

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ROSANE CRISTINA DE LARA**

**ESTUDO DA QUANTIDADE DE ADIÇÕES MINERAIS EM  
ARGAMASSAS PARA CONSUMO DO HIDRÓXIDO DE CÁLCIO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA  
2019**

**ROSANE CRISTINA DE LARA**

**ESTUDO DA QUANTIDADE DE ADIÇÕES MINERAIS EM  
ARGAMASSAS PARA CONSUMO DO HIDRÓXIDO DE CÁLCIO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

**CURITIBA**

**2019**



Ministério da Educação

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

*Campus Curitiba – Sede Ecoville*

**Departamento Acadêmico de Construção Civil**

**Curso de Engenharia Civil**

---

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

### **ESTUDO DA QUANTIDADE DE ADIÇÕES MINERAIS EM ARGAMASSAS PARA CONSUMO DO HIDRÓXIDO DE CÁLCIO**

Por

**ROSANE CRISTINA DE LARA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no primeiro semestre de 2019 e aprovado pela seguinte banca de avaliação presente:

---

Orientador – Wellington Mazer, Dr.  
UTFPR

---

Prof. Arthur Medeiros, Dr.  
UTFPR

---

Prof. Adauto José Miranda de Lima, Dr.  
UTFPR

---

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

---

## RESUMO

LARA, Rosane C. **Estudo da quantidade de adições minerais em argamassas para consumo do hidróxido de cálcio**. 2019. 49f. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Engenharia civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Em meio a larga utilização de argamassas e concretos na construção civil e a necessidade de obter materiais com qualidade e resistência a um valor compatível, este trabalho apresenta o estudo de uma dosagem de argamassa contendo adições minerais com quantidades determinadas a partir do ensaio Chapelle modificado. O ensaio basicamente se trata da quantificação da atividade pozolânica do material, resultando portando na dosagem otimizada da adição de forma a consumir todo o hidróxido de cálcio da mistura. Estabelecidos os teores a serem utilizados realiza-se a produção de corpos de prova de argamassa e a análise da interferência do incremento da sílica ativa, metacaulim e cinzas de casca de arroz em duas propriedades de fundamental importância para os elementos construtivos: A resistência à compressão e a porosidade. Os dados obtidos apresentam valores estatisticamente distintos para a resistência a compressão além do valor da porosidade total de cada uma das amostras e curvas porosimétricas para os materiais ensaiados.

**Palavras-chave:** argamassas, adição mineral, ensaio Chapelle modificado, porosidade, resistência e compressão.

## ABSTRACT

LARA, Rosane C. **Study of the amount of mineral additions in mortars for the consumption of calcium hydroxide**. 2019. 49f. Graduation work - Civil engineering. Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2019.

Amid the wide use of mortars and concretes in civil construction and the need to obtain materials with quality and resistance to a compatible value, this work presents the study of a mortar dosage containing mineral additions with determined quantities from the modified Chapelle test. The test basically deals with the quantification of the pozzolanic activity of the material, resulting in the optimized dosage of the addition in order to consume all the calcium hydroxide of the mixture. Once the mortar test specimens have been established, the analysis of the interference of the increase of the active silica, metakaolin and rice hull ash in two properties of fundamental importance to the constructive elements has been established: The compressive strength and porosity. The obtained data presented values statistically different for the resistance to compression besides the value of the total porosity of each one of the samples and porosimetric curves for the materials tested.

**Keywords:** mortar, mineral addition, modified Chapelle test, porosity, strength and compression.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sílica ativa.....	19
Figura 2 – Metacaulim.....	21
Figura 3 – Cinzas de casca de arroz.....	23
Figura 4 – Comparação entre cimentos Itambé .....	25
Figura 5 – Filtração das soluções antes da titulação.....	29
Figura 6 – Início do processo de titulação .....	29
Figura 7 – Final do processo de titulação.....	30

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Médias de resistências à compressão .....	37
Gráfico 2 – Curvas porosimétricas metacaulim .....	40
Gráfico 3 – Curvas porosimétricas sílica ativa.....	40
Gráfico 4 – Curvas porosimétricas cinza de casca de arroz .....	41

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades da sílica ativa .....	19
Quadro 2 – Composição do metacaulim .....	21

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – $V_2$ obtidos para cada adição mineral .....	35
Tabela 2– Volumes $V_3$ e $V_s$ e fator de correção $F_c$ calculado .....	35
Tabela 3 – Índice de atividade pozolânica e teor das adições .....	36
Tabela 4 – Teores de adição em relação a massa de aglomerante .....	36
Tabela 5 – Resultados estatísticos dos dados de resistência à compressão.....	37
Tabela 6 – Teste estatístico via método ANOVA .....	38
Tabela 7 – Análise estatística via método Tukey's .....	38
Tabela 8 – Resultados do ensaio de porosimetria.....	39

## **LISTA DE ABREVIações, SIGRAS E ACRÔNIMOS**

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATIC	Associação Técnica da Indústria do Cimento
ASTM	American Society for Testing and Materials
NBR	Norma brasileira
NPT	Núcleo de pesquisas tecnológicas
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
2.1	CONCRETO ARMADO	15
2.2	ADIÇÕES MINERAIS	17
2.2.1	Sílica ativa	18
2.2.2	Metacaulim	20
2.2.3	Cinzas de casca de arroz	22
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>24</b>
3.1	MATERIAIS	24
3.1.1	Produtos utilizados no ensaio Chapelle modificado	24
3.1.2	Aparelhagem utilizada no ensaio Chapelle modificado	24
3.1.3	Cimento Portland	24
3.1.4	Água	25
3.1.5	Areia	25
3.1.6	Metacaulim	26
3.1.7	Cinzas de casca de arroz	26
3.1.8	Sílica ativa	26
3.1.9	Aparelhagem utilizada na produção da argamassa	26
3.1.10	Materiais utilizados no ensaio de porosimetria	26
3.2	MÉTODOS	27
3.2.1	Determinação do traço	27
3.2.2	Ensaio Chapelle modificado	27
3.2.3	Produção da argamassa e moldagem dos corpos de prova	31
3.2.4	Ensaio de resistência à compressão	32
3.2.5	Ensaio de porosidade	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>35</b>
4.1	ENSAIO CHAPELLE MODIFICADO	35
4.2	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	36
4.3	ENSAIO DE POROSIMETRIA	39

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Mediante o avanço da tecnologia, o crescimento populacional e o aumento da complexidade das relações econômicas em escala global, surge a necessidade de construções de grandes obras de infraestrutura, transportes e industriais para atender a demanda gerada por esse fenômeno. A Engenharia Civil torna-se então responsável por suprir de forma favorável os requisitos para a continuidade do desenvolvimento dessa sociedade, relevando a qualidade das construções e os aspectos financeiros envolvidos.

Neste contexto destaca-se o concreto armado, largamente utilizado na construção civil desde o século XIX. O concreto armado alia a resistência do concreto à compressão com a resistência à tração do aço, tornando-se desta forma um conjunto ideal para obras de grande e pequeno porte. Além da resistência destacam-se também a trabalhabilidade, durabilidade e a boa relação custo benefício que este elemento estrutural oferece (FABRIZZI, 2007).

Segundo pesquisa encomendada pela Associação Brasileira de cimento Portland (ABCP) em 2016, o concreto é hoje o segundo produto mais consumido no mundo. Diante desse grande consumo existe uma variedade de utilizações tal como de métodos construtivos específicos para cada tipo de estrutura projetada. Além disso, a uma variedade também na exigência de diferentes propriedades do concreto armado para cada tipo de estrutura. Em vista deste fato, explora-se o uso de substâncias que podem ser adicionadas ao concreto ou argamassas em teor superior a 5% em relação a massa total, de forma a otimizar determinada propriedade ou característica de interesse, conhecidos como adições (NEVILLE, 2016).

As adições minerais são compostos de origem mineral que atuam na função de melhoramento das características técnicas do concreto armado. Se dividem em: Pozolânicas, cimentantes e inertes. Destacam-se por proporcionarem melhoramento do desempenho e vantagens econômicas quando comparados a concretos convencionais e por serem ecologicamente favoráveis, uma vez que são frutos de subprodutos industriais. A ressalva é que tais adições não podem ser utilizadas de forma indiscriminada. Há uma quantidade ideal da adição a ser utilizada, de forma que As características de melhoramento sejam atendidas satisfatoriamente ao passo que não prejudiquem outras propriedades relevantes.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar qual a quantidade de adições minerais que podem ser adicionadas ao aglomerante (cimento) de modo a consumir todo o hidróxido de cálcio da argamassa a fim de obter a melhor otimização possível.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Conforme o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Determinar a máxima quantidade de adição de sílica ativa, metacaulim e cinza de cascas de arroz para o cimento CP V-ARI em função do índice de atividade pozolânica dos materiais.
- Analisar a variação de resistência à compressão nos traços de argamassa produzidos em função dos teores distintos de adições minerais.
- Avaliar a variação da porosidade em função dos teores de adições minerais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Em meio à larga utilização do concreto e a construção de obras de engenharia com grande nível de complexidade, é fundamental que a qualidade seja considerada com grande relevância, a fim de garantir a durabilidade e resistência da estrutura conforme a função que irá desempenhar. No caso de obras de barragens por exemplo, os aditivos têm a capacidade de aumentar satisfatoriamente a impermeabilidade do concreto, de forma que a qualidade é elevada juntamente com a capacidade da construção de exercer com êxito a função para a qual foi projetada.

Nesse contexto identifica-se a importância do fator econômico, uma vez que o setor da construção civil é um dos mais importantes no Brasil, composto por mais de 170 mil empresas no território (SIMÃO, 2012) que na maioria dos casos utilizam o concreto armado como principal elemento estrutural em seus empreendimentos.

Desta forma o estudo do melhoramento do concreto na quantidade ideal das adições é indispensável para evitar gastos desnecessários e desperdício de material na relação entre concreto e adição superior ao suficiente para que as propriedades de interesse sejam alteradas da forma mais benéfica possível. Além disso, uma construção realizada com o concreto de performance beneficiada por adições necessita de menos manutenções e tem sua vida útil prolongada.

Do ponto de vista ambiental, as adições minerais se tornam favoráveis uma vez que quando adicionadas ao concreto reduzem o consumo de cimento. O que proporciona diminuição da energia incorporada e por consequência, a redução da emissão de dióxido de carbono (GASTALDINI, 2004), gás conhecidamente poluente e prejudicial à saúde. Soma-se a isso o fato de que grande parte das adições minerais é proveniente de resíduos de siderúrgicas, termoelétricas, indústrias e mineradoras. De forma que, o impacto ambiental desses insumos é ainda mais reduzido. Considerando a necessidade de obter materiais boa qualidade, com custo benefício favorável e reduzido impacto ambiental, estuda-se a possibilidade de utilizar as adições minerais para otimizar o atendimento dessas demandas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCRETO ARMADO

Os materiais usados inicialmente nas construções foram a pedra natural e a madeira, sendo que o ferro e o aço foram empregados apenas séculos depois. O concreto armado só surgiu mais recentemente, por volta de 1850. Para que um material de construção seja considerado bom, este deve apresentar duas características básicas: resistência e durabilidade. A pedra possui resistência à compressão e durabilidade elevadas, porém, na resistência à tração não atinge valores favoráveis. A madeira tem razoável resistência, mas tem durabilidade limitada. O aço possui resistências elevadas, mas requer proteção contra a corrosão (BASTOS, 2006).

Nesse contexto surge o concreto, da necessidade de aliar as qualidades da pedra (resistência à compressão e durabilidade) com as do aço (resistências mecânicas). Mediante as vantagens de poder assumir qualquer forma, com rapidez e facilidade, além de proporcionar a necessária proteção ao aço contra a corrosão. O concreto trata-se de um material composto, constituído por cimento, água, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra ou brita) e ar. Pode também conter adições (cinza volante, metacaulim, pozolanas, sílica ativa, etc.) e aditivos químicos com a finalidade de alterar características de interesse. Esquemáticamente pode-se indicar que a pasta é o cimento misturado com a água, a argamassa é a pasta misturada com a areia, e o concreto é a argamassa misturada com a pedra ou brita, também chamado concreto simples (concreto sem armaduras) (BASTOS, 2006).

A qualidade final de uma estrutura de concreto é função não só do controle de suas propriedades no estado fresco como no seu estado endurecido. De forma equivocada, por diversas vezes, o controle tecnológico limita-se aos ensaios de resistência à compressão simples (concreto endurecido), como se este parâmetro, isoladamente, pudesse garantir a qualidade do concreto (MORAES, 2012).

O concreto, e mesmo a sua comercialização, ao ser regido exclusivamente pela resistência característica ( $f_{ck}$ ) pode não apresentar propriedades tais que o levem a um bom desempenho e a uma durabilidade satisfatória. Dessa forma, outros

aspectos devem ser levados em consideração quando se deseja obter concretos de qualidade, entre eles o controle das propriedades do concreto fresco, pois estes são fundamentais à execução das estruturas e às propriedades da estrutura de concreto endurecido (GEYER, 2006).

Em uma análise do impacto ambiental da produção do concreto, segundo Isaia (2011), no Brasil, a produção é de cerca de 20 milhões de m<sup>3</sup> de concreto/ano em Centrais de Concreto, chamadas de Empresas de Serviços de Concretagem. Uma economia de 5kg de cimento por m<sup>3</sup>, proporcionada por uma melhor dosagem, poderia levar a uma redução da emissão de 100.000t de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) à atmosfera, assim como uma redução de agregados por aumento de resistência mecânica do concreto pode representar milhares de toneladas de economia de recursos naturais.

De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015), o concreto pode ser classificado em três tipos:

- Concreto Leve: concreto endurecido que apresenta massa específica entre 800 kg/m<sup>3</sup> a 2000 kg/m<sup>3</sup>.
- Concreto Normal: concreto endurecido que apresenta massa específica entre 2000 kg/m<sup>3</sup> a 2800 kg/m<sup>3</sup>.
- Concreto Pesado: concreto endurecido que apresenta massa específica superior as 2800 kg/m<sup>3</sup>.

Mehta e Monteiro (2014) classificam o concreto a partir da sua resistência à compressão aos 28 dias, sendo dividida entre:

- Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa.
- Concreto de resistência moderada: resistência à compressão de 20 a 40 MPa.
- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

Ainda, segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015) os concretos com resistência inferior à 20 MPa, concreto de baixa resistência, e segundo Mehta e Monteiro (2014)

não podem ser utilizados com fins estruturais. É possível a utilização para este fim apenas concretos das classes superiores a C20.

As adições minerais podem alterar favoravelmente algumas dessas propriedades, elevando a qualidade do concreto.

## 2.2 ADIÇÕES MINERAIS

Segundo a norma NBR 5751 (ABNT, 2012) as adições minerais são qualquer material, que não seja água, agregados, cimentos hidráulicos ou fibras, usado como ingrediente do concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente ou durante a mistura. As adições minerais beneficiam as propriedades do concreto, porém não têm a capacidade de compensar a baixa qualidade dos materiais utilizados na produção do concreto ou de uma dosagem equivocada. As adições mais utilizadas em concreto são as cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto-forno, cinzas de casca de arroz, metacaulim e fíller de calcário (MORAES, 2012). Ainda segundo Moraes (2012), essas adições exercem influência nas propriedades do concreto, sendo elas:

No estado fresco:

- Maior relação de volume “sólidos/água”;
- Melhor trabalhabilidade;
- Facilidade para bombear o concreto;
- Maior volume de finos e compacidade de pasta;
- Menor quantidade de canais de exsudação;
- Menor risco de fissurações térmicas;
- Menor calor de hidratação do que nas reações de hidratação do cimento.

No estado endurecido:

- Formação de mais compostos resistentes;
- Redução na permeabilidade e porosidade do concreto;
- Menor risco da entrada de agentes nocivos.

Este estudo consiste na análise de três produtos utilizados como adições minerais em argamassas: a sílica ativa, as cinzas de casca de arroz e o metacaulim e o seu desempenho no estado endurecido.

### 2.2.1 Sílica ativa

Segundo Mehta e Monteiro (2014) sílica ativa é, normalmente, oriunda do processo de produção das indústrias de ferrosilício e silíciometálico. Neste processo, o silício é produzido em grandes fornos elétricos de fusão, do tipo arco-voltaico, onde o quartzo é reduzido pelo carbono em altas temperaturas. Como resultado tem-se a produção do monóxido de silício gasoso ( $\text{SiO}$ ), que se condensa às temperaturas mais baixas, formando o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). Este apresenta uma coloração que pode variar do cinza claro ao escuro, devido aos teores de carbono incombusto presentes.

A sílica é um material relativamente novo entre os materiais cimentícios, tendo sido utilizada inicialmente apenas como pozolana. Como sua ação no concreto supera a de uma pozolana muito reativa, seus efeitos benéficos atingem outros aspectos. Seu ponto negativo, é seu alto custo, apesar de se tratar de um resíduo da produção do silício ou de ligas de ferrosilício (NEVILLE, 2016).

Aitcin (2000) classifica a sílica ativa como um material muito pozolânico principalmente por possuir uma área superficial muito elevada. Esse material possui um efeito físico e químico no processo de hidratação do cimento, resultando em uma microestrutura mais densa, homogênea e uniforme.

Pode se esperar da sílica ativa portanto duas importantes características: o efeito microfiller e a reação pozolânica já citada, que pode ser considerado uma de suas principais propriedades, pois, em uma substituição de 15% do cimento por sílica ativa existem cerca de 2.000.000 de partículas de sílica para cada grão de cimento (MORAIS, 2001).

O efeito físico é causado pela extrema finura do material e por seu formato esférico, sendo responsável pelo efeito de redução do espaço disponível para a água, proporcionando um melhor empacotamento (FORNASIER, 1995) e também pela obtenção de uma mistura mais coesa e com menos segregação, devido a uma redução da exsudação interna. Além disso, o efeito microfiller promove uma queda no número de poros e canais capilares (WOLF, 1991).

O material também possui o efeito químico, no qual as partículas de sílica que são altamente reativas reagem com o hidróxido de cálcio produzindo a hidratação do cimento, gerando o silicato de cálcio hidratado que promove uma subdivisão dos poros capilares diminuindo a permeabilidade (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Este efeito também interfere na zona de transição, aumentando a aderência devido a formação de materiais mais resistentes do que os formados em misturas convencionais, causada pela reação pozolânica.

No quadro 1 são apresentados resumidamente algumas propriedades da sílica ativa (MORAIS, 2001).

**Quadro 1: Propriedades da sílica ativa**

<b>Propriedade</b>	<b>Descrição</b>
<b>Tamanho médio</b>	Em média 100 vezes mais fino que o cimento
<b>Área específica</b>	De 20.000 m <sup>2</sup> /kg a 25.000 m <sup>2</sup> /kg
<b>Forma das partículas</b>	Esféricas
<b>Massa específica</b>	Da ordem de 2.200 kg/m <sup>3</sup>
<b>Massa unitária</b>	Em torno de 600 kg/m <sup>3</sup> para produto compacto
<b>Coloração</b>	Cinza

Fonte: Morais (2001)

Na figura 1 é apresentada a sílica ativa no estado final, pronto para ser adicionada ao aglomerante.

**Figura 1: Sílica ativa**



Fonte: Industria Tecnosil

Além da sílica, outros materiais são utilizados na otimização das propriedades do concreto, entre estes, o metacaulim.

### 2.2.2 Metacaulim

Os estudos sobre esse material são recentes mas esta adição já é usada com função pozolânica antes mesmo do cimento. Com o advento deste, o metacaulim caiu em desuso, até que o material passou a ser usado como adição ao aglomerante, a partir de 1909 na Inglaterra (SOUZA, 2003).

O metacaulim trata-se de um material amorfo de estrutura cristalina desordenada, sua obtenção se dá por meio de processo industrial em altas temperaturas (entre 600°C e 800°C) de caulins e argilas caulínicas (MEDINA, 2011). Constituído basicamente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na fase amorfa, o metacaulim possui a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), durante o processo de hidratação do cimento Portland, possibilitando a formação de produtos hidratados similares aos decorrentes da hidratação do cimento Portland. Essas reações conferem propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido, quando comparadas às propriedades apenas do cimento (MEDINA, 2011).

Um estudo de ROJAS e ROJAS (2003), concluiu que a reação pozolânica entre o metacaulim e o hidróxido de cálcio produz a reação CSH (silicato de cálcio hidratado), além de silicato bi cálcico de alumínio hidratado e silicato tri e tetra cálcico de alumínio hidratado, que consistem em materiais de maior resistência comparado ao formados no processo de hidratação do concreto convencional. Entretanto, verifica-se que a presença ou a ausência destas fases hidratadas depende de parâmetros diferentes, tais como a temperatura de cura e a matriz usada.

Seu efeito pozolânico cresce quanto maior for sua qualidade e finura, entretanto as características dos outros componentes da mistura, em especial do cimento Portland, também têm grande influência na eficácia do Metacaulim. A interação entre o cimento e o Metacaulim leva à formação de compostos cerâmicos denominados hidrogarnetos, stratlingita, gelenita e outros (GUERRA, 2013). No quadro 2, é mostrada a composição química do metacaulim em relação a massa.

**Quadro 2: Composição do metacaulim**

<b>Composição típica do metacaulim</b>	<b>Porcentagem em massa</b>
SiO <sub>2</sub>	51,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,23
CaO	2,00
MgO	0,12
Álcalis	0,53
Perda ao fogo	2,01

**Fonte: Mehta e Malhotra (2014)**

Na figura é apresentado o metacaulim seguido do processo de industrialização em estado pronto para que seja utilizado como adição mineral.

**Figura 2: Metacaulim**

**Fonte: Industria HP ultra**

A elevada área superficial devido a extrema finura do material otimiza a distribuição granulométrica da pasta de forma a contribuir na retenção de líquido, aumentar a coesão e reduzir a exsudação e segregação. Aumentando a qualidade do produto final.

### 2.2.3 Cinzas de casca de arroz

Durante o processo de beneficiamento do arroz, resulta como subproduto a casca de arroz, que representa cerca de 23% da massa do arroz. Esta casca devido a sua alta dureza, fibrosidade e natureza abrasiva, leva a obtenção de produtos de baixa propriedade nutritiva, boa resistência ao desgaste e muita cinza. Sua composição química é de predominantemente sílica no estado amorfo (DELLA *et al.*, 2001).

Atualmente, parte desta casca está sendo utilizada na fabricação de blocos e painéis empregados na construção civil, onde substitui a fibra de madeira comumente utilizada. Uma grande quantidade desta casca é reaproveitada dentro da própria usina de beneficiamento do arroz onde, a partir da sua combustão, é gerado calor para a parboilização dos grãos. Como resíduo desta combustão, é produzida a cinza de casca de arroz. Esta cinza, até então útil somente para estabilização de solos (ainda sem comprovação técnica) e aterros sanitários, devido ao seu elevado teor de óxido de silício, está sendo utilizado, na fabricação de vidros, isolantes térmicos, tijolos prensados e materiais refratários, bem como na produção de cimento Portland e na forma de agregado em argamassas e concretos (FONSECA, 2000).

A produção de casca de arroz no mundo chega a 80 milhões de toneladas ao ano. Isto representa um grande potencial na geração de energia. Há alguns anos, quase todo esse material tinha como destino as lavouras e o fundo de rios, em um descarte prejudicial e criminoso. As cascas são o subproduto mais volumoso da indústria do arroz, as quais podem ser aproveitadas de diversas maneiras. O uso das cascas na produção de concreto na forma de adição é uma alternativa praticável do ponto de vista tecnológico, viável do ponto de vista econômico e ético do ponto de vista ecológico, uma vez que a matéria-prima é abundante no país (FOLETTTO *et al.*, 2005).

Segundo Foletto *et al.* (2005) o uso da cinza de casca de arroz como fonte de sílica no cimento aumenta a durabilidade do concreto e reduz a porosidade, o que é extremamente importante em muitas aplicações, tais como canais de irrigação, concretos resistentes à poluição e às intempéries, pisos resistentes à abrasão, etc. Na figura 3 é apresentada a casca de arroz oriunda do processo de industrialização.

**Figura 3: Cinzas de casca de arroz**



**Fonte: Natassia Bratti (repositório UNESC)**

As adições minerais podem ter sua atividade pozolânica quantificada a partir do ensaio Chapelle, de forma a obter numericamente a quantidade ideal de adição a ser utilizada afim de consumir todo o hidróxido de cálcio da mistura.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Neste tópico são expostos os materiais que serão empregados durante a execução deste estudo, informações com relevância de especificações como, procedência, características singulares e critérios adotados na determinação dos mesmos.

##### 3.1.1 Produtos utilizados no ensaio Chapelle modificado:

- Ácido clorídrico (densidade 1,17 g/mL)
- Fenolftaleína
- Álcool etílico absoluto
- Sacarose
- Alaranjado-de-metila
- Carbonato de sódio
- Cal

##### 3.1.2 Aparelhagem utilizada no ensaio Chapelle modificado:

- Agitador magnético tipo banho - Maria
- Balanças, utensílios e vidrarias em geral

##### 3.1.3 Cimento Portland

O cimento utilizado é classificado como CP V-ARI da indústria fabricante Itambé. A razão principal de sua seleção se dá por ser um material isento de adições minerais, dessa forma torna-se possível a análise da influência dos materiais pozolânicos utilizados sem a interferência de componentes semelhantes no aglomerante. Além disso, o CP V tem como característica importante o alcance de altas resistências iniciais, devido a uma dosagem diferenciada de calcário e argila na

produção do clínquer e uma moagem mais fina. Suas características em comparação com os outros tipos de cimento Portland são expostas conforme a figura 4, disponibilizada pelo fabricante.

**Figura 4: Comparação entre cimentos Itambé**

Resumo das especificações da ABNT



Parâmetros	CP II-F-32	CP II-Z-32	CP IV-32 RS	CP V-ARI	CP II-F-40
Tempo de início de pega (horas)	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1
MgO (%)	-	-	-	≤ 6,5*	-
Perda ao fogo (%)	≤ 12,5	≤ 8,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 12,5
Resíduo insolúvel (%)	≤ 7,5	≤ 18,5	-	≤ 3,5*	≤ 7,5
SO <sub>3</sub> (%)	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5
<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>					
1 dia	-	-	-	≥ 14,0	-
3 dias	≥ 10,0	≥ 10,0	≥ 10,0	≥ 24,0	≥ 15,0
7 dias	≥ 20,0	≥ 20,0	≥ 20,0	≥ 34,0	≥ 25,0
28 dias	≥ 32,0	≥ 32,0	≥ 32,0	-	≥ 40,0
<b>Adições Permitidas (%)</b>					
Escória	0	0	0	0	0
Filer calcário	11 a 25	0 a 15	0 a 10	0 a 10	11 a 25
Material pozolânico	0	6 a 14	15 a 50	0	0

\*No caso de cimentos resistentes a sulfatos derivados do cimento CP V, não há limitação para Resíduo Insolúvel e MgO.

**Fonte: Fabricante Itambé**

### 3.1.4 Água

A água utilizada para a produção do concreto e para a preparação das soluções descritas no ensaio Chapelle é a água potável. Água proveniente da rede pública de abastecimento.

### 3.1.5 Areia

A areia utilizada é uma areia de origem natural, classificada como areia fina. A umidade da areia não é considerada para cálculo devido a situação de exposição a evaporação em se encontrava armazenada.

### 3.1.6 Metacaulim

O metacaulim utilizado é de propriedade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. É um material extremamente fino, de coloração clara, usado para melhoramento das propriedades do concreto.

### 3.1.7 Cinzas de casca de arroz

As cinzas de casca de arroz utilizadas são cedidas pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Esse material é um subproduto da indústria de arroz, composto predominantemente de sílica e quando usado como adição mineral provoca uma coloração mais escura no elemento moldado.

### 3.1.8 Sílica ativa

A Sílica ativa utilizada, assim como as outras adições minerais são de propriedade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR e cedida para a realização do estudo. Assim como o metacaulim trata-se de um material extremamente fino e um subproduto industrial.

### 3.1.9 Aparelhagem utilizada na produção da argamassa:

- Argamassadeira
- Balança com precisão 0,1 g
- Moldes e ferramentas

### 3.1.10 Materiais utilizados no ensaio de porosimetria:

- Porosímetro de intrusão de mercúrio modelo Porimaster 33
- Gás sintético a pressão de 60 psi
- Mercúrio em estado líquido

## 3.2 MÉTODOS

A detalhada descrição dos métodos, programação seguida e equipamentos utilizados nos trabalhos científicos, tem fundamental importância no papel de validar os resultados alcançados. Possibilita que a metodologia aqui executada possa ser reproduzida por outros acadêmicos, que tenham o propósito de comparar conclusões, ou dar continuidade ao estudo.

### 3.2.1 Determinação do traço

Para a determinação do traço da argamassa, utilizou-se o método Aictin (2000). Seguido da determinação das adições minerais utilizadas, determina-se o traço da argamassa, e a quantidade de adições minerais em função do consumo de hidróxido de cálcio. Essa quantidade é calculada por meio do ensaio Chapelle modificado, que consiste basicamente na quantificação da reatividade das adições minerais. A partir da quantidade determinada pelo ensaio adiciona-se 5 pontos percentuais e subtrai-se outros 5 para obtenção do resultado final. Considerando uma relação água cimento de 60% e desconsiderando-se a umidade do agregado miúdo devido as condições de armazenamento estabeleceu-se o traço de 1:3:0,6 em massa para a argamassa de referência.

No caso da argamassa produzida com adições minerais, a quantidade utilizada de adição é descontada da quantidade de cimento, de forma que a massa de aglomerantes é mantida constante para todas as amostras.

### 3.2.2 Ensaio Chapelle modificado

O ensaio Chapelle modificado consiste em um método de determinação do índice de atividade pozolânica de materiais, por meio da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado. Segundo a NBR 15895 (ABNT, 2010), para realização do ensaio são preparadas algumas soluções que atuam como reagentes. A determinação do índice de atividade pozolânica se dá por meio de duas etapas principais.

### 3.2.2.1 Padronização

A Primeira etapa é a determinação do  $F_c$  (fator de correção do ácido clorídrico) em função volume consumido na titulação do ácido clorídrico e do volume teórico. Para a determinação do fator de correção, processo chamado de padronização, utiliza-se solução de carbonato de sódio anidro (2,65 gramas dissolvidos em 500 mL de água) e solução alcoólica de alaranjado-de-metila (0,2 gramas dissolvidos em 100 mL de água). Com o auxílio de uma pipeta transfere-se 25 mL de solução de carbonato de cálcio para um frasco Erlenmeyer, onde adicionam-se 3 gotas do indicador alaranjado-de-metila, titulando-se com a solução de ácido clorídrico até a mudança de cor de amarelo para alaranjado. O fator de correção é calculado a partir da equação 1.

$$F_c = \frac{25}{V_s} \quad (1)$$

Onde:

$F_c$  é o fator de correção da concentração da solução de ácido clorídrico.

25 é o volume teórico que deveria ser gasto na titulação.

$V_s$  é o volume real da solução de ácido clorídrico gasto, expresso em mililitros (mL).

Seguido do processo da padronização, executa-se a segunda etapa, onde serão determinados os volumes de ácido clorídrico utilizados na titulação das soluções contendo os materiais a serem analisados.

### 3.2.2.2 Índice de atividade pozolânica Chapelle

O primeiro procedimento para determinação do índice de atividade pozolânica consiste em pesar a amostra do material a ser ensaiado (1 grama), para cada uma das adições minerais, e a Cal (2 gramas). Os dois materiais são transferidos para um frasco com 250 mL de água. A mistura é colocada para agitação pré-aquecida durante 16 horas em temperatura de aproximadamente 90°C. Passadas as 16 horas, o frasco é resfriado em água corrente e adiciona-se 250 mL de solução de sacarose (240 g/L) recém preparada. Agita-se manualmente por 15 minutos afim de obter

homogeneidade. Usando papel filtro, a mistura é filtrada e 50 mL utilizados para titulação com a solução de ácido clorídrico usando fenolftaleína (1 g/L) como indicador. As etapas são repetidas para cada uma das adições minerais utilizadas e para o ensaio em branco. O processo de filtração é apresentado na figura 5.

**Figura 5: Filtração das soluções antes da titulação**



**Fonte: Autoria própria**

Nas figuras 6 e 7 é mostrado o processo de titulação do filtrado usando o ácido clorídrico e a fenolftaleína como indicador.

**Figura 6: Início do processo de titulação**



**Fonte: Autoria própria**

**Figura 7: Final do processo de titulação**



**Fonte: Autoria própria**

O volume gasto na titulação é chamado  $V_2$  e o volume gasto na titulação no ensaio em branco é o  $V_3$ . O índice de atividade pozolânica Chapelle, que corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado, em miligramas (mg) de  $Ca(OH)_2$  por grama de material, é obtido através da equação 2.

$$I = \frac{28.(V_3 - V_2).F_c}{m_2} . 1,32 \quad (2)$$

Onde:

$I$  é o índice de atividade pozolânica expresso em miligramas (mg) de  $Ca(OH)_2$  por grama (g) de material.

$m_2$  é a massa do material pozolânico expressa em gramas (g).

$V_2$  é o volume de HCl consumido no ensaio com amostra expresso em mililitros (mL).

$V_3$  é o volume de HCl consumido no ensaio em branco expresso em mililitros (mL).

$F_c$  é o fator de correção do HCl para uma concentração 0,1 M.

De acordo com a norma NBR 15895 (ABNT, 2012), para o material ser considerado com característica pozolânica é necessário atingir um valor mínimo de

330 mg de consumo de CaO por grama de amostra ou 436 mg de  $\text{Ca(OH)}_2$  por grama de amostra.

O teor de adição mineral em relação a massa total de aglomerante que de fato será utilizada na produção dos corpos de prova é obtida por meio da equação 3.

$$\%Adição = \frac{\% \text{Ca(OH)}_2}{I_{\text{Chapelle}} + \text{Ca(OH)}_2} \quad (3)$$

Onde:

%Adição é o teor de adição em relação a massa de aglomerante.

%  $\text{Ca(OH)}_2$  é a porcentagem de hidróxido de cálcio adotada 30%.

$I_{\text{Chapelle}}$  é o índice de atividade pozolânica do material.

A porcentagem de hidróxido de cálcio adotada igual a 30% é obtida a partir da análise das reações de hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  presentes na composição do cimento Portland.

### 3.2.3 Produção da argamassa e moldagem dos corpos de prova

A produção dos corpos de prova é realizada conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2018), as quantidades de materiais são pesadas conforme previsto no traço. Primeiramente realiza-se a mistura da adição com o cimento, de forma a obter uma composição de aspecto homogêneo. Despeja-se na argamassadeira a areia e parte da água, posteriormente a mistura de aglomerante e o restante da água. A argamassadeira é ligada e deixada em funcionamento por aproximadamente 3 minutos. Com a argamassa pronta, os corpos de prova são moldados, em 4 camadas, utilizando o soquete para realizar 25 golpes em cada uma das camadas a fim de uma melhor compactação. O procedimento é repetido para o teor calculado da adição, o teor calculado acrescido de 5 pontos percentuais e o teor calculado diminuído de 5 pontos percentuais. Após 24 horas da produção dos corpos de prova, estes são desmoldados e armazenados em local para cura úmida. Totalizando dessa forma, 18 corpos de prova para cada uma das três adições minerais e outros seis para o concreto de referência, finalizando para ensaio aos 40 dias 60 amostras. A idade de

40 dias é escolhida devido a disponibilidade dos equipamentos para uso nos ensaios e o tempo de finalização do estudo.

#### 3.2.4 Ensaio de resistência à compressão

Passado o período de 40 dias em cura úmida, os copos de prova são recolhidos e ensaiados. O intuito do ensaio é analisar a influência das adições na resistência mecânica das argamassas à compressão, uma vez que, a resistência é uma das principais propriedades utilizadas para indicar a qualidade de um elemento construtivo. Segundo a NBR 5739 (ABNT,2018) o ensaio deve ser realizado “em corpos de prova cilíndricos de concreto, moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015) e extraídos conforme NBR 7680 (ABNT, 2015)”. O equipamento para realização do ensaio é uma prensa hidráulica com capacidade de 200 toneladas, que possibilita a aplicação de carga de forma controlada na direção vertical. Ainda segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), os corpos de prova devem ser mantidos em cura úmida ou saturada antes da realização do ensaio. Em relação a aplicação de cargas, a carga de ensaio deve ser aplicada de modo contínuo e sem choques, com velocidade de carregamento de 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s e nenhum ajuste deve ser efetuado nos controles da máquina, quando o corpo de prova estiver se deformando rapidamente ao se aproximar de sua ruptura.

Os corpos de prova são colocados na prensa de forma que a carga seja aplicada no sentido longitudinal. A carga é aumentada gradualmente até a ruptura da amostra. O resultado de resistência à compressão é obtido pelo quociente entre a carga de ruptura e a seção transversal do corpo de prova, aplicando-se as devidas correções quando necessárias.

Os dados são estatisticamente tratados, de forma que os resultados obtidos sejam capazes de estimar com segurança os valores de resistência esperado para a dosagem utilizada.

#### 3.2.5 Ensaio de porosidade

A porosidade, permeabilidade e absorção de água pelos agregados possuem grande influência na aderência entre estes e a pasta de cimento, na resistência do concreto e inclusive na sua estabilidade química e massa específica. Os poros dos

agregados possuem grande variação de dimensões, mas mesmo os menores poros, são maiores que os da pasta. Alguns poros são totalmente internos, enquanto outros tem abertura para a superfície, o que possibilita a entrada de água. A velocidade da penetração de água depende do tamanho, da continuidade e do volume total de poros. A porosidade em rochas comuns varia de 0 a 50%, como os agregados representam em média  $\frac{3}{4}$  do volume total do concreto, fica claro que essa porosidade tem influência direta na porosidade total do concreto (NEVILLE, 2016).

Segundo Campitelli (1987), a porosidade de um material é representada por sua propriedade de apresentar poros ou vazios, representada pela fração do volume total de uma amostra, que é composta por poros ou espaços vazios. No estudo da porosidade do concreto, é fundamental a determinação da distribuição dos poros e da porosidade aberta, que são realizadas por meio de instrução de mercúrio.

A porosimetria por intrusão de mercúrio é baseada no comportamento de líquidos não molhantes em capilares. Um líquido que tenha um ângulo de contato maior que  $90^\circ$  não pode penetrar em um poro, devido a tensão superficial. Essa tensão superficial pode ser superada, pela aplicação de uma pressão externa, e essa pressão é função do tamanho do poro. A relação entre o tamanho do poro e a pressão exercida é expressa pela Equação 4:

$$Pr = 2Ts \cos \theta \quad (4)$$

Na qual:

P = Pressão absoluta exercida.

r = Raio do poro.

Ts = Tensão superficial do mercúrio.

Cos $\theta$  = Ângulo de contato.

Utilizando mercúrio com tensão superficial de 480 dinas/cm, ângulo de contato de  $140^\circ$  e admitindo todos os poros cilíndricos, obtêm-se a relação entre a pressão exercida e o tamanho dos poros mostrada na Equação 5.

$$r = \frac{75000}{P} \quad (5)$$

Onde:

$r$  = Raio do poro em Angstroms.

$P$  = pressão absoluta exercida em  $\text{Kgf/cm}^2$ .

O ensaio realizou-se com 1 amostra retirada após a ruptura, para cada um dos teores de argamassa produzido. O corpo de prova é colocado em um recipiente de vidro cuja tampa está acoplada a um capilar de 10 cm de comprimento e diâmetro interno de 3 mm. Esse conjunto é ligado a um módulo de preenchimento onde é feito vácuo, e após o vácuo o preenchimento com mercúrio puro. Posteriormente em uma autoclave aplicam-se pressões crescentes até  $1.500 \text{ Kgf/cm}^2$  e os deslocamentos no capilar e a pressão correspondente são expostos em um diagrama. A porosidade total é calculada a partir dos dados de volume de mercúrio injetado e o volume da amostra.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 ENSAIO CHAPELLE MODIFICADO

O volume  $V_2$  é o volume ácido clorídrico utilizado para a titulação no ensaio com cada um dos materiais pozolânicos. Na tabela 1 são apresentados os valores de  $V_2$  anotados.

**Tabela 1:  $V_2$  obtidos para cada adição mineral**

Adição mineral	Volume de HCl consumido na titulação ( $V_2$ )
Metacaulim	12 mL
Sílica ativa	10,5 mL
Cinzas de casca de arroz	5,3 mL

Fonte: Autoria própria

O Volume  $V_3$  é o volume de ácido clorídrico utilizado na titulação, no ensaio em branco. Já o volume  $V_s$  é o utilizado na padronização do ácido, utilizando o alaranjado de metila como indicador. Ambos os volumes são apresentados na tabela 2, além do valor de  $F_c$  (fator de correção do ácido clorídrico) calculado pelo quociente entre  $V_s$  e o volume teórico de 25 mL.

**Tabela 2: Volumes  $V_3$  e  $V_s$  e fator de correção  $F_c$  calculado**

volume de HCl consumido no ensaio em branco ( $V_3$ )	22 mL
Volume real de ácido clorídrico usado na padronização ( $V_s$ )	21 mL
Fator de correção ( $F_c$ )	1,32

Fonte: Autoria própria

Os índices de atividade pozolânica são calculados para cada adição mineral, a partir dos volumes de titulação do ensaio com material ( $V_2$ ), no ensaio em branco ( $V_3$ ) e fator de correção ( $F_c$ ). Esses índices estão apresentados na tabela 3, assim como os teores de adição mineral a serem utilizados, calculados a partir do Índice.

Tabela 3: Índice de atividade pozolânica e teor das adições

Adição mineral	Índice de atividade pozolânica (I)	Teor de adição mineral (%)
Metacaulim	439,82 mg/g	40,50 %
Sílica ativa	505,80 mg/g	37,00 %
Cinzas de casca de arroz	734,51 mg/g	28,80 %

Fonte: Autoria própria

A NBR 15895 (ABNT, 2012) estabelece que para que o material seja considerado pozolânico deve atingir um consumo mínimo 436 mg de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por grama de amostra, todos os materiais ensaiados são considerados pozolânicos.

A partir dos teores obtidos de substituição do aglomerante por adição mineral, foram adotados mais 2 teores para cada uma das adições. Um deles aproximadamente 5 pontos percentuais acima e outro 5 pontos percentuais abaixo do teor calculado. Estabelecendo-se os teores apresentados na tabela 4 para a produção dos corpos de prova de argamassa.

Tabela 4: Teores de adição em relação a massa total de aglomerante

Adição mineral	Teores adotados (%)
Metacaulim	35%
	40%
	45%
Sílica ativa	32%
	37%
	42%
Cinza de casca de arroz	24%
	29%
	34%

Fonte: Autoria própria

#### 4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os corpos de prova são ensaiados após cura úmida de 40 dias e sua resistência máxima é obtida. Para a análise estatística dos dados obtidos, retirou-se

os valores considerados espúrios, adotando como critério dados distantes mais do que 1 desvio padrão acima ou abaixo da média. Na tabela 5 são apresentados para cada um dos teores produzidos e ensaiados, após a retirada de dados espúrios, a média de resistência, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados.

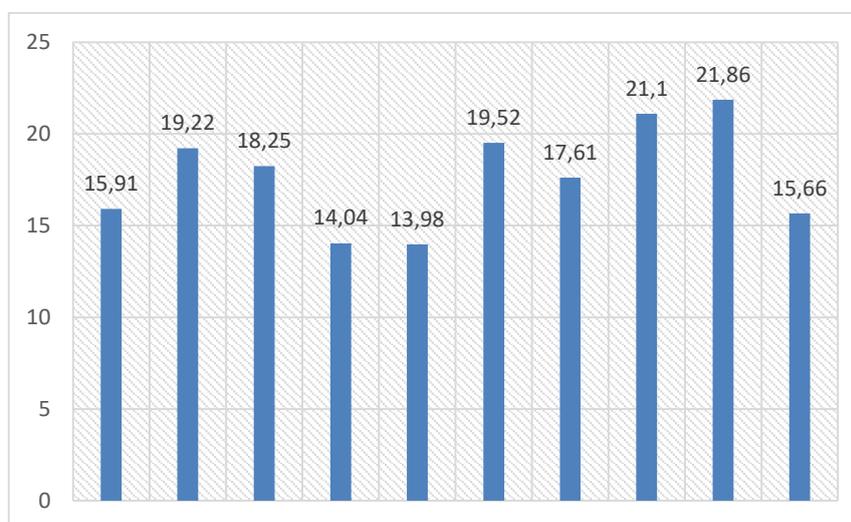
**Tabela 5: Resultados estatísticos dos dados de resistência à compressão**

Adição mineral/ teor	Média ( $\bar{x}$ ) Mpa	Desvio padrão ( $\sigma$ )	Coef. De variação ( $C_v$ )
Referência	15,91	3,75	23,59
Metacaulim 35%	19,22	4,80	24,98
Metacaulim 40%	18,25	1,94	10,65
Metacaulim 45%	14,04	3,21	22,89
Sílica ativa 32%	13,98	1,87	13,35
Sílica ativa 37%	19,52	1,88	9,65
Sílica ativa 42%	17,61	3,15	17,88
Cinza 24%	21,10	3,02	14,32
Cinza 29%	21,86	3,29	15,04
Cinza 34%	15,66	3,31	21,10

Fonte: Autoria própria

No gráfico 1 são apresentadas as médias de resistência na mesma ordem da segunda coluna da tabela 5 para a melhor visualização dos resultados.

**Gráfico 1: Médias de resistências à compressão**



Fonte: Autoria própria

A partir dos dados obtidos, é possível notar que há médias de resistências inferiores à da argamassa de referência, nos teores de 45% de metacaulim, 32% de sílica ativa e 34% de cinza de casca de arroz, apontando para uma redução da resistência mecânica à compressão nos corpos de prova moldados com estes materiais nos teores observados.

Segundo o método ANOVA realizou-se a análise estatística para inferir se há distinção entre as médias calculadas. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 6.

**Tabela 6: Teste estatístico via método ANOVA**

Teste para médias iguais					
	Soma dos quad.	df	Quadrado médio	F	p (igual)
Entre grupos:	389,039	9	43,2265	4,204	0,000601
Em grupo:	442,112	43	10,2817	Permutação p (n=99999)	
Total:	831,151	52	0,00067		

**Fonte: Autoria própria**

Segundo o método ANOVA, se o valor “p” for menor que 5%, é possível afirmar com um nível de confiança de 95% a distinção estatística entre os valores analisados, nesse caso, entre as médias de resistências apresentadas na tabela 5. Dessa forma, como  $p = 0,000601$ , realiza-se o teste via método de Tuckey’s afim de reconhecer os valores distintos. O resultado da análise é apresentado na tabela 7.

**Tabela 7: Análise via método Tuckey’s**

Adição mineral/ teor	Distinção estatística
Referência	
Metacaulim 35%	
Metacaulim 40%	
Metacaulim 45%	A
Sílica ativa 32%	B
Sílica ativa 37%	
Sílica ativa 42%	
Cinza 24%	AB
Cinza 29%	ABC
Cinza 34%	C

**Fonte: Autoria própria**

As letras iguais utilizadas na tabela 7, representam valores estatisticamente distintos, segundo a análise via método de Tuckey's. Dessa forma é possível afirmar, com um nível de confiança de 95%, que os valores obtidos no ensaio com metacaulim no teor de 45% é diferente do obtido com cinza de casca de arroz nos teores de 24 e 29%. Da mesma forma, os valores obtidos para, sílica ativa no teor de 32%, é também distinto dos resultados com cinza de casca de arroz nos teores de 24 e 29%. Por fim o teste conclui que os valores obtidos entre os teores de cinza de casca de arroz de 29 e 34% são estatisticamente distintos entre si.

A análise não demonstrou diferenças estatísticas entre os resultados obtidos na argamassa de referência e os alcançados com os 9 teores das 3 adições minerais. Portanto, na idade de 40 dias, não é possível observar um acréscimo na resistência à compressão, sob influência de adições minerais de metacaulim, sílica ativa e cinza de casca de arroz para os teores determinados a partir do consumo de hidróxido de cálcio, quantificado via ensaio Chapelle modificado.

#### 4.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE POROSIMETRIA

Para o ensaio de porosimetria é utilizada uma amostra para cada um dos teores produzidos, totalizando 10 corpos de prova. Os resultados obtidos no ensaio são apresentados na tabela 11.

**Tabela 11: Resultados do ensaio de porosimetria**

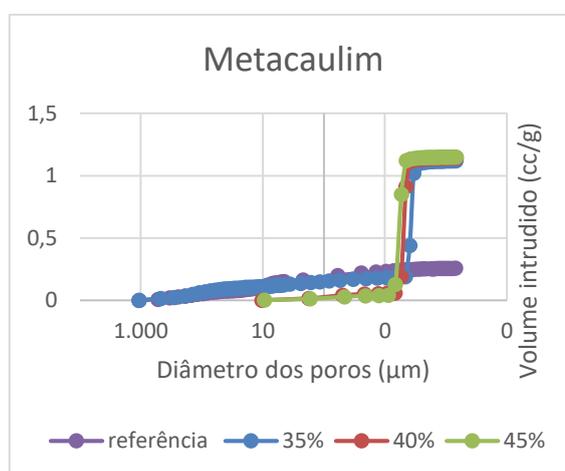
<b>Adição mineral</b>	<b>Teor</b>	<b>Porosidade total</b>
Metacaulim	35%	109.9423 [%]
	40%	100.4437 [%]
	45%	101.1074 [%]
Sílica ativa	32%	35.5819 [%]
	37%	110.8255 [%]
	42%	110.3909 [%]
Cinza de casca de arroz	24%	20.8170 [%]
	29%	24.6063 [%]
	34%	33.6550 [%]
Concreto de referência		31.9026 [%]

Fonte: NPT UTFPR (DACOC UTFPR)

Como o valor de porosidade total é a relação entre o volume de poros e o volume de total da amostra, esse resultado pode apresentar um valor máximo de 100%. Os resultados obtidos ultrapassaram esse limite, indicando um erro na execução do ensaio ou do equipamento, de forma que, não é possível obter conclusões a respeito da influência das adições minerais na propriedade de porosidade das amostras em relação a amostra de argamassa de referência.

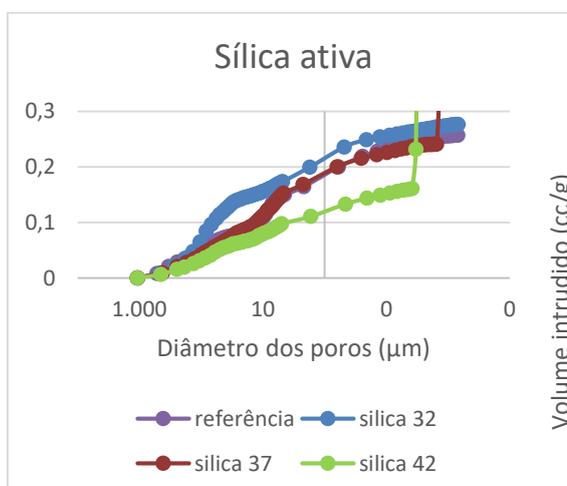
Nos gráficos 2, 3 e 4 abaixo são apresentadas as curvas que relacionam o volume intrudido e o diâmetro dos poros para as adições de metacaulim, sílica ativa e cinza de cascas de arroz respectivamente.

**Gráfico 2: Curvas porosimétricas Metacaulim**

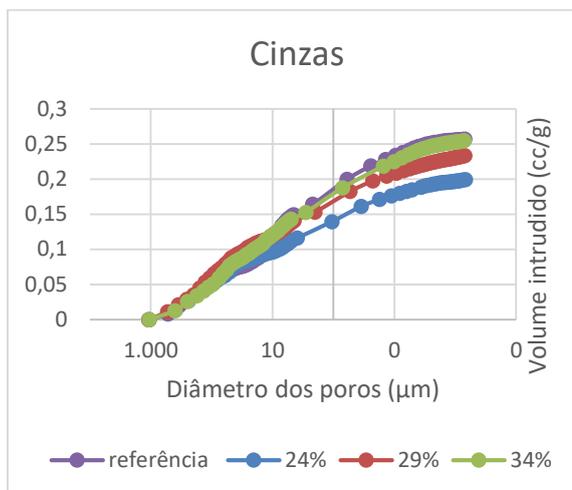


**Fonte: Autoria própria**

**Gráfico 3: Curvas porosimétricas sílica ativa**



**Fonte: Autoria própria**

**Gráfico 4: Curvas porosimétricas cinzas**

**Fonte: Autoria própria**

A análise dos gráficos é também impossibilitada devido a incoerência dos resultados obtidos na porosidade total. Embora o gráfico 4, aponte para uma queda da porosidade nas amostras com adição de cinza de casca de arroz em relação à amostra de referência, pela falta de confiabilidade dos resultados, não é possível afirmar que de fato existe essa distinção.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão nos corpos de prova moldados com os materiais pozolânicos: Metacaulim, sílica ativa e cinza de cascas de arroz e nas análises estatísticas via métodos ANOVA e Tuckey's. Em teores determinados pelo ensaio Chapelle modificado, é possível afirmar, com um nível de confiabilidade de 95% que nenhuma das três adições minerais utilizadas, nos teores produzidos, na idade de 40 dias, promove um aumento na resistência à compressão axial em relação à obtida na argamassa de referência. A análise estatística aponta valores distintos nos resultados, porém, estes são apenas entre as diferentes adições e teores, mas não distintos em relação a argamassa de referência.

No caso da análise da porosidade, embora as curvas representativas do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio nas amostras moldadas com cinza de casca de arroz demonstrem uma melhora na propriedade de porosidade em relação a amostra da argamassa de referência. Os resultados obtidos de porosidade total apontam para uma falha no equipamento ou na execução do ensaio, de forma que pela incoerência dos dados obtidos, como um volume de poros superior ao volume total da amostra, não é possível fazer inferências a respeito da representatividade dos resultados e da influência das adições minerais nos teores determinados pelo consumo de hidróxido de cálcio, na porosidade da argamassa.

É provável que o tempo total para a completa reação pozolânica não tenha sido alcançando, de forma que se espera que em estudos utilizando o ensaio Chapelle modificado em maiores idades seja possível uma obtenção de valores de resistência à compressão superiores aos obtidos nos ensaios realizados aos 40 dias, justificada pela completa reação pozolânica, assim como, valores de porosidade total inferiores ao da argamassa de referência.

## REFERÊNCIAS

- AITCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680. Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956. Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15985. Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro, 2010.
- BASTOS, P.S.S.; **Fundamentos do concreto armado**. Bauru: UNESP, 2006.
- CAMPITELI, V.C.; **Porosidade no concreto**: Boletim técnico 09/87. USP, São Paulo, 1987.
- DELLA, V.P.; KÜHN, I.; HOTZA, D.; Characterization of rice husk ash for use as raw material in the manufacture of silica refractory. **Química Nova**, v. 24, n. 6, ISSN 0100-4042., 2001.
- FABRIZZI, M.A.; Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos aço-concreto. **Dissertação (Mestrado)–Escola de Engenharia de São Carlos–USP**, São Paulo, 2007.
- FOLETTTO, E.L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R.S.; PORTUGAL JR., U.L. e JANH, S.L. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, 2005.
- FONSECA, M.R.G.; **Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima**; Porto Alegre, RS, UFRGS, 2000.

FORNASIER, R.S.; **Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com sílica ativa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 1995.

GASTALDINI, A.L.G.; **Concreto verde com teores muito elevados de adições minerais. Um estudo de sustentabilidade**. UFSM, 2004.

GEYER, A.; **Dosagem de Concreto: Método IPT/EPUSP** (Material de aulas). Goiânia, Escola de Engenharia Civil, UFGO, 2006.

GUERRA, R.S.T.; **Metacaulim**. 2013. Disponível em:  
< <http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/12/metacaulim.html> >. Acesso em: 02.nov.2018.

ISAIA, G.C.; **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, 2011.

ITAMBÉ; **Catálogo de cimentos Itambé**. Disponível em: < <https://www.cimentoitambe.com.br/cimento-certo/>>. Acesso em: 03.mai.2019.

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials. Advances in Concrete Technology**, v. 1, Gordon and Breach Publishers, 1996.

MARANGON, E.; **Atividade pozolânica da sílica da casca de arroz, produzida por combustão em leito fluidizado**. In: 55º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais do 55º Alegrete, RS, 2013.

MEDINA, E. A.; **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binário com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia De Construção Civil E Urbana, Escola Politécnica, São Paulo, USP, 2011.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura Propriedades e Materiais**. 3ª ed. São Paulo, 2014.

MORAES, M.; **Adições Minerais ao Concreto**. PUC-GO, Goiânia, 2012.

MORAIS, J. A.; **Estudo de Micro-concretos leves de alto desempenho para pré-fabricados de pequena espessura**. 2001. Dissertação (Mestrado), USP, EESC, São Paulo, 2001.

NEVILLE, A. M.; **Propriedades do Concreto**. 5.ed. São Paulo: Pini, 2016.

ROJAS, M.F.; ROJAS, M.I.S.; **The effect of high curing temperature on the reaction kinetics in metakaolin, lime and metakaolin**, 2003.

SIMÃO, P.S.; **Construção Civil: mercado cresce no país e aponta grandes desafios no setor**. 2012. Disponível em:<

[http://www.techoje.com.br/site/techoje/categoria/detalhe\\_artigo/1157](http://www.techoje.com.br/site/techoje/categoria/detalhe_artigo/1157)>. Acesso em: 02.set.2018.

SOUZA, P.S.L.; **Verificação da Influência do Uso de Metacaulim de Alta Reatividade nas Propriedades Mecânicas do Concreto de Alta Resistência**. 203 f. Porto Alegre, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

WOLF, J.; **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adições de microssílica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 1991.

## ANEXOS

Tabela 1 (anexo): Resistência máxima metacaulim

<b>Metacaulim</b>	
Teor (%)	Resistência (Mpa)
35%	23,86
	15,46
	23,76
	12,63
	16,90
	22,57
40%	10,43
	20,67
	18,95
	16,83
	9,29
	16,53
45%	16,44
	18,34
	10,73
	11,38
	11,06
	12,98

Fonte: Autoria própria

**Tabela 2 (anexo): Resistência máxima sílica ativa**

<b>Sílica ativa</b>	
<b>Teor (%)</b>	<b>Resistência (Mpa)</b>
32%	16,57
	15,92
	13,99
	12,43
	12,24
	12,75
37%	18,95
	12,06
	22,12
	17,64
	19,35
	11,89
42%	18,29
	14,76
	16,12
	20,53
	14,11
	21,85

**Fonte: Autoria própria**

**Tabela 3 (anexo): Resistência máxima cinzas**

<b>Cinzas de casca de arroz</b>	
Teor (%)	Resistência (Mpa)
24%	26,87
	20,64
	19,56
	20,91
	20,48
	17,95
29%	18,70
	23,84
	27,60
	20,30
	20,75
	19,98
34%	11,41
	18,66
	15,73
	18,81
	17,49
	11,88

Fonte: Autoria própria

**Tabela 4 (anexo): Resistência no concreto de referência**

<b>Concreto de referência</b>	
Corpo de prova	Resistência
1	7,65
2	12,05
3	6,43
4	18,72
5	13,35
6	19,50

Fonte: Autoria própria

**Tabela 5: Dados utilizados na análise (excluindo espúrios)**

Ref. (MPa)	Met. 35% (Mpa)	met. 40% (Mpa)	met.45 % (Mpa)	Sílica 32% (Mpa)	Sílica 37% (Mpa)	Sílica 42% (Mpa)	Cinzas 24% (Mpa)	Cinzas 29% (Mpa)	Cinzas 34% (Mpa)
19,5	23,9	16,5	16,4	16,6	19,0	18,3	26,9	20,8	17,5
12,1	16,9	20,7	18,3	15,9	19,4	21,9	20,6	23,8	18,7
13,4	23,8	19,0	13,0	14,0	22,1	16,1	20,5	27,6	15,7
18,7	22,6	16,8	11,4	12,8	17,6	20,5	20,9	20,3	18,8
	15,6		11,1	12,2		14,1	19,8	18,7	11,4
	12,6			12,4		14,8	18,0	20,0	11,9

**Fonte: Autoria própria**