dos materiais.....	64
4.1.1. Massa específica.....	64
4.1.2. Área específica (Método de Blaine e BET).....	64
4.1.3. Distribuição granulométrica a laser.....	66
4.1.4. Fluorescência de raios-X.....	68
4.1.5. Chappelle modificado.....	69
4.1.6. Difração de raios-X.....	70
4.1.7. Análise termogravimétrica.....	73



4.2. Argamassas de índice de atividade pozolânica da NBR 5751/12 e NBR 5752/12.....	77
4.2.1. Índice de atividade pozolânica com cal.....	77
4.2.2. Índice de atividade pozolânica com cimento.....	86
4.3. Argamassas com fixação de parâmetros .....	95
4.3.1. Argamassas com cal para resistência à compressão (relação água/finos fixa)....	95
4.3.2. Argamassas com cimento para resistência à compressão.....	99
4.4. Comparação entre resultados.....	116
5. Considerações Finais.....	121
5.1. Conclusões.....	121
5.2. Sugestões de trabalhos futuros .....	123
Referências bibliográficas.....	124
Apêndice 1.....	130
<b>Índice de atividade pozolânica com cal.....</b>	<b>130</b>
<b>Índice de atividade pozolânica com cimento.....</b>	<b>132</b>
<b>Argamassas com fixação de parâmetros.....</b>	<b>134</b>

## Lista de figuras

Figura 1 - Evolução da produção de cimento no Brasil em milhões de toneladas de 1970 a 2012. ....	17
Figura 2 - Micrografia obtida por MEV com ampliação de 500x do fíler calcário. ....	24
Figura 3 - Micrografia por MEV do fíler quartzoso com ampliação de 250x. ....	26
Figura 4 - Micrografia por MEV da cinza de casca de arroz com moagem de 30 minutos e ampliação de 450.000x. ....	29
Figura 5 - Micrografia por MEV do metacaulim com ampliação de 3.000x (a) e 10.000x (b). ....	32
Figura 6 - Micrografia da sílica ativa por microscopia eletrônica (a) e transmissão (b). ....	32
Figura 7 - Adições minerais utilizadas no estudo. ....	35
Figura 8 - Ensaio de caracterização das adições e análises em argamassas. ....	35
Figura 9 - Argamassas com fixação de parâmetros distintos da norma. ....	36
Figura 10 – Esquema da temperatura de calcinação vs permanência da amostra no forno mufla. ....	39
Figura 11 - Execução do ensaio de massa específica. ....	41
Figura 12 - Granulômetro a laser CILAS 1064. ....	43
Figura 13 - Colocação da amostra no equipamento ....	43
Figura 14 - Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por energia dispersiva. ....	44
Figura 15 – Pastilha prensada da amostra. ....	44
Figura 16 - Equipamento de análise termogravimétrica e termogravimétrica. ....	45
Figura 17 – Amostras no porta-amostra de alumínio. ....	46
Figura 18 - Exemplo de formação de halo característico de material pozzolânico. ....	47
Figura 19 - Determinação da consistência usando a mesa de espalhamento conforme NBR 7215 (ABNT, 1996). ....	48
Figura 20 - Etapas de acondicionamento das pastas para DRX. ....	52
Figura 21 - Ilustração da cura das pastas para a DRX. ....	53
Figura 22 - Freezer utilizado para congelar as amostras à -30 °C. ....	55
Figura 23 - Liofilizador empregado. ....	55
Figura 24 - Acondicionamento da amostra moída em recipiente tipo <i>ependorf</i> (2 mL), posteriormente estocados em dessecador. ....	56
Figura 25 – Correlação entre a área específica obtida pelo método BET e pelo método Blaine. ....	66
Figura 26 - Curva granulométrica dos materiais utilizados. ....	67
Figura 27 - Difratoogramas das amostras de fíler calcário e quartzoso no estado anidro. ....	70
Figura 28 - Difratoograma da amostra de cinza de casca de arroz no estado anidro. ....	71
Figura 29 – Difratoograma da amostra de metacaulim no estado anidro. ....	71
Figura 30 - Difratoograma da amostra de sílica ativa no estado anidro. ....	72
Figura 31 - Difratoograma da amostra de material cerâmico no estado anidro. ....	72
Figura 32 - Análise termogravimétrica do cimento CP V – ARI. ....	73
Figura 33 - Análise termogravimétrica do fíler calcário. ....	74
Figura 34 - Análise termogravimétrica do fíler quartzoso. ....	75
Figura 35 - Análise termogravimétrica da cinza de casca de arroz. ....	75
Figura 36 - Análise termogravimétrica do metacaulim. ....	76
Figura 37 - Análise termogravimétrica da sílica ativa. ....	77
Figura 38 - Resultado resistência à compressão - IAP cal. ....	78
Figura 39 - Teste Tukey IAP com cal. ....	81

Figura 40 - Difratomogramas das pastas com adições minerais inertes, após 7 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5751/12. ....	82
Figura 41 – Difrátograma da pasta com cinza de casca de arroz, após 7 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5751/12. ....	83
Figura 42 – Difrátograma da pasta com metacaulim, após 7 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5751/12. ....	84
Figura 43 – Difrátograma da pasta com sílica ativa, após 7 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5751/12. ....	84
Figura 44 – Teor de portlandita remanescente nos diferentes sistemas de cal com adições minerais, após 7 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5751/12. ....	86
Figura 45 - Resistência à compressão - IAP cimento. ....	87
Figura 46 - Teste Tukey IAP com cimento. ....	90
Figura 47 - Difrátograma da pasta com CPV-ARI, após 28 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5752/12. ....	91
Figura 48 - Difratomogramas das pastas de CPV-ARI com fíleres calcário e quartzoso, após 28 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5752/12. ....	92
Figura 49 – Difrátograma da pasta de CPV-ARI com cinza de casca de arroz, após 28 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5752/12. ....	93
Figura 50 – Difrátograma da pasta de CPV-ARI com metacaulim, após 28 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5752/12. ....	93
Figura 51 – Difrátograma da pasta de CPV-ARI com sílica ativa, após 28 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5752/12. ....	94
Figura 52 - Resistência à compressão de argamassas com cal e relação água/finos = 0,80. ....	95
Figura 53 - Teste Tukey argamassa cal água/finos =0,80. ....	98
Figura 54 - Resultado de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80. ....	99
Figura 55 - Teste Tukey de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80. ....	102
Figura 56 - Resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80. ....	103
Figura 57 - Teste Tukey de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80. ....	106
Figura 58 – Resultado de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	108
Figura 59 - Teste Tukey de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	111
Figura 60 - Resultado resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	113
Figura 61 - Teste Tukey de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	115
Figura 62 – Comparação da reatividade pelo ensaio de Chapelle modificado com a finura das amostras pelo método de Blaine. ....	116
Figura 63 - Comparação da reatividade pelo ensaio de Chapelle modificado com a finura das amostras pelo método de BET. ....	116
Figura 64 - Comparação das resistências à compressão aos 7 dias das argamassas do IAP com cal e das argamassas com cal e relação água/finos = 0,80. ....	117
Figura 65 – Comparação das resistências à compressão aos 28 dias com a reatividade pelo ensaio de Chapelle modificado. ....	118
Figura 66 – Comparação de resistência à compressão aos 7 dias de argamassas com cimento e consistência variável. ....	119

Figura 67 – Comparação de resistência à compressão aos 28 dias de argamassas com adições inertes e de baixa reatividade para o caso de consistência variável. .... 120

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Composição química do hidróxido de cálcio. ....	37
Tabela 2 – Proporção de mistura das argamassas para IAP com cal, relação água/finos e relação hidróxido de cálcio/adição mineral. ....	49
Tabela 3 – Proporção de mistura das argamassas para IAP com cimento e relação água/finos. ....	50
Tabela 4 – Proporção de mistura das pastas com cal e relação água/finos = 0,80. ....	51
Tabela 5 – Proporção de mistura das pastas com cimento e relação água/finos = 0,70. ....	54
Tabela 6 – Proporção de mistura das argamassas, relação água/finos = 0,80. ....	57
Tabela 7 – Proporção de mistura das argamassas, relação água/cimento = 0,80. ....	59
Tabela 8 – Proporção de mistura das argamassas e relação água/finos = 0,80. ....	60
Tabela 9 – Proporção de mistura das argamassas, relação água/cimento = 0,80 e aditivo (espalhamento de $370 \pm 5$ mm). ....	62
Tabela 10 – Proporção de mistura das argamassas e relação água/finos = 0,80 e aditivo (espalhamento de $370 \pm 5$ mm). ....	63
Tabela 11 - Massa específica dos materiais em estudo. ....	64
Tabela 12 - Área específica dos materiais em estudo. ....	65
Tabela 13 - Composição Química das Amostras. ....	68
Tabela 14 - Requisitos químicos de acordo com a NBR 12653. ....	68
Tabela 15 – Ensaio de Chapelle Modificado dos materiais em estudo. ....	69
Tabela 16- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão do IAP cal. ....	79
Tabela 17- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão do IAP cimento. ....	88
Tabela 18- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão de argamassas com cal e relação água/finos = 0,80. ....	96
Tabela 19- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão de argamassas aos 28 dias com cimento e relação água/cimento = 0,80. ....	101
Tabela 20- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80. ....	104
Tabela 21 - Resultado do espalhamento das argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	107
Tabela 22- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	109
Tabela 23 - Resultado do espalhamento das argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	112
Tabela 24- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	114
Tabela 25 - Resultado resistência à compressão IAP com cal. ....	130
Tabela 26 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para IAP com cal. ....	130
Tabela 27 - Resultado resistência à compressão IAP com cimento. ....	132
Tabela 28 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para IAP com cimento. ....	132
Tabela 29 - Resultado resistência à compressão de argamassas com cal e relação água/finos = 0,80. ....	134
Tabela 30 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para argamassas com cal e relação água/finos = 0,80. ....	134

Tabela 31 - Resultado de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80. ....	136
Tabela 32 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80. ....	136
Tabela 33 - Resultado resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80. ....	138
Tabela 34 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80. ....	138
Tabela 35 - Resultado de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	140
Tabela 36 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	140
Tabela 37 - Resultado de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	142
Tabela 38 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante. ....	142

## 1. Introdução

Os materiais pozolânicos estão atualmente presentes em uma grande parcela dos concretos empregados no mundo, seja por motivos ligados à redução do impacto ambiental e econômico ou pelas melhorias relacionadas a durabilidade. É difícil pensar na tecnologia do concreto sem a presença das pozolanas<sup>1</sup>, ainda que algumas vezes os usuários as empreguem sem perceber sua presença, como no caso dos cimentos do tipo CP II – Z e CP IV, os quais contêm esta adição na sua composição.

A produção do cimento causa um alto impacto ambiental, que pode ser reduzido com adições minerais em substituição parcial do cimento, tais como: fíler calcário, escória granulada de alto forno, argila calcinada e cinza volante. Com a diversidade atual de alternativas para esta substituição, a escolha torna-se cada vez mais complexa, necessitando de uma avaliação quanto à pozolanicidade apresentada por cada material. Para essa avaliação há diversos métodos disponíveis, normatizados ou não pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A substituição parcial de cimento geralmente oferece vantagens econômicas, pois está se substituindo o clínquer (um produto nobre) por subprodutos, oriundos, na maioria dos casos, de resíduos agroindustriais. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais são acrescentadas em quantidades relativamente grandes, de 20 a 70% da massa do material cimentício total, adicionando ou substituindo parcialmente o cimento, dependendo das propriedades que se quer obter. Desse modo, pode-se dizer que um dos avanços mais importantes do desenvolvimento do concreto neste último século foi a incorporação de adições minerais na sua produção.

Os estudos na área têm abordado temas como: alto teor de substituição, nos trabalhos de Hoppe Filho *et al.* (2013), Isaia e Gastaldini (2009) e Hoppe Filho (2002), o uso de composições com mais de uma adição, como nos trabalhos de Isaia (1995) e

---

<sup>1</sup> Os materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, quando finamente divididos e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar composto com propriedades aglomerantes (NBR12653/12).

Isaia *et al.* (2012), e cinzas provenientes da queima de resíduos agroindustriais, como é o caso das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, com trabalhos de Frias *et al.* (2011) e Gobbi *et al.* (2010a), de folha de bananeira, como no trabalho de Kanning *et al.* (2014), e de casca de arroz, com Zerbino *et al.* (2011).

Os concretos de alta resistência e alto desempenho estão diretamente ligados à incorporação de material pozolânico. Conforme afirma Mehta e Monteiro (2008), um fator importante é a redução do volume total e o tamanho dos poros (importante para o aumento da resistência mecânica do compósito de cimento Portland).

Além disso, segundo Valenzuela e Chodounsky (2010), a evolução das adições minerais pozolânicas tornou possível produzir concretos cada vez mais resistentes e duráveis, muito além do que se pensava ser possível há anos atrás. Neste sentido, pode-se considerar as pozolanas como ferramentas capazes de viabilizar os concretos de alto desempenho, que são um aprimoramento de concretos convencionais a partir da redução da porosidade e das modificações microestruturais.

A pozolanicidade das adições, ou seja, a capacidade de formar compostos cimentantes desde que na presença de água e hidróxido de cálcio, pode ser avaliada com algumas técnicas normatizadas pela ABNT, a partir de métodos indiretos de quantificação do potencial reativo, como o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland (NBR 5752/12) ou cal hidratada (NBR 5751/12), ou por método direto e acelerado, como o ensaio Chapelle Modificado (NBR 15895/10), o qual determina a capacidade da adição pozolânica em fixar cal.

Donatello *et al.* (2010) recomendaram que, para avaliar a atividade pozolânica de um material, é importante a escolha do método a ser utilizado, baseando-se nas limitações e nas condições de ensaio. Estes pesquisadores também indicam que a avaliação seja realizada por mais de um método e a comparação dos resultados de diferentes métodos deve contemplar uma análise crítica a respeito da temperatura e do tempo de cura das amostras.

Esta questão surgiu durante o desenvolvimento dos trabalhos de Gobbi *et al.* (2010a e 2010b). Nesta pesquisa, foi constatado que alguns dos métodos normatizados no Brasil se baseiam fundamentalmente no desenvolvimento de resistência à



compressão. Apesar das limitações, são capazes de subsidiar a seleção das adições minerais pozolânicas normalmente utilizadas, mas podem subestimar a reatividade das superpozolanas, como a cinza de casca de arroz, a sílica ativa e o metacaulim, produzindo resultados muito variáveis em termos de repetição e, em alguns momentos, aparentemente inconsistentes, classificando pozolanas reconhecidamente de alta eficiência como materiais de média reatividade.

A alta reatividade destas pozolanas, decorrente do alto teor de compostos amorfos<sup>2</sup> e da grande área específica, conduz a um elevado consumo de portlandita que, nas argamassas de cimento Portland ou cal hidratada preconizadas pelas normas brasileiras para determinar o IAP, podem esgotar a reserva alcalina do meio, em virtude da condição de reação catalisada pela cura térmica.

Para tanto, é necessário avaliar corretamente estes materiais, pois uma caracterização errônea possibilita a restrição do uso de certo tipo de pozolana ao classificar o seu desempenho de forma incorreta.

### ***1.1. Hipótese***

A hipótese deste trabalho é de que as normas brasileiras, atualmente em vigor, apresentam inconsistências classificando erroneamente algumas pozolanas. Métodos recém normatizados como o Chapelle modificado talvez possam avaliar com maior precisão estes materiais.

Pelas duas técnicas prescritas pelas NBR 5751/12 e NBR 5752/12 não se pode avaliar adequadamente os materiais pozolânicos, pois estas se baseiam fundamentalmente no desenvolvimento de resistência à compressão e produzem resultados muito variáveis em termos de repetição, como foi constatado nos trabalhos de Gobbi *et al.* (2010a e 2010b).

Pelos métodos indiretos, baseados na resistência à compressão, não se podem considerar alguns fatores que influenciam no desempenho da adição avaliada, como a

---

<sup>2</sup> Fase sem arranjo atômico bem definido, porém apenas de curta distância e com composição química similar à da fase cristalina equivalente.

sua área específica, o teor de substituição e a relação água/sólidos constante. Isso faz com que as pozolanas de grande área específica, mais reativas, apresentem desempenho minorizado em função da maior demanda de água de mistura, apresentando resultados variáveis, conforme o método aplicado e demonstrado no trabalho de Gava e Prudêncio Jr. (2007a). Os mesmos autores (GAVA e PRUDÊNCIO, 2007b) também relatam que outros fatores exercem influência no IAP, como o tipo de cimento utilizado, o teor de substituição do cimento e o uso de aditivos dispersantes.

Os resultados obtidos em cada ensaio tendem a variar com o método escolhido, além de alguns não simularem condições reais de aplicação na produção de concretos e de argamassas, conforme está descrito em detalhes no programa experimental deste trabalho.

## **1.2. Objetivo**

O objetivo deste trabalho é testar as técnicas de investigação de pozolanicidade de adições minerais normatizadas no Brasil até a primeira metade de 2014, de modo a produzir uma análise crítica aos procedimentos prescritos na NBR 5751/12 e NBR 5752/12.

Como objetivos específicos, podem ser listados os que estão apresentados a seguir:

- investigar, por difração de raios X, os produtos formados nos compósitos cimentícios usados para a determinação do IAP com cal (NBR 5751/12) e com cimento (NBR 5752/12);
- investigar a relação entre as características das adições com os resultados do IAP com cal (NBR 5751/12) e com cimento (NBR 5752/12);
- estudar possíveis variações nos ensaios da NBR 5751/12 e NBR 5752/12: [consistência variável X (relação água/cimento constante), (relação água/finos<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Foi denominado de relação água/finos, o quociente entre a massa de água pela somatória de cimento ou hidróxido de cálcio com as adições, pois nem todas são reativas para receberem a terminologia de aglomerante.

constante)]; [consistência constante com o uso de aditivo superplastificante X (relação água/cimento constante), (relação água/finos constante)].

Para isso, foram utilizadas as seguintes adições minerais: cinza de casca de arroz, metacaulim, sílica ativa, fíler quartzoso, fíler calcário e material cerâmico calcinado em forno mufla a 700 °C e com diferentes graus de moagem (0,5; 1,0 e 1,5 h).

Na presente pesquisa foi avaliado se as técnicas prescritas nas normas nacionais da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 5751/12, NBR 5752/12 e NBR 15895/10 são adequadas para a avaliação da reatividade de pozolanas em compósitos de cimento Portland.

### ***1.3. Justificativa***

A seguir, apresentam-se as justificativas ambientais, sociais, econômicas e tecnológicas cabíveis para essa pesquisa.

#### **1.3.1. Justificativa ambiental**

Com a elevação da produção de cimento no Brasil (Figura 1), aumentaram-se significativamente também os impactos ambientais decorrentes da sua produção. A emissão média mundial para cada tonelada de clínquer moído produzido é de aproximadamente 866 kg de gás carbônico (WBCSD, 2011). A redução nos impactos causados é alcançada com o aumento do teor de adições minerais no cimento Portland, tais como: escória granulada de alto forno, cinzas volantes, entre outros.

## Produção de Cimento no Brasil

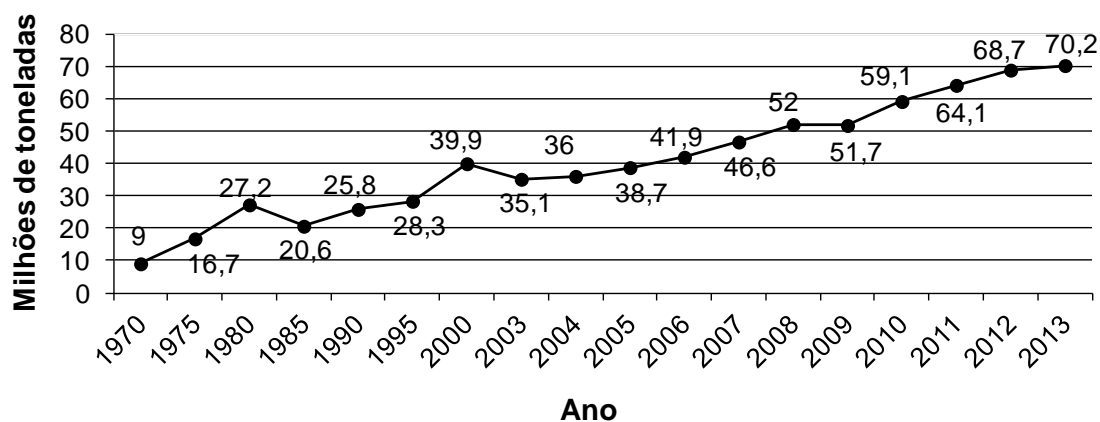


Figura 1 - Evolução da produção de cimento no Brasil em milhões de toneladas de 1970 a 2013.

Fonte: Relatórios anuais do sindicato nacional da indústria do cimento – SNIC.

Os inúmeros processos industriais de fabricação de bens trazem consigo uma vasta gama de resíduos que, muitas vezes, são depositados inadequadamente no meio ambiente. Exemplo disso são as usinas de processamento de cana-de-açúcar para a produção de etanol, que geram resíduos industriais como a cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Outro exemplo é a casca de arroz, resíduo gerado no beneficiamento de arroz que, quando calcinada, tende a desenvolver atividade pozolânica. Também, pode ser citado o resíduo proveniente da queima de carvão mineral, muito empregado para a produção de energia elétrica. O problema em questão pode ser reduzido utilizando estes resíduos como adições minerais em substituição parcial do cimento, sendo atualmente opções já consagradas: a cinza volante, a sílica ativa, a cinza da casca de arroz e a escória granulada de alto forno. Antes de implementar qualquer resíduo industrial como substituto parcial do cimento são necessários muitos estudos para produzir o embasamento teórico sobre benefícios e consequências que este tipo de prática pode proporcionar à tecnologia dos concretos e argamassas.

De acordo com Mehta (2001), a diminuição no consumo de clínquer é o primeiro passo para a redução no consumo de energia e emissões de gases que contribuem para o efeito estufa. Embora haja um crescimento estável na utilização de cimento Portland composto, grandes quantidades dos subprodutos industriais com

potencial de serem empregados na produção do cimento ainda recebem aplicações de baixo valor, como bases de estradas ou descartes em aterros.

A correta avaliação dos materiais pozolânicos é a base para se testar e desenvolver alternativas de incorporação de resíduos ambientais em substituição parcial ao cimento Portland.

### 1.3.2. Justificativa social

A presente pesquisa fornece suporte técnico e científico para a melhor avaliação das adições minerais utilizadas.

Os conhecimentos gerados podem contribuir com informações que serão usadas como base para outras pesquisas e, possivelmente, tornar-se uma referência para a sugestão de mudanças nas normas nacionais, de modo a torná-las mais eficientes na avaliação de materiais pozolânicos. Isto possibilitará a utilização de produtos mais atrativos economicamente, com menor custo energético, criando condições de aplicação de energia em atividades com alto valor agregado e empregos de qualidade. Isso seria uma forte contribuição deste trabalho para a sociedade.

### 1.3.3. Justificativa econômica

A substituição de parte do cimento por adições minerais pode oferecer vantagens econômicas, pois está substituindo o clínquer por resíduos sólidos industriais. Com isso, consome-se menor quantidade de recursos naturais, como o calcário e a argila, matérias-primas, além de reduzir o consumo de energia térmica para a clínquerização e de energia elétrica na moagem da matéria-prima e, também, do clínquer, o que implica em redução de custos na produção de cimento Portland.

O resultado da incorporação da grande maioria das adições minerais pozolânicas é a redução do custo do cimento Portland associado à melhoria do produto em muitas aplicações da engenharia civil.

#### 1.3.4. Justificativa tecnológica

Em termos técnicos, a incorporação de pozolanas no concreto pode resultar em vantagens para muitas aplicações em concretos e argamassas. De modo geral, pode-se citar que a reação pozolânica tende a reduzir a quantidade de hidróxido de cálcio na microestrutura do concreto, incorporando-o na estrutura do silicato de cálcio hidratado. Isso faz com que haja redução da susceptibilidade de ocorrência de reação álcali-agregado, redução da lixiviação e refinamento da estrutura de poros do concreto, tornando-o menos permeável à água, que é um agente necessário à maioria dos mecanismos de degradação.

Desse modo, pode-se dizer que as pozolanas são alternativas com potencial de elevar a eficiência dos concretos e argamassas em muitos tipos de aplicação da engenharia civil, justificando a importância desta pesquisa que se foca em produzir uma visão crítica da forma que a normalização nacional atual preconiza para a classificação de materiais pozolânicos. Neste sentido, avaliar bem as adições minerais potencialmente pozolânicas é a base para o desenvolvimento e o aproveitamento de resíduos potencialmente reativos e passíveis de emprego na produção de concretos e argamassas de cimento Portland.

## 2. Revisão bibliográfica

No presente capítulo estão apresentadas as informações sobre os materiais pozolânicos e seus efeitos, tanto físicos quanto químicos. Apresentam-se também informações sobre os materiais utilizados neste trabalho: a sílica ativa, o metacaulim, a cinza de casca de arroz, o fíler quartzoso, o fíler calcário e o material cerâmico submetido à moagem e calcinação.

### 2.1. Efeitos das adições minerais

De acordo com Malhotra e Mehta (1996), o termo adição refere-se a qualquer material além da água, agregados e cimento, que é utilizado como um constituinte do concreto e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura.

No Brasil, os cimentos com adição pozolânica começaram a ser comercializados em 1969, no Rio Grande do Sul, por iniciativa da S.A. Indústrias Reunidas Francisco Matarazzo, utilizando cinzas volantes coletadas na Termoelétrica de Charqueadas. Anteriormente, havia o uso esporádico de argila calcinada na obra da barragem de Jupuíá, no Rio Paraná, cuja fábrica iniciou sua operação em 1965 (SILVA, 2010).

Desde a década de 80, as adições minerais têm desempenhado um papel importante na produção de concreto de alto desempenho e seu predecessor, o concreto de alta resistência. A heterogeneidade na pasta de cimento Portland hidratada limita a resistência destes concretos, sendo solucionada pela modificação na microestrutura, a partir da incorporação de materiais pozolânicos, devido a sua reação com o hidróxido de cálcio resultar em um produto semelhante ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

As adições minerais podem ser classificadas em 3 grandes grupos: 1º) materiais cimentantes que não necessitam de hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes, como o C-S-H; 2º) materiais pozolânicos que reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio desde que na presença de água, formando compostos com propriedades cimentantes; e 3º) fíler, materiais finamente divididos e sem atividade química, que causam o efeito físico de empacotamento granulométrico.

A auto-hidratação dos materiais cimentantes é normalmente lenta e a quantidade de produtos formada é insuficiente para a sua aplicação com fins estruturais. Como exemplo deste material há a escória granulada de alto-forno proveniente da produção de ferro-gusa. Quando utilizado como adição ou substituição parcial de cimento Portland, a presença de hidróxido de cálcio e a gipsita acelera a hidratação (DAL MOLIN, 2011).

A utilização de material pozolânico se dá de duas formas, como adição ao cimento Portland durante sua fabricação, gerando os cimentos compostos (forma mais usual em países como Brasil, França e Alemanha), ou como adição ao concreto (como é o caso nos Estados Unidos). Independente da forma, o resultado final é semelhante: a adição mineral interage química e fisicamente com os produtos de hidratação do cimento Portland, modificando a microestrutura da pasta (SILVA, 2010).

O material pozolânico, quando natural, dispensa qualquer tratamento para apresentar ou potencializar sua pozolanicidade, exceto a moagem, procedimento que aumenta a área de contato para as reações. Já, no caso das pozolanas artificiais, aquelas que necessitam de beneficiamento, os tratamentos a elevadas temperaturas influenciam na cristalização do material, pois durante o resfriamento as fases cristalinas são transformadas em amorfas, atribuindo reatividade ao material. O dióxido de silício presente nos materiais pozolânicos possui fases polimórficas<sup>4</sup> como o quartzo, a tridimita, a cristobalita, entre outras. Os materiais com estrutura desordenada (amorfa) são os que apresentam maior reatividade comparada aos de estrutura cristalina (CORDEIRO, 2006).

Segundo Dal Molin (2011), o material não reativo, denominado fíler, é um material finamente dividido sem atividade química, ou seja, sua atuação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico, como exemplo: fíler calcário, fíler quartzoso, pó de pedra.

De acordo com Dal Molin (2011), vários são os efeitos físicos gerados pelas adições minerais no concreto:

---

<sup>4</sup> Fase sólida com mesma composição química, porém com estrutura cristalina diferenciada.



- efeito microfiller: aumento da densidade da mistura, resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, cujo diâmetro médio deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento;
- refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação do cimento: a adição mineral restringe os espaços nos quais os produtos de hidratação podem crescer, gerando um grande número de pequenos cristais;
- alteração na microestrutura da zona de transição: melhora significativa da zona de transição devido à somatória de efeitos: interferência na movimentação das moléculas de água em relação aos sólidos da mistura, reduzindo a exsudação, preenchimento de vazios deixados pelas partículas de cimento próximas à superfície do agregado e interferência no crescimento dos cristais.

O efeito químico obtido da reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é denominado reação pozolânica e como aspectos principais apresenta: a reação é lenta, desta forma a liberação de calor e o desenvolvimento da resistência também são lentos. Os produtos das reações são muito eficientes em preencher os espaços capilares, melhorando o desempenho (resistência e impermeabilidade) do produto final (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), embora todas as adições tendam a melhorar a coesão e a trabalhabilidade do concreto fresco, muitas não possuem a capacidade redutora de água da cinza volante e da escória granulada de alto forno. Para uma determinada consistência do concreto, o uso de materiais com alta área superficial específica, como cinza de casca de arroz e sílica ativa, aumenta a demanda de água (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Segundo Malhotra e Mehta (1996), este aumento no consumo de água pode não ocorrer em concretos com consumo de cimento menor do que 300 kg/m<sup>3</sup>. Já, para um concreto com elevado consumo de cimento, é possível a utilização de aditivos superplastificantes para evitar o aumento da relação a/c.

O uso de adições minerais oferece a possibilidade de reduzir o aumento da temperatura quase que em proporção direta à quantidade de cimento Portland

substituído pela adição, sendo considerado o calor de hidratação total produzido pelas reações pozolânicas como a metade do calor médio produzido pela hidratação do cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O refinamento dos poros quando se faz uso das adições minerais pode ser observado no trabalho de Senhadji *et al.* (2014), sendo evidenciado que as argamassas de cimento Portland possuem porosidade total mais elevada que as argamassas com adições minerais. Também, foi observada que a redução dos poros de maior volume é mais acentuada para a argamassa contendo adições minerais do que para a argamassa de referência, sendo esta redução mais significativa quando as adições apresentam pozolanicidade.

Conforme demonstrado no trabalho de Hoppe Filho *et al.* (2013), concretos contendo adição de cinzas volantes diminuem a quantidade de hidróxido de cálcio em relação ao concreto de referência. Para minimizar este efeito, realizou-se a adição de cal hidratada na mistura, que propiciou o aumento na quantidade de portlandita em concretos produzidos com cimento e cinzas volantes, acima do valor encontrado no concreto de referência. Esse trabalho ainda sugere que as previsões relativas à durabilidade do concreto com base na resistência à compressão são inadequadas, pois concretos de referência e com adições minerais, com a mesma resistência à compressão, quando submetidos à penetração de cloretos, apresentam coeficientes de difusão distintos, devido às melhorias nas propriedades da microestrutura da pasta.

De acordo com o trabalho de Krivenko *et al.* (2014), a presença de metacaulim e cinza volante permite reduzir a expansão ocasionada pela reação álcali-agregado a graus admissíveis ou evitá-la completamente.

Conforme cita Dal Molin (2011), inúmeros são os casos de utilização de adições minerais em obras de concreto (cimentos compostos). Seu uso é justificado em obras onde a redução do calor de hidratação é essencial, como barragens, e em ambientes com presença de cloretos, para reduzir a sua penetração e aumentar a durabilidade quanto à corrosão das armaduras.

## 2.2. Adições que compõem este estudo

### 2.2.1. Fíler calcário

Como fíler calcário deve ser entendido o material proveniente da rocha calcária finamente moída. O essencial é que possuam uniformidade e, principalmente, sejam finamente divididos (DAL MOLIN, 2011).

O fíler possui diâmetro médio próximo ao do cimento Portland, que em decorrência da sua ação física, melhora algumas propriedades do concreto quando em teores menores que 15% em relação à massa de cimento, de acordo com Silva (2010). Na Figura 2, está apresentada a imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do fíler calcário.

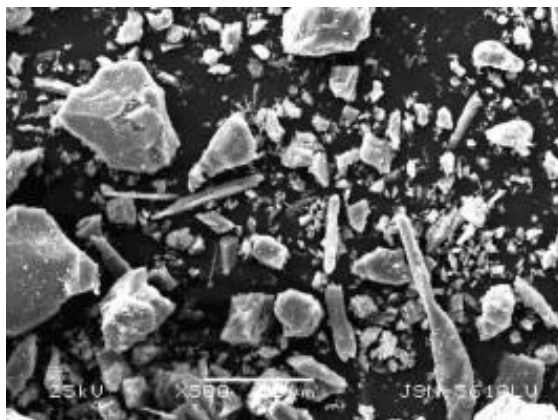


Figura 2 - Micrografia obtida por MEV com ampliação de 500x do fíler calcário.  
Fonte: Chen *et al.* (2011).

Quando presentes no cimento, o fíler calcário serve para tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis, porque os grãos desse material moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas dos demais componentes do concreto, funcionando como um verdadeiro “lubrificante” (BATTAGIN e BATTAGIN, 2010).

Quando utilizado nos concretos autoadensáveis, a maior capacidade da partícula de fíler calcário em adsorver água causa aumento de viscosidade e maior resistência à exsudação (REPETTE, 2011).

De acordo com Battagin e Battagin (2010), o filler apesar de apresentar ação predominantemente física, pode possuir alguma reatividade química com os aluminatos de cálcio, formando os carboaluminatos e substituindo parcialmente o papel da gipsita.

Por apresentar moabilidade mais fácil que o clínquer, durante a moagem conjunta nos moinhos industriais, ele se concentra nas frações mais finas do cimento. Essas partículas mais finas preenchem os poros e ao mesmo tempo promovem uma aceleração da hidratação ao se comportarem como locais de nucleação<sup>5</sup> na formação dos novos compostos hidratados, pois alteram a cinética do sistema fazendo com que as partículas de cimento reajam mais rapidamente com a água (BATTAGIN, 2011).

Segundo Bonavetti *et al.* (2003), para uma baixa relação água/cimento no concreto (0,25), uma grande proporção (mais de 35%) de cimento Portland permanece não hidratado atuando como material de enchimento de alto custo. O uso de filler calcário como demonstrado no trabalho, foi uma opção para a diminuição do consumo de energia e das emissões poluentes pela redução do consumo de cimento, porém não foi possível apontar um valor ótimo da adição mineral que varia de acordo com o proporcionamento dos materiais que compõem o concreto.

### 2.2.2. Fíler quartzoso

Trata-se de sílica com elevado grau de moagem, o que resulta em partículas médias da ordem de 15µm, conforme material utilizado no trabalho de Henche (2013). Na realidade, esses materiais estão disponíveis em granulometrias variadas e estão destinados a produção de tintas, plásticos, borrachas, esmaltes, abrasivos, concretos de alta resistência, etc (CASTRO *et al.*, 2009). Na Figura 3, está uma imagem de microscopia eletrônica de varredura do fíler quartzoso apresentando forma angular.

---

<sup>5</sup> Nucleação é a etapa em que as moléculas sólidas dispersas no solvente começam a se precipitar.

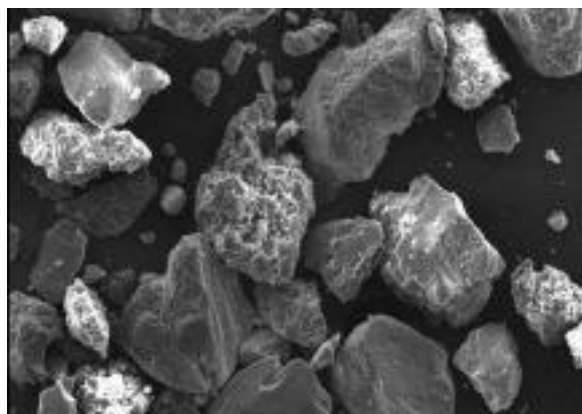


Figura 3 - Micrografia por MEV do fíler quartzoso com ampliação de 250x.  
Fonte: Felekoglu (2009).

É utilizado na produção de concretos de pós reativos (CPR) com diâmetro máximo entre 5 a 25  $\mu\text{m}$ , sendo adicionado à mistura para contribuir para o fechamento do pacote granulométrico, preenchendo os vazios deixados pelos grãos de areia. Quando submetido ao tratamento térmico, intensifica as reações pozolânicas, consumindo o hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  gerado na hidratação do cimento, produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H) em maior quantidade e tamanho superior ao original proveniente da hidratação do cimento. Essa mudança provoca melhora considerável da resistência da pasta e da zona de transição (pasta-agregado miúdo), diminuindo, inclusive, sua espessura (BIZ, 2001).

Richard & Cheyrezy (1995, *apud* TUTIKIAN *et al.*, 2011), apresentam controvérsias sobre o material, ressaltando que o fíler quartzoso apresenta reatividade quando submetido a altas temperaturas, o que ocorre durante a cura do CPR, elevando a resistência final da mistura.

Quando utilizado em concretos autoadensáveis, o efeito de sua adição aumenta a viscosidade da pasta, assemelhando-se ao da incorporação da mesma quantidade de fíler calcário. No entanto, enquanto o fíler calcário pode promover a aceleração do enrijecimento da pasta, o pó de quartzo causa retardo (DESMET *et al.*, 2010 *apud* REPETTE, 2011).

De acordo com Lawrence *et al.* (2003), os graus de hidratação a curto prazo de argamassas contendo fíler quartzoso são sempre mais elevados do que aqueles para a

argamassa de referência, confirmando o aumento da hidratação do cimento na presença de adições minerais inertes em virtude da nucleação heterogênea.

### 2.2.3. Material cerâmico

As cerâmicas são obtidas a partir de uma massa a base de argila, submetida a um processo de secagem lento e, após a retirada de grande parte da água, é sintetizada em temperaturas elevadas. Um dos critérios mais tradicionais para a classificação das cerâmicas é a cor da massa, que pode ser branca ou vermelha (KASMIERCZAK, 2010).

Atualmente existem muitos tipos de resíduos cerâmicos de barro vermelho que constituem subprodutos da indústria, cada tipo com diferenças marcadas pela constituição mineralógica, cor, dureza, em grande parte resultante da matéria-prima utilizada, mas também do tratamento térmico a que os produtos foram sujeitos (MATIAS *et al.*, 2012).

De acordo com Vieira (2005), a dureza das matérias-primas é um fator importante na seleção do equipamento a ser utilizado para a realização da moagem. Em se tratando de materiais cerâmicos, cuja matéria-prima básica é argila, o processo de moagem utilizando moinhos de bolas é largamente utilizado. O referido processo permite obter uma distribuição granulométrica bastante fina e pode ser realizado a úmido ou a seco.

Os tempos de moagem excessivamente grandes não correspondem necessariamente a uma melhor moagem, pois existe um tempo de moagem adequado para cada material e moinho. Ultrapassando-se este tempo não haverá um melhor rendimento, apenas elevação do custo do processo e o desgaste do moinho, sem obter uma moagem mais fina ou maior reatividade do material, como pode ser observado no trabalho de Vieira (2005).

Em pastas com cimento, Farias Filho *et al.* (2000) obtiveram aumento da resistência à compressão se comparado com o traço de referência, porém com teores de substituição de tijolo moído acima de 20%, houve decréscimo nas resistências à flexão. Para a substituição de 20% de cimento por resíduo cerâmico em concretos, Gonçalves

(2007) afirmou não haver influência no módulo de elasticidade e nas demais propriedades mecânicas aos 28 dias, como na resistência à compressão, na resistência à tração por compressão diametral e na resistência à tração na flexão, independentemente da relação água/cimento. Nesses trabalhos, não foi realizado tratamento térmico no material cerâmico, apenas o beneficiamento pela moagem. Também não foi realizado um estudo aprofundado sobre a reatividade pozolânica deste resíduo de construção.

#### 2.2.4. Cinza de casca de arroz

O Brasil é considerado um dos 10 maiores produtores de arroz no mundo, produzindo no ano de 2011, cerca de 13,4 milhões de toneladas de arroz em casca (IBGE, 2012), sendo a região sul a principal responsável por essa produção.

A cinza de casca de arroz é o material resultante da sua combustão, sendo usado pelas indústrias beneficiadoras de arroz como fonte calorífica na geração de calor e de vapor necessários nos processos de secagem e parboilização dos grãos (DAL MOLIN, 2011). Grande quantidade de resíduos gerados por estas indústrias de beneficiamento, que na maioria das vezes não possuem local próprio para a sua disposição, são lançados em aterros ou em terras produtivas, utilizados como fertilizantes, ficando muitas vezes próximo a rios e córregos, causando a poluição dos mesmos (GAVA, 1999).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), cada tonelada de arroz colhido produz cerca de 200 kg de casca que, na combustão, produz aproximadamente 40 kg de cinza. A eficiência da cinza de casca de arroz como material pozolânico está relacionada ao seu processo de obtenção. Cinzas provenientes de combustão não controlada geralmente contêm uma grande proporção de minerais de sílica não reativos (cristalinos) e de baixo valor pozolânico. Já, com a queima controlada, com temperaturas entre 500 e 700 °C, possibilita a obtenção de cinzas amorfas de alta pozolanicidade (DAL MOLIN, 2011).

O trabalho de Zerbino *et al.* (2011) destaca a importância do beneficiamento, por moagem, de determinados materiais para melhorar o desempenho das pastas de cimento que os recebem. A avaliação de diferentes finuras da cinza de casca de arroz incorporada ao concreto propiciou melhoras no estado fresco e, também, no estado endurecido. Outra pesquisa de Zerbino *et al.* (2012), evidenciou alguns dos benefícios

desta pozolana como o poder de influenciar na inibição ou no desenvolvimento da reação álcali-sílica (RAS). O estudo com cinza de casca de arroz comprovou que, dependendo do tempo de moagem, tamanho das partículas e do teor de substituição do cimento, esta pozolana pode inibir ou desenvolver a RAS.

Na Figura 4, a imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz com 30 minutos de moagem.

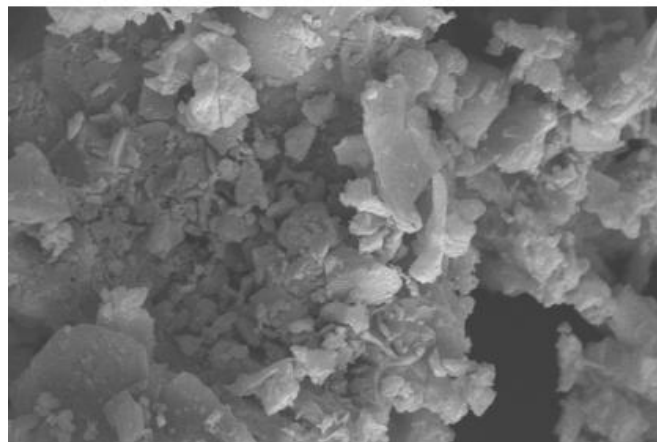


Figura 4 - Micrografia por MEV da cinza de casca de arroz com moagem de 30 minutos e ampliação de 4.500x.

Fonte: Fedumentí. (2013).

Diante da aplicação da cinza de casca de arroz em concretos e argamassas, a oportunidade de redução no impacto ambiental é fortalecida pelo concreto ser, de acordo com Pedroso (2009), o segundo material mais consumido no mundo, perdendo apenas para o consumo de água. Sendo estimada a utilização de 11 bilhões de toneladas de concreto anualmente, ou seja, um consumo médio de 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano (FEDERACIÓN IBEROAMERICANA DE HORMIGÓN PREMESCLADO - FIHP, *apud* PEDROSO, 2009).

#### 2.2.5. Metacaulim

O metacaulim pode ser produzido de duas formas. A primeira é a partir da calcinação da argila caulínica em temperaturas que variam entre 500 °C e 800 °C, com posterior moagem do material e sua tonalidade se caracteriza por um tom rosáceo. A



segunda forma de obtenção do metacaulim consiste na utilização do rejeito da indústria do papel, passando, da mesma forma pelo processo de calcinação e moagem, com tonalidade extremamente clara (KIRCHHEIM *et al.*, 2011).

Sua composição química é predominantemente sílica (aproximadamente 50%) e alumina (em torno de 40%) (MEDINA, 2011). Segundo Dal Molin (2011), o metacaulim possui uma coloração variável, dependendo do teor de óxido de ferro presente na matéria prima. A pureza do caulim influencia tanto na reatividade como na coloração do material, quanto menor a quantidade de sílica e alumínio, menor a reatividade e menor a brancura.

Ao contrário da maioria de outras adições minerais, o metacaulim não é um rejeito industrial e possui controle de produção específico (FONSECA, 2010). Apesar desta afirmação de Fonseca (2010), a publicação de Kirchheim *et al.* (2011) evidencia que o metacaulim pode sim ser proveniente de um resíduo industrial, porém, é verdade que na maioria dos casos trata-se de uma argila com composição química e calcinação controlados. Uma das vantagens da utilização do metacaulim é referente à questão ambiental, pois um dos resíduos gerados pela produção desta adição é o vapor de água, o qual é lançado diretamente na atmosfera sem qualquer dano ao meio ambiente. Portanto, como a utilização de metacaulim no concreto faz com que o consumo de cimento seja menor, há uma menor emissão de gás carbônico na atmosfera (NITA, 2006). Não se pode deixar de citar como vantagem a economia de energia, pois se a temperatura de calcinação do metacaulim é entre 500 °C e 800 °C, inferior a de produção do cimento (1450 °C), e na maioria dos casos o seu emprego será em substituição parcial do cimento, pode-se dizer que existe uma redução de energia aplicada para a produção de um metro cúbico de concreto.

De acordo com Kuperman *et al.* (2005), na década de 60 a Companhia Energética de São Paulo (CESP) tornou-se a primeira empresa brasileira a descobrir que suas estruturas de concreto poderiam apresentar reação álcali-agregado (RAA) e tomaram providências, pois em março de 1963 veio a divulgação de dois relatórios pioneiros pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas no Estado de São Paulo (IPT), que mencionavam as reações álcali-agregado nas Centrais Elétricas de Urubupungá S.A.. Uma das medidas adotadas foi a aplicação de metacaulim no concreto. Para atender esta

demanda, foi construída uma fábrica de pozolana em Três Lagoas – MS, ao lado da futura Usina Hidrelétrica Jupuí, devido a existência de jazidas de argila caulinítica.

No final de 2010, foi publicada a primeira norma brasileira referente a esta adição, que prescreve parâmetros específicos para o uso do metacaulim: NBR 15894/2010: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, que prescreve parâmetros específicos para o uso do metacaulim.

O trabalho de Chakchouk *et al.* (2009) acerca da temperatura e do tempo de calcinação de argilas para a produção de pozolanas artificiais a serem utilizadas em substituição parcial do cimento e com diferentes teores, mostrou que as propriedades mecânicas foram regidas pela temperatura de calcinação e pelo teor de substituição, sendo possível aumentar os teores de substituição desde que a temperatura de calcinação seja elevada.

Segundo Dal Molin (2011), tem-se também obtido esta pozolana a partir da moagem e da calcinação em baixas temperaturas de argilas especiais como o caulim muito puro, resíduo proveniente da indústria do papel. Neste processo, é obtida uma pozolana com alta atividade pozolânica, fazendo com que recebesse a denominação de metacaulim de alta reatividade (MCAR).

Medeiros e Helene (2004) realizaram um extenso estudo que demonstrou a eficiência do metacaulim quanto à mitigação da reação álcali-agregado, resistência à penetração de cloretos, redução da absorção e permeabilidade a água, elevação da resistividade elétrica, entre outros fatores.

Na Figura 5, constam as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do metacaulim com ampliação de 3.000x e 10.000x.

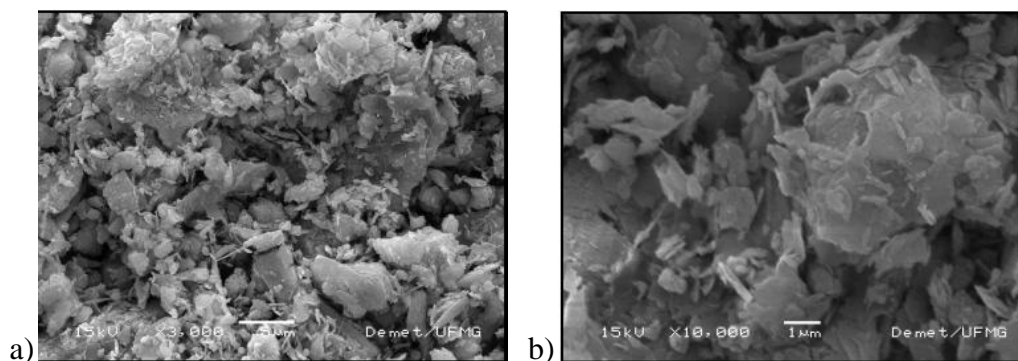


Figura 5 - Micrografia por MEV do metacaulim com ampliação de 3.000x (a) e 10.000x (b).  
Fonte: Rocha (2005).

### 2.2.6. Sílica ativa

A sílica ativa, também conhecida, como sílica volatilizada, microssílica ou fumo de sílica condensado, é um subproduto obtido dos fornos a arco nas indústrias de silício metálico e de ligas ferro-silício, com temperaturas acima de 2000 °C. Durante o processo, é gerado o gás SiO que, ao sair do forno, se oxida e condensa na zona de baixa temperatura do forno em partículas esféricas minúsculas, consistindo em sílica não cristalina. Esse material é removido por filtragem (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O material constitui um tipo de pozolana formada essencialmente por partículas esféricas de sílica no estado amorfo (ABNT NBR 13956/12). Na Figura 6, está ilustrada uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da sílica ativa.

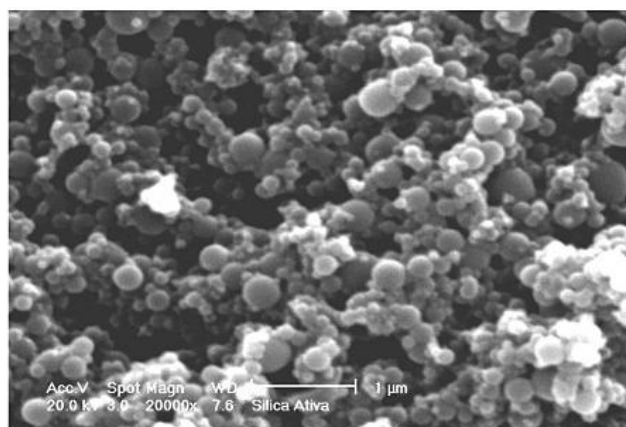


Figura 6 - Micrografia da sílica ativa com ampliação de 20.000x.  
Fonte: Dal Molin (2011).

A sílica ativa amorfa é conhecida a mais de 55 anos. Tem-se conhecimento que a primeira utilização prática deste subproduto tenha sido relatada em 1952 por um pesquisador norueguês. No final dos anos 70, a sílica ativa começou a ser utilizada no concreto na Escandinávia. Tem sido relatada que na América do Norte e diversos outros países seu uso deu-se no início dos anos 80 (AITCIN, 2000 *apud* LUZ, 2005).

Segundo Dal Molin (2011), dependendo do tipo de liga de silício produzida, tipo de forno, composição química e dosagem das matérias-primas, resultarão diferentes tipos de sílica ativa no que tange a composição química, cor, distribuição granulométrica e demais características. Por exemplo: a sílica ativa proveniente da manufatura do silício metálico é mais fina que a proveniente da manufatura do ferro-silício, isso se deve as diferenças nas temperaturas alcançadas pelos fornos, que tendem a diminuir à medida que aumente a proporção de ferro na liga metálica.

De acordo com Aictin (2000) *apud* Luz (2005), a sílica ativa exerce um efeito benéfico na fluidez do concreto (em quantidades inferiores a aproximadamente 10% da massa de cimento). Pequenas partículas de sílica são distribuídas dentro dos espaços entre as partículas do cimento e atuam como pequeníssimos rolamentos deslocando parte da água presente entre os grãos de cimento, e aumentando a quantidade de água disponível para fluidificar o concreto. Esta ação pode ser considerada como efeito lubrificante da sílica ativa.

Porém, segundo Rao (2003), a afirmação do parágrafo anterior apresenta controvérsia, porque, a fluidez de uma argamassa diminui quando é adicionada sílica ativa, devido à alta superfície específica da sílica ativa que necessita de mais água para completar a hidratação e, conseqüentemente, para a obtenção de uma fluidez adequada. Porém, é possível que este efeito só ocorra em quantidades superiores a aproximadamente 10% da massa de cimento, o que não seria contra o que foi afirmado por Aictin (2000) *apud* Luz (2005).

Conforme o exposto sobre os materiais deste estudo, a atividade pozolânica das adições se faz necessária quando existe a intenção de utilizá-los como material ativo. E esta é a principal importância dos ensaios de pozolanicidade, quantificar as propriedades de reatividade apresentadas pelas adições.

### 3. Programa experimental

Neste capítulo estão apresentados os materiais utilizados para a execução dos ensaios e as adições minerais estudadas: cinza de casca de arroz, metacaulim, sílica ativa, fíler quartzoso, fíler calcário e material cerâmico com diferentes graus de moagem (0,5; 1,0 e 1,5 h) e calcinação em forno mufla a 700 °C. Entre estas amostras existem pozolanas, materiais não pozolânicos para servir de referência e materiais com potencial de atividade pozolânica.

Também estão descritos os procedimentos para a calcinação do material cerâmico em laboratório, além dos métodos prescritos em norma e os procedimentos laboratoriais para a realização da massa específica e da área específica, o índice de atividade pozolânica com cal e com cimento, ensaio Chapelle modificado, fluorescência de raios-X, difração de raios-X, granulometria a laser e análise termogravimétrica. Também, foram dosadas argamassas onde se manteve a relação água/cimento e água/finos<sup>6</sup> constantes, com e sem a presença de aditivo superplastificante.

#### 3.1. Variáveis do estudo

A pesquisa compreende a análise de 11 adições minerais: fíler calcário, fíler quartzoso, material cerâmico com moagem por 0,5 hora, moagem por 1,0 hora, moagem por 1,5 hora, moagem por 0,5 hora e calcinação a 700 °C com resfriamento rápido, moagem por 1,0 hora e calcinação a 700 °C com resfriamento rápido, moagem por 1,5 hora e calcinação a 700 °C com resfriamento rápido, cinza de casca de arroz, metacaulim, e sílica ativa, conforme mostrado na Figura 77.

---

<sup>6</sup> Consideram-se como finos o hidróxido de cálcio, o cimento Portland e as adições minerais.

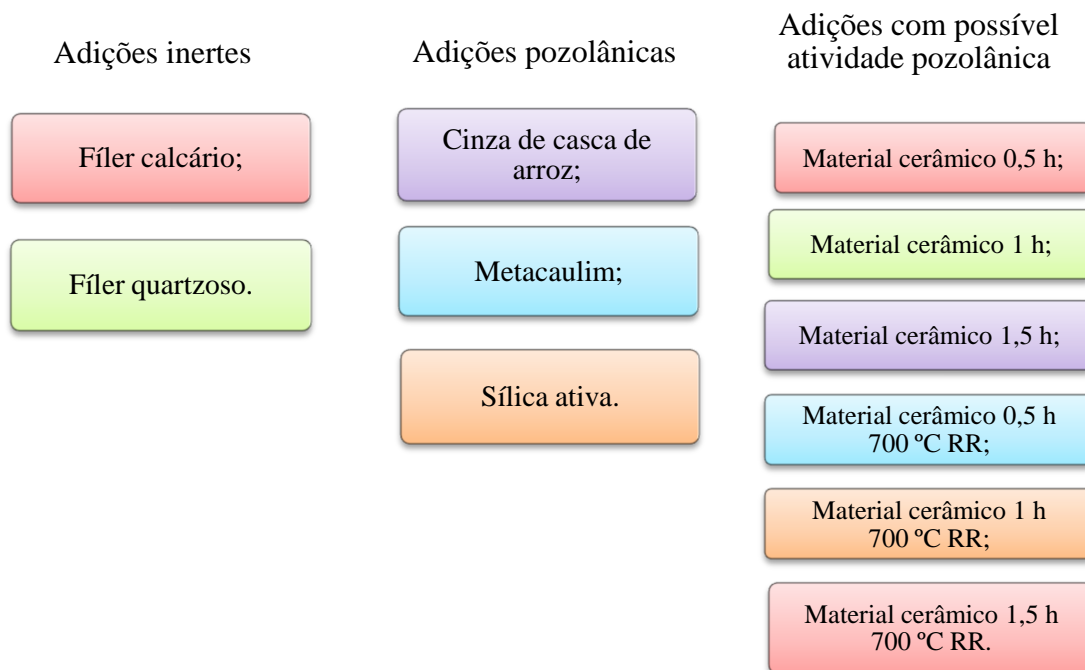


Figura 7 - Adições minerais utilizadas no estudo.

Em uma primeira etapa, as adições foram submetidas aos seguintes ensaios de caracterização: massa específica (necessária para a realização dos índices de atividade pozolânica com cal e com cimento), finura Blaine e BET (ensaios comparativos para a área superficial), granulometria à laser, fluorescência de raios-X, Chapelle modificado, difração de raios-X e análise termogravimétrica. Posteriormente, foram confeccionadas argamassas para os ensaios de determinação da atividade pozolânica: IAP com cal e IAP com cimento (as tabelas com traços seguem ao longo do programa experimental), pastas com hidróxido de cálcio (água/finos = 0,80) e com cimento Portland (água/finos = 0,80) para a difração de raios-X, conforme Figura 88.

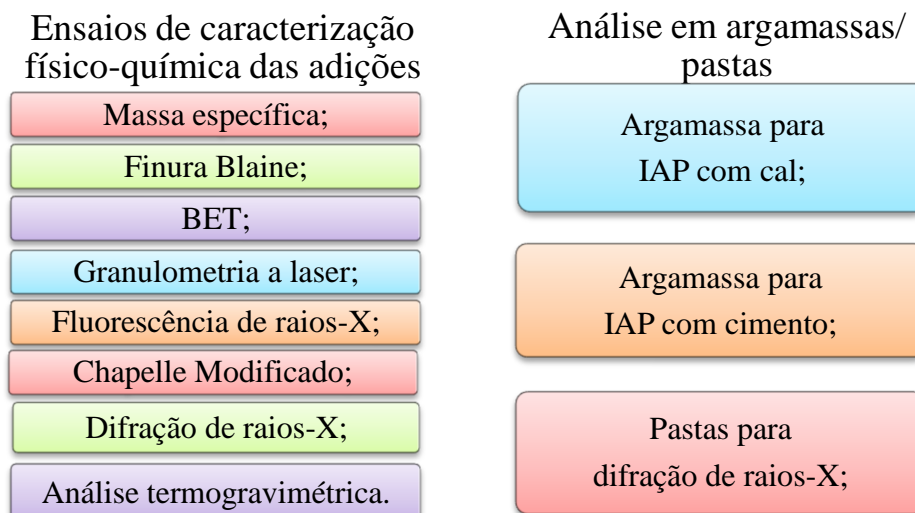


Figura 8 - Ensaio de caracterização das adições e análises em argamassas.

Na segunda etapa, após as moldagens das argamassas para IAP com cal e cimento, foram fixados parâmetros distintos a norma, conforme Figura 99. Para tanto, foram moldadas argamassas com hidróxido de cálcio e fixação da relação água/finos em 0,80 e argamassas com cimento e fixação da relação água/cimento e água/finos em 0,80. Em seguida, tomando como base o espalhamento obtido pela argamassa de referência (com cimento), foram fixadas as consistências das demais argamassas com o uso de aditivo superplastificante. As tabelas com traços seguem ao longo do programa experimental.

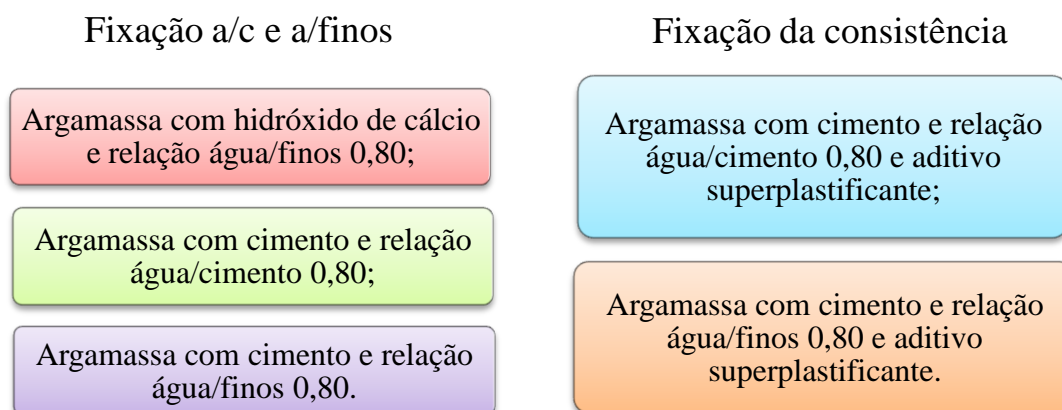


Figura 9 - Argamassas com fixação de parâmetros distintos da norma.

### 3.2. *Materiais utilizados*

#### 3.2.1. Cimento

O cimento CPV-ARI, fornecido pela Itambé, de massa específica de  $3,13 \text{ g/cm}^3$ , foi utilizado para a execução de todas as argamassas.

#### 3.2.2. Hidróxido de cálcio

O hidróxido de cálcio P.A. utilizado possui massa específica de  $2,22 \text{ g/cm}^3$  e foi produzido pelo fabricante Biotec Reagentes Analíticos. Os dados apresentados pelo hidróxido de cálcio constam na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do hidróxido de cálcio.

Teor $\text{Ca(OH)}_2$	Min. 96%
Teor ( $\text{CaCO}_3$ )	Máx. 5%
Insolúvel em HCl	Máx. 0,05%
Cloreto (Cl)	Máx. 0,033%
Sulfato	Máx. 0,04%
Metais Pesados (como Pb)	Máx. 0,002%
Arsênico	Máx. 0,0003%
Magnésio e Sais Alcalinos	Máx. 4,0%

Fonte: Fabricante.

### 3.2.3. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado em todas as argamassas e pastas foi a areia normal, de acordo com as prescrições da NBR 7214 (ABNT, 2012).

### 3.2.4. Água de amassamento

Foi utilizada água potável proveniente da rede de abastecimento da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

### 3.2.5. Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi o ViscoCrete 60 HE, produzido pela Sika. É um aditivo líquido de pega normal de terceira geração, com coloração castanha e composição básica de solução de policarboxilato em meio aquoso. Este aditivo apresenta densidade de  $1,05 \pm 0,02$  g/L, pH de  $4,5 \pm 1,0$  e teor de sólidos de 35,58%.

### 3.2.6. Fíler calcário

O fíler calcário utilizado foi proveniente da fábrica Itaú de Minas da Votorantim Cimentos, sendo este material utilizado na produção de cimentos e argamassas nesta fábrica. A massa específica medida deste material foi de  $2,70$  g/cm<sup>3</sup>.



### 3.2.7. Fíler quartzoso

O fíler quartzoso utilizado neste estudo foi comercialmente chamado de Sílica Malha 325 e foi disponibilizado pela Mineração Jundu. O produto foi extraído e beneficiado na cidade de Araguari, interior do estado de São Paulo. A massa específica medida deste material foi de 2,60 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.8. Material cerâmico

O material cerâmico utilizado foi oriundo de tijolos de 6 e 8 furos de cerâmica vermelha provenientes de olarias da região de Prudentópolis no estado do Paraná. Posteriormente, foram triturados em britador de mandíbula da marca Furlan, para obtenção de 100% de material passante pela peneira de abertura 4,8 mm (peneira n<sup>o</sup>. 4).

Não se utilizou o britador de martelo devido ao excesso de material pulverulento que é gerado no processo. Desse modo, o material passante na peneira 4,8 mm foi moído em um moinho de bolas da marca Gardellini, durante os tempos determinados: 0,5; 1,0 e 1,5 h. Após essa etapa, amostras dos três graus de moagem foram submetidas a calcinação em forno mufla, em que o elemento de partida foi a temperatura ambiente, elevando-se gradativamente a temperatura no período de 1 h. Após esse período chegou-se na temperatura de 700 °C. As amostras foram inseridas no forno mufla após este atingir a temperatura de calcinação desejada e mantidas durante o patamar de estabilização de 5 h. Os parâmetros foram baseados nos resultados obtido nas pesquisas de Freitas (2005), Gobbi *et al.* (2010b) e Gobbi (2010).

Para o resfriamento das amostras haviam duas opções estudadas em Gobbi (2010), o resfriamento lento (RL), ou seja, o material permaneceria dentro do forno mufla até que a temperatura baixasse gradativamente de 700 °C à temperatura ambiente (entorno de 23 °C) ou o choque térmico (ou resfriamento rápido), onde as amostras que estavam em temperatura de 700 °C no forno mufla, eram colocadas imediatamente a temperatura ambiente após completar as 5 h de calcinação, conforme esquema apresentado na Figura 10. No estudo prévio de Gobbi (2010), o melhor resultado foi obtido com o resfriamento rápido (RR), sendo esta a opção escolhida para realizar o resfriamento do material cerâmico na presente pesquisa. Contudo, vale salientar que o

estudo de Gobbi (2010) foi realizado com cinza de bagaço de cana-de-açúcar, sendo adotado como elemento de partida para arbitrar o patamar de temperatura a ser testado.

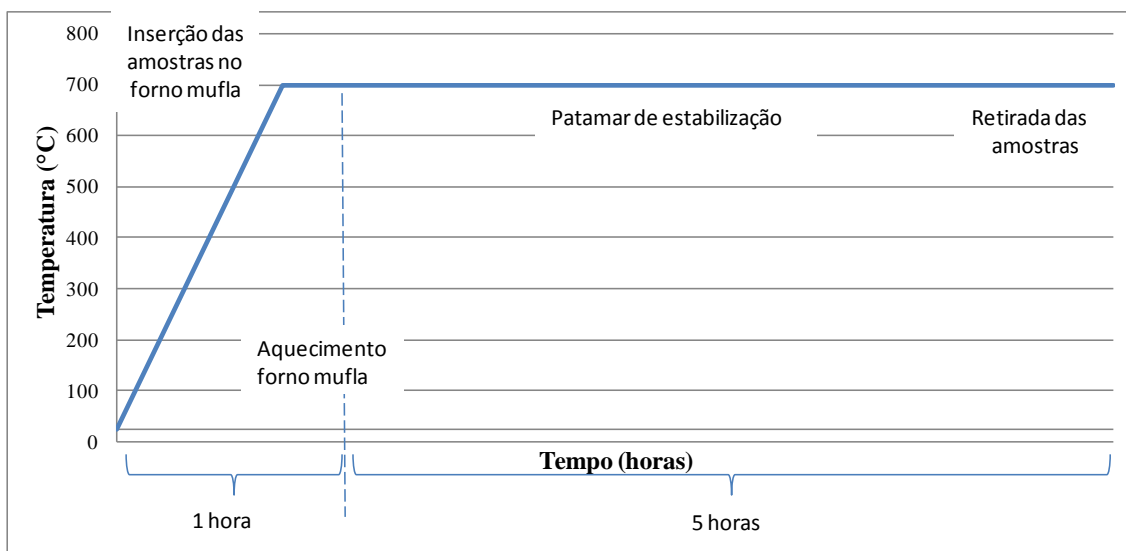


Figura 10 – Esquema da temperatura de calcinação vs permanência da amostra no forno mufla.

Desta forma, as amostras de cerâmica foram as seguintes:

- 0,5 h: material cerâmico moído por 0,5 h, com massa específica de 2,60 g/cm<sup>3</sup>;
- 1,0 h: material cerâmico moído por 1 h, com massa específica de 2,63 g/cm<sup>3</sup>;
- 1,5 h: material cerâmico moído por 1,5 h, com massa específica de 2,65 g/cm<sup>3</sup>;
- 0,5h 700 °C RR: material cerâmico moído por 1, calcinado em forno mufla por 5 h a temperatura de 700 °C e deixado resfriar rapidamente (choque térmico), com massa específica de 2,57 g/cm<sup>3</sup>;
- 1,0 h 700 °C RR: material cerâmico moído por 1 h, calcinado em forno mufla por 5 h a temperatura de 700 °C e deixado resfriar rapidamente (choque térmico), com massa específica de 2,61 g/cm<sup>3</sup>;
- 1,5 h 700 °C RR: material cerâmico moído por 1,5 h, calcinado em forno mufla por 5 h a temperatura de 700 °C e deixado resfriar rapidamente (choque térmico), com massa específica de 2,60 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.9. Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz foi proveniente da combustão controlada em caldeira com leito fluidizado na Geradora de Energia Elétrica Alegrete (GEEA), com massa específica de 2,12 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.10. Metacaulim

O metacaulim utilizado para a realização desta pesquisa foi fabricado pela Metacaulim do Brasil e é denominado metacaulim HP (high performance). A massa específica medida foi de 2,50 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.11. Sílica ativa

A sílica ativa utilizada foi fabricada pela Tecnosil. Sua massa específica medida foi de 2,18 g/cm<sup>3</sup>.

## 3.3. *Ensaios realizados*

### 3.3.1. Caracterização físico-química das adições minerais

#### 3.3.1.1. *Massa específica*

A massa específica é necessária para a realização do índice de atividade pozolânica com cal e com cimento onde, para a determinação da quantidade de material pozolânico a ser utilizado na argamassa confeccionada é preciso conhecer tanto com a massa específica da cal e do cimento como da amostra de adição em análise, conforme preconiza a norma de índice de atividade pozolânica com cal e com cimento, NBR 5751/12 e NBR 5752/12, respectivamente. O ensaio foi realizado conforme prescrito na norma NBR NM 23/01.

Para a sua execução fez-se uso do frasco volumétrico de Le Chatelier (Figura 11), de vidro de borossilicato com capacidade de 250 cm<sup>3</sup> até a marca zero da escala. O recipiente tem graduação que permite leituras com precisão de 0,05 cm<sup>3</sup>. Sendo utilizado água para as adições minerais e querosene para o cimento CPV-ARI.



Figura 11 - Execução do ensaio de massa específica.  
Fonte: Própria.

### 3.3.1.2. Área específica Blaine e BET

A área específica Blaine foi determinada conforme preconizado na NBR NM 76/98, fazendo uso do permeâmetro de Blaine com o qual é medido o tempo para que uma quantidade de ar passe pela camada de material compactada, de dimensões e porosidade especificadas. Este método somente permite uma determinação limitada das propriedades dos materiais em uso e o método de permeabilidade ao ar pode não fornecer resultados significativos para materiais contendo partículas ultrafinas, não sendo a técnica mais adequada para o estudo de adições minerais de elevada finura. O método é mais comparativo que absoluto e, portanto, requer uma amostra de superfície específica conhecida para calibração do aparelho.

O método BET (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett e Edward Teller) baseia-se na adsorção de moléculas de um gás inerte na superfície externa e interna dos poros abertos e interligados das partículas do sólido ensaiado. De acordo com Odler (2003), é largamente utilizado para determinar a superfície específica de materiais sólidos com diferentes tamanhos de poros.

A técnica BET tende a fornecer um valor mais alto para a área superficial específica em comparação com a técnica Blaine, pois o gás nitrogênio penetra e se

adsorve nos poros e microporos das partículas e não simplesmente em sua superfície (ROCHA *et al.*, 2009).

Para a superfície específica pelo método BET, no equipamento para a análise são realizadas medidas de área superficial específica pela determinação do volume de gás fixado na superfície da amostra.

Antes da realização do ensaio, a amostra deve ser desgaseificada, sob alta temperatura e vácuo, para a completa remoção de água e outros contaminantes adsorvidos na amostra, garantindo desta forma, que não haverá alteração nos resultados obtidos. A análise é realizada adicionando, em etapas, quantidades conhecidas de nitrogênio ao recipiente da amostra, de forma que diferentes pressões de vapor sejam alcançadas. Durante o procedimento, um sensor monitora as variações de pressão, quando a pressão de saturação é alcançada, a amostra é removida da atmosfera de nitrogênio, e aquecida para que ocorra a dessorção e quantificação das moléculas de nitrogênio adsorvidas no material.

#### 3.3.1.3. *Granulometria a laser*

O ensaio consiste em analisar a amostra num equipamento composto por duas partes: um sistema de dispersão e um sistema focal. A amostra é dispersa em um fluido (água para as adições minerais e álcool etílico para a amostra de cimento), duas fontes de laser posicionadas em 0° e 45°, produzem um padrão de difração que varia conforme o tamanho das partículas. O equipamento utilizado foi do modelo CILAS 1064 com faixa de medição de 0,04-500  $\mu\text{m}$  (Figura12).



Figura 12 - Granulômetro a laser CILAS 1064.  
Fonte: Própria.

Coloca-se uma fração da amostra, dentro de um compartimento no aparelho (Figura 13), o operador deverá adicionar quantidades da amostra até que haja uma boa dispersão. Sendo indicada pelo fornecedor como concentração ideal, a taxa de 150 unidades de difração/área de incidência. Depois de adicionada a amostra ao equipamento, esta permanece por 60 s desagregando as partículas com ultrassom (tempos superiores podem fragmentar as partículas e mascarar os resultados). Esta mistura é enviada até um recipiente por onde os feixes de laser irão atravessar e colidir com as partículas. Os resultados são coletados automaticamente por meio do software e a curva de distribuição granulométrica da amostra é representada.



Figura 13 - Colocação da amostra no equipamento  
Fonte: Própria.

#### 3.3.1.4. Fluorescência de raios X (FRX)

Para a análise química dos materiais estudados, inicialmente foram moldadas pastilhas do material em estudo para o acoplamento no equipamento Espectrômetro de fluorescência de raios-X com energia dispersiva (EDX – 720) da Shimadzu (Figura 14) e obtenção quantitativa dos elementos presentes nas determinadas amostras.



Figura 14 - Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por energia dispersiva.  
Fonte: Shimadzu.

A Figura 15 apresenta uma pastilha prensada, opção adotada para as amostras analisadas deste trabalho.



Figura 15 – Pastilha prensada da amostra.  
Fonte: Própria.

#### 3.3.1.5. Análise Termogravimétrica (TG)

A caracterização térmica avalia o comportamento da amostra durante o aquecimento, sendo ligada a uma balança de precisão, que permite o registro das variações de massa em função da temperatura. O sistema de controle atmosférico é de

grande importância, pois os gases presentes no momento da análise podem ou não reagir com a amostra, tendo efeitos diretos nas variações de massa.

A análise termogravimétrica (TG/DTG) foi realizada em equipamento da TA Instruments modelo SDT 2960 (Figura 16), em atmosfera dinâmica de nitrogênio (N<sub>2</sub>) com fluxo de 100 mL/min., utilizando cadinho de alumina como porta-amostra. A taxa de aquecimento foi de 10 °C/min., aplicada até 1200 °C.



Figura 16 - Equipamento de análise termogravimétrica e termogravimétrica.  
Fonte: Própria.

#### 3.3.1.6. Difração de raios X (DRX)

A análise por difração de raios-X identifica qualitativamente as fases químicas dos minerais constituintes das amostras, a partir da interação de raios-X que difratam, caracterizando cada ângulo de incidência. O resultado se apresenta em um gráfico (difratograma) que apresenta picos característicos da estrutura cristalina de cada espécie química (CINCOTTO e COSTA, 2007).

O preparo das amostras para a coleta dos difratogramas foi realizado pela prensagem manual no porta-amostra (Figura 17).





Figura 17 – Amostras no porta-amostra de alumínio.  
Fonte: Própria.

Em seguida, foram expostas aos raios-X no equipamento RIGAKU Ultima IV X-ray diffractometer. A medida foi realizada entre  $5^\circ$  e  $75^\circ 2\theta$ , com passo angular de  $0,02^\circ 2\theta$  e tempo por passo de 1 segundo. A análise utilizou tubo com ânodo de cobre, 40 kV / 30 mA e fenda divergente de  $1^\circ$ . Este ensaio foi realizado em amostras das diferentes adições minerais e em pastas de cimento e pastas de cal contendo as adições estudadas, após liofilização e moagem.

A reatividade de uma pozolana é influenciada pelo teor de material amorfo presente, que pode ser identificado pela difração de raios-X. Os difratogramas típicos de pozolanas reativas apresentam um halo característico de material amorfo conforme pode ser observado na Figura 18.

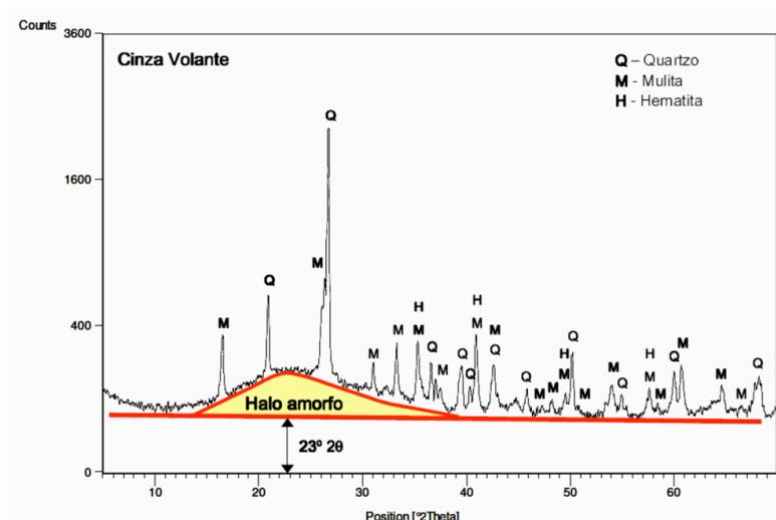


Figura 18 - Exemplo de formação de halo característico de material pozolânico.

Fonte: Hoppe Filho, 2008.

### 3.3.1.7. Método Chapelle modificado

Conforme a NBR 15895/10, o ensaio de Chapelle modificado é um método de determinação da atividade pozolânica por meio da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado. O resultado é expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material pozolânico (mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  pozolana).

O Método Chapelle modificado permite determinar a pozolanicidade de uma adição mineral, na sua finura de utilização pela taxa de reação da cal, após um tempo padronizado, sendo a reação acelerada por elevação da temperatura, ou seja, uma determinada quantidade de material supostamente pozolânico e de  $\text{CaO}$  são colocados para reagir em banho-maria ( $90 \pm 5$  °C). A mistura é mantida reagindo por 16 h. A pozolonicidade do material é admitida com consumo de óxido de cálcio superior a 330 mg  $\text{CaO}/\text{g}$  pozolana, por estequiometria, este valor corresponde a 436 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  pozolana.

### 3.3.2. Métodos de avaliação da atividade pozolânica em argamassas

Há ensaios distintos para a determinação da reatividade de pozolanas. Existem tanto os normatizados pela ABNT: os ensaios de índice de atividade pozolânica com cal, índice de atividade pozolânica com cimento e Chapelle modificado (já detalhado

anteriormente). E os ainda não normatizados, como a difração de raios X, que identifica a amorficidade da adição.

### 3.3.2.1. Índice de atividade pozolânica com cal:

Este ensaio foi conduzido seguindo a NBR 5751/12 que descreve o método de ensaio de atividade pozolânica através do índice de atividade com cal.

O método prescreve a moldagem de três corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura e posterior ruptura à compressão. O ensaio foi realizado em argamassa misturada com a adição em teste (dobro do volume de hidróxido de cal utilizado), areia normal da ABNT (234 g de cada fração 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm), 104 g de hidróxido de cálcio, e a água necessária para se obter a consistência da argamassa em  $225 \pm 5$  mm, conforme as prescrições do Anexo B da NBR 7215 (ABNT, 1996) pelo ensaio da mesa de espalhamento (Figura 19).



Figura 19 - Determinação da consistência usando a mesa de espalhamento conforme NBR 7215 (ABNT, 1996).  
Fonte: Própria.

Na Tabela 2, estão apresentadas as proporções de mistura das argamassas, em massa, para os diferentes tipos de adições minerais e a relação portlandita/adiação mineral de cada argamassa. Este proporcionamento foi realizado de acordo com a NBR 5751/12.

Tabela 2 – Proporção de mistura das argamassas para IAP com cal, relação água/finos e relação hidróxido de cálcio/adição mineral.

Argamassas	Massa dos materiais (g)				Relação Água/ finos <sup>2</sup> (g/g)	Relação CH/Adição <sup>3</sup> (g/g)
	Hidróxido de cálcio	Areia normal <sup>1</sup>	Adição mineral	Água		
Fíler calcário	104,0	936,0	250,7	180,0	0,51	0,41
Fíler quartzoso			241,4	200,0	0,58	0,43
Cinza de casca de arroz			196,9	200,0	0,66	0,53
Metacaulim			232,1	185,0	0,55	0,45
Sílica ativa			202,4	340,0	1,11	0,51
Material cerâmico 0,5 h			243,6	150,0	0,43	0,43
Material cerâmico 1,0 h			246,4	150,0	0,43	0,42
Material cerâmico 1,5 h			248,3	150,0	0,43	0,42
Material cerâmico 0,5 h 700 RR			240,8	150,0	0,44	0,43
Material cerâmico 1,0 h 700 RR			244,5	150,0	0,43	0,43
Material cerâmico 1,5 h 700 RR	243,6	150,0	0,43	0,43		

<sup>1</sup> Areia normal brasileira (NBR 7214): 234 gramas de cada fração granulométrica.

<sup>2</sup> Relação água/finos: quociente entre a massa de água e a soma das massas de hidróxido de cálcio e adição mineral contidas na argamassa – água/(hidróxido de cálcio + adição mineral).

<sup>3</sup> Relação hidróxido de cálcio/adição: quociente entre as massas de hidróxido de cálcio e adição mineral contidas na argamassa.

A mistura e moldagem seguiram as prescrições da NBR 7215 (1996), após os corpos de prova foram curados nos próprios moldes durante 24 h a temperatura de 23 °C e durante seis dias a temperatura de 55 ± 4 °C. A ruptura foi realizada aos 7 dias com o corpo de prova a temperatura de 23 °C. Para que fosse evidenciada a pozolanicidade do material foi necessário alcançar resistência à compressão superior a 6 MPa conforme preconiza a NBR 12653/12.

### 3.3.2.2. Índice de atividade pozolânica com cimento:

Este ensaio foi conduzido de acordo com a NBR 5752/12, que prescreve o método de ensaio de atividade pozolânica através do índice de atividade com cimento. Foram preparadas, uma argamassa de referência que contém apenas cimento Portland e mais uma para cada adição em teste de modo a se ter 35% do volume absoluto de cimento substituído pelo material pozolânico, todas com espalhamento de 225 ± 5 mm. Foi realizada a moldagem de três corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura para cada argamassa.

Na Tabela 3, estão apresentadas as proporções de mistura das argamassas, em massa, para a mistura de referência e para os diferentes tipos de adições minerais estudados. Neste caso, a NBR 5752/12 foi tomada como referência para a definição destes proporcionamentos empregados.

Tabela 3 – Proporção de mistura das argamassas para IAP com cimento e relação água/finos.

Argamassas	Massa dos materiais (g)				Relação Água/ finos <sup>2</sup> (g/g)	Relação Água/ cimento <sup>3</sup> (g/g)
	Cimento	Areia normal <sup>1</sup>	Adição mineral	Água		
Cimento CPV-ARI	312,0	936,0	0,0	150,0	0,48	0,48
Fíler calcário	202,8		94,2	159,0	0,54	0,78
Fíler quartzoso			90,7	171,0	0,58	0,84
Cinza de casca de arroz			74,0	181,9	0,66	0,90
Metacaulim			87,2	117,0	0,40	0,58
Sílica ativa			76,1	210,0	0,75	1,04
Material cerâmico 0,5 h			90,7	115,2	0,39	0,57
Material cerâmico 1,0 h			91,8	112,1	0,38	0,55
Material cerâmico 1,5 h			92,5	110,9	0,38	0,55
Material cerâmico 0,5 h 700 RR			89,7	115,2	0,39	0,57
Material cerâmico 1,0 h 700 RR			91,1	115,2	0,39	0,57
Material cerâmico 1,5 h 700 RR			90,7	115,2	0,39	0,57

<sup>1</sup> Areia normal brasileira (NBR 7214): 234 gramas de cada fração granulométrica.

<sup>2</sup> Relação água/finos: quociente entre a massa de água e a soma das massas de cimento Portland e adição mineral contidas na argamassa – água/(cimento Portland + adição mineral).

<sup>3</sup> Relação água/cimento: quociente entre a massa de água e a massa de cimento Portland.

A mistura e moldagem seguiram as prescrições da NBR 7215 (1996), posteriormente os corpos de prova foram curados nos próprios moldes durante 24 h a temperatura de  $23 \pm 2$  °C e durante 27 dias a temperatura de  $38 \pm 2$  °C. A ruptura à compressão dos corpos de prova foi realizada aos 28 dias e os valores obtidos foram comparados com a resistência à compressão da argamassa de referência. Para se constatar a pozolanicidade do material, a argamassa com 35% de substituição de cimento por adição deve ter resistência à compressão maior ou igual a 75% da resistência à compressão da argamassa de referência (sem substituição), conforme a NBR 12653/12.

### 3.3.2.3. Difração de raios X como análise da IAP com cal e com cimento:

#### Pastas com cal para a difração de raios-X

A técnica de difração de raios X, utilizada para caracterizar as adições minerais, também foi usada para avaliar as pastas provenientes do ensaio de atividade pozolânica com cal.

Para isso, foi necessário um processo de acondicionamento e preparo das amostras. Neste sentido, as pastas moldadas para a quantificação do consumo de cal por atividade pozolânica seguiram as recomendações da NBR 5751/12. A relação água/finos foi mantida constante em 0,80, de forma a permitir a adequada mistura das pastas com sílica ativa e metacaulim, as quais demandam maior volume de água em decorrência das suas características físico-químicas. Na Tabela 4, estão apresentadas as proporções de mistura das pastas, em massa, para os diferentes tipos de adições minerais, fixando a relação água/finos = 0,80.

Tabela 4 – Proporção de mistura das pastas com cal e relação água/finos = 0,80.

Pastas	Massa dos materiais (g)			Relação Água/ finos <sup>1</sup> (g/g)
	Hidróxido de cálcio	Adição mineral	Água	
Fíler calcário	104,0	253,0	285,6	0,80
Fíler quartzoso		243,6	278,1	
Cinza de casca de arroz		198,6	242,1	
Metacaulim		234,2	270,6	
Sílica ativa		204,3	246,6	
Material cerâmico 0,5 h		243,6	278,1	
Material cerâmico 1,0 h		246,4	280,3	
Material cerâmico 1,5 h		248,3	281,8	
Material cerâmico 0,5 h 700 RR		240,8	275,8	
Material cerâmico 1,0 h 700 RR		244,5	278,8	
Material cerâmico 1,5 h 700 RR		243,6	278,1	

<sup>1</sup> Relação água/finos: quociente entre a massa de água e a soma das massas de hidróxido de cálcio e adição mineral contidas na argamassa – água/(hidróxido de cálcio + adição mineral).

Logo após a mistura, as pastas foram lançadas em sacos plásticos ( $\pm 25$  mL) e acondicionadas em recipientes poliméricos de 50 mL, com tampa, objetivando

minimizar a evaporação da água na cura térmica, a  $55 \pm 2$  °C durante 6 dias, após 1 dia de cura à temperatura de  $23 \pm 2$  °C. Na Figura 20, está mostrada a sequência de atividades para o acondicionamento da pasta.



Figura 20 - Etapas de acondicionamento das pastas para DRX.

Fonte: Própria.

Na Figura 21, está indicado o armazenamento da amostra na estufa para manter na temperatura de  $55 \pm 2$  °C por 6 dias.



Figura 21 - Ilustração da cura das pastas para a DRX.  
Fonte: Própria.

### **Pastas com cimento Portland para a difração de raios-X**

No caso da determinação do índice de atividade pozolânica com cimento também foi empregada a técnica de difração de raios X como ferramenta de investigação dos produtos formados e remanescentes após o ensaio de IAP com cimento. Nesta parte da pesquisa foram confeccionadas pastas de cimento CPV-ARI contendo a substituição de 35% do volume de cimento pelas diferentes adições minerais, além de uma pasta de referência, somente com cimento, conforme preconizado na NBR 5752/12. A moldagem destas pastas manteve a relação água/finos constante em 0,70, o que resultou em pastas com diferentes consistências no estado fresco. A determinação da relação água/finos foi baseada na quantidade mínima de água para que as pastas de cimento contendo sílica ativa ou metacaulim pudessem ser misturadas adequadamente.

Na Tabela 5, estão apresentadas as proporções de mistura das pastas, em massa, para a mistura de referência e para os diferentes tipos de adições minerais fixando a relação água/finos = 0,70.



Tabela 5 – Proporção de mistura das pastas com cimento e relação água/finos = 0,70.

Pastas	Massa dos materiais (g)			Relação Água/ finos <sup>1</sup> (g/g)
	Cimento	Adição mineral	Água	
Cimento CPV-ARI	312,0	0,0	218,4	0,70
Fíler calcário	202,8	94,2	207,9	
Fíler quartzoso		90,7	205,5	
Cinza de casca de arroz		74,0	193,8	
Metacaulim		87,2	203,0	
Sílica ativa		76,1	195,5	
Material cerâmico 0,5 h		90,7	205,5	
Material cerâmico 1,0 h		91,8	206,2	
Material cerâmico 1,5 h		92,5	206,7	
Material cerâmico 0,5 h 700 RR		89,7	204,8	
Material cerâmico 1,0 h 700 RR		91,1	205,7	
Material cerâmico 1,5 h 700 RR		90,7	205,5	

<sup>1</sup> Relação água/finos: quociente entre a massa de água e a soma das massas de cimento Portland e adição mineral contidas na argamassa.

Após a mistura, as pastas foram lançadas nas mesmas condições apresentadas para as pastas moldadas com hidróxido de cálcio e submetidas à cura térmica, realizada a  $(38 \pm 2) ^\circ\text{C}$  durante 27 dias, após 1 dia de cura à temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .

### Preparo das amostras para a difração de raios-X

As amostras das diferentes pastas com cal hidratada, aos 7 dias de idade, foram retiradas da estufa à  $55 ^\circ\text{C}$ , fragmentadas em pedaços com dimensão máxima de 5,0 mm (aproximadamente), acondicionadas em recipientes poliméricos com tampa e congeladas/estocadas em freezer à  $-30 ^\circ\text{C}$  (Figura 22) para reduzir a velocidade das reações de hidratação. As amostras das pastas com cimento Portland seguiram as mesmas etapas, porém foram preparadas aos 28 dias de idade.



Figura 22 - Freezer utilizado para congelar as amostras à -30 °C.  
Fonte: Própria.

Na sequência, alguns fragmentos das amostras (volume necessário para a realização da difratometria de raios-X) foram liofilizados em Liofilizador TERRONI LS 3000 (Figura 23) para que a água livre fosse sublimada, restando, nas amostras, a água quimicamente combinada e parte da água adsorvida na estrutura dos compostos hidratados formados.



Figura 23 - Liofilizador empregado.  
Fonte: Própria.

As amostras liofilizadas foram finamente moídas em almofariz cerâmico com pistilo, acondicionadas em eppendorf (2 mL) e estocadas em dessecador contendo sílica

gel até a realização da difratometria de raios-X (Figura 24).



Figura 24 - Acondicionamento da amostra moída em recipiente tipo *eppendorf* (2 mL), posteriormente estocados em dessecador.

### 3.3.3. Estudo em argamassas com parâmetros pré-estabelecidos

Nesta parte da pesquisa foram confeccionadas argamassas com cal com relação água/finos constante em 0,80, e argamassas com cimento, onde foi mantida a relação água/finos e relação água/cimento constante em 0,80. Posteriormente, as argamassas com cimento foram moldadas com aditivo superplastificante, onde foi mantida a relação água/finos e relação água/cimento constante em 0,80, mas a consistência medida pela mesa de espalhamento foi ajustada com o uso do aditivo para os valores obtidos com a argamassa de referência.

#### **Argamassas com cal para resistência à compressão**

As argamassas moldadas com cal, com as diferentes adições minerais e areia normal, seguiram as recomendações da NBR 5751/12. A relação água/finos foi mantida constante em 0,80, de forma a permitir a adequada mistura das pastas com sílica ativa e metacaulim. Após a mistura, foram moldados 3 corpos de prova de cada argamassa e submetidos à cura térmica, realizada a  $(55 \pm 2)$  °C durante 6 dias, após 1 dia de cura à temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C. A ruptura à compressão, em corpos de prova cilíndricos (5 x

10 cm), foi realizada com 7 dias de idade, sendo utilizada como variável de resposta nesta parte do experimento.

A Tabela 6 apresenta as proporções de mistura das argamassas, em massa, para os diferentes tipos de adições minerais de cada argamassa fixando a relação água/finos = 0,80.

Tabela 6 – Proporção de mistura das argamassas, relação água/finos = 0,80.

Argamassas	Massa dos materiais (g)				Relação Água/ finos <sup>2</sup> (g/g)	Relação CH/Adição <sup>3</sup> (g/g)
	Hidróxido de cálcio	Areia normal <sup>1</sup>	Adição mineral	Água		
Fíler calcário	104,0	936,0	253,0	285,6	0,80	0,41
Fíler quartzoso			243,6	278,1		0,43
Cinza de casca de arroz			198,6	242,1		0,52
Metacaulim			234,2	270,6		0,44
Sílica ativa			204,3	246,6		0,51
Material cerâmico 0,5 h			243,6	278,1		0,43
Material cerâmico 1,0 h			246,4	280,3		0,42
Material cerâmico 1,5 h			248,3	281,8		0,42
Material cerâmico 0,5 h 700 RR			240,8	275,8		0,43
Material cerâmico 1,0 h 700 RR			244,5	278,8		0,43
Material cerâmico 1,5 h 700 RR			243,6	278,1		0,43

<sup>1</sup> Areia normal brasileira (NBR 7214): 234 gramas de cada fração granulométrica.

<sup>2</sup> Relação água/finos: quociente entre a massa de água e a soma das massas de hidróxido de cálcio e adição mineral contidas na argamassa – água/(hidróxido de cálcio + adição mineral).

<sup>3</sup> Relação hidróxido de cálcio/adiação: quociente entre as massas de hidróxido de cálcio e adiação mineral contidas na argamassa.

A mistura mecânica foi executada colocando inicialmente na cuba toda a quantidade de água e adicionando o hidróxido de cálcio e a adição mineral. A mistura destes materiais foi feita com o misturador na velocidade baixa ( $140 \pm 5$  rpm em torno do eixo), durante 30 s. Após este tempo, e sem paralisar a operação de mistura, iniciou-se a colocação da areia normal, com o cuidado de que toda esta areia fosse colocada gradualmente durante o tempo de 30 s. Imediatamente após o término da colocação da areia, a velocidade foi alterada para alta ( $285 \pm 10$  rpm em torno do eixo), misturando-se os materiais nesta velocidade durante 30 s. Após este tempo, o misturador foi desligado durante 1 minuto e 30 s. Nos primeiros 15 s, foi retirada, com auxílio de uma espátula, a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá e que não foi suficientemente misturada, colocando-a no interior da cuba. Durante o tempo restante (1

minuto e 15 s), a argamassa ficou em repouso na cuba, coberta com pano limpo e úmido. Imediatamente após este intervalo, o misturador foi ligado na velocidade alta, por mais 1 minuto.

A moldagem dos corpos de prova foi feita com o auxílio de uma espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal, homogeneamente distribuídos. Sendo finalizada a moldagem com a rasadura do topo dos corpos de prova.

### ***Argamassas com cimento para resistência à compressão***

#### **Argamassas sem aditivo superplastificante (consistência variável)**

Foram moldadas argamassas com cimento CP V – ARI contendo a substituição de 35% do volume de cimento pelas diferentes adições minerais e areia normal, além de uma argamassa de referência, sem adição, conforme preconizado na NBR 5752/12. A moldagem destas argamassas manteve a relação água/finos constante em 0,80, e relação água/cimento constante em 0,80, o que resultou em argamassas com diferentes consistências no estado fresco. A determinação da relação água/finos foi baseada na quantidade mínima de água para que as argamassas contendo adição de sílica ativa ou metacaulim, materiais mais finos, pudessem ser misturadas adequadamente.

A mistura mecânica e a moldagem foram executadas da mesma forma que as argamassas com cal. A cura térmica foi realizada a  $(38 \pm 2)$  °C durante 6 dias ou 27 dias, após 1 dia de cura à temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C. As rupturas foram realizadas com duas idades, 7 dias e 28 dias de idade.

A variável de resposta neste caso foi a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm. Nesta parte do experimento foi realizada a fixação da relação água/cimento e da relação água/finos como se pode verificar a seguir:

### Relação água/cimento = 0,80

Na Tabela 7, estão apresentadas as proporções de mistura das argamassas, em massa, para os diferentes tipos de adições minerais de cada argamassa fixando a relação água/cimento = 0,80.

Tabela 7 – Proporção de mistura das argamassas, relação água/cimento = 0,80.

Argamassas	Massa dos materiais (g)				Relação Água/ cimento (g/g)	Relação Água/ finos <sup>2</sup> (g/g)
	Cimento	Areia normal <sup>1</sup>	Adição mineral	Água		
Cimento CPV-ARI	312,0	936,0	0,0	249,6	0,80	0,80
Fíler calcário	202,8		94,2	162,2		0,55
Fíler quartzoso			90,7			0,55
Cinza de casca de arroz			74,0			0,59
Metacaulim			87,2			0,56
Sílica ativa			76,1			0,58
Material cerâmico 0,5 h			90,7			0,55
Material cerâmico 1,0 h			91,8			0,55
Material cerâmico 1,5 h			92,5			0,55
Material cerâmico 0,5 h 700 RR			89,7			0,55
Material cerâmico 1,0 h 700 RR			91,1			0,55
Material cerâmico 1,5 h 700 RR			90,7			0,55

<sup>1</sup> Areia normal brasileira (NBR 7214): 234 gramas de cada fração granulométrica.

<sup>2</sup> Relação água/finos: quociente entre a massa de água e a soma das massas de cimento Portland e adição mineral contidas na argamassa.

### Relação água/finos = 0,80

A Tabela 8 apresenta as proporções de mistura das argamassas, em massa, para a mistura de referência e para os diferentes tipos de adições minerais fixando a relação água/finos = 0,80.

Tabela 8 – Proporção de mistura das argamassas e relação água/finos = 0,80.

Argamassas	Massa dos materiais (g)				Relação Água/cimento (g/g)	Relação Água/ finos <sup>2</sup> (g/g)
	Cimento	Areia normal <sup>1</sup>	Adição mineral	Água		
Cimento CPV-ARI	312,0	936,0	0,0	249,6	0,80	0,80
Fíler calcário	202,8		94,2	237,6	1,17	
Fíler quartzoso			90,7	234,8	1,16	
Cinza de casca de arroz			74,0	221,4	1,09	
Metacaulim			87,2	232,0	1,14	
Sílica ativa			76,1	223,1	1,10	
Material cerâmico 0,5 h			90,7	234,8	1,16	
Material cerâmico 1,0 h			91,8	235,7	1,16	
Material cerâmico 1,5 h			92,5	236,2	1,16	
Material cerâmico 0,5 h 700 RR			89,7	234,0	1,15	
Material cerâmico 1,0 h 700 RR			91,1	235,1	1,16	
Material cerâmico 1,5 h 700 RR			90,7	234,8	1,16	

<sup>1</sup> Areia normal brasileira (NBR 7214): 234 gramas de cada fração granulométrica.

<sup>2</sup> Relação água/finos: quociente entre a massa de água e a soma das massas de cimento Portland e adição mineral contidas na argamassa.

### Argamassas com aditivo superplastificante (consistência constante)

Foram moldadas argamassas com cimento CPV-ARI contendo a substituição de 35% do volume de cimento pelas diferentes adições minerais e areia normal, além de uma argamassa de referência, sem adição, conforme preconiza a NBR 5752/12. A moldagem destas argamassas fez uso de aditivo superplastificante, onde foi mantida a relação água/finos constante em 0,80, e relação água/cimento constante em 0,80. Nestes casos, a consistência medida pela mesa de espalhamento foi ajustada com o uso do aditivo para que a consistência de todas as argamassas fosse a mesma da argamassa de referência.

A mistura mecânica foi executada colocando inicialmente na cuba toda a quantidade de água com aditivo superplastificante, e o cimento com a adição mineral. A mistura destes materiais foi feita com o misturador na velocidade baixa ( $140 \pm 5$  rpm em torno do eixo), durante 5 minutos. Após este tempo, e sem paralisar a operação de mistura, foi iniciada a colocação da areia normal, com o cuidado de que toda esta areia fosse colocada gradualmente durante o tempo de 30 s. Imediatamente após o término da colocação da areia, a velocidade foi alterada para alta ( $285 \pm 10$  rpm em torno do eixo),

misturando-se os materiais nesta velocidade por mais 14 minutos e 30 s, completando 20 minutos de mistura total da argamassa.

A moldagem foi executada da mesma forma que as argamassas com cal. Foram moldados 3 corpos de prova de cada argamassa para cada idade de ruptura e submetidos à cura térmica, realizada a  $(38 \pm 2)$  °C durante 6 dias ou 27 dias, após 1 dia de cura à temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C. As rupturas foram realizadas com duas idades, 7 dias e 28 dias.

A variável de resposta neste caso foi a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (5 x 10 cm). Nesta parte do experimento foi realizada a fixação da relação água/cimento e da relação água/finos com o uso de aditivo superplastificante como se pode verificar a seguir:

#### **Relação água/cimento = 0,80 com aditivo**

A Tabela 9 apresenta as proporções de mistura das argamassas, em massa, para os diferentes tipos de adições minerais de cada argamassa fixando a consistência das argamassas em  $370 \pm 5$  mm. Esta consistência se refere a argamassa de referência, utilizada como espalhamento pré-estabelecido para as demais e a relação água/cimento = 0,80 e com o uso de aditivo superplastificante, sendo estabelecido os teores de aditivo por tentativa e erro.



Tabela 9 – Proporção de mistura das argamassas, relação água/cimento = 0,80 e aditivo (espalhamento de  $370 \pm 5$  mm).

Argamassas	Massa dos materiais (g)					Teor de aditivo em relação à massa de cimento (%)	Relação Água/cimento (g/g)
	Cimento	Areia normal <sup>1</sup>	Adição mineral	Água	Aditivo <sup>2</sup>		
Cimento CPV-ARI	312,0	936,0	0,0	249,6	0,00	0,0	0,80
Fíler calcário	202,8		94,2	162,2	3,24	1,6	
Fíler quartzoso			90,7	162,2	3,24	1,6	
Cinza de casca de arroz			74,0	162,2	3,24	1,6	
Metacaulim			87,2	162,2	4,05	3,0	
Sílica ativa			76,1	162,2	4,05	3,0	
Material cerâmico 0,5 h <sup>3</sup>			6,08	90,7	162,2	3,0	
Material cerâmico 1,0 h <sup>3</sup>				91,8	162,2	3,0	
Material cerâmico 1,5 h <sup>3</sup>				92,5	162,2	3,0	
Material cerâmico 0,5 h 700 RR <sup>3</sup>				89,7	162,2	3,0	
Material cerâmico 1,0 h 700 RR <sup>3</sup>				91,1	162,2	3,0	
Material cerâmico 1,5 h 700 RR <sup>3</sup>				90,7	162,2	3,0	

<sup>1</sup> Areia normal brasileira (NBR 7214): 234 gramas de cada fração granulométrica.

<sup>2</sup> Foi descartado o valor do aditivo na relação água/cimento.

<sup>3</sup> As argamassas com adição de material cerâmico não atingiram o espalhamento esperado, os valores pouco alteravam com o aumento do teor de aditivo.

### Relação água/finos = 0,80 com aditivo

A Tabela 10 apresenta as proporções de mistura das argamassas, em massa, para a mistura de referência e para os diferentes tipos de adições minerais fixando a consistência das argamassas em  $370 \pm 5$  mm e a relação água/finos = 0,80 e com o uso de aditivo superplastificante.

Tabela 10 – Proporção de mistura das argamassas e relação água/finos = 0,80 e aditivo (espalhamento de  $370 \pm 5$  mm).

Argamassas	Massa dos materiais (g)					Teor de aditivo em relação à massa de cimento (%)	Relação Água/finos <sup>3</sup> (g/g)
	Cimento	Areia normal <sup>1</sup>	Adição mineral	Água	Aditivo <sup>2</sup>		
Cimento CPV-ARI	312,0	936,0	0,0	249,6	0,00	0,0	0,80
Fíler calcário	202,8		94,2	237,6	2,02	1,0	
Fíler quartzoso			90,7	234,8	2,02	1,0	
Cinza de casca de arroz			74,0	221,4	2,02	1,0	
Metacaulim			87,2	232,0	6,08	2,0	
Sílica ativa			76,1	223,1	4,05	2,0	
Material cerâmico 0,5 h <sup>4</sup>			90,7	234,8	6,08	3,0	
Material cerâmico 1,0 h <sup>4</sup>			91,8	235,7	6,08	3,0	
Material cerâmico 1,5 h <sup>4</sup>			92,5	236,2	6,08	3,0	
Material cerâmico 0,5 h 700 RR <sup>4</sup>			89,7	234,0	6,08	3,0	
Material cerâmico 1,0 h 700 RR <sup>4</sup>			91,1	235,1	6,08	3,0	
Material cerâmico 1,5 h 700 RR <sup>4</sup>			90,7	234,8	6,08	3,0	

<sup>1</sup> Areia normal brasileira (NBR 7214): 234 gramas de cada fração granulométrica.

<sup>2</sup> Foi descartado o valor do aditivo na relação água/cimento.

<sup>3</sup> Relação água/finos: quociente entre a massa de água e a soma das massas de cimento Portland e adição mineral contidas na argamassa.

<sup>4</sup> As argamassas com adição de material cerâmico não atingiram o espalhamento esperado, os valores pouco alteravam com o aumento do teor de aditivo.

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Caracterização dos materiais

#### 4.1.1. Massa específica

A Tabela 11 apresenta os valores de massa específica dos materiais utilizados. Estes dados foram usados para o cálculo da quantidade de material a ser empregado no ensaio de determinação do índice de atividade pozolânica com cal e com cimento.

Tabela 11 - Massa específica dos materiais em estudo.

Amostras	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
Cimento CP V - ARI	3,13	
Hidróxido de cálcio	2,22	
Fíler calcário	2,70	
Fíler quartzoso	2,60	
Cinza de casca de arroz	2,12	
Metacaulim	2,50	
Sílica ativa	2,18	
Material cerâmico 0,5 h	2,60	Média 2,61
Material cerâmico 1,0 h	2,63	
Material cerâmico 1,5 h	2,65	
Material cerâmico 0,5 h 700 RR	2,57	
Material cerâmico 1,0 h 700 RR	2,61	
Material cerâmico 1,5 h 700 RR	2,60	

Nota-se pela Tabela 11 que há uma significativa diferença entre as massas específicas do cimento e dos demais materiais. Sendo as adições menos densas, a cinza de casca de arroz e a sílica ativa, com 2,12 e 2,18 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Dentre as adições, as mais densas são os fíleres calcário e quartzoso, seguidos da média do material cerâmico e do metacaulim.

#### 4.1.2. Área específica (Método de Blaine e BET)

A Tabela 12 apresenta os valores de área específica pelo método de Blaine e BET para as adições empregadas neste trabalho.

Tabela 12 - Área específica dos materiais em estudo.

Adições minerais	BLAINE (m <sup>2</sup> /kg)	BET (m <sup>2</sup> /kg)
Cimento CPV-ARI	451	1.070
Fíler calcário	760	1.413
Fíler quartzoso	795	1.227
Cinza de casca de arroz	696	14.692
Metacaulim	474	23.258
Sílica ativa	718	20.238
Material cerâmico 0,5 h	271	12.974
Material cerâmico 1,0 h	330	13.078
Material cerâmico 1,5 h	494	13.112
Material cerâmico 0,5 h 700 RR	238	12.864
Material cerâmico 1,0 h 700 RR	298	12.885
Material cerâmico 1,5 h 700 RR	563	12.953

De acordo com a Tabela 12, como o método de adsorção de nitrogênio (BET) mede a área superficial dos poros/microporos, os resultados de superfície específica BET se mostraram bem maiores que aqueles da técnica Blaine, o qual mede apenas a área da superfície externa, incluindo rugosidades e grandes poros abertos. Observa-se que a superfície específica do material cerâmico são próximas umas das outras para o método BET, enquanto para o método Blaine houve um acréscimo na área superficial com o aumento do tempo de moagem. Os fíleres calcário e quartzoso apresentaram semelhança quando comparados entre si. Pelo método BET, a sílica ativa e o metacaulim apresentam finura  $\approx 40\%$  superior em relação ao material cerâmico e a cinza de casca de arroz.

Segundo requisitos físicos da norma NBR 15894/10, para o metacaulim a área específica BET é opcional, mas quando realizada deve ser igual ou superior a 15.000 m<sup>2</sup>/kg, portanto, a amostra encontra-se acima do limite mínimo.

Comparando as dados de superfície específica por BET e pelo método Blaine, verifica-se que além de os resultados não seguirem a mesma escala de grandeza, não existiu relação entre os resultados dos dois ensaios, como indicado na Figura 25.

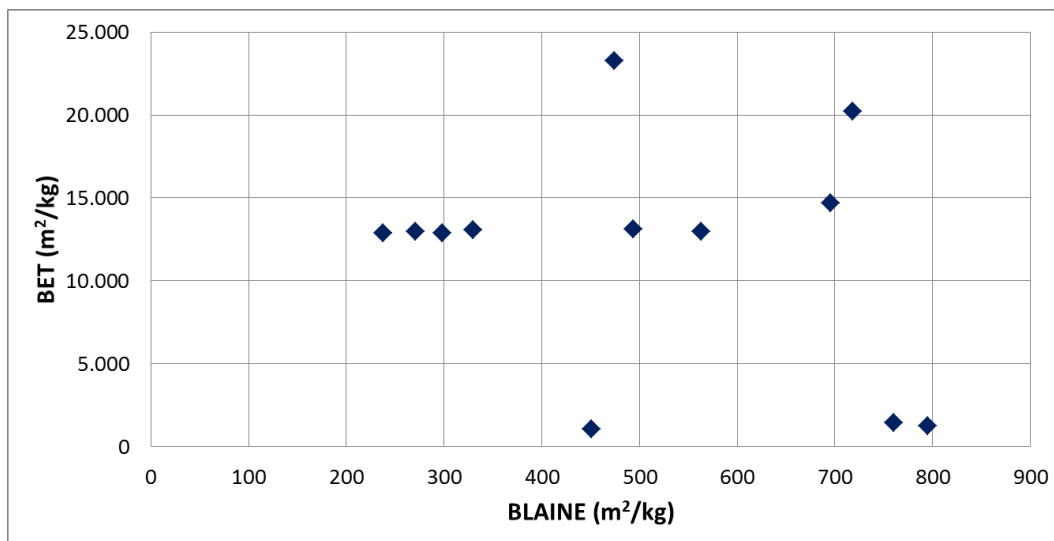


Figura 25 – Correlação entre a área específica obtida pelo método BET e pelo método Blaine.

#### 4.1.3. Distribuição granulométrica a laser

A Figura 26 apresenta a distribuição granulométrica das adições minerais utilizadas, além do cimento e do hidróxido de cálcio utilizados na execução das argamassas. Avaliando 50% da massa do material, a curva granulométrica do cimento CPV ARI, apenas os materiais cerâmicos moídos por 1,5 h e 1,0 h possuem finura superior, sendo a amostra com moagem de 1,5 h a com maior grau de finura dentre todas as analisadas. As amostras de fíler quartzoso e materiais cerâmicos se destacaram apresentando finura superior ao metacaulim e a sílica ativa. O menor grau de finura foi obtido com a amostra de fíler calcário.

O resultado apresentado para a sílica ativa e para o metacaulim não condizem com os apresentados pela área específica, pois usualmente, a sílica ativa é comercializada na forma densificada, devido às facilidades de manuseio, transporte e armazenamento e para o metacaulim a calcinação influencia na aglomeração das partículas conforme Rezende (2013).

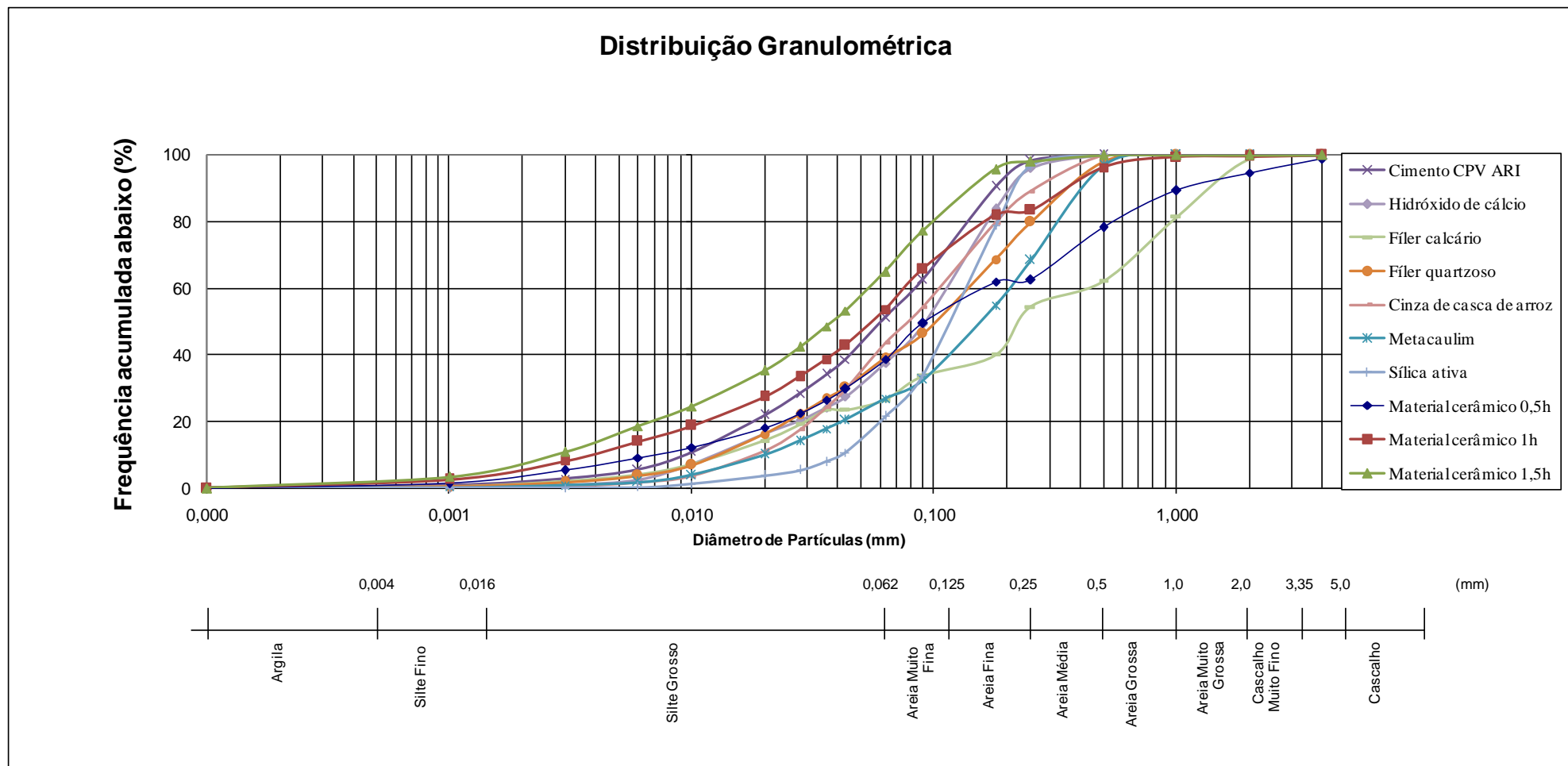


Figura 26 - Curva granulométrica dos materiais utilizados.

#### 4.1.4. Fluorescência de raios-X

Nas amostras analisadas foram encontradas as porcentagens químicas representadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Composição Química das Amostras.

Amostras	Composição Química (%)														
	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	ZnO	MnO	CuO	Rb <sub>2</sub> O	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO
Cimento CPV-ARI	10,45	1,36	3,71	73,21	3,59	-	0,26	3,05	3,66	0,02	0,14	-	-	0,11	0,43
Fíler calcário	1,76	0,36	0,52	84,16	1,15	-	-	0,62	11,07	-	0,14	-	-	-	0,22
Fíler quartzoso	95,65	-	-	-	2,43	-	0,04	1,77	-	0,02	-	0,02	-	-	-
Cinza de casca de arroz	88,94	4,18	0,11	1,10	2,42	0,24	-	2,08	-	0,01	0,88	0,02	0,02	0,00	-
Metacaulim	45,86	-	3,90	0,14	46,05	-	2,22	1,69	-	0,01	0,01	0,01	0,01	-	0,01
Sílica ativa	92,49	2,76	0,13	0,51	1,91	-	-	2,08	-	0,02	0,07	0,02	0,01	-	-
Material cerâmico	52,93	2,71	10,46	0,36	30,31	-	1,71	1,22	-	0,02	0,09	-	0,02	-	0,02

De acordo com as exigências químicas especificadas pela ABNT para materiais pozolânicos, dentre as adições testadas, apenas o fíler calcário não atende ao mínimo exigido (Tabela 14) no somatório dos teores de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Tabela 14 - Requisitos químicos de acordo com a NBR 12653.

Propriedades	Classes de Material Pozolânico		
	N	C	E
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % mín.	70	70	50
SO <sub>3</sub> % máx.	4,0	5,0	5,0
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, % máx.	1,5	1,5	1,5
Onde: Classe N: pozolanas naturais e artificiais (argilas calcinadas); Classe C: cinzas volantes e materiais resultantes da queima do carvão; Classe E: os que não enquadram nas classes N ou C.			

Os requisitos químicos para o metacaulim são especificados pela NBR 15894/10, as porcentagens encontradas na análise química cumprem o exigido para o teor de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) compreendido entre 44 e 65% e somatório dos teores de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) inferior a 1,5%. O limite superior de

46% apresentado pelo teor de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) corresponde a um metacaulim puro. Não foi atendido o requisito de teor de  $\text{SO}_3$ , devendo este manter-se abaixo de 1,5%.

#### 4.1.5. Chappelle modificado

A Tabela 15 apresenta os resultados do ensaio Chappelle Modificado para as adições minerais empregadas neste trabalho.

Tabela 15 – Ensaio de Chappelle Modificado dos materiais em estudo.

Adições minerais	Atividade pozolânica (mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /g amostra)
Fíler calcário	174
Fíler quartzoso	140
Cinza de casca de arroz	<b>1336</b>
Metacaulim	<b>1193</b>
Sílica ativa	<b>1542</b>
Material cerâmico 0,5 h	<b>454</b>
Material cerâmico 1,0 h	<b>516</b>
Material cerâmico 1,5 h	<b>537</b>
Material cerâmico 0,5 h 700 RR	520
Material cerâmico 1,0 h 700 RR	<b>537</b>
Material cerâmico 1,5 h 700 RR	<b>545</b>

As adições podem ser consideradas pozolanas a serem incorporadas à composição do cimento Portland quando o consumo de  $\text{CaO}$  é superior a 330 mg  $\text{CaO/g}$  pozolana, por estequiometria, este valor corresponde a 436 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  pozolana. Desta forma, é possível afirmar que as adições inertes, de origem calcária e quartzosa não apresentaram reatividade, as cerâmicas moídas possuem alguma reatividade sendo classificadas como pozolanas e a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim apresentaram elevado consumo de hidróxido de cálcio, sendo portanto, considerados pozolanas de alta reatividade.

De acordo com a NBR 15894/10, no caso do metacaulim, a atividade pozolânica através do método Chappelle é opcional, mas quando este for utilizado como forma de análise, deverá apresentar mínimo de 750 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ , portanto o material em estudo cumpre este requisito da norma.



#### 4.1.6. Difração de raios-X

A Figura 27 apresenta os difratogramas de raios-X do fíler calcário e do fíler quartzoso. Na amostra de fíler calcário foram identificados, pelo International Centre of Diffraction Data (ICDD), picos característicos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) provenientes da sua composição. Na amostra de fíler quartzoso, foi identificado quartzo como única fase cristalina.

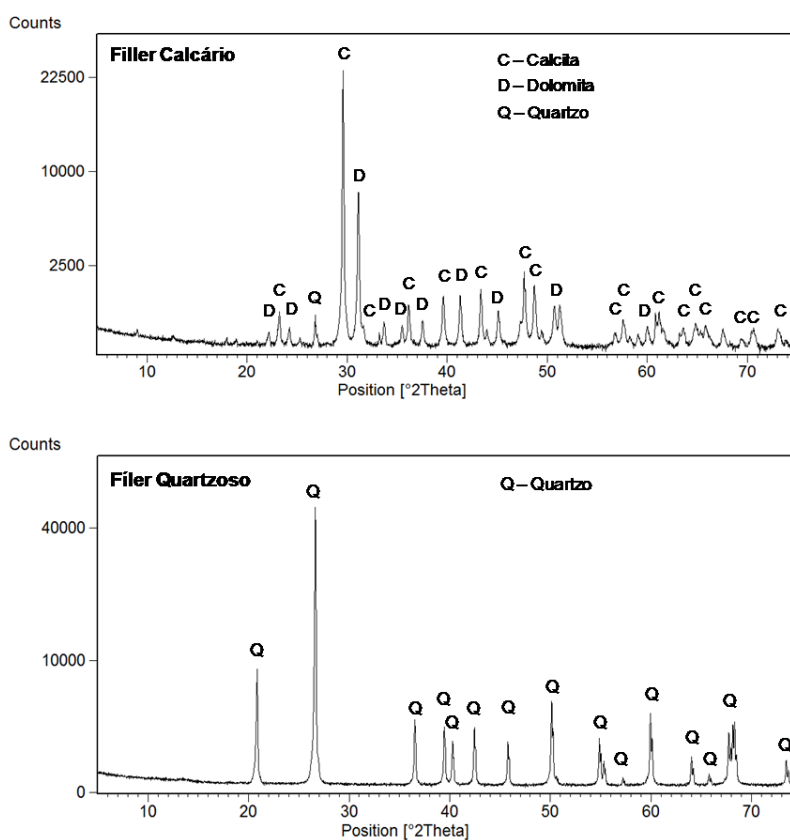


Figura 27 - Difratogramas das amostras de fíler calcário e quartzoso no estado anidro.

Não houve evidências da presença de halo amorfo, comprovando assim que tais adições minerais são inertes, podendo ser utilizadas como material de enchimento para melhorar o empacotamento das partículas.

Nas adições minerais ativas foi identificado halo amorfo característico de estrutura vítrea. A seguir estão apresentados os difratogramas das diferentes amostras,

com a identificação das fases cristalinas presentes nas adições minerais. Na amostra de cinza de casca de arroz (Figura 28) foram identificados picos referentes à cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ), uma das formas polimórficas do dióxido de silício, indicando haver, além da estrutura vítrea da pozolana, uma estrutura cristalina.

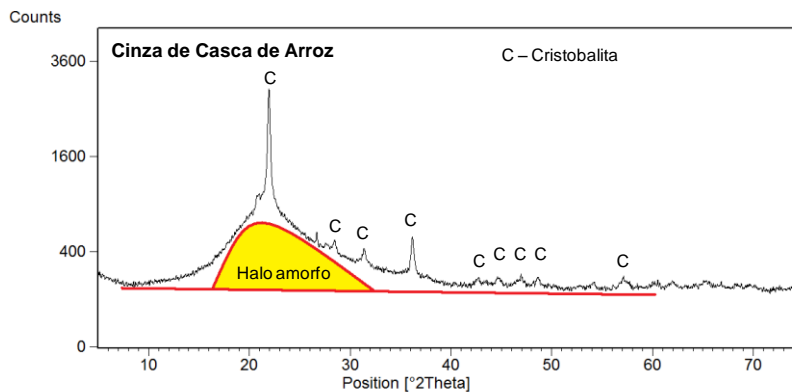


Figura 28 - Difratograma da amostra de cinza de casca de arroz no estado anidro.

O difratograma do metacaulim (Figura 29), apresentou picos característicos de quartzo, caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5\cdot(\text{OH})_4$ ) e muscovita ( $\text{K}\cdot\text{Al}_2\cdot(\text{Al}\cdot\text{Si}_3\cdot\text{O}_{10})\cdot(\text{OH})_2$ ), mas além das fases cristalinas, também houve presença de uma estrutura vítrea, representada pelo halo amorfo no difratograma, constituída basicamente de sílica e alumina sem arranjo atômico característico, como também constatado por Medina (2011).

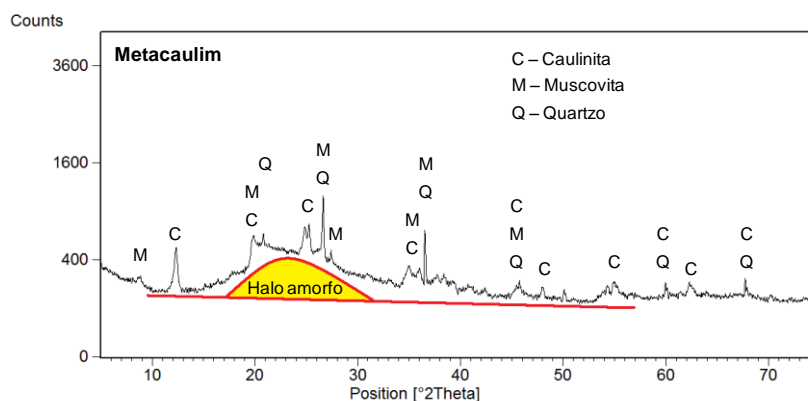


Figura 29 – Difratograma da amostra de metacaulim no estado anidro.

A amostra de sílica ativa apresenta-se totalmente amorfa (vítrea), conforme apresentado na Figura 30, com a ocorrência do halo amorfo característico de materiais pozolânicos.

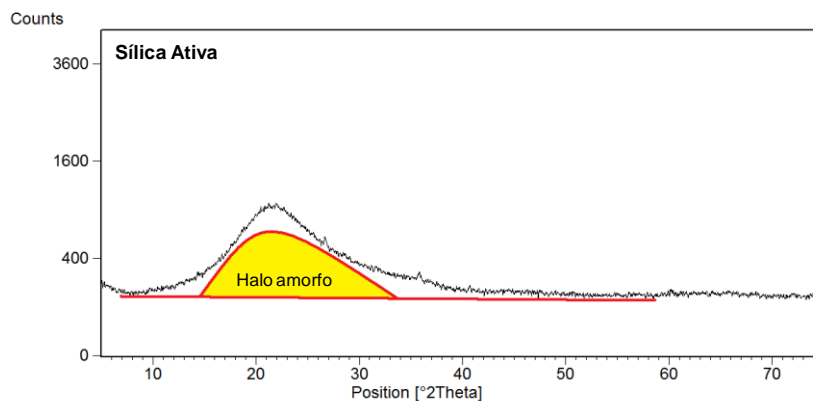


Figura 30 - Difratograma da amostra de sílica ativa no estado anidro.

Na amostra de material cerâmico (Figura 31) foram encontrados picos referentes ao quartzo, ilita ( $K.Al_2.(Si_3.Al).O_{10}.(OH)_2$ ) e hematita ( $Fe_2O_3$ ). Este material apresenta um singelo halo amorfo, o que lhe permite interagir quimicamente com a cal, formando compostos hidratados. A presença de halo amorfo justifica a capacidade desta adição em fixar cal, conforme observado no ensaio Chappelle Modificado e, também, na determinação com IAP com cal.

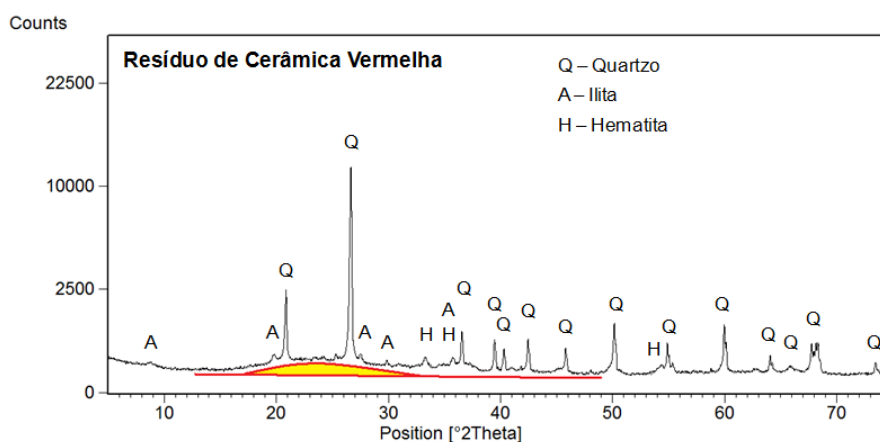


Figura 31 - Difratograma da amostra de material cerâmico no estado anidro.

#### 4.1.7. Análise termogravimétrica

Pela análise termogravimétrica do cimento CP V – ARI, estão destacadas três principais faixas de perda de massa. Como pode ser observado na Figura 32, a primeira entre 35 °C e 340 °C, refere-se à decomposição do C-S-H, da gipsita, da etringita e da singenita ( $K_2SO_4 \cdot CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). A segunda faixa, entre 340 °C e 485 °C, ocorre a decomposição da portlandita, e a terceira, entre 485 °C e 1.000 °C, ocorre a decomposição do carbonato de cálcio.

Na curva termogravimétrica derivada (DTG) é possível observar que até 85 °C houve perda de massa referente à decomposição do C-S-H, com pico característico em 59 °C. Na faixa de temperatura entre 85°C e 180°C ocorreu a decomposição da gipsita, com formação de hemidrato ( $\approx 140$  °C) e, na sequência, de anidrita ( $\approx 150$  °C), e a decomposição da etringita. A decomposição da singenita ocorre entre 180 °C e 285 °C.

O teor de portlandita, obtido a partir do teor de água de composição determinado pela perda de massa entre 340°C e 485°C, resulta no valor de 3,70%. A presença de portlandita se deu pela hidratação da cal livre presente no cimento anidro e pela hidratação parcial das fases silicato (alita ( $C_3S$ ) e belita ( $C_2S$ )) durante a estocagem.

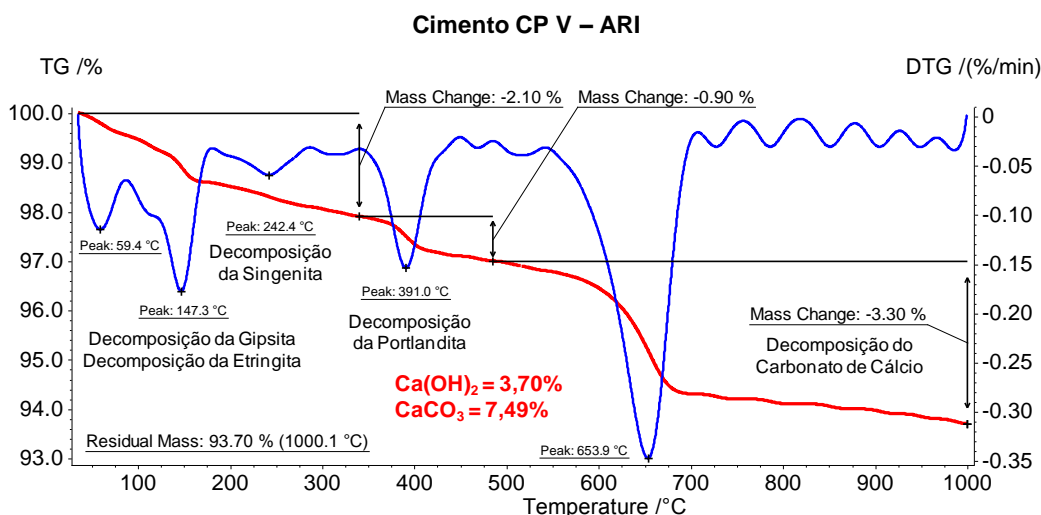


Figura 32 - Análise termogravimétrica do cimento CP V – ARI.

O carbonato de cálcio, proveniente do fíler calcário adicionado à composição do cimento, se decompõe a partir de 485 °C, com perda de massa referente ao anidrido carbônico de 3,30%, o que resulta em um teor de calcita de 7,49%. Assim sendo, o teor máximo possível de fíler calcário adicionado ao cimento foi de 8,80%, considerando que o teor de calcita mínimo contido no fíler foi de 85% (HOPPE FILHO, 2008).

O fíler calcário apresentou perda de massa, referente à volatilização do anidrido carbônico, na faixa compreendida entre 550 °C e 1.000 °C, de 43,39%, o que resulta em 98,50% de carbonato de cálcio na sua composição (Figura 33). A análise por difração de raios X permitiu identificar a presença de dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) no fíler, a qual se decompõe, termicamente, de forma distinta à calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). De acordo como Soares Filho (2010), a dolomita apresenta dois picos característicos na termogravimetria derivada onde, o primeiro, se refere à volatilização do anidrido carbônico combinado ao óxido de magnésio, e o segundo, ao óxido de cálcio; descarbonatações que ocorrem em temperaturas superiores à 550 °C. A não distinção dos picos referentes à dolomita na análise da termogravimetria derivada indica que o seu teor é bastante pequeno, o que resultou em sobreposição do pico de decomposição da calcita aos picos de decomposição da dolomita. A análise mais criteriosa do teor de dolomita na amostra requer a análise química do fíler calcário, com indicação do percentual total e, também, do teor livre de óxido de magnésio. Assim sendo, adotou-se, a priori, para fins de análise, que a totalidade do anidrido carbônico está combinada na forma de carbonato de cálcio.

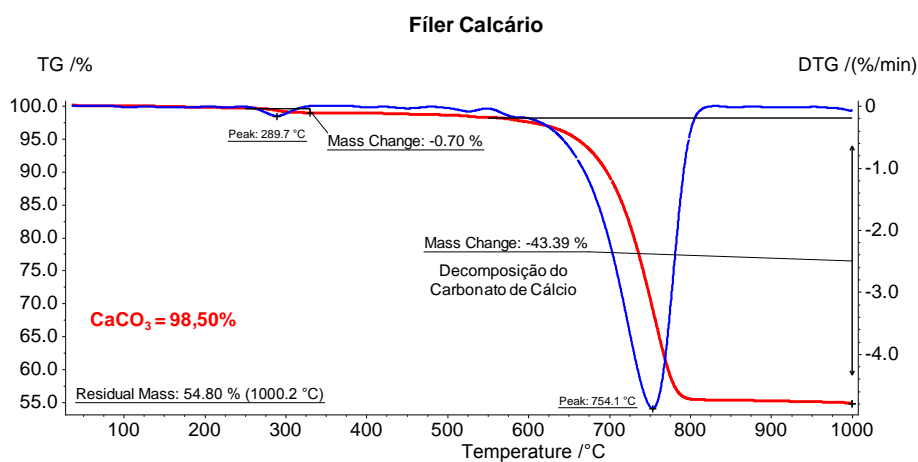


Figura 33 - Análise termogravimétrica do fíler calcário.

O filer quartzoso apresentou perda de massa total de 1,30% que, ao ser analisada em conjunto com a termogravimetria derivada (Figura 34), permitiu concluir que não houve volatilização de água e/ou anidrido carbônico da amostra, haja vista não haver qualquer pico característico de decomposição de estrutura hidratada e/ou carbonatada e, sim, indícios de ruídos oriundos da aquisição de dados pelo equipamento de ensaio. A perda de massa até a temperatura de 100 °C foi inexistente, o que indicou que não houve umidade na amostra.

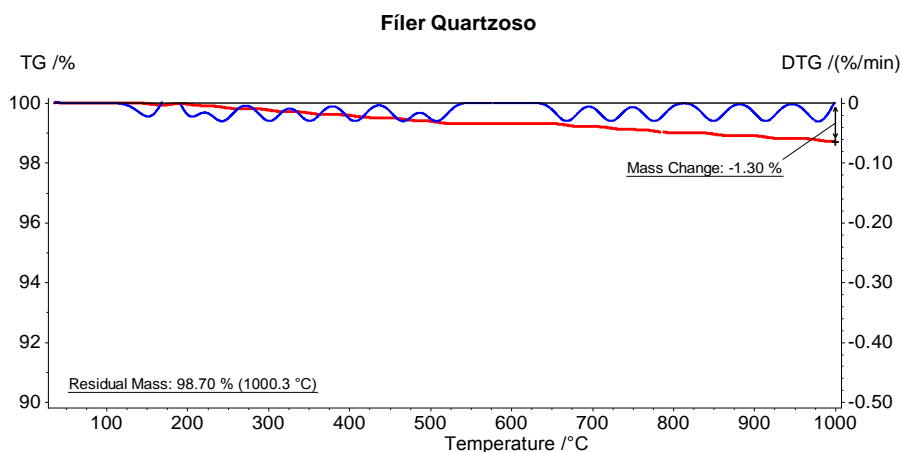


Figura 34 - Análise termogravimétrica do filer quartzoso.

A análise térmica da cinza de casca de arroz resultou em perda de massa total de 3,00%, com valor de 0,20% aos 100°C, atribuído à água adsorvida na estrutura alveolar peculiar desta pozolana (Figura 35).

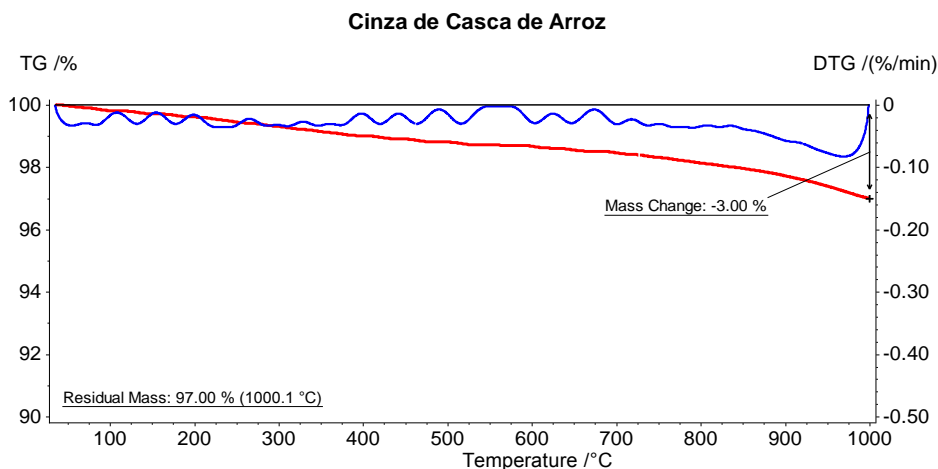


Figura 35 - Análise termogravimétrica da cinza de casca de arroz.

Pela termogravimetria derivada da cinza de casca de arroz não foi destacado qualquer pico significativo relacionado à decomposição de composto hidratado e/ou carbonatado. Portanto, a perda de massa obtida no ensaio pode estar relacionada com a volatilização de matéria orgânica remanescente na cinza de casca de arroz, a qual não teve processo de combustão devido à natureza inerte do gás de purga, isto é, inexistência de oxigênio no entorno da amostra.

A caracterização do metacaulim, por análise térmica (TG/DTG), resultou em perda de massa total de 6,60%, com ênfase na perda de massa ocorrida entre 380 °C e 625 °C, referente à desidratação da caulinita (Figura 36). A primeira perda de massa, até 100 °C, se refere à umidade contida na amostra, com valor de 0,46%.

Na sequência, ocorre a perda das moléculas de água adsorvida na superfície externa das partículas do metacaulim. A partir de 380 °C ocorreu a desidroxilação da caulinita remanescente, com término a 625 °C, indicando que a calcinação para obtenção do metacaulim não foi completa (MEDINA, 2011). A perda de massa acima de 625 °C não está relacionada a qualquer decomposição, haja vista a ausência de picos característicos na termogravimetria derivada. Assim sendo, esta variação pode ser atribuída à ruídos de ensaio.

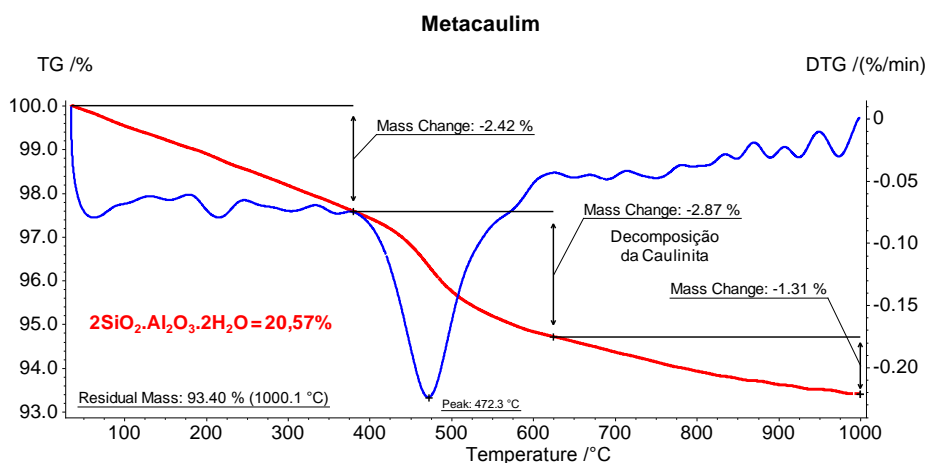


Figura 36 - Análise termogravimétrica do metacaulim.

A sílica ativa apresentou perda de massa de 2,70% até 1.000°C, sem apresentar pico, na termogravimetria derivada, que caracterizasse qualquer decomposição térmica (Figura 37).

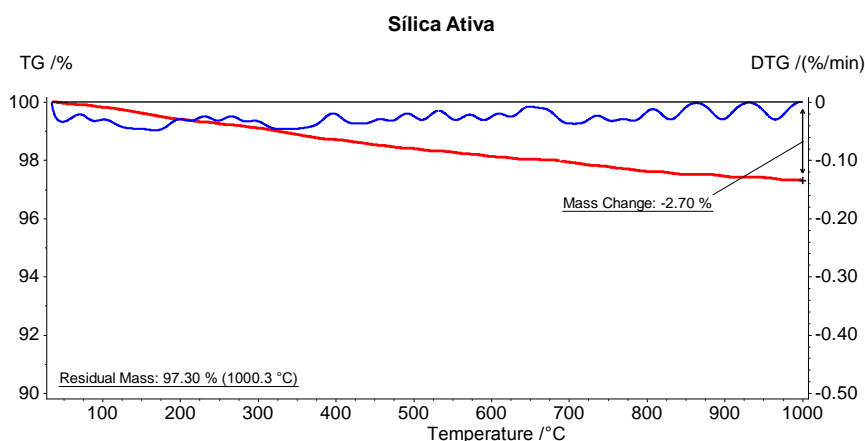


Figura 377 - Análise termogravimétrica da sílica ativa.

## 4.2. Argamassas de índice de atividade pozolânica da NBR 5751/12 e NBR 5752/12

### 4.2.1. Índice de atividade pozolânica com cal

A Figura 38 apresenta os resultados obtidos de resistência à compressão no ensaio de índice de atividade pozolânica com cal.

Como critério de análise estatística, para eliminação dos espúrios, utilizou-se a maior resistência obtida na amostra, sendo mantidos os maiores valores dos resultados à compressão. De acordo com Helene e Terzian (1949), deve-se desprezar o resultado que possui resistência mais baixa, pois alguma operação de ensaio foi a causadora dessa diminuição. Sendo assim, o valor mais alto representa melhor a resistência potencial, não porque as operações de ensaio tenham elevado o seu valor real, mas sim porque é a máxima resistência à compressão que pode representar à idade do ensaio.

No Apêndice 1 deste trabalho, encontram-se todos os dados obtidos nos ensaios realizados, sem a eliminação de quaisquer destes.



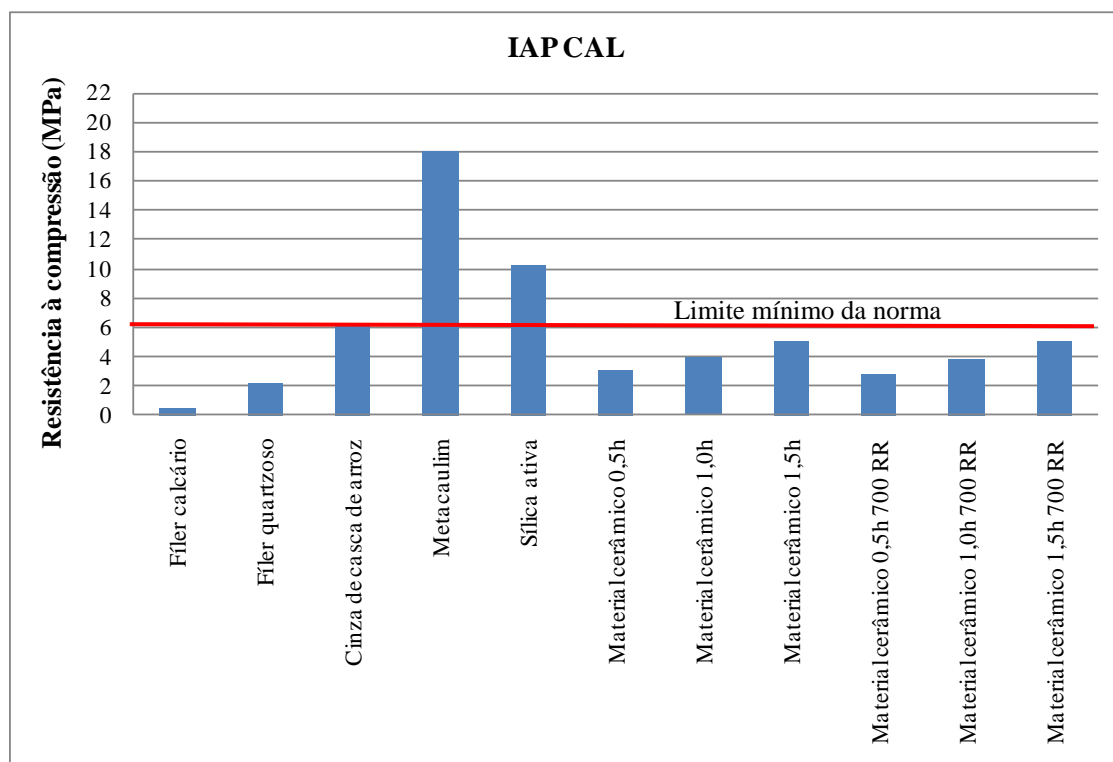


Figura 388 - Resultado resistência à compressão - IAP cal.

As argamassas com adições minerais inertes, ou seja, o fíler calcário e o fíler quartzoso, apresentaram resistência à compressão abaixo do mínimo de 6,0 MPa preconizado pela NBR 12653/12. Este comportamento evidencia que não houve atividade química significativa entre o hidróxido de cálcio e os materiais inertes estudados e, desta forma, estas adições não foram classificadas como pozolanas. As argamassas com adição de material cerâmico, independente do tempo de moagem ou de calcinação, também apresentaram resistências à compressão inferiores ao mínimo preconizado pela norma, embora seja evidente que existiram resultados próximos ao limite de classificação como pozolana. Isso pode ser explicado pelo leve indício de atividade pozolânica evidenciado no ensaio de Chapelle Modificado e pelo pequeno halo amorfo indicado no difratograma da Figura 31.

As argamassas contendo cinza de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim atingiram a resistência à compressão mínima preconizada pela NBR 12653/12 e, portanto, com base na metodologia de avaliação da atividade pozolânica proposta pela NBR 5751/12, foram classificadas como materiais pozolânicos passíveis de incorporação na composição de cimento Portland composto ou pozolânico. A avaliação

da cinza de casca de arroz resultou em resistência à compressão máxima de 6,3 MPa, valor muito próximo do mínimo estabelecido por norma, ou seja, uma pequena variação nos resultados experimentais poderia propiciar redução no valor de resistência à compressão, inviabilizando a sua classificação como pozolana.

A argamassa contendo metacaulim apresentou a maior resistência à compressão dentre as adições minerais ativas estudadas, atingindo 18,1 MPa aos 7 dias de idade, seguido da argamassa com sílica ativa, com resistência à compressão de 10,3 MPa.

Para validação destes resultados aplicou-se a ferramenta de análise de variância (ANOVA), que é utilizado na comparação de médias das amostras. Este método testa duas hipóteses:

- Hipótese nula (H<sub>0</sub>): os resultados de todas as amostras não diferem entre si;
- Hipótese alternativa (H<sub>1</sub>): pelo menos um resultado difere dos outros.

Verificou-se que os resultados são significativamente diferentes, com 95% de confiança, validando-se assim as análises posteriores, os procedimentos de cálculo da ANOVA foram realizados com o programa Action e podem ser visualizados na Tabela 16, a diferença entre os resultados é confirmada pelo fato de F ser maior do que F<sub>crítico</sub>.

Tabela 16 - Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão do IAP cal.

<b>Tabela da Anova</b>	<b>Grau de Liberdade</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>F</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>
Entre grupos	10	631,38	63,14	483,42	2,21 x 10 <sup>-23</sup>
Dentro dos grupos	22	2,87	0,13		

O Teste estatístico de Tukey (Figura 39) foi utilizado para comparação múltipla dos resultados, assim evidenciando as diferenças entre os produtos, também com um grau de confiança de 95%. O teste foi realizado com o auxílio do programa Action e as tabelas completas se encontram no Apêndice 1.

Os intervalos de confiança representam a interação entre duas amostras, caso haja a intersecção entre o intervalo do limite inferior e superior das amostras com o eixo vertical zero, pode-se afirmar que as diferenças entre elas não são significativas.

De acordo com o teste Tukey, foi possível afirmar que a calcinação do material cerâmico não teve influência significativa dentro de cada tempo de moagem, ou seja, a amostra de material cerâmico com moagem de 0,5 h e a amostra com moagem de 0,5 h e calcinação a 700 °C e resfriamento rápido, não apresentaram com 95% de confiança diferença significativa entre si, o mesmo ocorreu com as demais amostras de cerâmica vermelha em diferentes finuras e com ou sem calcinação seguido de resfriamento rápido. Não se rejeita a hipótese de igualdade entre o fíler quartzoso e as amostras de material cerâmico com moagem de 0,5 h e com moagem de 0,5 h e calcinação a 700 °C e resfriamento rápido. Entre as demais amostras não foi possível observar significância entre os resultados.

Filer calcário-Cinza de casca de arroz  
 Filer quartzoso-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Metacaulim-Cinza de casca de arroz  
 Sílica ativa-Cinza de casca de arroz  
 Filer quartzoso-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,0h-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,5h-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer calcário  
 Metacaulim-Filer calcário  
 Sílica ativa-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,0h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,5h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer quartzoso  
 Metacaulim-Filer quartzoso  
 Sílica ativa-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 0,5h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,0h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,5h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR  
 Sílica ativa-Metacaulim

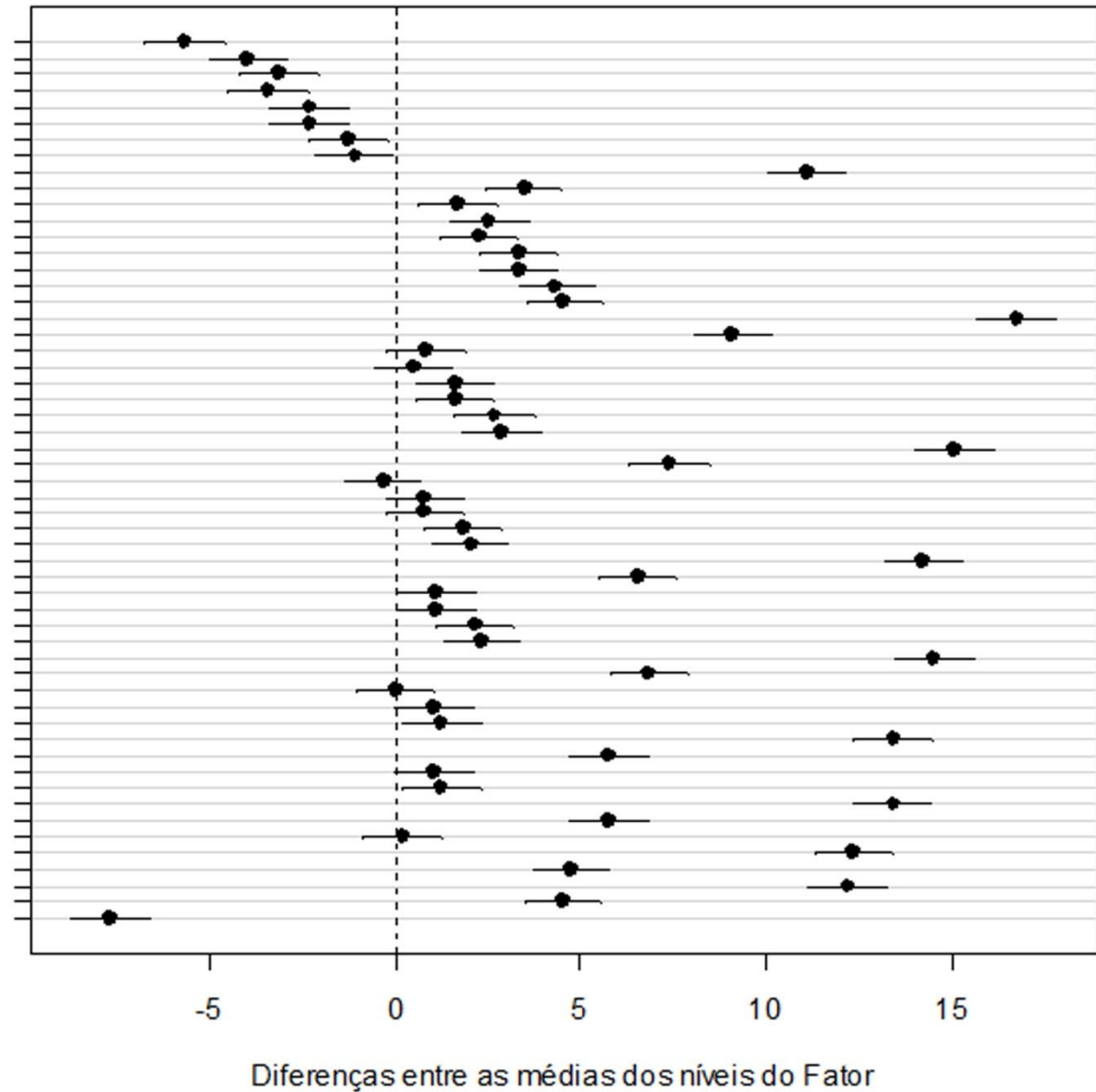


Figura 39 - Teste Tukey IAP com cal.

Nesta parte do trabalho optou-se por ir além da avaliação básica da NBR 5251/12 que avalia apenas a resistência à compressão. Então, a técnica de difração de raios-X foi empregada para investigar se houve hidróxido de cálcio e material amorfo remanescentes após o procedimento da norma.

Nesse sentido, na Figura 40 estão apresentados os difratogramas das pastas contendo adições minerais inertes, coletados após 7 dias de cura conforme as diretrizes da NBR 5751/12. A pasta moldada com fíler calcário apresentou picos característicos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), oriundos da adição mineral, e picos da portlandita utilizada na composição da pasta. A identificação da brucita se deu pela hidratação do óxido de magnésio presente no calcário durante o período de cura da pasta. Na pasta contendo fíler quartzoso, foram identificados, quartzo e portlandita.

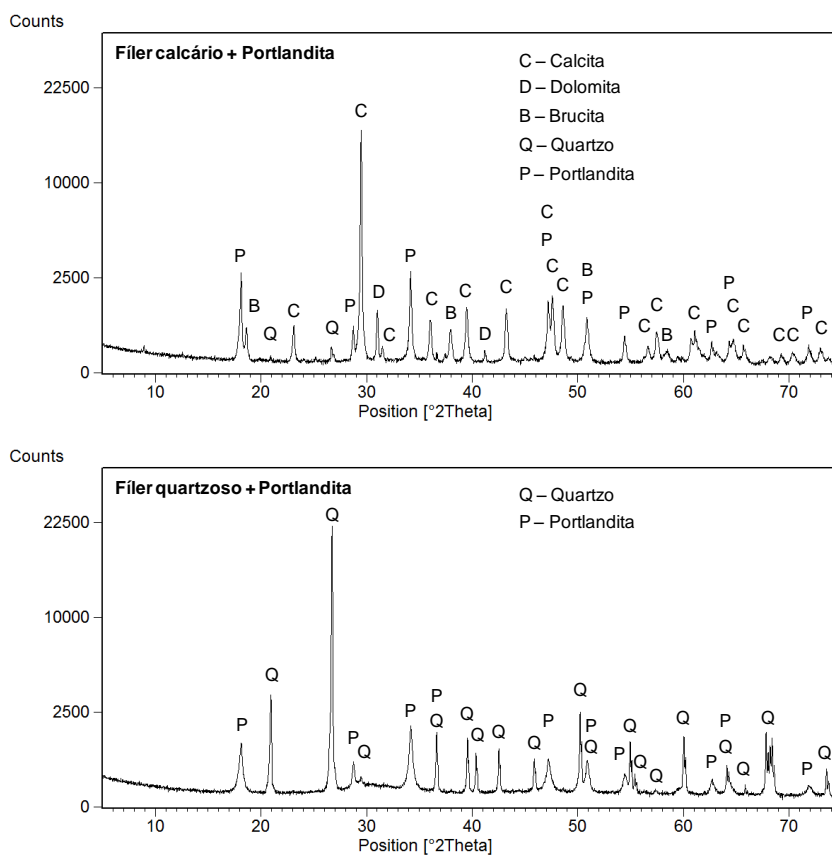


Figura 40 - Difratogramas das pastas com adições minerais inertes, após 7 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5751/12.

Não houve evidências, em ambas as pastas, da formação de qualquer produto hidratado, comprovando assim que tais adições minerais são inertes, podendo ser utilizadas como material de enchimento melhorando o empacotamento das partículas.

Nas pastas contendo adições minerais ativas foram identificados compostos hidratados e halo amorfo característico de estrutura vítrea, além do consumo de portlandita por atividade pozolânica. A seguir são apresentados os difratogramas das diferentes pastas, com a identificação das fases cristalinas presentes nas adições minerais e os compostos hidratados formados.

Na pasta com cinza de casca de arroz (Figura 41) foram identificados picos referentes à calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e à cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ), uma das formas polimórficas do dióxido de silício, indicando haver, além da estrutura vítrea da pozolana, uma estrutura cristalina metaestável. O halo amorfo destacado no difratograma indica que, na idade de 7 dias, a atividade pozolânica não consumiu totalmente a sílica amorfa e, portanto, houve potencial para que a reação tivesse prosseguimento, desde que houvesse disponibilidade de cal e maior tempo de cura. A identificação de portlandita possibilitou haver continuidade da reação química, interrompida pelo término do ensaio. Assim sendo, o período de tempo estabelecido pela norma, apesar da catalisação da reação pela cura térmica ( $55 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ), não foi suficiente para que a cinza de casca de arroz consumisse totalmente a portlandita disponível, interferindo no resultado de carga de ruptura à compressão.

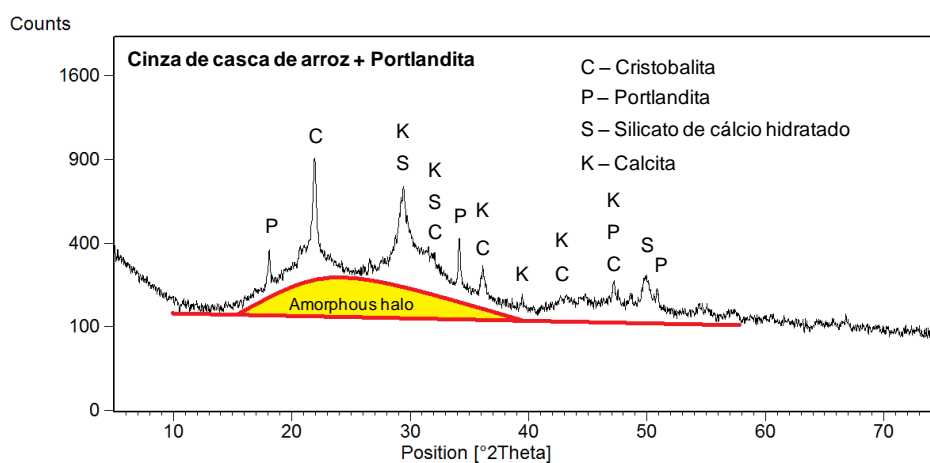


Figura 41 – Difratograma da pasta com cinza de casca de arroz, após 7 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5751/12.

O metacaulim consumiu totalmente a portlandita disponível, formando C-S-H e sílico-aluminato de cálcio hidratado, sem que houvesse o esgotamento da matriz vítrea, identificada pela presença no halo amorfo no difratograma (Figura 42).

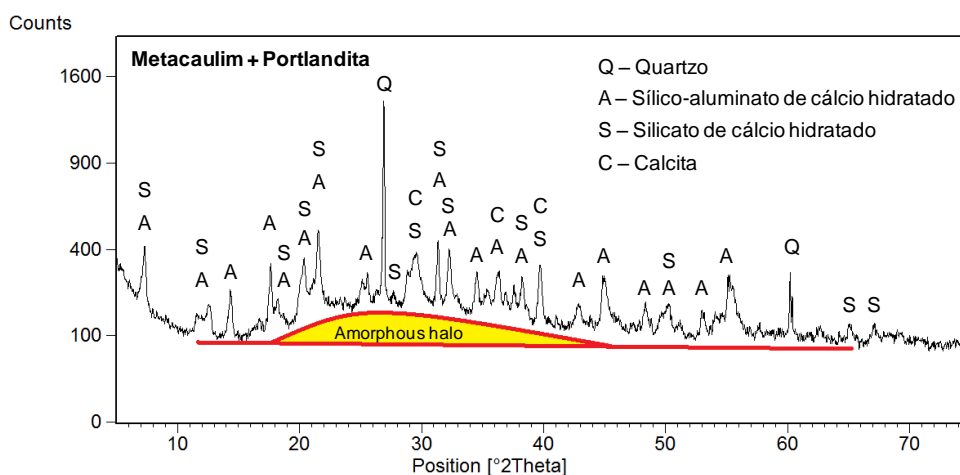


Figura 42 – Difratograma da pasta com metacaulim, após 7 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5751/12.

A pasta pozolânica com sílica ativa apresentou halo amorfo, indicando haver matriz vítrea remanescente, e picos característicos do C-S-H e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) (Figura 43).

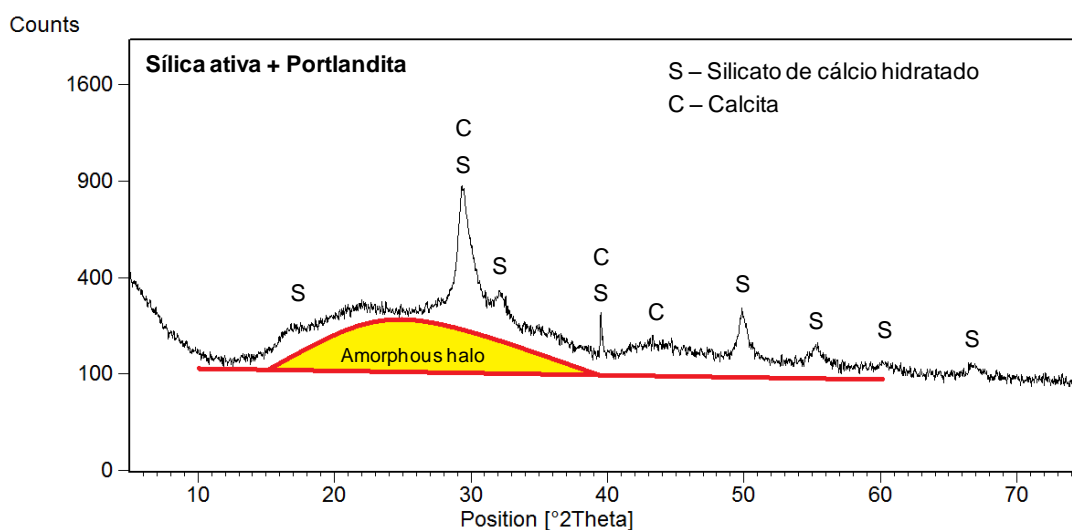


Figura 43 – Difratograma da pasta com sílica ativa, após 7 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5751/12.

Na pasta com sílica ativa e, também na pasta com metacaulim, a portlandita foi totalmente consumida e, desta forma, não houve presença de picos que a identificassem no difratograma. A sílica ativa consumiu toda a portlandita da pasta e ainda houve sobra de material amorfo, indicando que se existisse mais hidróxido de cálcio disponível na pasta, a reação pozolânica seguiria ocorrendo. Ou seja, a capacidade pozolânica desta adição foi subestimada nesta aplicação da NBR 5751/12, sendo um indicativo de falha desta norma quando empregada para comparar a atividade pozolânica de adições para concreto.

Os resultados da difração de raios-X evidenciaram que a determinação do índice de atividade pozolânica com cal segundo a norma, não considera parâmetros importantes que influenciam o resultado de resistência à compressão quando utilizadas adições minerais de alta reatividade. O principal parâmetro desconsiderado é a disponibilidade de portlandita durante o período de ensaio. Ou seja, quando as reações pozolânicas são interrompidas, deve haver reserva alcalina, caso contrário, o potencial reativo das adições minerais no período de tempo pré-estabelecido pode ser avaliado incorretamente, em virtude da indisponibilidade de cal a ser fixada na formação dos compostos hidratados. Isto repercute negativamente na resistência à compressão, tornando a comparação da atividade pozolânica pelo IAP com cal imprecisa.

A Figura 44 apresenta, em destaque, o pico de maior intensidade da portlandita nos diferentes difratogramas, evidenciando o seu esgotamento nos sistemas contendo sílica ativa e metacaulim, com resquícios de teor remanescente na pasta com cinza de casca de arroz. Isso confirma que o uso de DRX é um meio importante de investigação da atividade pozolânica, permitindo evidenciar se existe portlandita e material pozolânico remanescente.



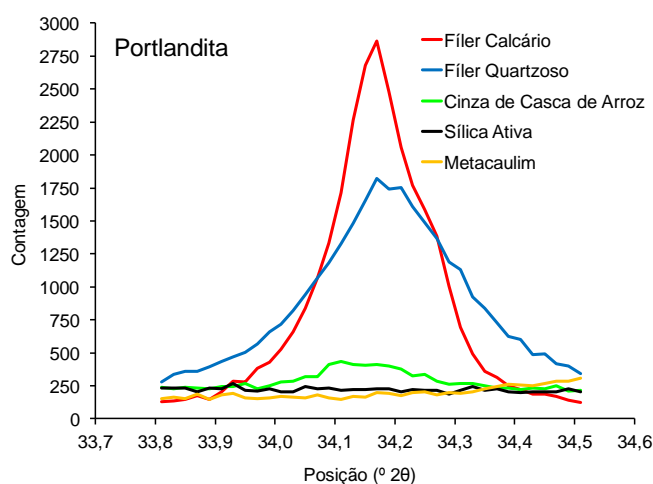


Figura 44 – Teor de portlandita remanescente nos diferentes sistemas de cal com adições minerais, após 7 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5751/12.

A presença de halo amorfo em alguns difratogramas significa que a atividade pozolânica foi interrompida, assim sendo, a disponibilidade de portlandita no sistema é imprescindível para que os outros fatores sejam avaliados, sejam eles, a área específica das adições minerais e a cinética de reação em função da composição química da amostra ensaiada.

Não foram realizadas análises de DRX no caso das amostras de cerâmica moída pelo fato de elas já não terem apresentado halo amorfo nos ensaios de caracterização por DRX e baixa reatividade no ensaio de Chapelle Modificado. Desse modo, optou-se por otimizar o número de amostras de ensaio e as 6 amostras de cerâmica foram excluídas destas análises por apresentarem baixa atividade pozolânica no IAP com cal.

#### 4.2.2. Índice de atividade pozolânica com cimento

A Figura 45 apresenta os resultados obtidos de resistência à compressão no ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento. Foram considerados os resultados de resistência à compressão seguindo os mesmos critérios das argamassas com cal.

A argamassa de referência atingiu a máxima resistência à compressão de 42,1 MPa, enquanto a substituição de 35% do volume de cimento pelas adições

minerais inertes (fíler calcário e fíler quartzoso) reduziu a resistência para, 23,5 e 24,0 MPa, respectivamente. As prescrições da norma NBR 12.653 estabelecem um percentual mínimo de 75% da resistência à compressão da argamassa de referência para atribuir potencial pozolânico à adição mineral ensaiada. Assim sendo, as argamassas com adições minerais devem atingir uma resistência mínima de 31,6 MPa, o que não ocorreu com as adições inertes, nem com as amostras de material cerâmico, portanto, não são consideradas pozolânicas, o que está de acordo com o ensaio realizado com cal.

Analisando os grupos de material cerâmico moído, deve-se destacar o efeito da finura, pois quanto mais fino o material, maior a resistência à compressão da argamassa, que pode ser causado pela melhora no empacotamento de partículas ou por uma leve reatividade do material que foi sendo potencializada pela elevação da área disponível para reação, conforme pode ser observado nos resultados de área específica pelo método Blaine. Vale salientar que este mesmo comportamento foi encontrado no IAP com cal.

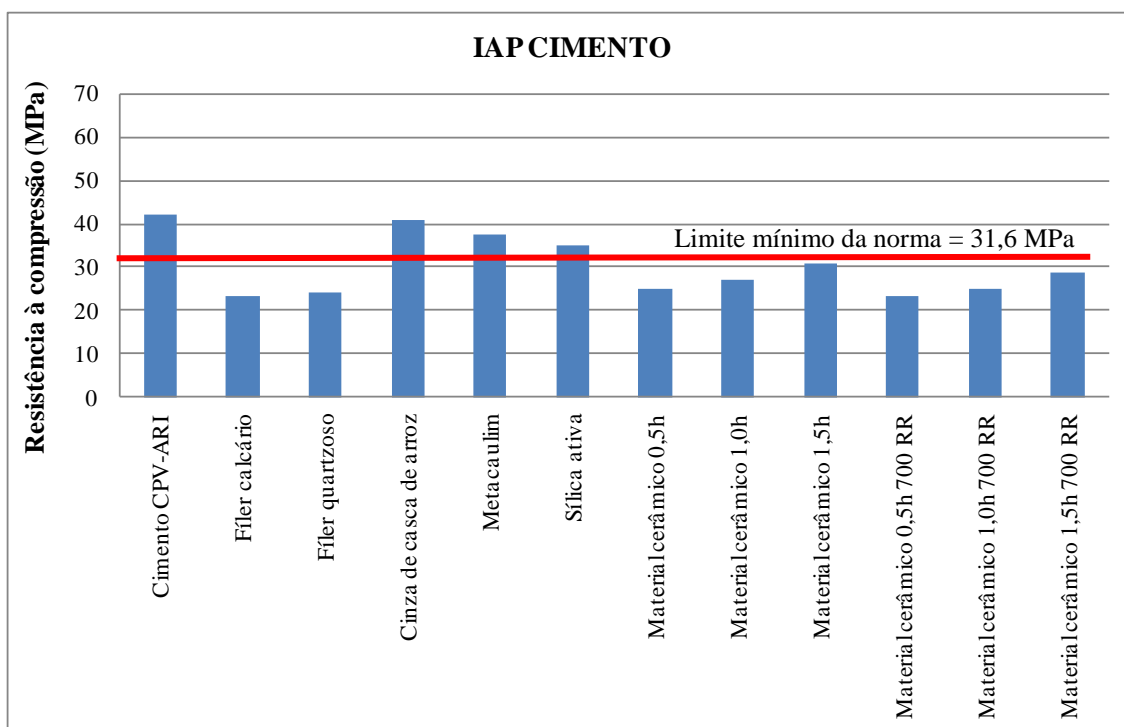


Figura 45 - Resistência à compressão - IAP cimento.

Todas as argamassas com adições ativas atingiram o percentual mínimo em relação à série de referência. A incorporação de cinza de casca de arroz resultou no

melhor desempenho mecânico, atingindo 40,9 MPa (97%), seguido do metacaulim com 37,3 MPa (89%), e da sílica ativa com resistência à compressão de 34,9 MPa (83%). A avaliação do material cerâmico moído por 1,5 h resultou em resistência à compressão média de 31,0 MPa, valor muito próximo do mínimo estabelecido por norma, ou seja, uma pequena variação nos resultados experimentais poderia propiciar acréscimo no valor médio de resistência à compressão, possibilitando a sua classificação como pozolana.

As argamassas com adições minerais inertes, ou seja, o fíler calcário e o fíler quartzoso, apresentaram resistência à compressão abaixo do mínimo preconizado pela NBR 12653/12. As argamassas com adição de material cerâmico, independente do tempo de moagem ou de calcinação, também apresentaram resistências à compressão inferiores ao mínimo preconizado pela norma.

Para validação destes resultados aplicou-se a ferramenta de análise de variância (ANOVA) conforme aplicado às argamassas com cal (Tabela 17).

Tabela 17- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão do IAP cimento.

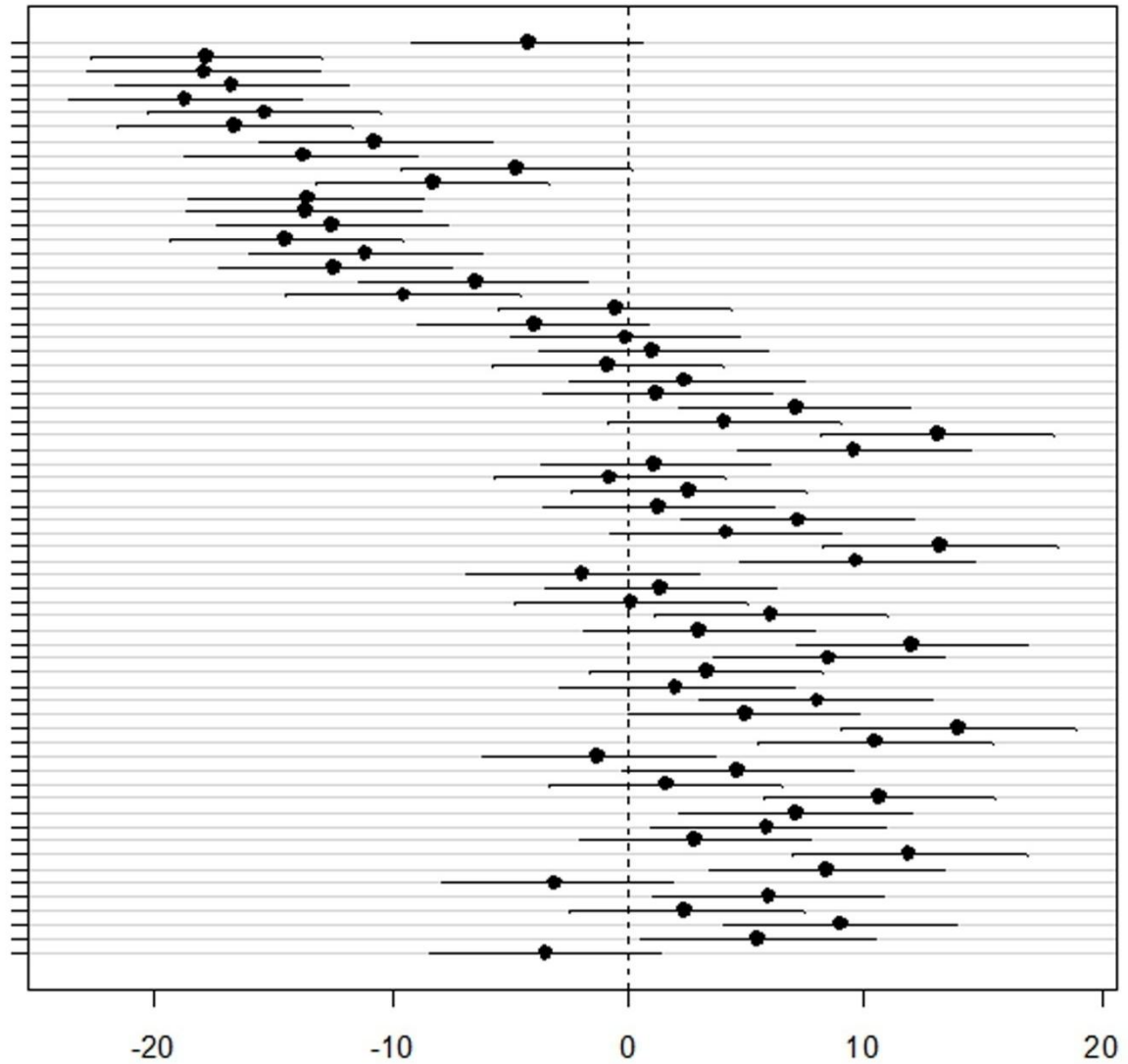
<b>Tabela da Anova</b>	<b>Grau de Liberdade</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>F</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>
Entre grupos	11	1334,60	121,33	43,26	$4,18 \times 10^{-13}$
Dentro dos grupos	24	67,30	2,80		

De acordo com o teste Tukey (Figura 46), as adições ativas apresentaram comportamento semelhante no que tange à resistência à compressão com teor volumétrico de 35%. Assim sendo, baseado somente na capacidade portante, é preferível utilizar a adição de menor valor agregado.

Os intervalos de confiança representam a interação entre duas amostras, caso haja a intersecção entre o intervalo do limite inferior e superior das amostras com o eixo vertical zero, pode-se afirmar que as diferenças entre elas não são significativas. Desta forma, as argamassas com adições do fíler calcário e fíler quartzoso não apresentaram diferença significativa entre si, assim como amostras cerâmicas com moagem de 0,5 h, com e sem calcinação, e material cerâmico com 1 h de moagem, com e sem calcinação.

Estas adições cerâmicas e os dois fíleres apresentaram semelhança entre si quando analisadas par a par, conforme pode ser observado na Figura 46.

- Cinza de casca de arroz-Cimento CPV-ARI
- Filer calcário-Cimento CPV-ARI
- Filer quartzoso-Cimento CPV-ARI
- Material cerâmico 0,5h-Cimento CPV-ARI
- Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI
- Material cerâmico 1,0h-Cimento CPV-ARI
- Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cimento CPV-ARI
- Material cerâmico 1,5h-Cimento CPV-ARI
- Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI
- Metacaulim-Cimento CPV-ARI
- Sílica ativa-Cimento CPV-ARI
- Filer calcário-Cinza de casca de arroz
- Filer quartzoso-Cinza de casca de arroz
- Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz
- Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz
- Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz
- Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz
- Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz
- Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz
- Metacaulim-Cinza de casca de arroz
- Sílica ativa-Cinza de casca de arroz
- Filer calcário-Filer calcário
- Material cerâmico 0,5h-Filer calcário
- Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer calcário
- Material cerâmico 1,0h-Filer calcário
- Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer calcário
- Material cerâmico 1,5h-Filer calcário
- Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer calcário
- Metacaulim-Filer calcário
- Sílica ativa-Filer calcário
- Material cerâmico 0,5h-Filer quartzoso
- Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer quartzoso
- Material cerâmico 1,0h-Filer quartzoso
- Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer quartzoso
- Material cerâmico 1,5h-Filer quartzoso
- Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer quartzoso
- Metacaulim-Filer quartzoso
- Sílica ativa-Filer quartzoso
- Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h
- Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h
- Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h
- Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h
- Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h
- Metacaulim-Material cerâmico 0,5h
- Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h
- Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR
- Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR
- Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR
- Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR
- Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR
- Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR
- Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h
- Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h
- Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h
- Metacaulim-Material cerâmico 1,0h
- Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h
- Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR
- Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR
- Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR
- Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR
- Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h
- Metacaulim-Material cerâmico 1,5h
- Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h
- Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR
- Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR
- Sílica ativa-Metacaulim



Diferenças entre as médias dos níveis do Fator

Figura 46 - Teste Tukey IAP com cimento.

Nesta parte do trabalho, além da avaliação pela resistência à compressão, conforme NBR 5252/12, foi utilizada a técnica de difração de raios-X para investigar as pastas de cimento CPV-ARI com as adições minerais.

Desta forma, a Figura 47 apresenta o difratograma da pasta de referência, contendo apenas cimento CPV-ARI, coletado após 28 dias de cura conforme as diretrizes da NBR 5752/12. A pasta moldada com cimento CPV-ARI apresenta picos característicos de portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), etringita, monocarboaluminato de cálcio hidratado e silicato de cálcio hidratado.

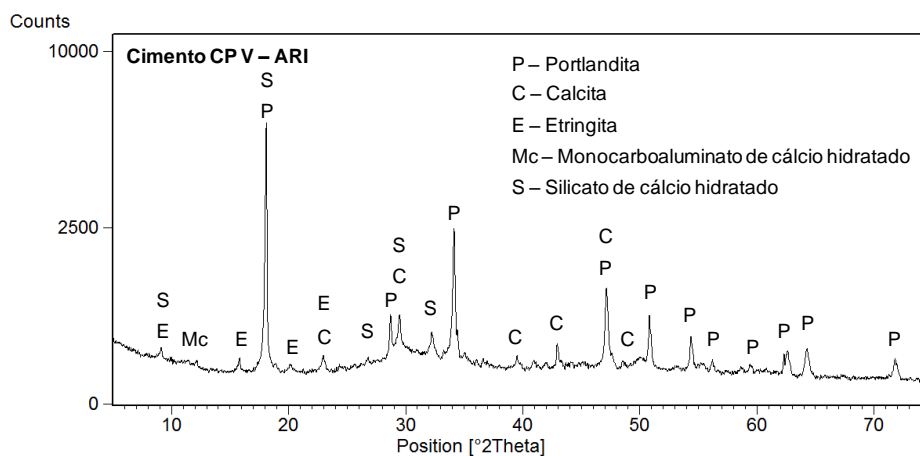


Figura 47 - Difratograma da pasta com CPV-ARI, após 28 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5752/12.

A Figura 48 apresenta os difratogramas das pastas contendo adições minerais inertes, coletados após 28 dias de cura conforme as diretrizes da NBR 5752/12. A pasta moldada com fíler calcário apresenta picos característicos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), oriundos da adição mineral, e picos da portlandita, etringita, monocarboaluminato de cálcio hidratado e silicato de cálcio hidratado na composição da pasta oriundos da hidratação do cimento. Na pasta contendo fíler quartzoso, foram identificados, quartzo, oriundo da adição mineral, portlandita, etringita, monocarboaluminato, silicato de cálcio hidratado e calcita na composição da pasta oriundos da hidratação do cimento.

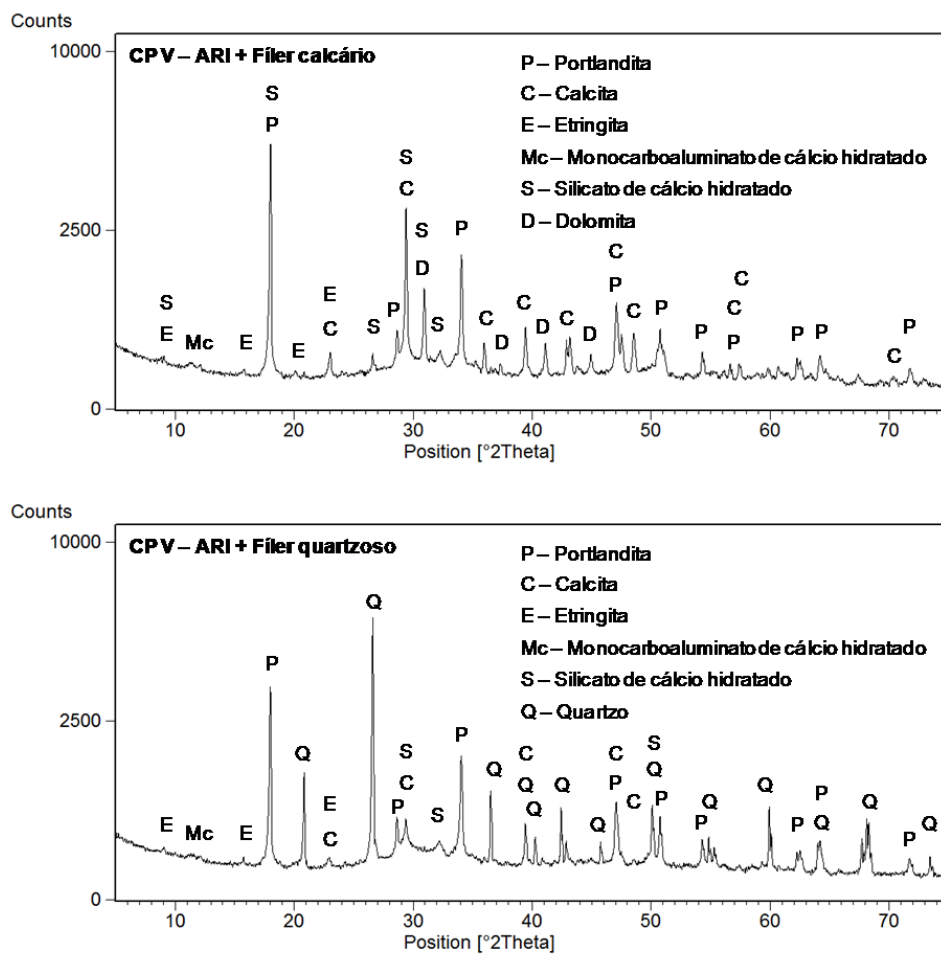


Figura 48 - Difratoformas das pastas de CPV-ARI com fíleres calcário e quartzoso, após 28 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5752/12.

A seguir estão apresentados os difratogramas das diferentes pastas contendo adições minerais ativas (pozolânicas), com a identificação das fases cristalinas presentes nas adições minerais e os compostos hidratados formados.

Na pasta com cinza de casca de arroz (Figura 49) foram identificados picos referentes à cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ), oriundo da adição mineral e picos de portlandita, etringita, silicato de cálcio hidratado, calcita e monocarboaluminato de cálcio hidratado.

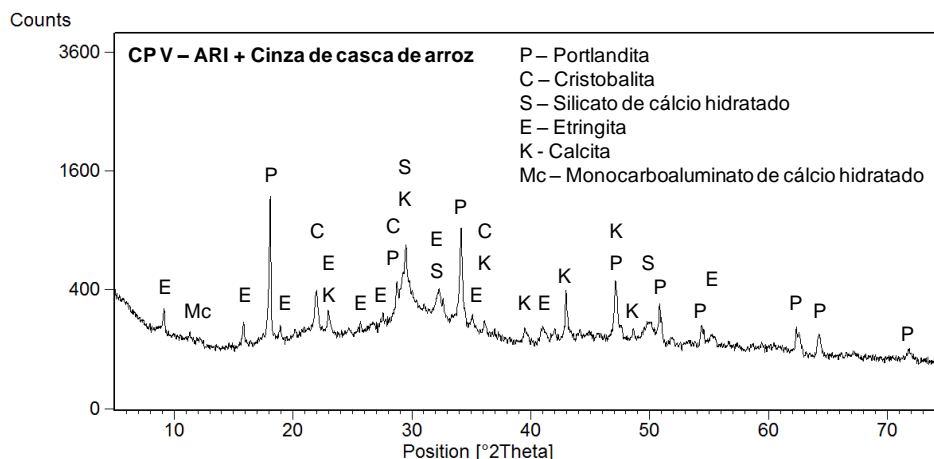


Figura 49 – Difratoograma da pasta de CPV-ARI com cinza de casca de arroz, após 28 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5752/12.

Na pasta com metacaulim foram observados picos da formação do C-S-H, portlandita, calcita, sílico-aluminato de cálcio hidratado, quartzo, monocarboaluminato de cálcio hidratado e monossulfoaluminato de cálcio hidratado (Figura 50).

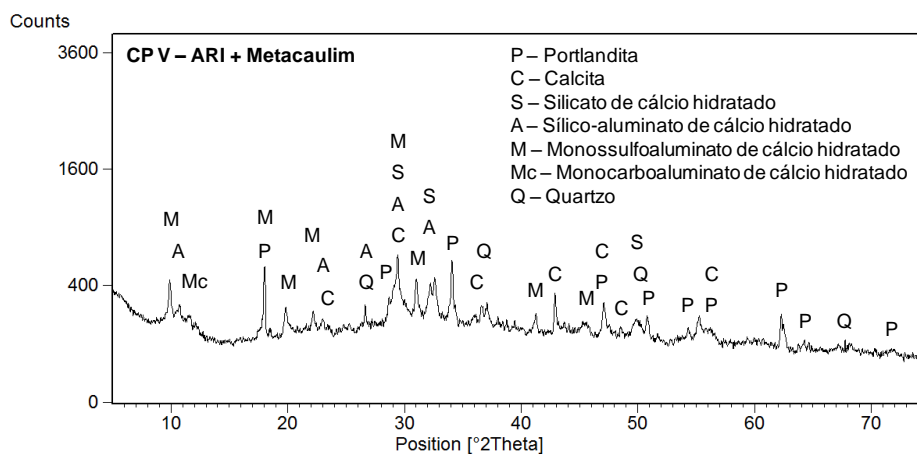


Figura 50 – Difratoograma da pasta de CPV-ARI com metacaulim, após 28 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5752/12.

Não houve a identificação de picos de etringita, pois no metacaulim, na fração amorfa, contém alumina passível de reação, favorecendo a formação de etringita por causa da alta relação sulfato/aluminato. Após o consumo de sulfato, a concentração de íons aluminato volta a se elevar e a etringita torna-se instável, sendo gradativamente



convertida em cristais de monossulfoaluminato de cálcio hidratado que é um dos produtos finais da hidratação do cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A pasta com sílica ativa apresentou picos característicos do C-S-H, portlandita, calcita, etringita e monocarboaluminato de cálcio hidratado (Figura 51).

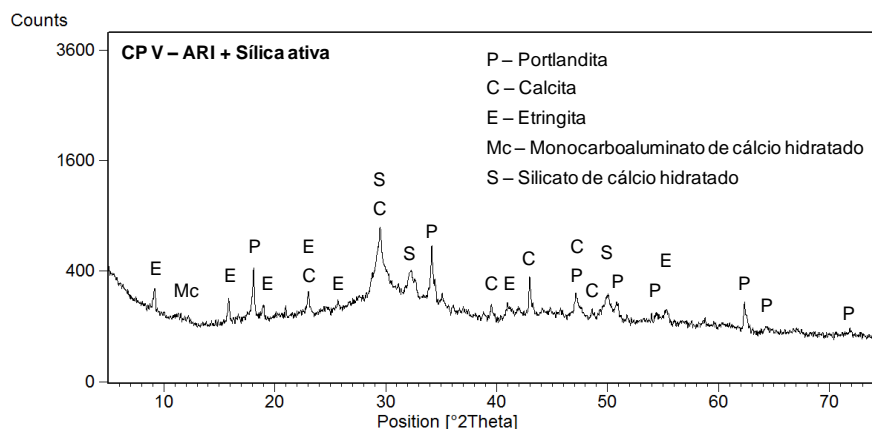


Figura 51 – Difratograma da pasta de CPV-ARI com sílica ativa, após 28 dias de cura, conforme recomendações da NBR 5752/12.

Não foram realizadas análises de DRX no caso das amostras de cerâmica moída pelo fato de elas terem indicado baixa atividade pozolânica nos ensaios de caracterização por DRX e reatividade no ensaio de Chapelle suficiente para classificação como pozolana, porém muito próximo do limite mínimo. Desse modo, optou-se por otimizar o número de amostras de ensaio de DRX e as 6 amostras de cerâmica foram excluídas destas análises.

Nas pastas de cimento e adições pozolânicas sempre houve teor remanescente de portlandita e, portanto, sendo mais adequado para avaliar o IAP das adições.

### 4.3. Argamassas com fixação de parâmetros

#### 4.3.1. Argamassas com cal para resistência à compressão (relação água/finos fixa)

Durante a moldagem das argamassas com cal e relação água/finos = 0,80, não foi medida a consistência. A Figura 52 apresenta os resultados de resistência à compressão das argamassas com cal e relação água/finos = 0,80.

Foram considerados os resultados de resistência à compressão conforme descritos para os ensaios de IAP com cal e com cimento. No Apêndice 1 deste trabalho, encontram-se todos os dados obtidos nos ensaios realizados, sem a eliminação dos espúrios.

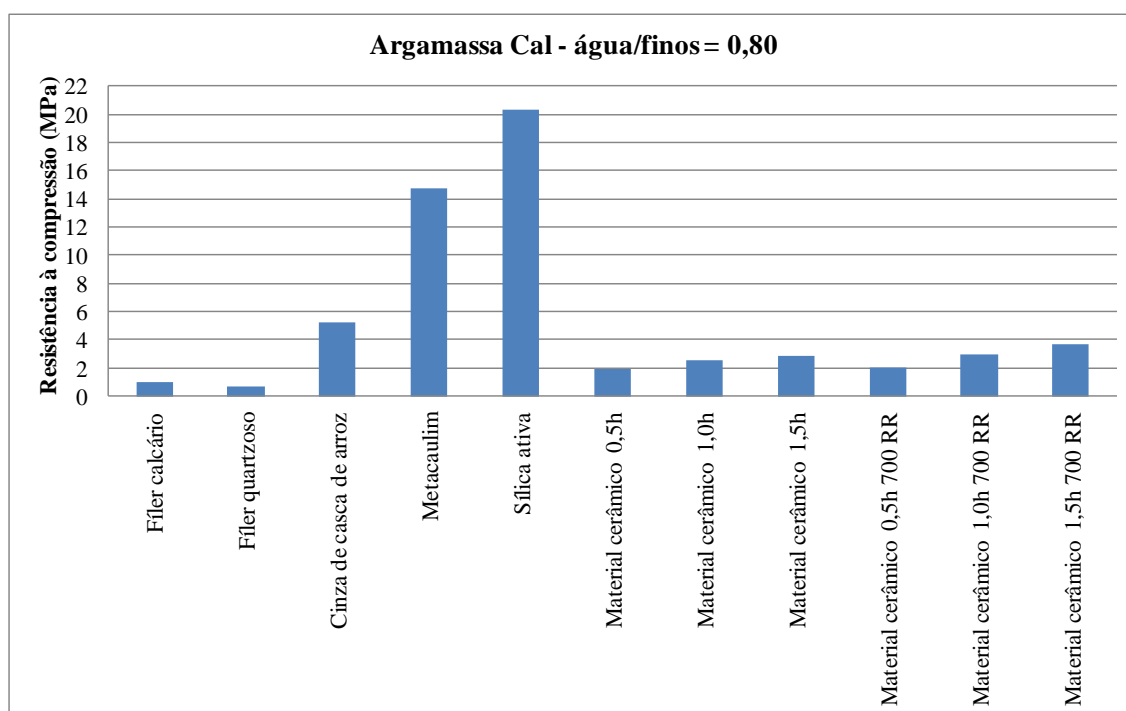


Figura 52 - Resistência à compressão de argamassas com cal e relação água/finos = 0,80.

As argamassas contendo sílica ativa e metacaulim apresentaram os maiores resultados de resistência à compressão dentre as adições minerais estudadas, atingindo 20,3 MPa aos 7 dias de idade para a argamassa com sílica ativa, e com resistência à compressão média de 14,8 MPa para a argamassa com metacaulim. Este foi um indício

de que estes materiais apresentam maior atividade pozolânica do que os demais casos do estudo.

Para validação destes resultados aplicou-se a ferramenta de análise de variância (ANOVA), verificou-se que os resultados são significativamente diferentes, com 95% de confiança, validando-se assim as análises anteriores. Os procedimentos de cálculo realizados com o programa Action podem ser visualizados na Tabela 18, a diferença entre os resultados é confirmada pelo fato de F ser maior do que  $F_{\text{crítico}}$ .

Tabela 18 - Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão de argamassas com cal e relação água/finos = 0,80.

<b>Tabela da Anova</b>	<b>Grau de Liberdade</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>F</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>
Entre grupos	10	1004,96	100,49	234,32	$6,05 \times 10^{-17}$
Dentro dos grupos	18	7,72	0,43		

O teste estatístico de Tukey (Figura 53) foi utilizado para comparação múltipla dos resultados, assim evidenciando as diferenças entre os produtos, com um grau de confiança de 95%. Também realizado com o auxílio do programa Action, as tabelas completas se encontram no Apêndice 1.

De acordo com o teste Tukey, foi possível afirmar que não houve diferença significativa entre as argamassas com adições do fíler calcário e fíler quartzoso entre si, assim como amostras cerâmicas com moagem de 0,5 h, com e sem calcinação, também não apresentaram diferença significativa entre si, o mesmo pode ser afirmado entre as amostras de material cerâmico com 1,0 h de moagem, com e sem calcinação, e entre as argamassas com material cerâmico moído por 1,5 h, com e sem calcinação. Estas adições cerâmicas e o dois fíleres apresentaram semelhanças entre si quando analisadas par a par, desta forma nem a calcinação influenciou significativamente a resistência à compressão, como a moagem também não apresentou diferença significativa, conforme pode ser observado na Figura 53.

A argamassa com cinza de casca de arroz apresentou semelhança com as argamassas contendo adição de material cerâmico com 1,0 e 1,5 h, ambas com

calcinação à 700 °C e resfriamento rápido. Para as demais amostras deve-se rejeitar a hipótese de igualdade.

Filer calcário-Cinza de casca de arroz  
 Filer quartzoso-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Metacaulim-Cinza de casca de arroz  
 Sílica ativa-Cinza de casca de arroz  
 Filer calcário-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,0h-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,5h-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer calcário  
 Metacaulim-Filer calcário  
 Sílica ativa-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,0h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,5h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer quartzoso  
 Metacaulim-Filer quartzoso  
 Sílica ativa-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 0,5h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,0h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,5h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR  
 Sílica ativa-Metacaulim

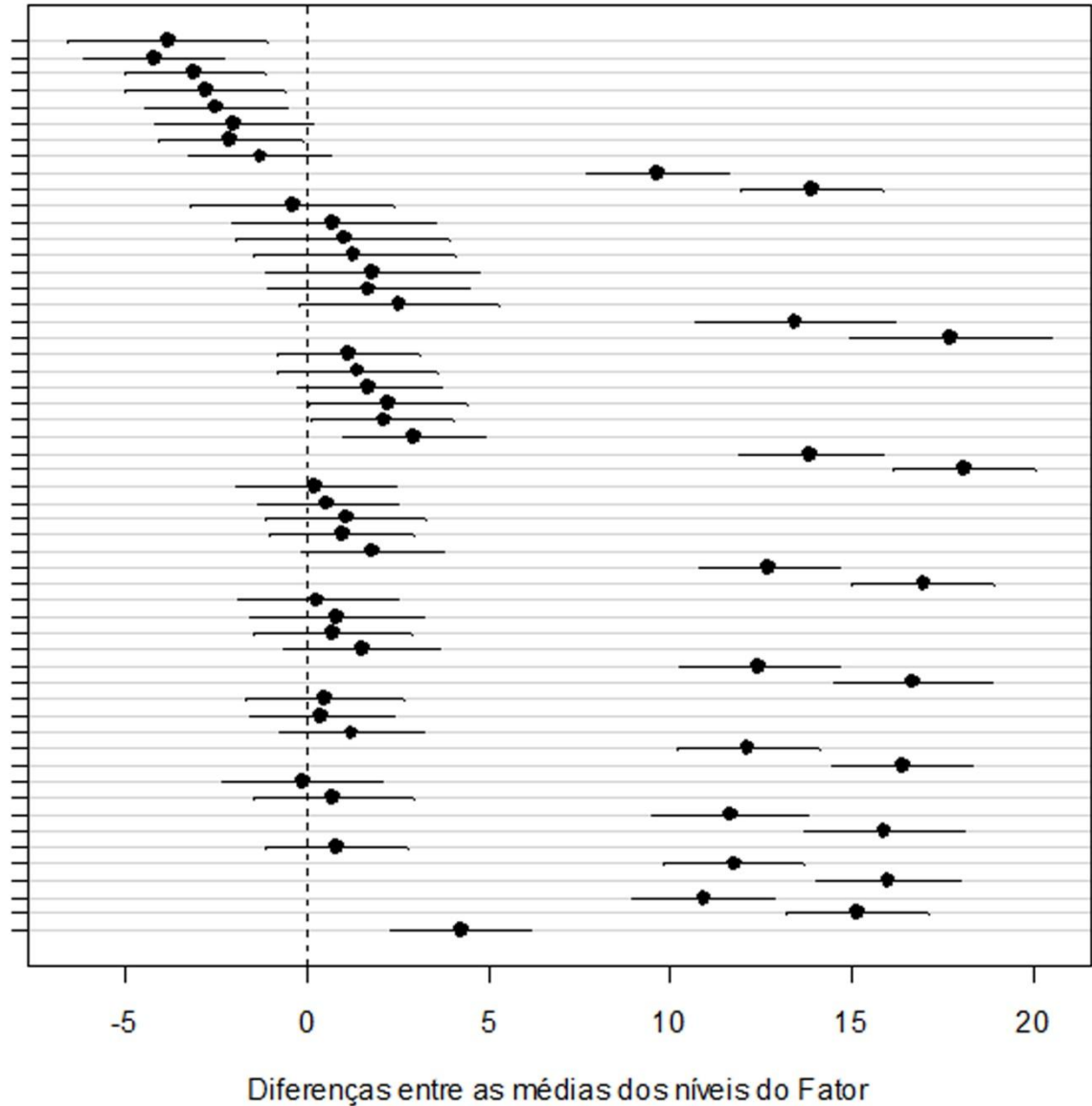


Figura 53 - Teste Tukey argamassa cal água/finos =0,80.

### 4.3.2. Argamassas com cimento para resistência à compressão

#### 4.3.2.1. Argamassas sem aditivo superplastificante (consistência variável)

#### Relação água/cimento = 0,80

Durante a moldagem das argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80, vale salientar que neste caso a massa de água utilizada refere-se exclusivamente à massa de cimento e não foi medida a consistência. A Figura 54 apresenta o gráfico de barras obtido com os valores da resistência à compressão das argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80, nas idades de 7 e 28 dias.

Os resultados de resistência à compressão seguiram os critérios descritos para os ensaios de IAP com cal e com cimento. No Apêndice 1 deste trabalho, encontram-se todos os dados obtidos nos ensaios realizados, sem a eliminação dos espúrios.

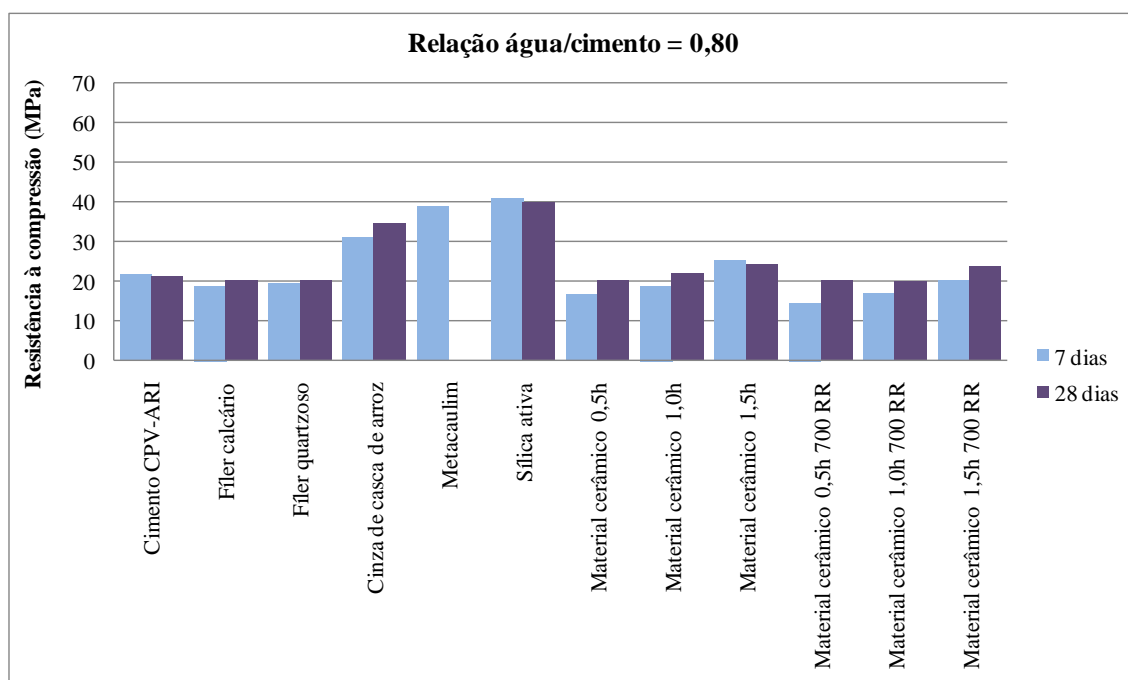


Figura 54 - Resultado de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80.

A argamassa de referência atingiu, em média, a resistência à compressão de 21,2 MPa aos 28 dias. As adições que indicaram alta atividade pozolânica no ensaio de

Chapelle e difração de raios-X (cinza de casca de arroz, metacaulim e sílica ativa) apresentaram valores de resistência à compressão acima de 30 MPa, superando a resistência da série de referência. Isso ocorreu para a substituição de 35% do volume de cimento pelas adições citadas e relação água/cimento igual a 0,80.

A argamassa com material cerâmico com moagem de 1,5 h, apresentou resistência à compressão superior a argamassa de referência para ambas as idades, 7 e 28 dias.

Considerando os valores de resistência à compressão a 7 dias, pode-se dizer que a sílica ativa teve a maior capacidade de elevar a resistência compressão, seguido do metacaulim e da cinza de casca de arroz.

Deve-se notar que a cinza de casca de arroz não apresenta significativa atividade pozolânica adicional entre 7 dias e 28 dias (acréscimo de 11%), sendo um indicativo de que praticamente todas as reações pozolânicas desta adição ocorrem até os 7 dias de cura. Já, no caso do metacaulim este tipo de comparação ficou inviabilizado pelo fato de os dados de 28 dias terem sido descartados por motivos de erro na execução dos ensaios.

Algumas amostras apresentaram decréscimo de resistência aos 28 dias quando comparados com os resultados a 7 dias, podendo ter havido falha de moldagem e/ou capeamento que influenciaram no resultado de compressão das amostras de referência, sílica ativa e material cerâmico com moagem de 1,5 h, com redução de resistência de 2,3%, 2,7% e 4,7% respectivamente.

Para validação destes resultados aplicou-se a ferramenta de análise de variância (ANOVA) e verificou-se que os resultados são significativamente diferentes para a resistência à compressão aos 28 dias, com 95% de confiança, validando-se assim as análises comparativas realizadas. Os procedimentos de cálculo realizados com o programa Action podem ser visualizados na Tabela 19 e a diferença entre as amostras é confirmada pelo fato de  $F$  ser maior do que  $F_{\text{crítico}}$ .

Tabela 19- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão de argamassas aos 28 dias com cimento e relação água/cimento = 0,80.

<b>Tabela da Anova</b>	<b>Grau de Liberdade</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>F</b>	<b>F<sub>crítico</sub></b>
Entre grupos	10	1328,09	132,81	143,55	1,19 x 10 <sup>-17</sup>
Dentro dos grupos	22	20,35	0,93		

De acordo com o teste Tukey, é possível afirmar que não houve diferença significativa aos 28 dias, quando comparada a argamassa de referência com as argamassas com adição de fíler calcário, fíler quartzoso, material cerâmico com moagem de 0,5, 1,0 h e 1,5 h (com e sem calcinação).

Os fíleres apresentaram semelhança, assim como as amostras cerâmicas com moagem de 0,5 h, com e sem calcinação, que não apresentaram diferença significativa entre si, o mesmo pode ser afirmado entre as amostras de material cerâmico com 1 h de moagem, com e sem calcinação, e entre as argamassas com material cerâmico moído por 1,5 h, com e sem calcinação. Estas adições cerâmicas e dos fíleres apresentaram semelhança entre si quando analisadas par a par. É possível afirmar para o material cerâmico que nem a calcinação influenciou significativamente a resistência à compressão aos 28 dias, como a moagem também não apresentou diferença significativa, conforme pode ser observado na Figura 55. Para as adições de maior reatividade é possível rejeitar a hipótese de igualdade entre as amostras.



Cinza de casca de arroz-Cimento CPV-ARI  
 Filer calcário-Cimento CPV-ARI  
 Filer quartzoso-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 0,5h-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,0h-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,5h-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
 Sílica ativa-Cimento CPV-ARI  
 Filer calcário-Cinza de casca de arroz  
 Filer quartzoso-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Sílica ativa-Cinza de casca de arroz  
 Filer quartzoso-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,0h-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,5h-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer calcário  
 Sílica ativa-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,0h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,5h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer quartzoso  
 Sílica ativa-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR

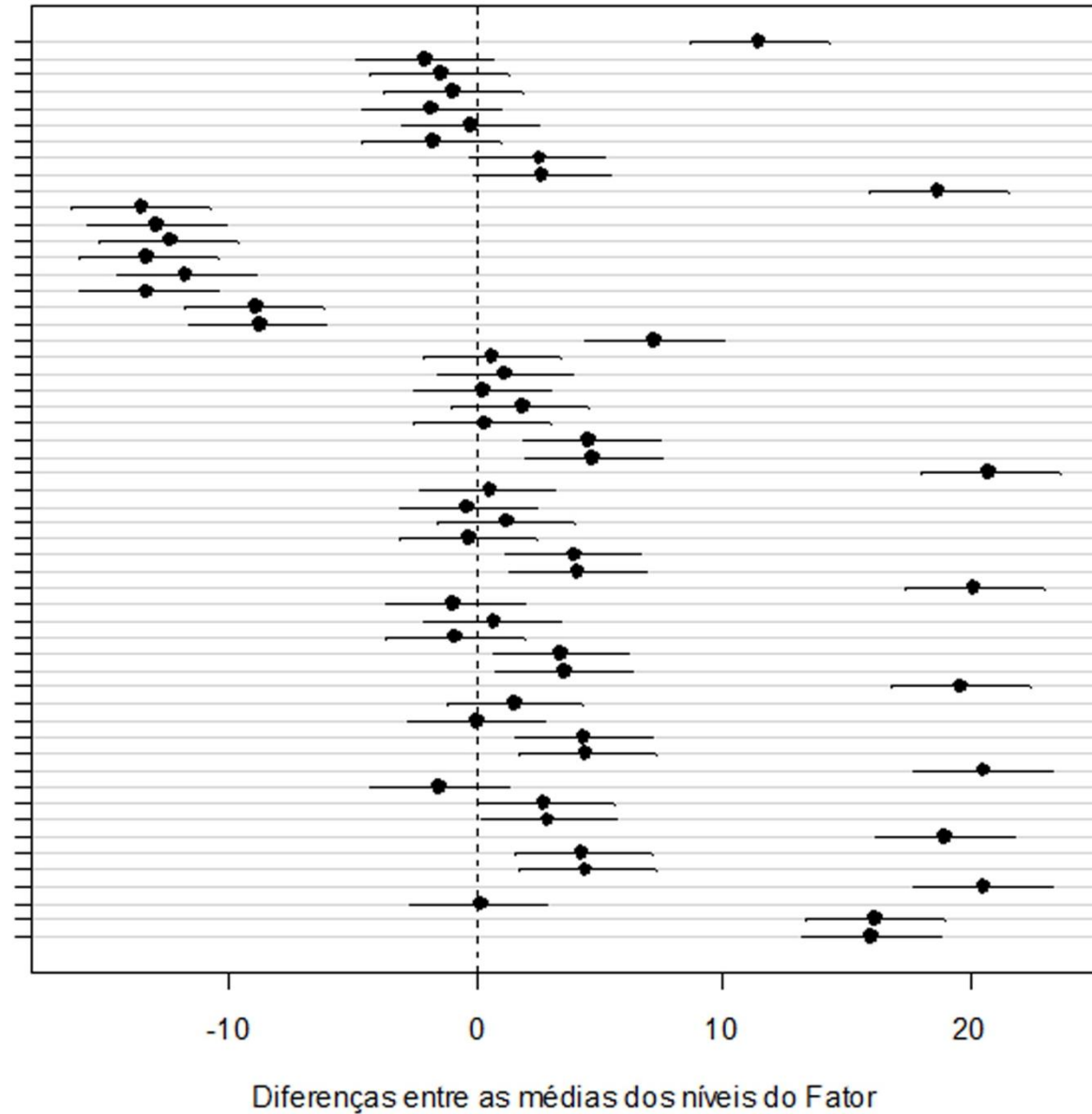


Figura 55 - Teste Tukey de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80.

### Relação água/finos<sup>7</sup> = 0,80

Durante a moldagem das argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80, não foi medida a consistência. A Figura 56 apresenta o gráfico de barras obtido com os valores da resistência à compressão das argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80.

Para os resultados de resistência à compressão adotou-se os critérios apresentados para os ensaios de IAP com cal e cimento. No Apêndice 1 deste trabalho, encontram-se todos os dados obtidos nos ensaios realizados, sem a eliminação dos espúrios.

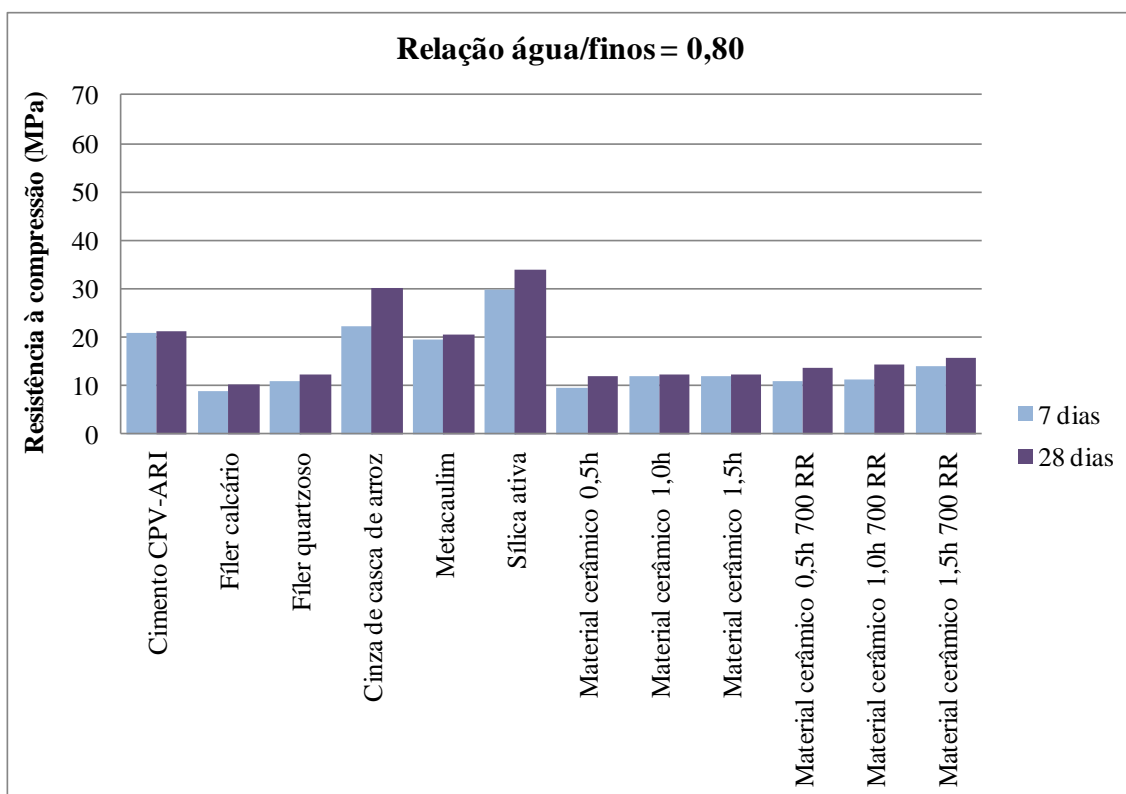


Figura 56 - Resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80.

<sup>7</sup> Foi denominado de relação água/finos, o quociente entre a massa de água pela somatória de cimento ou hidróxido de cálcio com as adições, pois nem todas são reativas para receberem a terminologia de aglomerante.

A argamassa de referência atingiu, em média, a resistência à compressão de 21,1 MPa, aos 28 dias, valor em acordo com a série de referência do estudo de relação água/cimento fixa em 0,80, uma vez que se trata do mesmo traço no caso da série de referência e que lá apresentou média de resultados igual a 21,2 MPa. Este é um indicativo da coerência do controle de qualidade impresso no procedimento experimental.

Deve-se notar na Figura 56 que as adições sílica ativa e cinza de casca de arroz elevaram a resistência à compressão para valores acima de 30,0 MPa aos 28 dias de cura. Por outro lado, o metacaulim, não apresentou resultados tão elevados quanto a estas duas adições de pozolanas, apresentando 20,4 MPa, abaixo da série de referência.

É nítido nos resultados que os materiais que não apresentaram ou tiveram baixa atividade pozolânica pelo método do Chapelle e pela avaliação por difração de raios-X não tiveram a presença de halos amorfos, apresentaram resistências inferiores do que a série de referência, sendo todos com valor médio abaixo de 16 MPa.

Para a validação destes resultados aplicou-se a ferramenta de análise de variância (ANOVA), verificou-se que os resultados foram significativamente diferentes para a resistência à compressão aos 28 dias, com 95% de confiança, validando-se assim as análises posteriores, os procedimentos de cálculo realizados com o programa Action podem ser visualizados na Tabela 20, a diferença entre as amostras foi confirmada pelo fato de F ser maior do que  $F_{\text{crítico}}$ .

Tabela 20- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80.

<b>Tabela da Anova</b>	<b>Grau de Liberdade</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>F</b>	<b><math>F_{\text{crítico}}</math></b>
Entre grupos	11	1356,27	123,30	99,31	$4,06 \times 10^{-16}$
Dentro dos grupos	22	27,31	1,24		

O Teste estatístico de Tukey (Figura 57) foi utilizado para comparação múltipla dos resultados, assim evidenciando as diferenças entre os produtos, também com um grau de confiança de 95%. Também realizado com o auxílio do programa Action, as tabelas completas se encontram no Apêndice 1.

De acordo com o teste Tukey, é possível afirmar que não houve diferença significativa entre as argamassas com adições do fíler calcário e fíler quartzoso entre si, assim como todas as amostras cerâmicas também não apresentaram diferença significativa entre si, o mesmo pode ser afirmado entre as amostras de referência e metacaulim, e entre as amostras de sílica ativa e cinza de casca de arroz.

As argamassas contendo fíler quartzoso e fíler calcário apresentaram semelhanças com as argamassas contendo material cerâmico calcinado para os 3 tempos de moagem.

É possível afirmar para o material cerâmico que nem a calcinação influenciou significativamente a resistência à compressão, como a moagem também não apresentou diferença significativa, conforme pode ser observado na Figura 57.

Cinza de casca de arroz-Cimento CPV-ARI  
 Filer calcário-Cimento CPV-ARI  
 Filer quartzoso-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 0,5h-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,0h-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,5h-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
 Metacaulim-Cimento CPV-ARI  
 Sílica ativa-Cimento CPV-ARI  
 Filer calcário-Cinza de casca de arroz  
 Filer quartzoso-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Metacaulim-Cinza de casca de arroz  
 Sílica ativa-Cinza de casca de arroz  
 Filer quartzoso-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,0h-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,5h-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer calcário  
 Metacaulim-Filer calcário  
 Sílica ativa-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,0h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,5h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer quartzoso  
 Metacaulim-Filer quartzoso  
 Sílica ativa-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 0,5h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,0h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,5h  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR  
 Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR  
 Sílica ativa-Metacaulim

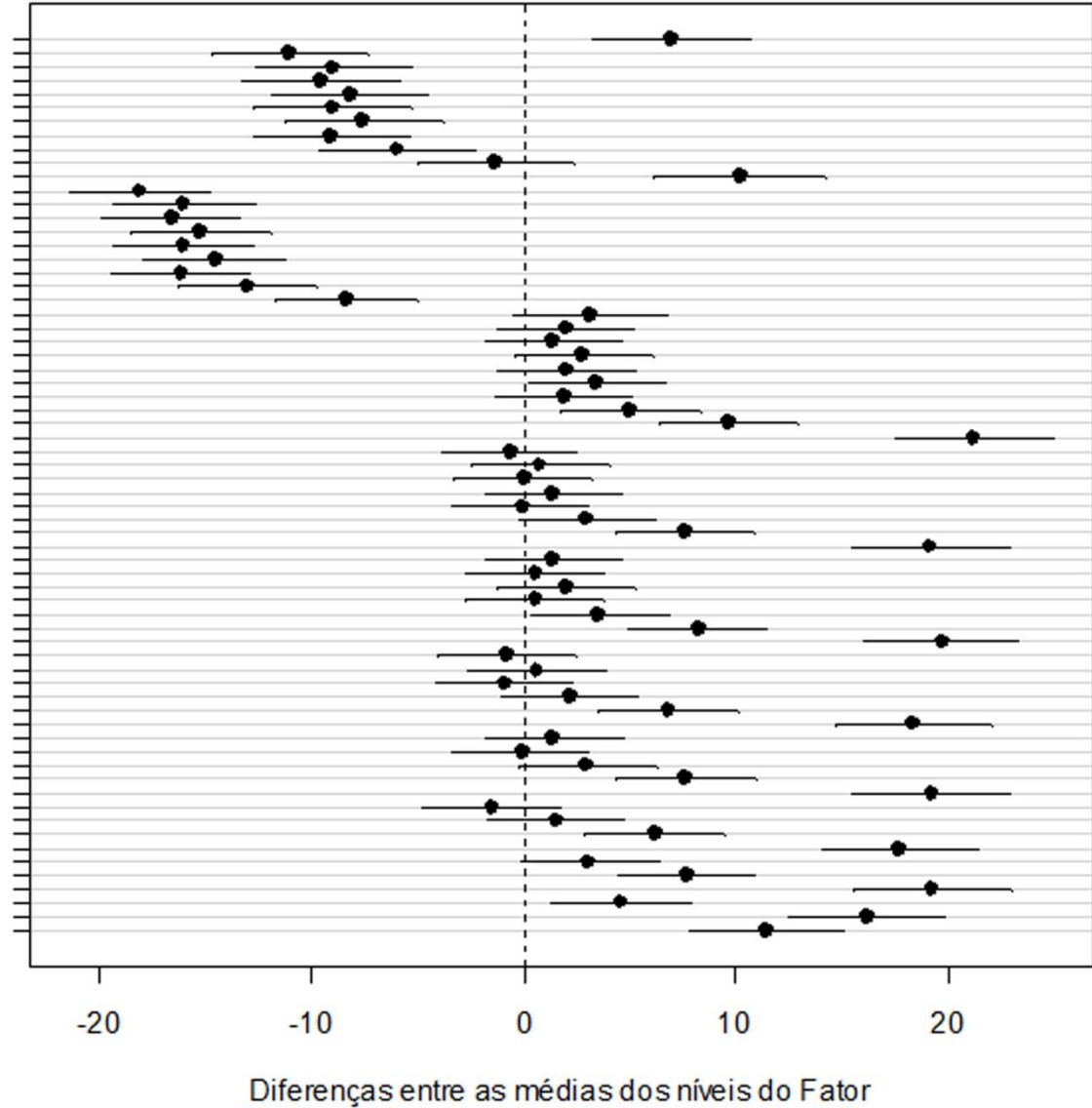


Figura 57 - Teste Tukey de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80.

#### 4.3.2.2. Argamassas com aditivo superplastificante (consistência constante)

##### **Relação água/cimento = 0,80 com aditivo**

Durante a moldagem das argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com o uso de aditivo superplastificante, foi medida a consistência pela mesa de espalhamento, e fixada conforme o valor obtido para a argamassa de referência. A Tabela 21 apresenta os valores de espalhamento na mesa de consistência das argamassas com cimento.

Para os resultados de resistência à compressão foram considerados os critérios descritos para os ensaios de IAP com cal e com cimento. No Apêndice 1 deste trabalho, encontram-se todos os dados obtidos nos ensaios realizados, sem a eliminação dos espúrios.

Tabela 21 - Resultado do espalhamento das argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante.

<b>Argamassas</b>	<b>Espalhamento (mm)</b>
Cimento CPV-ARI	370
Fíler calcário	375
Fíler quartzoso	374
Cinza de casca de arroz	368
Metacaulim	366
Sílica ativa	365
Material cerâmico 0,5h	260
Material cerâmico 1,0h	262
Material cerâmico 1,5h	262
Material cerâmico 0,5h 700 RR	260
Material cerâmico 1,0h 700 RR	263
Material cerâmico 1,5h 700 RR	262

A Figura 58 apresenta o gráfico de barras obtido com os valores da resistência à compressão das argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com o uso de aditivo superplastificante.

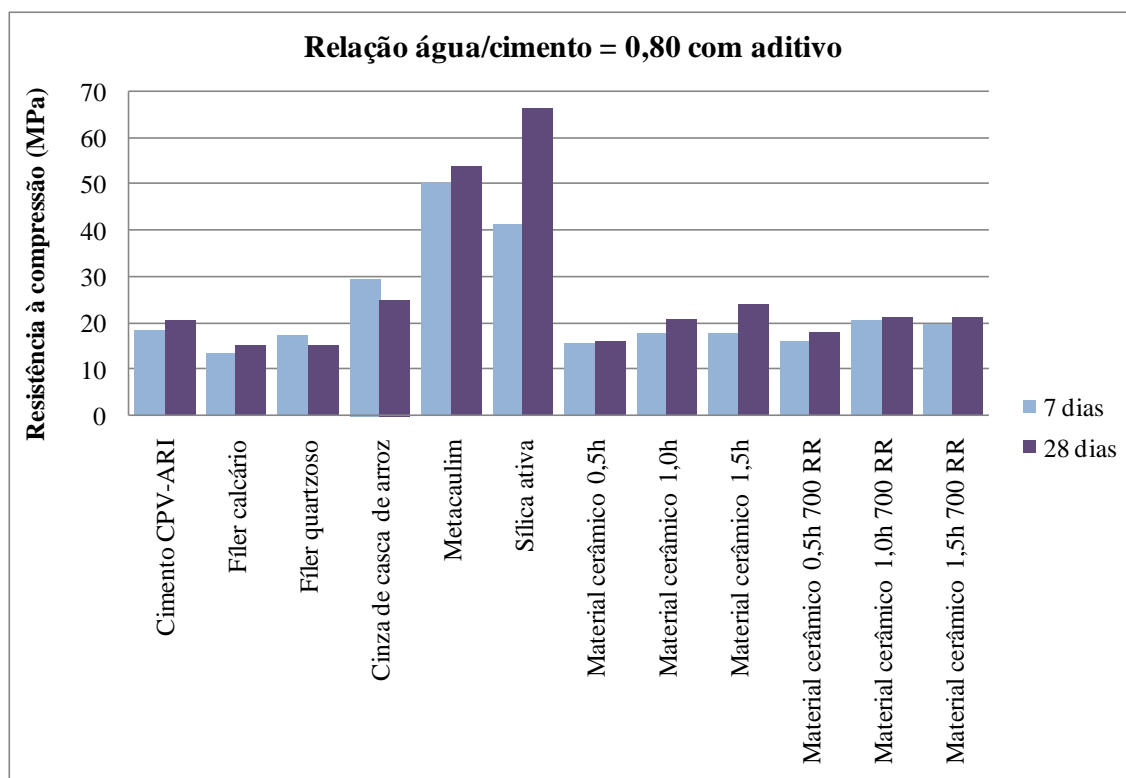


Figura 58 – Resultado de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante.

A argamassa de referência atingiu, em média, a resistência à compressão de 21,3 MPa, aos 28 dias, muito semelhante as outras séries de referência indicadas nos estudos sem fixação da consistência, que são de mesmo proporcionamento e apresentaram médias de 21,2 e 21,1 MPa, sendo um indicativo de pouca variabilidade no processo de realização do experimento.

Porém, neste caso nota-se que a substituição de 35% do volume de cimento pelas adições sílica ativa e metacaulim elevaram as resistências para valores acima do dobro obtido pela argamassa de referência. Isso indica que o procedimento de manter a relação água/cimento sem fixar a consistência tende a subestimar o potencial destas pozolanas, possivelmente pela dificuldade de adensamento provocado pela redução da fluidez proveniente da substituição parcial do cimento por materiais de maior área específica. Deve-se destacar que a cinza de casca de arroz não acompanhou esta tendência, apresentando resistência semelhante ao do procedimento de estudo sem o uso de aditivo.

Para validação destes resultados aplicou-se a ferramenta de análise de variância (ANOVA), verificou-se que os resultados são significativamente diferentes para a resistência à compressão aos 28 dias, com 95% de confiança, validando-se assim as análises posteriores. Os procedimentos de cálculo realizados com o programa Action podem ser visualizados na Tabela 22, a diferença entre os resultados é confirmada pelo fato de F ser maior do que  $F_{\text{crítico}}$ .

Tabela 22- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante.

<b>Tabela da Anova</b>	<b>Grau de Liberdade</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>F</b>	<b><math>F_{\text{crítico}}</math></b>
Entre grupos	11	6111,50	555,60	317,35	$9,26 \times 10^{-21}$
Dentro dos grupos	21	36,77	1,75		

O Teste estatístico de Tukey (Figura 59) foi utilizado para comparação múltipla das amostras, assim evidenciando as diferenças entre os produtos, também com um nível de confiança de 95%. Foi realizado com o auxílio do programa Action, as tabelas completas se encontram no Apêndice 1.

De acordo com o teste Tukey, é possível afirmar que não houve diferença significativa entre a argamassa de referência e as argamassas com adições de material cerâmico moído por 0,5 h com calcinação e com moagem de 1 e 1,5 h, com e sem calcinação.

A amostra contendo cinza de casca de arroz apresentou semelhança com as amostras de material cerâmico com moagem de 1 e 1,5 h, com e sem calcinação.

Os fíleres apresentaram semelhança, assim como as amostras cerâmicas com moagem de 0,5 h, com e sem calcinação, que não apresentaram diferença significativa entre si. O mesmo pode ser afirmado entre as amostras de material cerâmico com 1 h de moagem, com e sem calcinação, e entre as argamassas com material cerâmico moído por 1,5 h, com e sem calcinação. É possível afirmar para o material cerâmico que nem a calcinação influenciou significativamente a resistência à compressão, como a moagem



também não apresentou diferença significativa, conforme pode ser observado na Figura 58. Entre as demais adições deve-se rejeitar a hipótese de igualdade.

Cinza de casca de arroz-Cimento CPV-ARI  
 Filer calcário-Cimento CPV-ARI  
 Filer quartzoso-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 0,5h-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,0h-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,5h-Cimento CPV-ARI  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
 Metacaulim-Cimento CPV-ARI  
 Silica ativa-Cimento CPV-ARI  
 Filer calcário-Cinza de casca de arroz  
 Filer quartzoso-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
 Metacaulim-Cinza de casca de arroz  
 Silica ativa-Cinza de casca de arroz  
 Filer quartzoso-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,0h-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,5h-Filer calcário  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer calcário  
 Metacaulim-Filer calcário  
 Silica ativa-Filer calcário  
 Material cerâmico 0,5h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,0h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,5h-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer quartzoso  
 Metacaulim-Filer quartzoso  
 Silica ativa-Filer quartzoso  
 Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 0,5h  
 Silica ativa-Material cerâmico 0,5h  
 Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Silica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
 Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,0h  
 Silica ativa-Material cerâmico 1,0h  
 Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Silica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
 Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,5h  
 Silica ativa-Material cerâmico 1,5h  
 Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR  
 Silica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR  
 Silica ativa-Metacaulim

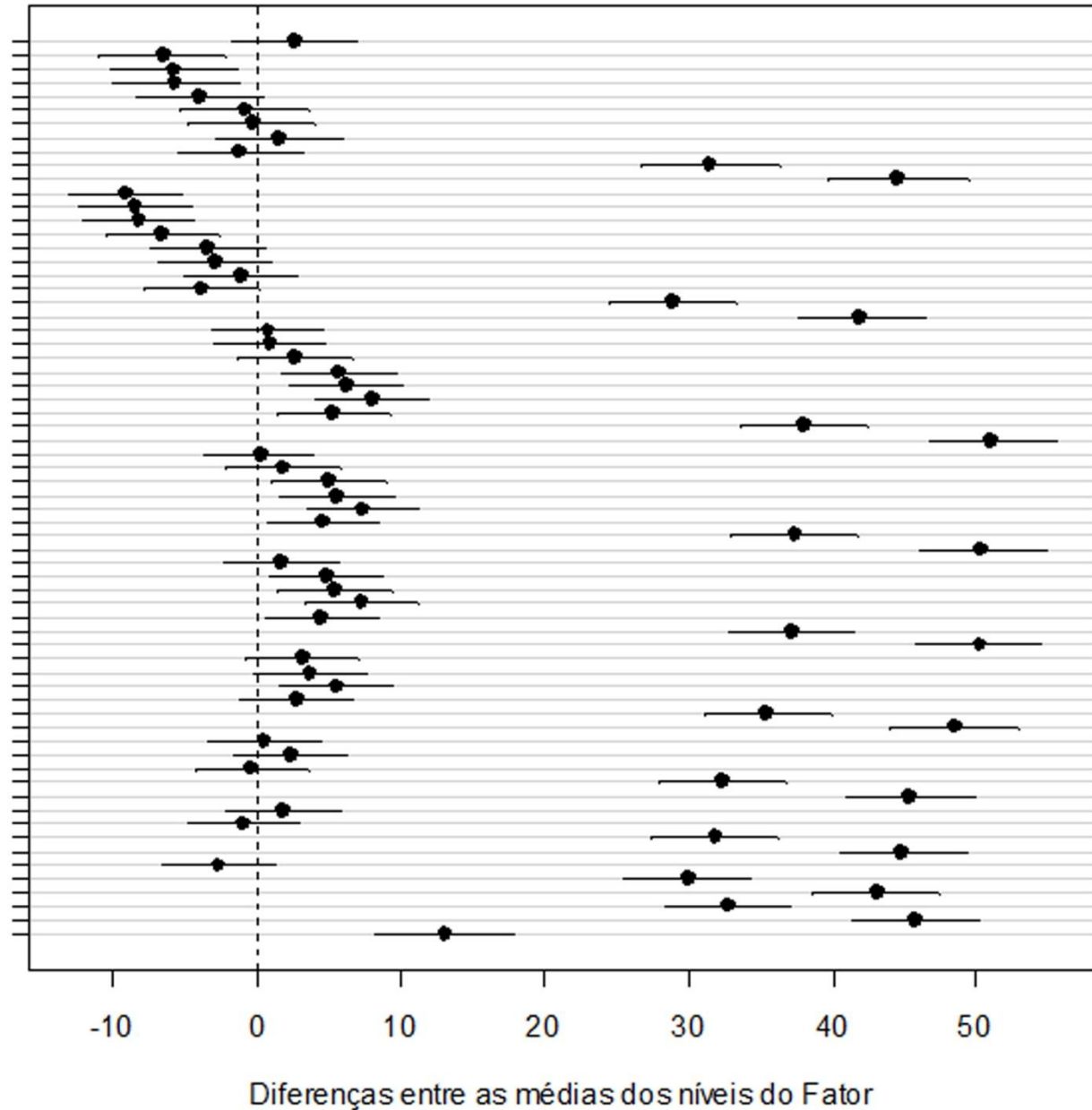


Figura 59 - Teste Tukey de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante.

### Relação água/finos = 0,80 com aditivo

Durante a moldagem das argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com o uso de aditivo superplastificante, foi medida a consistência pela mesa de espalhamento, e fixada conforme o valor obtido para a argamassa de referência. A Tabela 23 apresenta os valores de espalhamento das argamassas com cimento.

Os critérios utilizados para os resultados de resistência à compressão são os mesmos descritos para os ensaios de IAP com cal e cimento. No Apêndice 1 deste trabalho, encontram-se todos os dados obtidos nos ensaios realizados, sem a eliminação dos espúrios.

Tabela 23 - Resultado do espalhamento das argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante.

<b>Argamassas</b>	<b>Espalhamento (mm)</b>
Cimento CPV-ARI	370
Fíler calcário	374
Fíler quartzoso	374
Cinza de casca de arroz	371
Metacaulim	367
Sílica ativa	367
Material cerâmico 0,5h	323
Material cerâmico 1,0h	325
Material cerâmico 1,5h	325
Material cerâmico 0,5h 700 RR	324
Material cerâmico 1,0h 700 RR	325
Material cerâmico 1,5h 700 RR	325

A Figura 60 apresenta o gráfico de barras obtido com os valores da resistência à compressão das argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com o uso de aditivo superplastificante.

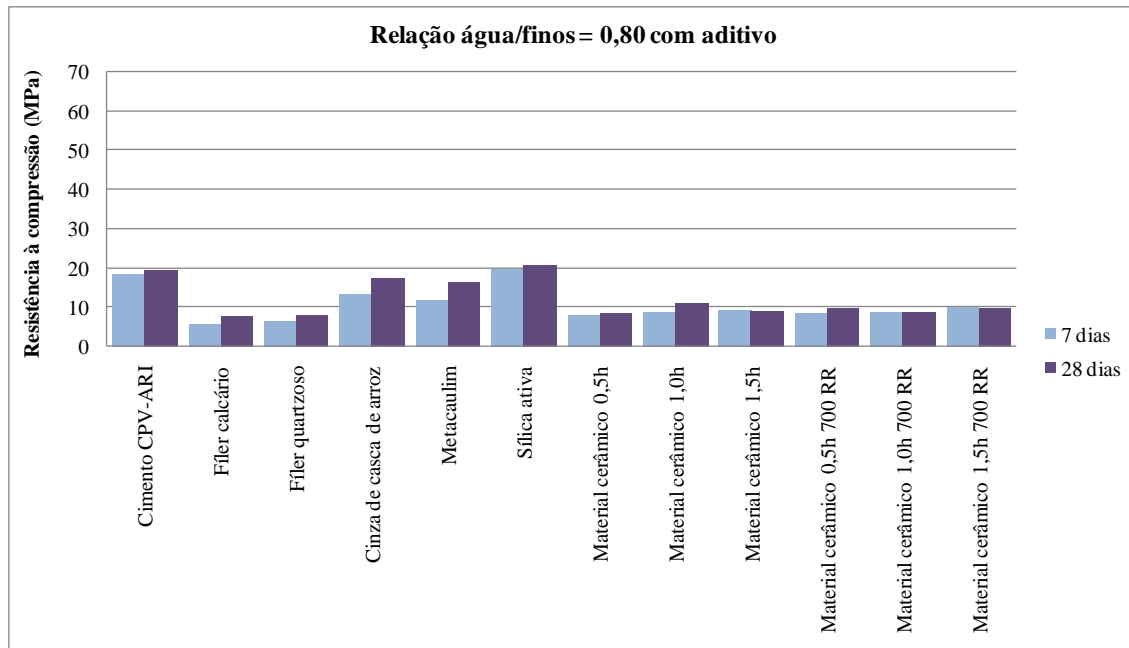


Figura 60 - Resultado resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante.

A argamassa de referência atingiu a resistência à compressão de 19,3 MPa, aos 28 dias. Vale destacar que neste caso a série de referência apresentou menor valor de resistência média do que as séries de referência das comparações anteriores que tem o mesmo proporcionamento, indicando alguma interferência de ensaio não identificada dentro do programa experimental. Pode ter ocorrido alguma variação de temperatura do laboratório ou mesmo na cura dos corpos de prova, mas não foi possível identificar com exatidão o que pode ter causado esta variação. O mesmo pode ser afirmado para as amostras de material cerâmico com moagem de 1,5 h, com e sem calcinação, onde a resistência à compressão aos 28 dias foi menor que aos 7 dias, 2,2% e 4,0% inferior, respectivamente. Porém, pode-se dizer que para esta série de comparação as condições de ensaio foram mantidas constantes, viabilizando as comparações realizadas com os dados da Tabela 24 e Figura 61.

No caso da substituição de 35% do volume de cimento pelas adições sílica ativa, cinza de casca de arroz e metacaulim, observam-se as maiores resistências em relação às demais adições minerais. Nota-se que neste caso, as adições pozolânicas apresentaram resistências à compressão mais semelhantes com relação à série de referência. Isso se

deve ao fato de que nesta comparação foi mantida a relação água/finos, que no caso de adições pozolânicas, se traduz em relação água/aglomerantes.

Para validação destes resultados aplicou-se a ferramenta de análise de variância (ANOVA), verificou-se que os resultados são significativamente diferentes para a resistência à compressão aos 28 dias, com 95% de confiança, validando-se assim as análises posteriores. Os procedimentos de cálculo realizados com o programa Action podem ser visualizados na Tabela 24 e a diferença entre as amostras é confirmada pelo fato de F ser maior do que  $F_{\text{crítico}}$ .

Tabela 24- Análise ANOVA entre os valores de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante.

<b>Tabela da Anova</b>	<b>Grau de Liberdade</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Quadrado Médio</b>	<b>F</b>	<b><math>F_{\text{crítico}}</math></b>
Entre grupos	11	643,61	58,51	79,79	$1,26 \times 10^{-15}$
Dentro dos grupos	23	16,87	0,73		

O Teste estatístico de Tukey (Figura 61) foi utilizado para comparação múltipla das amostras, assim evidenciando as diferenças entre os produtos, com um grau de confiança de 95%. Também realizado com o auxílio do programa Action, as tabelas completas se encontram no Apêndice 1.

De acordo com o teste Tukey, é possível afirmar que não há diferença significativa entre as argamassas com adições do fíler calcário, fíler quartzoso e todas as amostras de material cerâmico quando comparadas entre si, desta forma tanto a moagem como a calcinação não apresentaram alterações significativas no material cerâmico.

As argamassas de referência, cinza de casca de arroz e metacaulim apresentaram semelhanças entre si. Para as demais amostras é possível rejeitar a hipótese de igualdade.

Cinza de casca de arroz-Cimento CPV-ARI  
Filer calcário-Cimento CPV-ARI  
Filer quartzoso-Cimento CPV-ARI  
Material cerâmico 0,5h-Cimento CPV-ARI  
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
Material cerâmico 1,0h-Cimento CPV-ARI  
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
Material cerâmico 1,5h-Cimento CPV-ARI  
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI  
Metacaulim-Cimento CPV-ARI  
Sílica ativa-Cimento CPV-ARI  
Filer calcário-Cinza de casca de arroz  
Filer quartzoso-Cinza de casca de arroz  
Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz  
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz  
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz  
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz  
Metacaulim-Cinza de casca de arroz  
Sílica ativa-Cinza de casca de arroz  
Filer quartzoso-Filer calcário  
Material cerâmico 0,5h-Filer calcário  
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer calcário  
Material cerâmico 1,0h-Filer calcário  
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer calcário  
Material cerâmico 1,5h-Filer calcário  
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer calcário  
Metacaulim-Filer calcário  
Sílica ativa-Filer calcário  
Material cerâmico 0,5h-Filer quartzoso  
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Filer quartzoso  
Material cerâmico 1,0h-Filer quartzoso  
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Filer quartzoso  
Material cerâmico 1,5h-Filer quartzoso  
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Filer quartzoso  
Metacaulim-Filer quartzoso  
Sílica ativa-Filer quartzoso  
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h  
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h  
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h  
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h  
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h  
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR  
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h  
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h  
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h  
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h  
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR  
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h  
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h  
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h  
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR  
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR  
Sílica ativa-Metacaulim

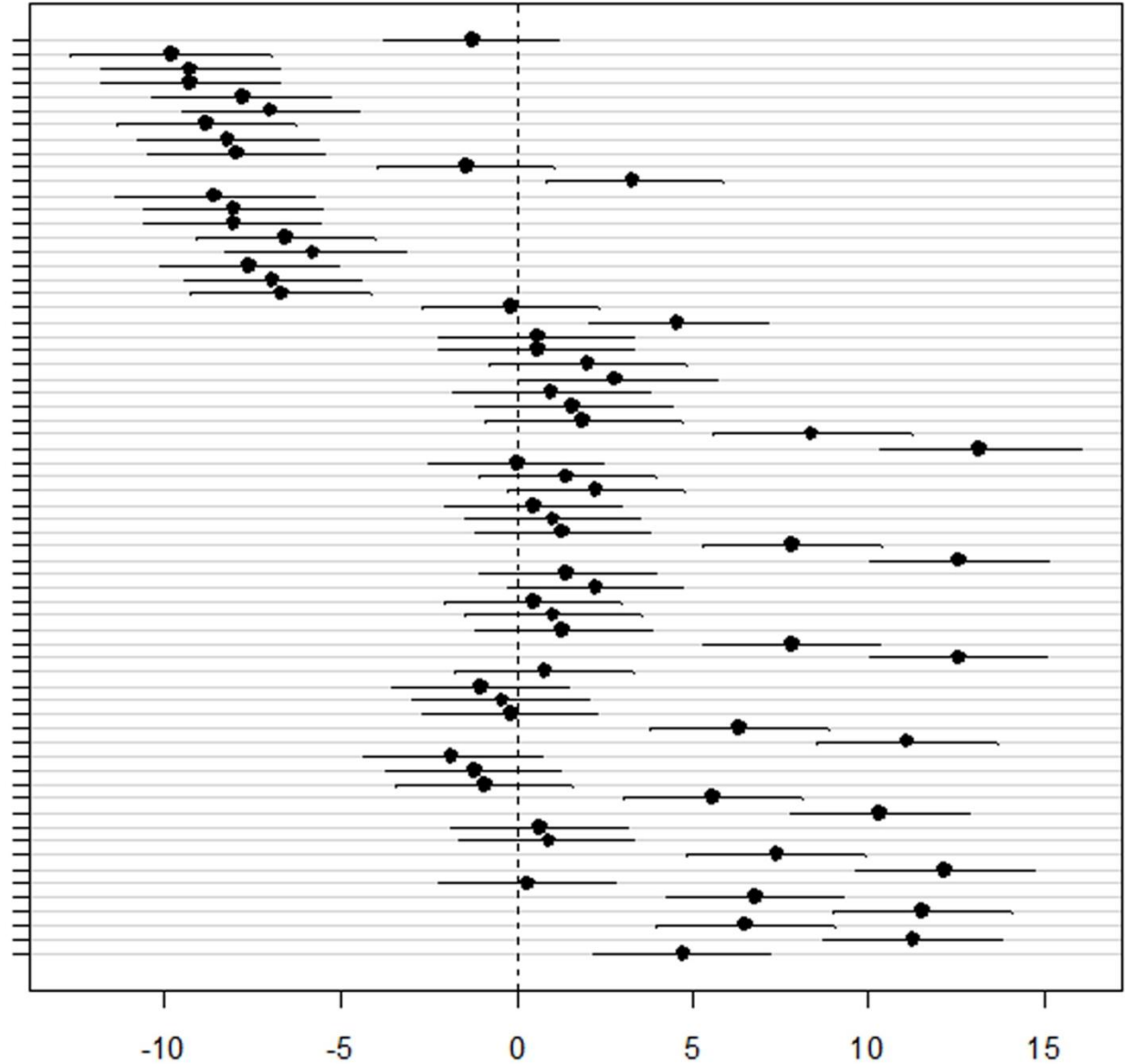


Figura 61 - Teste Tukey de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante.

#### 4.4. Comparação entre resultados

Analisando as amostras que apresentaram atividade pozolânica confirmada pelo ensaio de Chapelle modificado com as suas respectivas áreas específicas pelo método de Blaine e BET, é possível observar nas amostras uma tendência de aumento da reatividade conforme maior a área específica do material (Figuras 62 e 63).

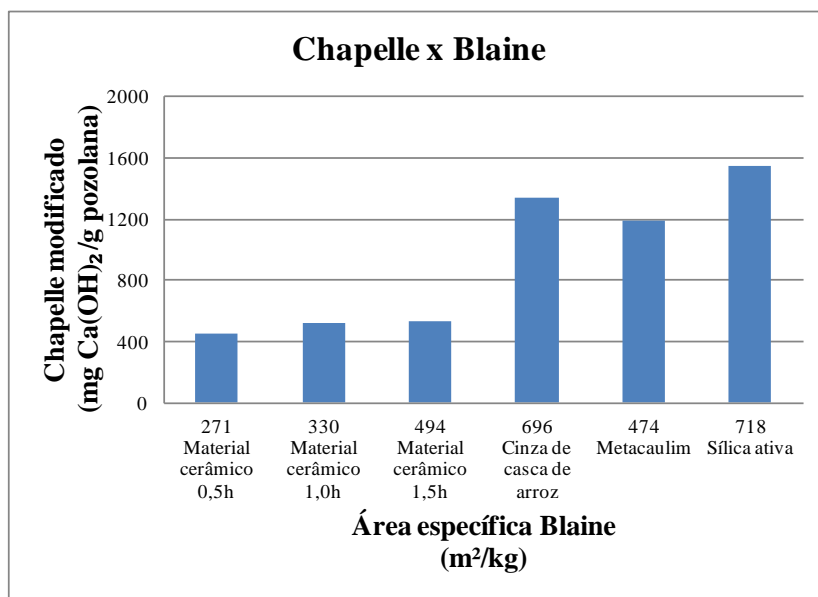


Figura 62 – Comparação da reatividade pelo ensaio de Chapelle modificado com a finura das amostras pelo método de Blaine.

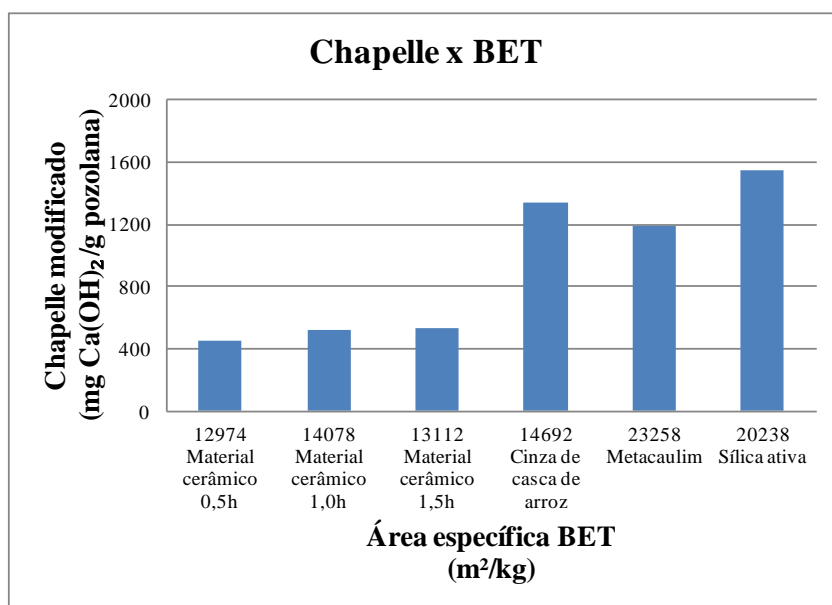


Figura 63 - Comparação da reatividade pelo ensaio de Chapelle modificado com a finura das amostras pelo método de BET.

Pode ser observado na Figura 64 que as resistências à compressão a 7 dias de cura para o ensaio de IAP com cal apresentaram valores superiores aos encontrados nas argamassas com água/finos constantes. No caso da fixação da relação água/finos, há acréscimo de água na argamassa e isso gera maior volume de poros provenientes da fração da água que não foi consumida nas reações de hidratação. Exceto para a argamassa com sílica ativa, pois a relação água/finos baixou de 1,11 para 0,80.

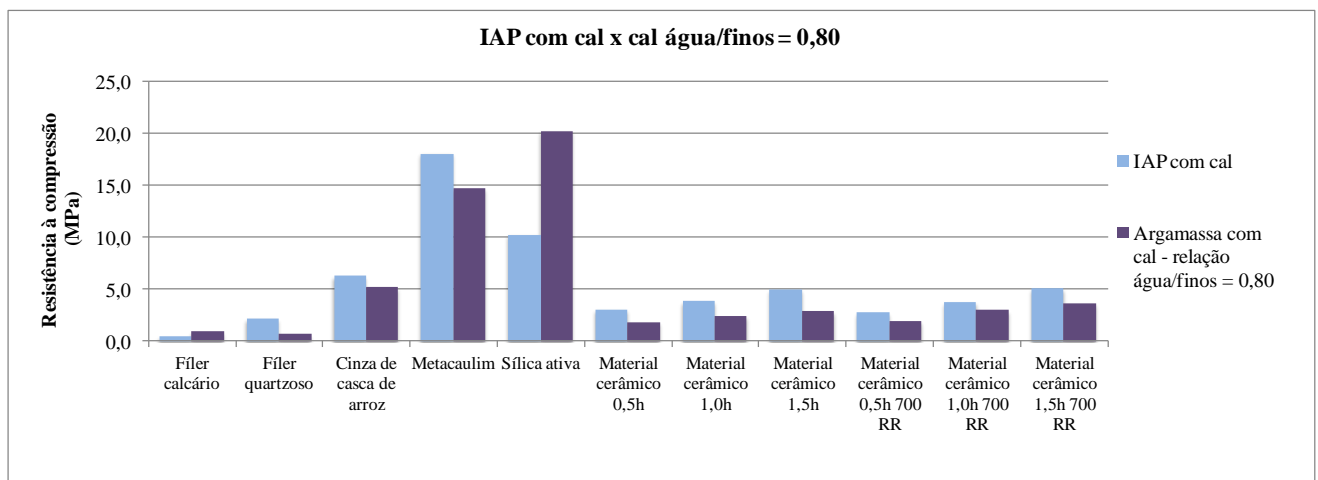


Figura 64 - Comparação das resistências à compressão aos 7 dias das argamassas do IAP com cal e das argamassas com cal e relação água/finos = 0,80.

A Figura 65 evidencia a tendência de aumento da resistência à compressão aos 28 dias com o aumento reatividade indicada pelo Chapelle modificado para o caso da relação água/cimento, água/finos constantes e IAP com cimento. A amostra de metacaulim não apresentou resultados de resistência à compressão aos 28 dias para o caso de relação água/cimento constante, pois estes foram descartados devido a um erro na execução do ensaio. Pode ser observado que as resistências à compressão a 28 dias de cura para o ensaio de IAP com cimento apresentaram valores superiores as demais argamassas, pois o consumo de água para o ensaio de IAP com cimento foi inferior em todos os casos.



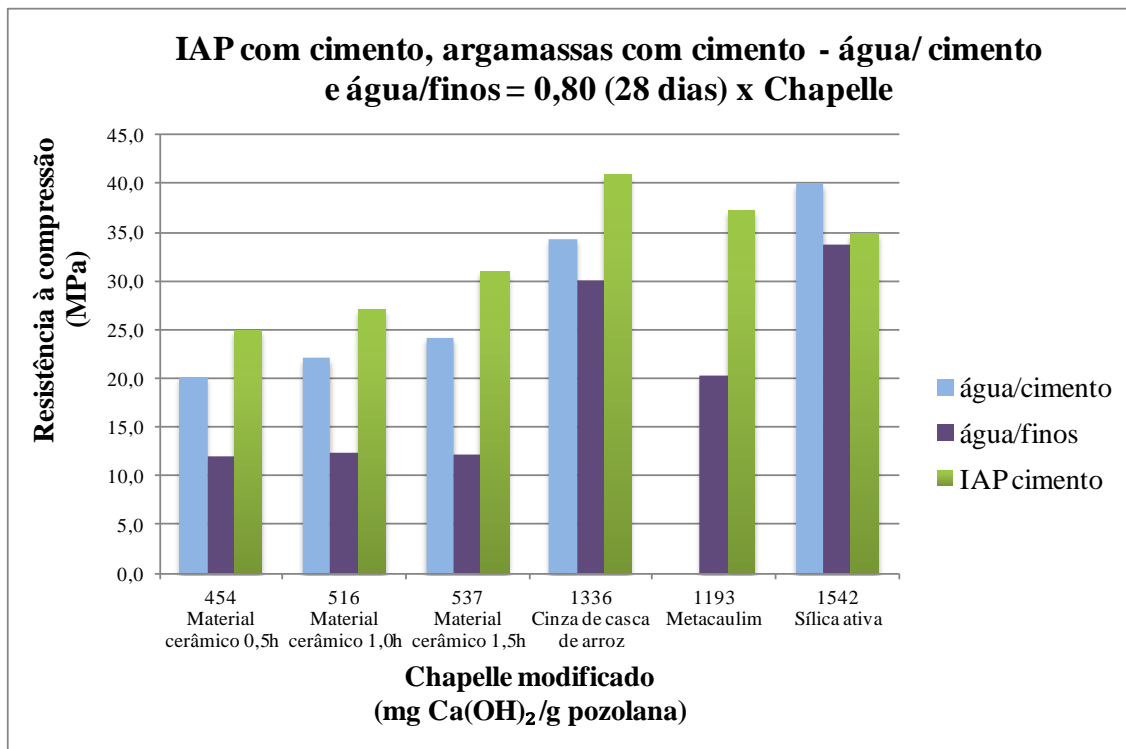


Figura 65 – Comparação das resistências à compressão aos 28 dias com a reatividade pelo ensaio de Chappelle modificado.

A Figura 66 evidencia os dados de resistência à compressão a 7 dias de cura para o caso de relação água/cimento e água/finos constantes. Deve-se notar que no caso de empregar a relação água/cimento constante, as adições testadas funcionam como simples acréscimo sem ser considerada na proporção de água. No caso da fixação da relação água/finos, a adição é contabilizada no acréscimo de água na argamassa e isso gera maior consumo de água por unidade de volume de argamassa e maior volume de poros provenientes da fração da água que não foi consumida nas reações de hidratação. É por esse motivo que os valores de resistência à compressão são sempre menores no caso da fixação da relação água/finos do que no caso de fixação da relação água/cimento.

Deve-se notar que para o estudo com a fixação da relação água/cimento e consistência variável o resultado de resistência à compressão das adições com alta pozolanicidade estão acima dos valores da série de referência e os valores das séries com materiais inertes tendem a ficar próximos da série de referência. Já, no caso de fixação da relação água/finos, os valores de materiais pozolânicos tendem a apresentar

valores mais próximos aos da série de referência e os de adições inertes foram sempre inferiores aos da série de referência.

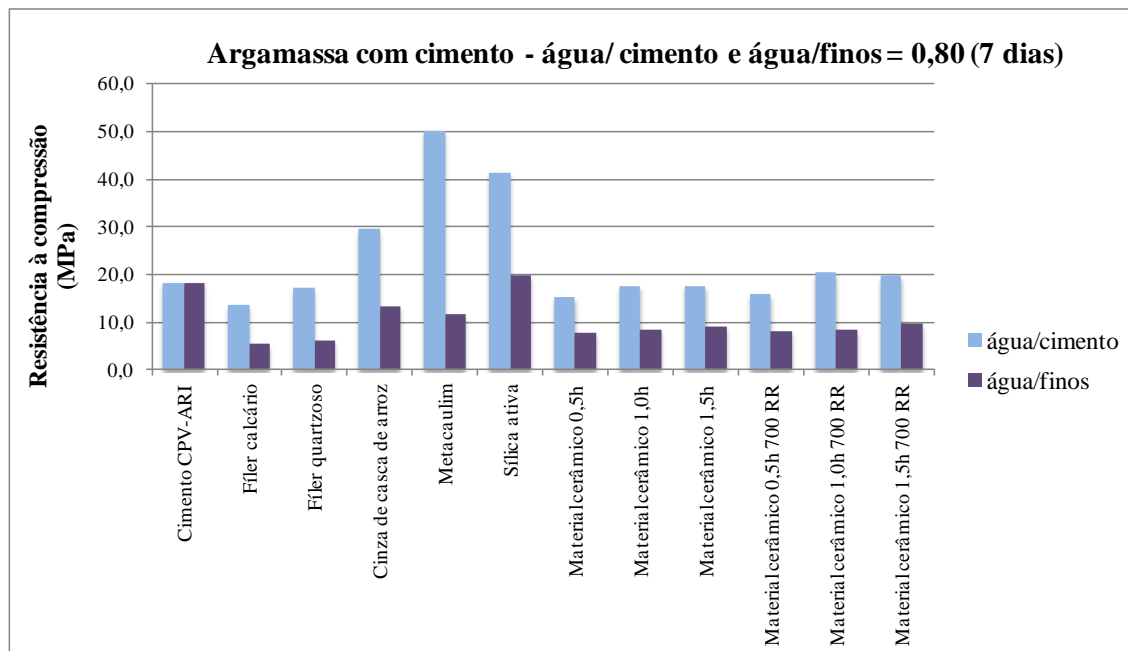


Figura 66 – Comparação de resistência à compressão aos 7 dias de argamassas com cimento e consistência variável.

Para melhor interpretar os dados de consistência variável elaborou-se a Figura 67, separando os dados das adições inertes e com baixa reatividade. Os resultados mostram que a substituição de 35% de cimento, em volume, por cada adição indica que as resistências são semelhantes aos da série de referência no caso de fixação da relação água/cimento e inferiores a série de referência no caso de fixação da relação água/finos. Isso é justificável porque sendo a adição inerte ou pouco reativa, a fixação da relação água/cimento tende a manter a qualidade da pasta, existindo em todos os casos a mesma quantidade de água para reação com a fração de material reativo do sistema. Já, no caso de fixar a relação água/finos, o desempenho da pasta tende a ser inferior a da série de referência, pois a proporção de água em relação a fração anidra do cimento é maior nos sistemas em que as adições inertes ou baixa reatividade são aplicadas. Existindo mais água no sistema e admitindo que a sua quantidade necessária para as reações de hidratação da fração amorfa esteja presente em todos os casos, significa que o aumento da relação água/material amorfo irá gerar elevação no volume de poros da argamassa, sendo coerente a ocorrência de redução da resistência à compressão. O detalhe que pode

contrapor estes argumentos e também influenciar nos resultados é o empacotamento dos grãos da argamassa, que também deve ter efeito nos sistemas estudados.

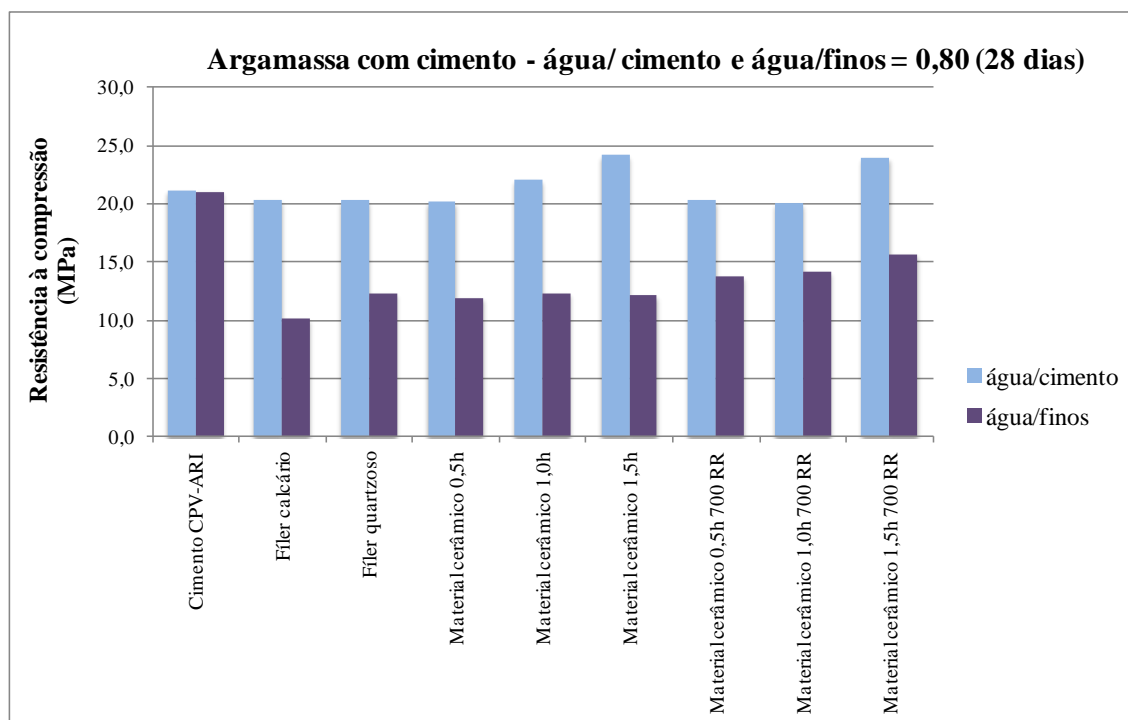


Figura 67 – Comparação de resistência à compressão aos 28 dias de argamassas com adições inertes e de baixa reatividade para o caso de consistência variável.

Deve-se destacar que o empacotamento de partículas é um tema bem mais complexo, sendo necessário sua otimização para se obter seu efeito potencializado e neste trabalho não se objetivou fazer um estudo de empacotamento de partículas.

## 5. Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar os métodos de ensaio do índice de atividade pozolânica prescrito pelas normas NBR 5751/12 e 5752/12, utilizando para essa análise ensaios complementares. A partir dos resultados obtidos com os ensaios descritos no programa experimental, seguem as conclusões das análises realizadas, sendo elas válidas às condições expostas ao longo deste trabalho.

### 5.1. Conclusões

Pelo ensaio de Chapelle modificado as amostras de fíleres, calcário e quartzoso, foram considerados materiais inertes e as adições cerâmicas com alguma reatividade, e apresentaram alta reatividade com elevados valores de consumo de hidróxido de cálcio, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim.

Avaliando a finura Blaine destas amostras com atividade pozolânica, houve o aumento da reatividade conforme maior foi a área específica do material e o acréscimo da resistência à compressão aos 28 dias de cura para o caso de relação água/cimento e água/finos constantes. Contudo, é importante salientar que os materiais usados nesta avaliação não são de mesma composição. Desse modo, existiram outros fatores de influência além da finura, o que prejudica a constatação efetuada.

O ensaio de índice de atividade pozolânica com cal, conforme preconizado pela NBR 5751/12, não foi apropriado para a avaliação de pozolanas de alta reatividade, como o metacaulim e a sílica ativa, devido ao esgotamento da reserva alcalina durante o andamento de ensaio. Desta forma, se faz necessário alterar a proporção em massa dos materiais, aumentando a relação portlandita/pozolana, tal qual, possa garantir a disponibilidade de cal até o fim do ensaio.

Na DRX das pastas de hidróxido de cálcio, não houve evidências da formação de qualquer produto hidratado quando testadas as adições fíler calcário e pó de quartzo, comprovando assim que tais adições minerais são inertes, podendo ser utilizadas como material de enchimento melhorando o empacotamento das partículas. Já, para as adições, metacaulim e sílica ativa, foi possível observar o esgotamento da reserva

alcalina durante o período de ensaio. Ressaltando que não foram realizados os ensaios de DRX para as pastas contendo material cerâmico.

Para o IAP com cal, a argamassa contendo metacaulim apresentou a maior resistência à compressão dentre as adições minerais ativas estudadas, atingindo 17,2 MPa aos 7 dias de idade, seguido da argamassa com sílica ativa, com resistência à compressão média de 9,6 MPa. Considerando que em ambos os casos toda a portlandita foi consumida pela adição, pode-se considerar que deve existir diferença na estrutura cristalina formada em cada adição, pois as resistências foram bem distintas. Como tanto para o metacaulim como para a sílica ativa houve material amorfo remanescente, isso indica que nem todo o potencial reativo de cada uma delas foi medido. Já, no caso da cinza de casca de arroz, a identificação de portlandita no difratograma possibilita a continuidade da reação química, que foi interrompida pelo término do ensaio, portanto, há potencial para que a reação tenha continuidade, desde que disponível um maior tempo de cura.

Os compostos hidratados formados na presença de cal hidratada diferem daqueles observados na presença de cimento para as pozolanas que contém alumina na composição da fração vítrea, influenciando na resistência à compressão da matriz hidratada. Assim sendo, o estudo do IAP com cimento Portland está melhor relacionado com as aplicações práticas, devendo, portanto, ser indispensável quando da análise da pozolanicidade de adição mineral com a presença de alumínio da composição química.

O procedimento de moagem das amostras de material cerâmico não se mostrou eficiente quando aplicado em argamassas com cimento, tanto para a avaliação da atividade pozolânica com cimento quanto para as argamassas com consistência variável e fixação de parâmetros (espalhamento fixo). Porém, seu efeito foi significativo quando moldadas argamassas para o índice de atividade pozolânica com cal.

A calcinação a 700 °C com resfriamento rápido proporcionou um acréscimo na reatividade medida pelo Chapelle modificado, mas não foi eficiente em influenciar a resistência à compressão quando comparadas as argamassas contendo material cerâmico apenas moído, nos ensaios de índice de atividade pozolânica com cal e com cimento, e nem nas argamassas com fixação de parâmetros.

As normas não consideram parâmetros importantes para a atividade pozolânica, como a área específica, as características físico-químicas das pozolanas, o teor de amorfos e a taxa de reação ao longo do tempo em função da temperatura de cura, os quais interferem na resistência da argamassa no estado endurecido.

## ***5.2. Sugestões de trabalhos futuros***

Neste trabalho, a análise foi realizada pela execução de argamassas, no entanto há diferenças no desenvolvimento da resistência de argamassas e concretos, devido a interface pasta-agregado para os concretos. Desta forma, sugere-se que estudos semelhantes sejam realizados, mas baseando-se na resistência à compressão de concretos com pozolanas. Além da avaliação da durabilidade de compósitos cimentícios com as adições minerais estudadas.

No caso onde a reação química foi interrompida pelo término do ensaio, sugere-se um maior tempo de cura para que as reações tenham continuidade. Então, a sugestão é pesquisar o tempo necessário para que as reações ocorram de modo a propor mudança no tempo estabelecido pela norma atual.

Torna-se também interessante o estudo da temperatura ótima de calcinação do material cerâmico para atingir maior reatividade, além do tempo ótimo de permanência no processo de calcinação para a maior atividade pozolânica.

## Referências bibliográficas

- AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1ª Edição. PINI. São Paulo, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal.. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7214**: Areia Normal para ensaio de Cimento. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, 1996.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13956**: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Especificação. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15894**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 76**: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.
- BATTAGIN, A. F. Capítulo 6: Cimento Portland. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo. 1 v. 2011.
- BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. Capítulo 24 – O cimento Portland no Brasil. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. Vol 1. 2ª Edição atualizada e ampliada. IBRACON. São Paulo, 2010.
- BONAVETTI, V.; DONZA, H.; MENENDEZ, G.; CABRERA, O.; IRASSAR, E. F.. Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy. **Cement and Concrete Research**. N° 33, 865–871, 2003.
- BIZ, C. E. **Concreto de pós reativos**. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 2001.

CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Performance of advanced concretes for building site designed by computing mix proportion technique. **Cerâmica**, São Paulo, v. 55, n. 335, Setembro. 2009.

CHAKCHOUK, A.; TRIFI, L.; SAMET, B.; BOUAZIZ, S. Formulation of blended cement: Effect of process variables on clay pozzolanic activity. **Construction and Building Materials**. N° 23, 1365-1373, 2009.

CHEN, M.; LIN, J.; WU S.; LIU, C.. Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture. **Construction and Building Materials**. N° 25, 1532 – 1536, 2011.

CINCOTTO, M. A.; COSTA, M. do R. de M. M. da. Metodologia de caracterização de argamassas colantes. Relatório Técnico, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

CORDEIRO, G. C.. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

DAL MOLIN, D. C. C. Capítulo 8: Adições minerais. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo. 1 v. 2011.

DESMET, B.; GROUP, S.; VANTOMME, J.; DE SCHUTTER, G.; LESAGE, K.; VANDEWALLW, L. Parametric study of the effects of the composition on the setting of self-compacting mortar, using continuous ultrasonic monitoring. In: Design, production and placement of self-consolidating concrete, SCC2010. Canada. 2010.

DONATELLO, S.; TYER, M.; CHEESEMAN, C. R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. **Cement & Concrete Composites**. N° 32, 121-127, 2010.

FARIAS FILHO, J. de; ROLIM, J. S.; TOLEDO FILHO, R. D. Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p.437-444, 2000.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto**. Dissertação. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Rio Grande do Sul. 2013.

FELEKOGU, B.. A new approach to the characterisation of particle shape and surface properties of powders employed in concrete industry. **Construction and Building Materials**. N° 23, 1154–1162, 2009.

FONSECA, G. C. da. **Adições minerais e disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. 2010.



FREITAS, E. de S. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do Município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. Dissertação. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro, 2005.

FRÍAS, M.; VILLAR COCIÑA, E.; SAVASTANO JR, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement & Concrete Composites**. N° 33, 490-496, 2011.

GAVA, G. P. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 1999.

GAVA, G. P.; PRUDÊNCIO JR., L. R. Pozzolanic activity tests as a measure of pozzolans' performance. Part 1. **Magazine of Concrete Research**. N° 10, 735-741, 2007 a.

\_\_\_\_\_. Pozzolanic activity tests as a measure of pozzolans' performance. Part 2. **Magazine of Concrete Research**. N° 10, 729-734, 2007 b.

GOBBI, A. **Cinza do bagaço de cana-de-açúcar como adição para concreto: investigação sobre a atividade pozolânica**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Paraná. Paraná. 2010.

GOBBI, A.; GROENWOLD, J. A.; MEDEIROS, M. H. F. de. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar: Contribuição para a sustentabilidade dos materiais de reparo. In: **VI Congresso Internacional sobre Patologias e Reabilitação de Estruturas**, 2010, Córdoba. Anais do VI CINPAR, 2010 a.

GOBBI, A.; GROENWOLD, J. A.; MEDEIROS, M. H. F. de. Influência da Temperatura de Calcinação e Tipo de Resfriamento na Atividade Pozzolânica da Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar. In: **52º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2010, Ceará. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 2010 b.

GONÇALVES, J. P.. Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos. **Revista Escola de Minas**. N° 60, 639-344, 2007.

HENCHE, D.. **Composto cimentício de alta resistência com adição de nanotubos de carbono**. Dissertação. Universidade Federal do Paraná. Paraná. 2013.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.

HOPPE FILHO, J. **Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2002.

HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F. de; PEREIRA, E.; HELENE, P. ; ISAIA, G. C.. High-volume fly ash concrete with and without hydrated lime: chloride diffusion

coefficient from accelerated test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, p. 411-418, 2013.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores conjunturais: produção agrícola. Brasília, 2012. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa\\_201204\\_5.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201204_5.shtm). Acessado em: maio de 2012.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de alto desempenho: um estudo de durabilidade com vistas a corrosão da armadura**. Tese. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C.; FURQUIM, P.; GASTALDINI, A. L. A statistical approach of binary and ternary concrete mixtures with mineral additions. **Construction & Building Materials**, v. 36, p. 597-603, 2012.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.. Concrete sustainability with very high amount of fly ash and slag. ISSN 1983-4195. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v. 2, 244-253, 2009.

KANNING, R. C.; PORTELLA, K. F.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; BONATO, M. M.; DOS SANTOS, J. C. M.. Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement. **Construction & Building Materials**. v. 54, 460-465, 2014.

KAZMIERCZAK, C. de S. Capítulo 18 – Produtos de cerâmica vermelha. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. Vol 1. 2ª Edição atualizada e ampliada. IBRACON. São Paulo, 2010.

KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELLO, A.; DAL MOLIN, D. C. C.; SILVA FILHO, L. C. P. da. Capítulo 46: Concreto branco. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo. 2 v. 2011.

KRIVENKO, P.; DROCHYTKA, R.; GELEVERA, A.; KAVALEROVA, E.. Mechanism of preventing the alkali–aggregate reaction in alkali activated cement concretes. **Cement & Concrete Composites**. N° 45, 157-165, 2014.

KUPERMAN, S. C.; SALLES, F. M.; PÍNFARE, J. C.; CARNEIRO, E. F. A CESP e a Detecção da reação álcali-agregado. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens. Goiânia, 2005.

LAWRENCE, P.; CYR, M; RINGOT, E.. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**. N° 33, 1939–1947, 2003.

LUZ, D. C. S. da. **Efeito do tratamento superficial da sílica ativa com soluções de ácidos nítrico e fosfórico em propriedades do concreto**. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte. 2005.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. **Advances in Concrete Technology**. Vol 1, CANEMET. Canadá, 1996.

MATIAS, G.; FARIA, P.; TORRES, I.; TOMÁS, A.; FERREIRA, T.; DUARTE, T. Argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica. In: 4º Congresso de Argamassas de Construção da APFAC. Coimbra, 2012.

MEDEIROS, M.; HELENE, P. Relatório Técnico do Metacaulim HP como adição de Alta Eficiência em Concretos de Cimento Portland. Relatório Técnico, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

MEDINA, E. A.. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio.** Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

MEHTA, P. K. Reducing the environmental impact of concrete: concrete can be durable and environmentally friendly. **Concrete Internacional.** 61-66, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3ª Edição em Inglês. 1ª Edição em Português. Editora IBRACON. São Paulo, 2008.

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçado com fibras de celulose e PVA.** Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

ODLER, I. The BET-specific surface area of hydrated Portland cement and related materials. **Cement and Concrete Research.** v. 33, Nº 12, 2049-2056, 2003.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e Construções.** Nº53, 14-19, 2009.

RAO, G. A. Investigation on the performance of silica fume- incorporated cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research,** v. 33, n.11, p. 1765-1770, 2003.

REPETTE, W. L. Capítulo 48: Concreto autoadensável. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo. 2 v. 2011.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research,** v. 25, n.7, p. 1501-1511, 1995.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade.** Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. 2005.

ROCHA, L; PERES, A. E. C. Aproveitamento econômico das lamas de ferro. **Revista Escola de Minas.** v.62, Nº 3, 291-295, 2009.

SENHADJI, Y.; ESCADEILLAS, G.; MOULI, M.; KHELAFI, H. BENOSMAN. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. **Powder Technology.** 314–323, 2014.

SILVA, M. G. da. Capítulo 25 – Cimentos Portland com Adições Minerais. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. Vol 1. 2ª Edição atualizada e ampliada. IBRACON. São Paulo, 2010.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. Relatórios anuais Disponível em: <http://www.snic.org.br/>. Acessado em: junho de 2012.

SOARES, R. A. L.. **Efeito da adição de carbonatos em formulação de massa para revestimento cerâmico utilizando matérias-primas do Piauí**. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte. 2010.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Capítulo 36: Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo. 2 v. 2011.

VALENZUELA, F. A. de O.; CHODOUNSKY, M. A. Novos conceitos na produção de concretos de alto desempenho para pisos industriais. **ANAPRE – Associação Nacional de Pisos e revestimentos de Alto Desempenho**. 2010.

VIEIRA, A. de A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de Cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. Dissertação. Universidade Federal da Paraíba. Paraíba, 2005.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. The Cement Sustainability Initiative - Cement Industry Energy and CO2 Performance - “Getting the Numbers Right”. Disponível em: [http://www.wbcdcement.org/pdf/CSI%20GNR%20Report%20final\\_updated%20Nov11\\_LR.pdf](http://www.wbcdcement.org/pdf/CSI%20GNR%20Report%20final_updated%20Nov11_LR.pdf) . Acessado em: janeiro de 2014.

ZERBINO, R.; GIACCIO, G.; ISAIA, G. C. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. **Construction & Building Materials**. v. 25, 371-378, 2011.

ZERBINO, R.; GIACCIO, G.; BATIC, O. R.; ISAIA, G. C. Alkali–silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash. **Construction and Building Materials**. Nº 36, 796-806, 2012.

## Apêndice 1

Neste apêndice, estão compreendidos os dados obtidos nos ensaios realizados de resistência à compressão nas argamassas de índice de atividade pozolânica com cal e com cimento, e nas argamassas com fixação de parâmetros, sem a eliminação dos espúrios.

### Índice de atividade pozolânica com cal

Tabela 25 - Resultado resistência à compressão IAP com cal.

Argamassas	7 dias (MPa)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Maior
Fíler calcário	0,5	0,4	0,5	0,5
Fíler quartzoso	2,2	2,2	2,1	2,2
Cinza de casca de arroz	6,3	6,1	5,9	6,3
Metacaulim	18,1	16,5	17,0	18,1
Sílica ativa	8,7	9,7	10,3	10,3
Material cerâmico 0,5h	2,9	3,1	3,0	3,1
Material cerâmico 1,0h	3,8	3,9	3,7	3,9
Material cerâmico 1,5h	4,7	4,8	5,0	5,0
Material cerâmico 0,5h 700 RR	2,6	2,7	2,8	2,8
Material cerâmico 1,0h 700 RR	3,8	3,8	3,8	3,8
Material cerâmico 1,5h 700 RR	5,1	4,9	5,1	5,1

Tabela 26 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para IAP com cal.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Fíler calcário-Cinza de casca de arroz	-5,63	-6,69	-4,58	1,83E-13
Fíler quartzoso-Cinza de casca de arroz	-3,93	-4,99	-2,88	2,51058E-10
Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz	-3,10	-4,15	-2,05	2,35678E-08
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-3,40	-4,45	-2,35	4,21062E-09
Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz	-2,30	-3,35	-1,25	4,1774E-06
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-2,30	-3,35	-1,25	4,1774E-06
Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz	-1,27	-2,32	-0,21	0,010395786
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-1,07	-2,12	-0,01	0,045965674
Metacaulim-Cinza de casca de arroz	11,10	10,05	12,15	2,10942E-14
Sílica ativa-Cinza de casca de arroz	3,47	2,41	4,52	2,9127E-09
Fíler quartzoso-Fíler calcário	1,70	0,65	2,75	0,000358086
Material cerâmico 0,5h-Fíler calcário	2,53	1,48	3,59	8,41269E-07
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler calcário	2,23	1,18	3,29	6,69704E-06
Material cerâmico 1,0h-Fíler calcário	3,33	2,28	4,39	6,11702E-09
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler calcário	3,33	2,28	4,39	6,11702E-09
Material cerâmico 1,5h-Fíler calcário	4,37	3,31	5,42	3,19693E-11
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler calcário	4,57	3,51	5,62	1,32836E-11
Metacaulim-Fíler calcário	16,73	15,68	17,79	2,10942E-14
Sílica ativa-Fíler calcário	9,10	8,05	10,15	2,10942E-14
Material cerâmico 0,5h-Fíler quartzoso	0,83	-0,22	1,89	0,212182842
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler quartzoso	0,53	-0,52	1,59	0,764216161

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Material cerâmico 1,0h-Fíler quartzoso	1,63	0,58	2,69	0,000600661
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler quartzoso	1,63	0,58	2,69	0,000600661
Material cerâmico 1,5h-Fíler quartzoso	2,67	1,61	3,72	3,48556E-07
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler quartzoso	2,87	1,81	3,92	9,73881E-08
Metacaulim-Fíler quartzoso	15,03	13,98	16,09	2,10942E-14
Sílica ativa-Fíler quartzoso	7,40	6,35	8,45	2,18714E-14
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	-0,30	-1,35	0,75	0,992604616
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h	0,80	-0,25	1,85	0,256310383
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	0,80	-0,25	1,85	0,256310383
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h	1,83	0,78	2,89	0,000128554
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	2,03	0,98	3,09	2,86158E-05
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h	14,20	13,15	15,25	2,10942E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h	6,57	5,51	7,62	2,72005E-14
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	1,10	0,05	2,15	0,036157732
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	1,10	0,05	2,15	0,036157732
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	2,13	1,08	3,19	1,37513E-05
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	2,33	1,28	3,39	3,30699E-06
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR	14,50	13,45	15,55	2,10942E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR	6,87	5,81	7,92	2,38698E-14
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	0,00	-1,05	1,05	1
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h	1,03	-0,02	2,09	0,058190186
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	1,23	0,18	2,29	0,013403589
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h	13,40	12,35	14,45	2,10942E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h	5,77	4,71	6,82	1,16684E-13
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR	1,03	-0,02	2,09	0,058190186
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR	1,23	0,18	2,29	0,013403589
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR	13,40	12,35	14,45	2,10942E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR	5,77	4,71	6,82	1,16684E-13
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h	0,20	-0,85	1,25	0,999736034
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h	12,37	11,31	13,42	2,10942E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h	4,73	3,68	5,79	6,5643E-12
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR	12,17	11,11	13,22	2,10942E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR	4,53	3,48	5,59	1,53348E-11
Sílica ativa-Metacaulim	-7,63	-8,69	-6,58	2,15383E-14

## Índice de atividade pozolânica com cimento

Tabela 27 - Resultado resistência à compressão IAP com cimento.

Argamassas	28 dias (MPa)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Maior
Cimento CPV-ARI	39,5	42,1	41,6	42,1
Fíler calcário	23,2	23,5	23,0	23,5
Fíler quartzoso	24,0	23,0	22,4	24,0
Cinza de casca de arroz	36,7	40,9	32,9	40,9
Metacaulim	35,1	36,5	37,3	37,3
Sílica ativa	29,6	34,9	33,9	34,9
Material cerâmico 0,5h	24,2	24,8	23,9	24,8
Material cerâmico 1,0h	27,1	25,5	24,5	27,1
Material cerâmico 1,5h	29,6	30,4	31,0	31,0
Material cerâmico 0,5h 700 RR	21,3	23,4	22,4	23,4
Material cerâmico 1,0h 700 RR	24,5	23,7	25,1	25,1
Material cerâmico 1,5h 700 RR	27,4	25,9	28,6	28,6

Tabela 28 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para IAP com cimento.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Cinza de casca de arroz-Cimento CPV-ARI	-4,23	-9,16	0,70	0,141201856
Fíler calcário-Cimento CPV-ARI	-17,83	-22,76	-12,90	1,30907E-10
Fíler quartzoso-Cimento CPV-ARI	-17,93	-22,86	-13,00	1,16253E-10
Material cerâmico 0,5h-Cimento CPV-ARI	-16,77	-21,70	-11,84	4,77646E-10
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-18,70	-23,63	-13,77	4,75004E-11
Material cerâmico 1,0h-Cimento CPV-ARI	-15,37	-20,30	-10,44	2,84577E-09
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-16,63	-21,56	-11,70	5,6363E-10
Material cerâmico 1,5h-Cimento CPV-ARI	-10,73	-15,66	-5,80	2,47892E-06
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-13,77	-18,70	-8,84	2,52013E-08
Metacaulim-Cimento CPV-ARI	-4,77	-9,70	0,16	0,064499368
Sílica ativa-Cimento CPV-ARI	-8,27	-13,20	-3,34	0,000158362
Fíler calcário-Cinza de casca de arroz	-13,60	-18,53	-8,67	3,1925E-08
Fíler quartzoso-Cinza de casca de arroz	-13,70	-18,63	-8,77	2,76957E-08
Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz	-12,53	-17,46	-7,60	1,51348E-07
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-14,47	-19,40	-9,54	9,51603E-09
Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz	-11,13	-16,06	-6,20	1,30734E-06
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-12,40	-17,33	-7,47	1,84812E-07
Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz	-6,50	-11,43	-1,57	0,003549223
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-9,53	-14,46	-4,60	1,79595E-05
Metacaulim-Cinza de casca de arroz	-0,53	-5,46	4,40	0,9999996
Sílica ativa-Cinza de casca de arroz	-4,03	-8,96	0,90	0,185171734
Fíler quartzoso-Fíler calcário	-0,10	-5,03	4,83	1
Material cerâmico 0,5h-Fíler calcário	1,07	-3,86	6,00	0,999578726
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler calcário	-0,87	-5,80	4,06	0,999942374
Material cerâmico 1,0h-Fíler calcário	2,47	-2,46	7,40	0,800919003

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler calcário	1,20	-3,73	6,13	0,998769025
Material cerâmico 1,5h-Fíler calcário	7,10	2,17	12,03	0,001234167
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler calcário	4,07	-0,86	9,00	0,177167291
Metacaulim-Fíler calcário	13,07	8,14	18,00	6,88704E-08
Sílica ativa-Fíler calcário	9,57	4,64	14,50	1,69784E-05
Material cerâmico 0,5h-Fíler quartzoso	1,17	-3,76	6,10	0,99904338
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler quartzoso	-0,77	-5,70	4,16	0,999983003
Material cerâmico 1,0h-Fíler quartzoso	2,57	-2,36	7,50	0,761370087
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler quartzoso	1,30	-3,63	6,23	0,997520792
Material cerâmico 1,5h-Fíler quartzoso	7,20	2,27	12,13	0,001034385
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler quartzoso	4,17	-0,76	9,10	0,154796567
Metacaulim-Fíler quartzoso	13,17	8,24	18,10	5,9541E-08
Sílica ativa-Fíler quartzoso	9,67	4,74	14,60	1,43506E-05
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	-1,93	-6,86	3,00	0,949237619
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h	1,40	-3,53	6,33	0,995369627
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	0,13	-4,80	5,06	1
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h	6,03	1,10	10,96	0,007993581
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	3,00	-1,93	7,93	0,568218456
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h	12,00	7,07	16,93	3,38884E-07
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h	8,50	3,57	13,43	0,000105472
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	3,33	-1,60	8,26	0,419924534
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	2,07	-2,86	7,00	0,923044539
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	7,97	3,04	12,90	0,000267793
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	4,93	0,00	9,86	0,04974872
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR	13,93	9,00	18,86	1,99291E-08
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR	10,43	5,50	15,36	4,03296E-06
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	-1,27	-6,20	3,66	0,998019227
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h	4,63	-0,30	9,56	0,079026136
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	1,60	-3,33	6,53	0,986628562
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h	10,60	5,67	15,53	3,07533E-06
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h	7,10	2,17	12,03	0,001234167
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR	5,90	0,97	10,83	0,010053259
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR	2,87	-2,06	7,80	0,629598041
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR	11,87	6,94	16,80	4,15766E-07
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR	8,37	3,44	13,30	0,000133013
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h	-3,03	-7,96	1,90	0,552895999
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h	5,97	1,04	10,90	0,008966111
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h	2,47	-2,46	7,40	0,800919003
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR	9,00	4,07	13,93	4,44881E-05
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR	5,50	0,57	10,43	0,019791315
Sílica ativa-Metacaulim	-3,50	-8,43	1,43	0,352832203



## Argamassas com fixação de parâmetros

### Com cal para resistência à compressão

Tabela 29 - Resultado resistência à compressão de argamassas com cal e relação água/finos = 0,80.

Argamassas	7 dias (MPa)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Maior
Fíler calcário	1,0	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	1,0
Fíler quartzoso	0,7	0,6	0,5	0,7
Cinza de casca de arroz	4,8	4,4	5,2	5,2
Metacaulim	13,8	14,8	14,8	14,8
Sílica ativa	20,3	16,8	19,0	20,3
Material cerâmico 0,5h	1,8	1,5	1,9	1,9
Material cerâmico 1,0h	2,5	2,2	2,2	2,5
Material cerâmico 1,5h	2,8	2,9	2,4	2,9
Material cerâmico 0,5h 700 RR	2,0	2,0	- <sup>1</sup>	2,0
Material cerâmico 1,0h 700 RR	- <sup>1</sup>	3,0	2,6	3,0
Material cerâmico 1,5h 700 RR	3,3	3,6	3,7	3,7

<sup>1</sup> Corpo de prova não resistiu ao capeamento com enxofre.

Tabela 30 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para argamassas com cal e relação água/finos = 0,80.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Fíler calcário-Cinza de casca de arroz	-3,80	-6,57	-1,03	0,003152376
Fíler quartzoso-Cinza de casca de arroz	-4,20	-6,16	-2,24	1,35056E-05
Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz	-3,07	-5,02	-1,11	0,000746929
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-2,80	-4,99	-0,61	0,006345825
Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz	-2,50	-4,46	-0,54	0,006453642
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-2,00	-4,19	0,19	0,090505932
Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz	-2,10	-4,06	-0,14	0,029449515
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-1,27	-3,22	0,69	0,433720403
Metacaulim-Cinza de casca de arroz	9,67	7,71	11,62	2,2859E-11
Sílica ativa-Cinza de casca de arroz	13,90	11,94	15,86	8,79297E-14
Fíler quartzoso-Fíler calcário	-0,40	-3,17	2,37	0,999967943
Material cerâmico 0,5h-Fíler calcário	0,73	-2,03	3,50	0,994386344
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler calcário	1,00	-1,93	3,93	0,967050696
Material cerâmico 1,0h-Fíler calcário	1,30	-1,47	4,07	0,808293637
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler calcário	1,80	-1,13	4,73	0,504944582
Material cerâmico 1,5h-Fíler calcário	1,70	-1,07	4,47	0,502660865
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler calcário	2,53	-0,23	5,30	0,089731887
Metacaulim-Fíler calcário	13,47	10,70	16,23	2,99925E-11
Sílica ativa-Fíler calcário	17,70	14,93	20,47	4,11005E-13
Material cerâmico 0,5h-Fíler quartzoso	1,13	-0,82	3,09	0,579375059
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler quartzoso	1,40	-0,79	3,59	0,44880115

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Material cerâmico 1,0h-Fíler quartzoso	1,70	-0,26	3,66	0,122433319
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler quartzoso	2,20	0,01	4,39	0,047932248
Material cerâmico 1,5h-Fíler quartzoso	2,10	0,14	4,06	0,029449515
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler quartzoso	2,93	0,98	4,89	0,001234101
Metacaulim-Fíler quartzoso	13,87	11,91	15,82	9,08162E-14
Sílica ativa-Fíler quartzoso	18,10	16,14	20,06	2,53131E-14
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	0,27	-1,92	2,45	0,999993442
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h	0,57	-1,39	2,52	0,989157037
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	1,07	-1,12	3,25	0,774740896
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h	0,97	-0,99	2,92	0,76206651
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	1,80	-0,16	3,76	0,087077564
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h	12,73	10,78	14,69	3,1819E-13
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h	16,97	15,01	18,92	2,59792E-14
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	0,30	-1,89	2,49	0,999980287
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	0,80	-1,60	3,20	0,971133582
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	0,70	-1,49	2,89	0,97821711
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	1,53	-0,65	3,72	0,332520174
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR	12,47	10,28	14,65	2,18559E-12
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR	16,70	14,51	18,89	3,95239E-14
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	0,50	-1,69	2,69	0,998250714
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h	0,40	-1,56	2,36	0,99930769
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	1,23	-0,72	3,19	0,468799412
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h	12,17	10,21	14,12	6,21725E-13
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h	16,40	14,44	18,36	2,68674E-14
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR	-0,10	-2,29	2,09	1
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR	0,73	-1,45	2,92	0,970341421
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR	11,67	9,48	13,85	6,08802E-12
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR	15,90	13,71	18,09	6,52811E-14
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h	0,83	-1,12	2,79	0,880151913
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h	11,77	9,81	13,72	1,00586E-12
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h	16,00	14,04	17,96	2,79776E-14
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR	10,93	8,98	12,89	2,92877E-12
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR	15,17	13,21	17,12	3,53051E-14
Sílica ativa-Metacaulim	4,23	2,28	6,19	1,20973E-05

## Com cimento para resistência à compressão

### *Argamassas sem aditivo superplastificante (consistência variável)*

#### Relação água/cimento = 0,80

Tabela 31 - Resultado de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80.

Argamassas	7 dias (MPa)				28 dias (MPa)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Maior	CP 1	CP 2	CP 3	Maior
Cimento CPV-ARI	20,6	21,7	17,9	21,7	21,1	21,2	20,9	21,2
Fíler calcário	18,8	16,9	17,0	18,8	17,5	19,0	20,4	20,4
Fíler quartzoso	17,0	19,7	17,4	19,7	19,6	18,9	20,3	20,3
Cinza de casca de arroz	30,4	30,4	30,9	30,9	34,4	31,4	31,8	34,4
Metacaulim	35,1	36,5	38,9	38,9	25,8	22,0	29,8	29,8
Sílica ativa	41,1	29,7	38,7	41,1	40,0	39,5	39,8	40,0
Material cerâmico 0,5h	16,8	16,9	16,8	16,9	20,1	20,1	20,2	20,2
Material cerâmico 1,0h	19	17,6	17,1	19,0	19,6	22,1	20,7	22,1
Material cerâmico 1,5h	17,7	23,6	25,4	25,4	22,4	24,2	24,2	24,2
Material cerâmico 0,5h 700 RR	13,6	14,4	14,7	14,7	20,3	18,2	19,2	20,3
Material cerâmico 1,0h 700 RR	16,7	17,0	15,9	17,0	18,2	20,1	19,5	20,1
Material cerâmico 1,5h 700 RR	17	20,3	19,5	20,3	23,9	24,0	23,3	24,0

Tabela 32 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Cinza de casca de arroz-Cimento CPV-ARI	11,47	8,66	14,27	4,1634E-11
Fíler calcário-Cimento CPV-ARI	-2,10	-4,91	0,71	0,272183022
Fíler quartzoso-Cimento CPV-ARI	-1,47	-4,27	1,34	0,730213702
Material cerâmico 0,5h-Cimento CPV-ARI	-0,93	-3,74	1,87	0,977339725
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-1,83	-4,64	0,97	0,446471329
Material cerâmico 1,0h-Cimento CPV-ARI	-0,27	-3,07	2,54	0,99999958
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-1,80	-4,61	1,01	0,471407179
Material cerâmico 1,5h-Cimento CPV-ARI	2,53	-0,27	5,34	0,101404175
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	2,67	-0,14	5,47	0,072346606
Sílica ativa-Cimento CPV-ARI	18,70	15,89	21,51	2,29816E-14
Fíler calcário-Cinza de casca de arroz	-13,57	-16,37	-10,76	1,47593E-12
Fíler quartzoso-Cinza de casca de arroz	-12,93	-15,74	-10,13	3,89344E-12
Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz	-12,40	-15,21	-9,59	8,96527E-12
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-13,30	-16,11	-10,49	2,21578E-12
Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz	-11,73	-14,54	-8,93	2,65052E-11
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-13,27	-16,07	-10,46	2,33169E-12
Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz	-8,93	-11,74	-6,13	5,36895E-09
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-8,80	-11,61	-5,99	7,12273E-09
Sílica ativa-Cinza de casca de arroz	7,23	4,43	10,04	2,50302E-07

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Fíler quartzoso-Fíler calcário	0,63	-2,17	3,44	0,998828478
Material cerâmico 0,5h-Fíler calcário	1,17	-1,64	3,97	0,909749066
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler calcário	0,27	-2,54	3,07	0,99999958
Material cerâmico 1,0h-Fíler calcário	1,83	-0,97	4,64	0,446471329
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler calcário	0,30	-2,51	3,11	0,999998695
Material cerâmico 1,5h-Fíler calcário	4,63	1,83	7,44	0,000261148
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler calcário	4,77	1,96	7,57	0,000177697
Sílica ativa-Fíler calcário	20,80	17,99	23,61	2,13163E-14
Material cerâmico 0,5h-Fíler quartzoso	0,53	-2,27	3,34	0,999731488
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler quartzoso	-0,37	-3,17	2,44	0,999991211
Material cerâmico 1,0h-Fíler quartzoso	1,20	-1,61	4,01	0,89477575
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler quartzoso	-0,33	-3,14	2,47	0,99999643
Material cerâmico 1,5h-Fíler quartzoso	4,00	1,19	6,81	0,001661411
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler quartzoso	4,13	1,33	6,94	0,001123381
Sílica ativa-Fíler quartzoso	20,17	17,36	22,97	2,15383E-14
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	-0,90	-3,71	1,91	0,98236468
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h	0,67	-2,14	3,47	0,998210235
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	-0,87	-3,67	1,94	0,986496168
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h	3,47	0,66	6,27	0,007894062
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	3,60	0,79	6,41	0,005360018
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h	19,63	16,83	22,44	2,18714E-14
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	1,57	-1,24	4,37	0,654022628
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	0,03	-2,77	2,84	1
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	4,37	1,56	7,17	0,000567284
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	4,50	1,69	7,31	0,000384568
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR	20,53	17,73	23,34	2,14273E-14
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	-1,53	-4,34	1,27	0,679898822
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h	2,80	-0,01	5,61	0,051003902
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	2,93	0,13	5,74	0,03560029
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h	18,97	16,16	21,77	2,25375E-14
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR	4,33	1,53	7,14	0,000625323
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR	4,47	1,66	7,27	0,000423757
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR	20,50	17,69	23,31	2,14273E-14
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h	0,13	-2,67	2,94	1
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h	16,17	13,36	18,97	5,08482E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR	16,03	13,23	18,84	5,68434E-14
Cinza de casca de arroz-Cimento CPV-ARI	11,47	8,66	14,27	4,1634E-11
Fíler calcário-Cimento CPV-ARI	-2,10	-4,91	0,71	0,272183022
Fíler quartzoso-Cimento CPV-ARI	-1,47	-4,27	1,34	0,730213702
Material cerâmico 0,5h-Cimento CPV-ARI	-0,93	-3,74	1,87	0,977339725
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-1,83	-4,64	0,97	0,446471329
Material cerâmico 1,0h-Cimento CPV-ARI	-0,27	-3,07	2,54	0,99999958
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-1,80	-4,61	1,01	0,471407179
Material cerâmico 1,5h-Cimento CPV-ARI	2,53	-0,27	5,34	0,101404175
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	2,67	-0,14	5,47	0,072346606
Sílica ativa-Cimento CPV-ARI	18,70	15,89	21,51	2,29816E-14
Fíler calcário-Cinza de casca de arroz	-13,57	-16,37	-10,76	1,47593E-12

### Relação água/finos = 0,80

Tabela 33 - Resultado resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80.

Argamassas	7 dias (MPa)				28 dias (MPa)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Maior	CP 1	CP 2	CP 3	Maior
Cimento CPV-ARI	19,3	20,8	18,8	20,8	- <sup>1</sup>	20,9	21,1	21,1
Fíler calcário	8,1	8,0	8,9	8,9	10,0	10,2	9,7	10,2
Fíler quartzoso	10,5	10,4	10,8	10,8	11,8	11,9	12,4	12,4
Cinza de casca de arroz	19,7	22,1	20,2	22,1	26,2	30,1	27,8	30,1
Metacaulim	19,2	19,6	19,5	19,6	20,4	19,5	19,2	20,4
Sílica ativa	29,4	28,0	29,8	29,8	33,8	28,6	- <sup>1</sup>	33,8
Material cerâmico 0,5h	9,5	9,1	8,6	9,5	10,8	11,5	12,0	12,0
Material cerâmico 1,0h	11,0	11,7	12,0	12,0	11,8	11,8	12,4	12,4
Material cerâmico 1,5h	11,9	8,6	- <sup>1</sup>	11,9	11,8	11,8	12,2	12,2
Material cerâmico 0,5h 700 RR	11,0	8,9	10,1	11,0	13,0	11,7	13,8	13,8
Material cerâmico 1,0h 700 RR	11,2	11,2	10,9	11,2	13,4	14,2	12,8	14,2
Material cerâmico 1,5h 700 RR	14,0	13,3	14,0	14,0	14,7	14,7	15,7	15,7

<sup>1</sup> Corpo de prova não resistiu ao capeamento com enxofre.

Tabela 34 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Cinza de casca de arroz-Cimento CPV-ARI	7,03	3,33	10,73	3,20144E-05
Fíler calcário-Cimento CPV-ARI	-11,03	-14,73	-7,33	1,54866E-08
Fíler quartzoso-Cimento CPV-ARI	-8,97	-12,67	-5,27	6,33757E-07
Material cerâmico 0,5h-Cimento CPV-ARI	-9,57	-13,27	-5,87	2,05157E-07
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-8,17	-11,87	-4,47	3,04621E-06
Material cerâmico 1,0h-Cimento CPV-ARI	-9,00	-12,70	-5,30	5,94604E-07
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-7,53	-11,23	-3,83	1,11382E-05
Material cerâmico 1,5h-Cimento CPV-ARI	-9,07	-12,77	-5,37	5,23611E-07
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-5,97	-9,67	-2,27	0,000330755
Metacaulim-Cimento CPV-ARI	-1,30	-5,00	2,40	0,973760985
Sílica ativa-Cimento CPV-ARI	10,20	6,15	14,25	3,29869E-07
Fíler calcário-Cinza de casca de arroz	-18,07	-21,38	-14,76	1,00031E-13
Fíler quartzoso-Cinza de casca de arroz	-16,00	-19,31	-12,69	1,20948E-12
Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz	-16,60	-19,91	-13,29	5,56777E-13
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-15,20	-18,51	-11,89	3,46601E-12
Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz	-16,03	-19,34	-12,72	1,15807E-12
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-14,57	-17,88	-11,26	8,09441E-12
Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz	-16,10	-19,41	-12,79	1,06171E-12
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-13,00	-16,31	-9,69	7,56054E-11
Metacaulim-Cinza de casca de arroz	-8,33	-11,64	-5,02	3,26384E-07
Sílica ativa-Cinza de casca de arroz	3,17	-0,53	6,87	0,141426248
Fíler quartzoso-Fíler calcário	2,07	-1,24	5,38	0,521366723
Material cerâmico 0,5h-Fíler calcário	1,47	-1,84	4,78	0,886944474
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler calcário	2,87	-0,44	6,18	0,131812422
Material cerâmico 1,0h-Fíler calcário	2,03	-1,28	5,34	0,543919912
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler calcário	3,50	0,19	6,81	0,032046835

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Material cerâmico 1,5h-Fíler calcário	1,97	-1,34	5,28	0,58943524
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler calcário	5,07	1,76	8,38	0,000650678
Metacaulim-Fíler calcário	9,73	6,42	13,04	1,99912E-08
Sílica ativa-Fíler calcário	21,23	17,53	24,93	4,72955E-14
Material cerâmico 0,5h-Fíler quartzoso	-0,60	-3,91	2,71	0,999910095
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler quartzoso	0,80	-2,51	4,11	0,998689212
Material cerâmico 1,0h-Fíler quartzoso	-0,03	-3,34	3,28	1
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler quartzoso	1,43	-1,88	4,74	0,90055102
Material cerâmico 1,5h-Fíler quartzoso	-0,10	-3,41	3,21	1
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler quartzoso	3,00	-0,31	6,31	0,099549362
Metacaulim-Fíler quartzoso	7,67	4,36	10,98	1,36307E-06
Sílica ativa-Fíler quartzoso	19,17	15,47	22,87	2,81775E-13
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	1,40	-1,91	4,71	0,913122734
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h	0,57	-2,74	3,88	0,999948597
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	2,03	-1,28	5,34	0,543919912
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h	0,50	-2,81	3,81	0,99998524
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	3,60	0,29	6,91	0,025254892
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h	8,27	4,96	11,58	3,7543E-07
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h	19,77	16,07	23,47	1,50324E-13
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	-0,83	-4,14	2,48	0,998124912
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	0,63	-2,68	3,94	0,999848519
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	-0,90	-4,21	2,41	0,996384025
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	2,20	-1,11	5,51	0,434064854
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR	6,87	3,56	10,18	8,26355E-06
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR	18,37	14,67	22,07	6,94445E-13
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	1,47	-1,84	4,78	0,886944474
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h	-0,07	-3,38	3,24	1
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	3,03	-0,28	6,34	0,092648002
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h	7,70	4,39	11,01	1,26707E-06
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h	19,20	15,50	22,90	2,71783E-13
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR	-1,53	-4,84	1,78	0,856696134
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR	1,57	-1,74	4,88	0,840115057
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR	6,23	2,92	9,54	3,67386E-05
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR	17,73	14,03	21,43	1,45028E-12
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h	3,10	-0,21	6,41	0,080100076
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h	7,77	4,46	11,08	1,09542E-06
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h	19,27	15,57	22,97	2,52687E-13
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR	4,67	1,36	7,98	0,001783493
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR	16,17	12,47	19,87	9,35685E-12
Sílica ativa-Metacaulim	11,50	7,80	15,20	7,14503E-09

*Argamassas com aditivo superplastificante (consistência constante)*

**Relação água/cimento = 0,80 com aditivo**

Tabela 35 - Resultado de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante.

Argamassas	7 dias (MPa)				28 dias (MPa)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Maior	CP 1	CP 2	CP 3	Maior
Cimento CPV-ARI	17,4	17,5	18,4	18,4	21,3	20,4	- <sup>†</sup>	21,3
Fíler calcário	13,4	13,6	11,8	13,6	15,3	12,7	15,0	15,3
Fíler quartzoso	10,1	12,9	17,3	17,3	14,9	15,1	15,1	15,1
Cinza de casca de arroz	29,6	27,0	24,4	29,6	24,8	24,3	21,3	24,8
Metacaulim	46,7	50,1	47,8	50,1	51,0	53,8	- <sup>†</sup>	53,8
Sílica ativa	40,7	41,5	34,6	41,5	66,6	64,2	- <sup>†</sup>	66,6
Material cerâmico 0,5h	15,4	14,8	12,7	15,4	15,4	15,9	14,3	15,9
Material cerâmico 1,0h	17,8	17,6	16,3	17,8	20,9	18,5	20,6	20,9
Material cerâmico 1,5h	17,4	17,0	17,8	17,8	23,9	22,2	21,0	23,9
Material cerâmico 0,5h 700 RR	14,9	15,7	16,0	16,0	16,0	16,7	18,0	18,0
Material cerâmico 1,0h 700 RR	17,9	18,9	20,5	20,5	20,7	21,0	19,9	21,0
Material cerâmico 1,5h 700 RR	19,8	15,9	19,1	19,8	20,2	17,6	21,1	21,1

<sup>†</sup> Corpo de prova não resistiu ao capeamento com enxofre.

Tabela 36 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para argamassas com cimento e relação água/cimento = 0,80 com aditivo superplastificante.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Cinza de casca de arroz-Cimento CPV-ARI	2,62	-1,80	7,03	0,587051383
Fíler calcário-Cimento CPV-ARI	-6,52	-10,93	-2,10	0,001107068
Fíler quartzoso-Cimento CPV-ARI	-5,82	-10,23	-1,40	0,004038918
Material cerâmico 0,5h-Cimento CPV-ARI	-5,65	-10,07	-1,23	0,005492865
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-3,95	-8,37	0,47	0,107523003
Material cerâmico 1,0h-Cimento CPV-ARI	-0,85	-5,27	3,57	0,999826835
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-0,32	-4,73	4,10	0,999999994
Material cerâmico 1,5h-Cimento CPV-ARI	1,52	-2,90	5,93	0,976509906
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-1,22	-5,63	3,20	0,995705007
Metacaulim-Cimento CPV-ARI	31,55	26,71	36,39	5,14033E-14
Sílica ativa-Cimento CPV-ARI	44,55	39,71	49,39	4,38538E-14
Fíler calcário-Cinza de casca de arroz	-9,13	-13,08	-5,18	1,82742E-06
Fíler quartzoso-Cinza de casca de arroz	-8,43	-12,38	-4,48	6,50818E-06
Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz	-8,27	-12,22	-4,32	8,87297E-06
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-6,57	-10,52	-2,62	0,000244541
Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz	-3,47	-7,42	0,48	0,120755711
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-2,93	-6,88	1,02	0,283881778
Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz	-1,10	-5,05	2,85	0,995306793
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-3,83	-7,78	0,12	0,0622667
Metacaulim-Cinza de casca de arroz	28,93	24,52	33,35	5,08482E-14
Sílica ativa-Cinza de casca de arroz	41,93	37,52	46,35	4,38538E-14
Fíler quartzoso-Fíler calcário	0,70	-3,25	4,65	0,999921885
Material cerâmico 0,5h-Fíler calcário	0,87	-3,08	4,82	0,999410903

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler calcário	2,57	-1,38	6,52	0,460119895
Material cerâmico 1,0h-Fíler calcário	5,67	1,72	9,62	0,001547004
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler calcário	6,20	2,25	10,15	0,000515976
Material cerâmico 1,5h-Fíler calcário	8,03	4,08	11,98	1,37598E-05
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler calcário	5,30	1,35	9,25	0,003302511
Metacaulim-Fíler calcário	38,07	33,65	42,48	4,38538E-14
Sílica ativa-Fíler calcário	51,07	46,65	55,48	4,38538E-14
Material cerâmico 0,5h-Fíler quartzoso	0,17	-3,78	4,12	1
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler quartzoso	1,87	-2,08	5,82	0,836702468
Material cerâmico 1,0h-Fíler quartzoso	4,97	1,02	8,92	0,006567454
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler quartzoso	5,50	1,55	9,45	0,00218366
Material cerâmico 1,5h-Fíler quartzoso	7,33	3,38	11,28	5,30205E-05
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler quartzoso	4,60	0,65	8,55	0,01388012
Metacaulim-Fíler quartzoso	37,37	32,95	41,78	4,38538E-14
Sílica ativa-Fíler quartzoso	50,37	45,95	54,78	4,38538E-14
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	1,70	-2,25	5,65	0,900516315
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h	4,80	0,85	8,75	0,009241468
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	5,33	1,38	9,28	0,003082564
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h	7,17	3,22	11,12	7,36073E-05
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	4,43	0,48	8,38	0,019411962
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h	37,20	32,78	41,62	4,38538E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h	50,20	45,78	54,62	4,38538E-14
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	3,10	-0,85	7,05	0,22103538
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	3,63	-0,32	7,58	0,089905707
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	5,47	1,52	9,42	0,002339558
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	2,73	-1,22	6,68	0,374080134
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR	35,50	31,08	39,92	4,39648E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR	48,50	44,08	52,92	4,38538E-14
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	0,53	-3,42	4,48	0,999994867
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h	2,37	-1,58	6,32	0,572030805
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	-0,37	-4,32	3,58	0,999999898
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h	32,40	27,98	36,82	4,4742E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h	45,40	40,98	49,82	4,38538E-14
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR	1,83	-2,12	5,78	0,850832512
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR	-0,90	-4,85	3,05	0,999170034
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR	31,87	27,45	36,28	4,50751E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR	44,87	40,45	49,28	4,38538E-14
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h	-2,73	-6,68	1,22	0,374080134
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h	30,03	25,62	34,45	4,75175E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h	43,03	38,62	47,45	4,38538E-14
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR	32,77	28,35	37,18	4,45199E-14
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR	45,77	41,35	50,18	4,38538E-14
Sílica ativa-Metacaulim	13,00	8,16	17,84	1,47032E-07



### Relação água/finos = 0,80 com aditivo

Tabela 37 - Resultado de resistência à compressão de argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante.

Argamassas	7 dias (MPa)				28 dias (MPa)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Maior	CP 1	CP 2	CP 3	Maior
Cimento CPV-ARI	17,4	17,5	18,4	18,4	19,3	17,0	15,0	19,3
Fíler calcário	5,5	5,3	- <sup>1</sup>	5,5	7,0	7,6	- <sup>1</sup>	7,6
Fíler quartzoso	5,9	6,4	6,1	6,4	8,0	7,9	7,7	8,0
Cinza de casca de arroz	11,3	12,9	13,5	13,5	17,4	15,3	14,9	17,4
Metacaulim	10,5	11,7	11,8	11,8	15,2	15,6	16,3	16,3
Sílica ativa	19,8	18,1	18,0	19,8	20,3	20,1	20,9	20,9
Material cerâmico 0,5h	6,9	7,9	7,2	7,9	8,0	8,2	7,4	8,2
Material cerâmico 1,0h	8,5	7,9	8,1	8,5	11,0	10,2	9,2	11,0
Material cerâmico 1,5h	8,2	8,3	9,2	9,2	8,8	9,0	9,0	9,0
Material cerâmico 0,5h 700 RR	8,0	7,9	8,3	8,3	9,3	9,5	9,2	9,5
Material cerâmico 1,0h 700 RR	8,5	8,0	7,9	8,5	8,6	7,8	8,5	8,6
Material cerâmico 1,5h 700 RR	9,9	6,7	7,7	9,9	9,5	8,7	9,4	9,5

<sup>1</sup> Corpo de prova não resistiu ao capeamento com enxofre.

Tabela 38 - Teste estatístico de Tukey gerado pelo programa Action para argamassas com cimento e relação água/finos = 0,80 com aditivo superplastificante.

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Cinza de casca de arroz-Cimento CPV-ARI	-1,23	-3,77	1,30	0,820681925
Fíler calcário-Cimento CPV-ARI	-9,80	-12,63	-6,97	5,42626E-10
Fíler quartzoso-Cimento CPV-ARI	-9,23	-11,77	-6,70	1,88228E-10
Material cerâmico 0,5h-Cimento CPV-ARI	-9,23	-11,77	-6,70	1,88228E-10
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-7,77	-10,30	-5,23	5,94449E-09
Material cerâmico 1,0h-Cimento CPV-ARI	-6,97	-9,50	-4,43	4,72453E-08
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-8,80	-11,33	-6,27	5,01097E-10
Material cerâmico 1,5h-Cimento CPV-ARI	-8,17	-10,70	-5,63	2,22591E-09
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cimento CPV-ARI	-7,90	-10,43	-5,37	4,26848E-09
Metacaulim-Cimento CPV-ARI	-1,40	-3,93	1,13	0,687834503
Sílica ativa-Cimento CPV-ARI	3,33	0,80	5,87	0,003741707
Fíler calcário-Cinza de casca de arroz	-8,57	-11,40	-5,74	7,72577E-09
Fíler quartzoso-Cinza de casca de arroz	-8,00	-10,53	-5,47	3,33798E-09
Material cerâmico 0,5h-Cinza de casca de arroz	-8,00	-10,53	-5,47	3,33798E-09
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-6,53	-9,07	-4,00	1,54854E-07
Material cerâmico 1,0h-Cinza de casca de arroz	-5,73	-8,27	-3,20	1,5674E-06
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-7,57	-10,10	-5,03	9,8423E-09
Material cerâmico 1,5h-Cinza de casca de arroz	-6,93	-9,47	-4,40	5,16781E-08
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Cinza de casca de arroz	-6,67	-9,20	-4,13	1,06942E-07
Metacaulim-Cinza de casca de arroz	-0,17	-2,70	2,37	0,999999998
Sílica ativa-Cinza de casca de arroz	4,57	2,03	7,10	6,07848E-05
Fíler quartzoso-Fíler calcário	0,57	-2,26	3,40	0,99978333
Material cerâmico 0,5h-Fíler calcário	0,57	-2,26	3,40	0,99978333
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler calcário	2,03	-0,80	4,86	0,333431616
Material cerâmico 1,0h-Fíler calcário	2,83	0,00	5,66	0,049626891

Níveis	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler calcário	1,00	-1,83	3,83	0,97394342
Material cerâmico 1,5h-Fíler calcário	1,63	-1,20	4,46	0,634241345
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler calcário	1,90	-0,93	4,73	0,425535838
Metacaulim-Fíler calcário	8,40	5,57	11,23	1,12803E-08
Sílica ativa-Fíler calcário	13,13	10,30	15,96	1,33449E-12
Material cerâmico 0,5h-Fíler quartzoso	0,00	-2,53	2,53	1
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Fíler quartzoso	1,47	-1,07	4,00	0,629100035
Material cerâmico 1,0h-Fíler quartzoso	2,27	-0,27	4,80	0,108547397
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Fíler quartzoso	0,43	-2,10	2,97	0,999952521
Material cerâmico 1,5h-Fíler quartzoso	1,07	-1,47	3,60	0,918067085
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Fíler quartzoso	1,33	-1,20	3,87	0,744105845
Metacaulim-Fíler quartzoso	7,83	5,30	10,37	5,03481E-09
Sílica ativa-Fíler quartzoso	12,57	10,03	15,10	3,20632E-13
Material cerâmico 0,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	1,47	-1,07	4,00	0,629100035
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h	2,27	-0,27	4,80	0,108547397
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	0,43	-2,10	2,97	0,999952521
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h	1,07	-1,47	3,60	0,918067085
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h	1,33	-1,20	3,87	0,744105845
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h	7,83	5,30	10,37	5,03481E-09
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h	12,57	10,03	15,10	3,20632E-13
Material cerâmico 1,0h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	0,80	-1,73	3,33	0,988568062
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	-1,03	-3,57	1,50	0,932338065
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 0,5h 700 RR	-0,40	-2,93	2,13	0,99997859
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 0,5h 700 RR	-0,13	-2,67	2,40	1
Metacaulim-Material cerâmico 0,5h 700 RR	6,37	3,83	8,90	2,47509E-07
Sílica ativa-Material cerâmico 0,5h 700 RR	11,10	8,57	13,63	4,2697E-12
Material cerâmico 1,0h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	-1,83	-4,37	0,70	0,322985078
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h	-1,20	-3,73	1,33	0,843473933
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h	-0,93	-3,47	1,60	0,964994528
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h	5,57	3,03	8,10	2,59074E-06
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h	10,30	7,77	12,83	1,97342E-11
Material cerâmico 1,5h-Material cerâmico 1,0h 700 RR	0,63	-1,90	3,17	0,998337463
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,0h 700 RR	0,90	-1,63	3,43	0,972778003
Metacaulim-Material cerâmico 1,0h 700 RR	7,40	4,87	9,93	1,50876E-08
Sílica ativa-Material cerâmico 1,0h 700 RR	12,13	9,60	14,67	6,77458E-13
Material cerâmico 1,5h 700 RR-Material cerâmico 1,5h	0,27	-2,27	2,80	0,999999674
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h	6,77	4,23	9,30	8,1249E-08
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h	11,50	8,97	14,03	2,06901E-12
Metacaulim-Material cerâmico 1,5h 700 RR	6,50	3,97	9,03	1,69987E-07
Sílica ativa-Material cerâmico 1,5h 700 RR	11,23	8,70	13,77	3,34599E-12
Sílica ativa-Metacaulim	4,73	2,20	7,27	3,53696E-05