

Éverton Henrique Ferreira

**DESEMPENHO ESTRUTURAL E VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DO METACAULIM EM  
CONCRETO DOSADO EM CENTRAL**

Trabalho de conclusão de curso II apresentado ao curso de engenharia civil da universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como exigência parcial para a obtenção do título de engenheiro civil, elaborado sob orientação do professor, MSc. Eng. Civil Marco Antônio Pozzobon.

Santa Cruz do Sul  
2017

Éverton Henrique Ferreira

**DESEMPENHO ESTRUTURAL E VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DO METACALUM EM  
CONCRETO DOSADO EM CENTRAL**

Trabalho de conclusão de curso II apresentado ao curso de engenharia civil da universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como exigência parcial para a obtenção do título de engenheiro civil.

Prof. Ms Eng. Marco Antônio Pozzobon  
Professor orientador - UNISC

Prof. Ms Eng. Camila Crauss  
Professora examinadora - UNISC

Prof. Ms Eng. Marcus Daniel Friederich dos Santos  
Professor examinador - UNISC

Santa Cruz do Sul  
2017

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho a minha família, pois sem sua ajuda e apoio não teria chegado aonde cheguei. São eles, meu pai Luciano José Ferreira, minha mãe Marilane Ferreira, meu irmão Jean Gabriel Ferreira e meu avô Assis de Jesus Ferreira.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado forças e permitir que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais Luciano José Ferreira e Marilane Ferreira, pelo apoio, incentivo e carinho.

A meu irmão Jean Gabriel Ferreira, pelo apoio durante esses anos de estudo.

A minha namorada Bruna Schimuneck, por estar ao meu lado nessa etapa de minha vida.

Aos meus amigos e familiares que sempre estiveram ao meu lado.

Ao professor orientador Marco Antônio Pozzobon, por me orientar nesse trabalho de conclusão.

Aos meus colegas, que estiveram ao meu lado durante todo o curso.

Aos laboratoristas pelo auxílio na execução dos ensaios.

A universidade de Santa Cruz do Sul e seus funcionários.

## RESUMO

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo, pela facilidade com que os elementos estruturais podem ser executados com uma variedade enorme de formas e tamanhos, e também pelo seu baixo custo. A relação entre custo e desempenho dos materiais é o que rege o mercado da construção civil. Diversos estudos afirmam que a utilização de metacaulim como substituição parcial do cimento portland, propicia enormes ganhos, principalmente relacionados à resistência mecânica, mais precisamente a resistência a compressão. Grande parte da bibliografia recomenda a adição de metacaulim para a obtenção de concretos de alto desempenho (CAD). O estudo teve como base avaliativa a resistência a compressão, relação água e aglomerante, e a consistência dos concretos. Foram desenvolvidos cinco tipos de concreto com três traços para cada. Os concretos foram o de referência com a utilização apenas de cimento, outro com a adição de cinza mineral leve Silmin e mais três com adições de 4 %, 8 % e 12 % de metacaulim. O presente trabalho estuda o desempenho e a viabilidade para a utilização de metacaulim em concreto dosado em central, de modo a obter concretos com baixo custo de produção que atendam as resistências características requisitadas e as normas técnicas e de qualidade. O estudo apresenta os custos para produção de um metro cúbico de cada um dos concretos dosados segundo uma resistência característica. Dentre os concretos estudados o que apresentou melhor custo benefício foi com a adição de cinza mineral leve, o uso de metacaulim se torna viável quando não houver disponibilidade desta, ou quando for necessário aceleração da resistência inicial, em teor de 4 % como substituição em massa do cimento portland.

Palavras chave: Concreto, metacaulim, resistência a compressão, relação água e aglomerante, consistência.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	3
2	JUSTIFICATIVA.....	5
3	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	7
3.1	Objetivo Geral.....	7
3.2	Objetivos Específicos.....	7
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	8
4.1	Concreto .....	8
4.1.1	Composição do concreto .....	9
4.1.1.1	Cimento.....	10
4.1.1.2	Agregados .....	15
4.1.1.3	Água .....	17
4.1.1.4	Aditivo e adições.....	17
4.1.2	Estrutura do concreto.....	18
4.1.2.1	Estrutura da fase agregado.....	19
4.1.2.2	Estrutura da pasta endurecida.....	20
4.1.2.3	Zona de transição .....	21
4.2	Metacaulim de alta reatividade .....	22
4.2.1	Processo de fabricação.....	25
4.2.1.1	Matéria prima.....	25
4.2.1.2	Industrialização .....	26
4.2.2	Características físicas e químicas.....	27
4.2.3	Adição de metacaulim em concretos a base de cimento .....	29
4.2.3.1	Resistência mecânica.....	31
4.2.3.2	Módulo de elasticidade.....	34
4.2.3.3	Retração por secagem.....	35
4.2.3.4	Calor de hidratação.....	36
4.2.3.5	Resistência a abrasão .....	36

4.2.3.6 Porosidade e absorção de água .....	36
4.2.3.7 Corrosão de armadura.....	37
4.2.3.8 Reação alcali agregado .....	39
5. METODOLOGIA .....	40
5.1 Planejamento dos ensaios .....	40
5.1.1 Variáveis independentes .....	41
5.1.2 Variáveis dependentes .....	41
5.2 Seleção dos materiais .....	42
5.2.1 Cimento Portland .....	42
5.2.2 Agregado miúdo.....	43
5.2.3 Agregado graúdo .....	46
5.2.4 Água .....	48
5.2.5 Aditivos .....	49
5.2.6 Metacaulim.....	49
5.2.7 Adição pozolânica utilizada pela concreteira .....	51
5.3 Dosagem dos materiais.....	52
5.4 Produção do concreto e preparo dos corpos de prova.....	53
6. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	57
6.1 Concretos estudados .....	57
6.2 Resistência a compressão .....	58
6.3 Relação água e aglomerante.....	59
6.4 Verificação da consistência pelo ensaio de abatimento .....	59
7 ANÁLISE DO RESULTADOS.....	60
7.1 Resistência a compressão .....	60
7.1.1 Traço A.....	62
7.1.2 Traço B.....	64
7.1.3 Traço C.....	67
7.2 Relação água e aglomerante.....	70
7.3 Consistência.....	72

7.3.1 Traço A.....	72
7.3.2 Traço B.....	73
7.3.3 Traço C.....	74
7.4 Diagramas de dosagem.....	74
7.5 Consumo de materiais segundo resistência característica (fck).....	75
7.6 Custos de produção .....	77
7.6.1 Concreto de 15 MPa.....	79
7.6.2 Concreto de 20 MPa.....	80
7.6.3 Concreto de 25 MPa.....	80
7.6.4 Concreto de 30 MPa.....	81
7.6.5 Concreto de 35 MPa.....	81
7.6.6 Concreto de 40 MPa.....	82
7.6.7 Concreto de 45 MPa.....	82
7.6.8 Concreto de 50 MPa.....	83
8 CONCLUSÕES.....	84
9 SUJESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	86
REFERÊNCIAS.....	87
ANEXO A.1 Resistência a compressão x fator água / cimento.....	89
ANEXO A.2 Resistência a compressão x consumo de cimento.....	89
ANEXO B.1 Teor de agregados x consumo de cimento.....	90
ANEXO B.2 Teor de agregados x fator água / cimento.....	90
ANEXO C.1 Resistência a compressão x fator água / cimento.....	91
ANEXO C.2 Resistência a compressão x consumo de cimento.....	92
ANEXO D.1 Teor de agregados x consumo de cimento.....	92
ANEXO D.2 Teor de agregados x fator água / cimento.....	92
ANEXO E.1 Resistência a compressão x fator água / cimento.....	93
ANEXO E.2 Resistência a compressão x consumo de cimento.....	93
ANEXO F.1 Teor de agregados x consumo de cimento.....	94
ANEXO F.2 Teor de agregados x fator água / cimento.....	94

<b>ANEXO G.1 Resistência a compressão x fator água / cimento.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO G.2 Resistência a compressão x consumo de cimento.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO H.1 Teor de agregados x consumo de cimento.....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO H.2 Teor de agregados x fator água / cimento.....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO I.1 Resistência a compressão x fator água / cimento.....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXO I.2 Resistência a compressão x consumo de cimento.....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXO J.1 Teor de agregados x consumo de cimento.....</b>	<b>98</b>
<b>ANEXO J.2 Teor de agregados x fator água / cimento.....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção de obras civis vem acompanhando o homem desde os primórdios da humanidade, com o passar do tempo o homem foi evoluindo, aprimorou suas técnicas construtivas e desenvolveu novos materiais, buscando eficiência e racionalidade. Um dos materiais mais utilizados na construção civil é o concreto. Estimasse que anualmente no mundo sejam consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o equivalente a 1,9 tonelada de concreto por habitante a cada ano. Esse valor o coloca como o segundo insumo mais consumido no mundo, perdendo apenas para a água, sendo que esta é inserida nele (Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2009).

Largamente utilizado pela facilidade com que os elementos estruturais podem ser executados com uma variedade enorme de formas e tamanhos, o uso do concreto vai desde as mais simples exigências estruturais, passando por estruturas pré-fabricadas, até obras que apresentam peculiaridades, como grande carregamentos e meios de maior agressividade. Em cada aplicação há exigências específicas que o material deve atender como, por exemplo, em estruturas pré fabricadas, onde necessitasse principalmente de altas resistências em poucos dias de cura, ou elevadas resistências mecânicas e a ataques químicos no caso de obras especiais.

O concreto é composto por cimento portland, agregado graúdo, agregado miúdo, água e pode conter ou não aditivos e adições. Segundo Helene (1993) a resistência a compressão dos concretos tem sido tradicionalmente utilizada como parâmetro principal de dosagem e controle da qualidade dos concretos, sendo ela influenciada em grande parte pela relação água/cimento. Deste modo o cimento se torna um componente muito importante na dosagem do concreto, e devido a o seu uso há uma grande demanda e, portanto fabricação. A extração de matéria prima para a produção de cimento portland gera grande emissão de gás carbônico na atmosfera, causando um grande impacto ao meio ambiente. Cada vez mais há preocupação quanto aos impactos ambientais de sua produção, sendo discutidas mundialmente formas de diminuir a emissão de CO<sub>2</sub>.

Atualmente busca-se o desenvolvimento de concretos que apresentem grande durabilidade e ganho de resistência mecânica em pouco tempo, aliando com baixos impactos ambientais da obtenção dos seus constituintes e com um bom custo x benefício.

## 2 JUSTIFICATIVA

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo, um de seus componentes principais é o cimento portland, que é produzido em larga escala. Segundo Ecycle (2015) os procedimentos necessários para a produção do cimento geram cerca de 5 % das emissões mundiais de CO<sub>2</sub>. Cada vez mais cresce a preocupação ambiental frente ao aquecimento global e a busca de formas para diminuir a emissão de gás carbônico que é o principal agente de degradação da camada de ozônio.

Paralelo a preocupação ambiental se tem a econômica, pois onde há consumo de concreto, e por consequência de cimento, há também desenvolvimento econômico, pode-se dizer que o consumo de concreto é um termômetro da economia de um país.

No setor da construção civil a preocupação no meio técnico é quanto à resistência mecânica do concreto e sua durabilidade. Hoje em dia a velocidade com que as obras são executadas e os sistemas construtivos, como o de estruturas pré fabricadas, exigem altas resistências mecânicas em pouco tempo. A durabilidade de estruturas de concreto armado gira em função do concreto utilizado e do grau de agressividade do meio ao qual a estrutura está inserida.

O desenvolvimento de um concreto com um menor consumo de cimento, atingindo boas resistências mecânicas e durabilidade, e com baixo custo de produção, é um meio de diminuir a emissão de gás carbônico proveniente da produção do cimento portland.

A utilização de materiais pozolânicos na composição do concreto tem por objetivo diminuir o consumo de cimento e melhorar suas propriedades, principalmente a de resistência a compressão e durabilidade. Os materiais pozolânicos têm a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio gerado pela hidratação do cimento, produzindo hidratos semelhantes ao do cimento hidratado responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica.

O metacaulim de alta reatividade vem sendo uma ótima opção de material pozolânico substituto parcial do cimento portland. Diferente de outras pozolanas, não utiliza resíduos industriais, e possui excelente estética, não interferindo na

coloração do concreto. Sua reação com o hidróxido de cálcio diminui a porosidade aumentando a resistência mecânica e a durabilidade.

Constatado a importância do concreto como material de construção e seus principais requisitos e exigências em cada aplicação, busca-se no presente trabalho estudar o desempenho e a viabilidade do uso de metacaulim em concreto dosado em central. Analisando os resultados obtidos e verificando se a substituição propicia economia e eficiência, para assim viabilizar o seu uso.

### **3 OBJETIVOS DA PESQUISA**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Avaliar a resistência a compressão em quatro diferentes idades de concretos dosados com a substituição de 4 %, 8 % e 12 % de cimento portland por metacaulim de alta reatividade, comparando-os com traços de concreto convencional de concreteira.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a resistência a compressão em 3, 7, 28 e 56 dias.
- Avaliar o custo de produção do concreto com adição de metacaulim de alta reatividade.
- Avaliar a disponibilidade de metacaulim de alta reatividade no mercado para o Rio Grande do Sul.
- Avaliar a evolução da sua resistência para emprego em concretagens que necessitam cura rápida.
- Enquadrar seus resultados em possíveis usos.
- Caracterizar suas vantagens com base na bibliografia e estudos técnicos existentes.

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Concreto

O concreto é um material constituído basicamente de aglomerante e agregado, segundo Mehta (1994,p.08),

O concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados. No concreto de cimento hidráulico o meio aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água.

Dois propriedades o destacam como material construtivo, que são a resistência a água- diferente do aço e da madeira, ele sofre menos deterioração - e a sua plasticidade – permite obter diversos formatos construtivos. É um dos materiais mais usados no mundo, estimasse que no Brasil a quantidade de concreto que sai das centrais dosadoras gire em torno de 30 milhões de metros cúbicos ao ano (IBRACON, 2009).

Quando combinado com o aço em uma união racional é chamado de concreto armado, aliando a excelente resistência à compressão do concreto com a de tração e do aço. Essa união de concreto e aço busca tirar o máximo possível de proveito das características de cada um dos materiais. O concreto resiste muito bem a compressão, porém a sua resistência a tração e flexão são na ordem de 10% a 15% a de compressão, valores baixos devido a heterogeneidade e complexidade da sua estrutura. Já o aço possui excelente resistência a tração, flexão e também compressão, mas não é usado isoladamente na construção civil por ser oxidável, não resistindo à ação da umidade e de alguns tipos de gases, devido a esses fatores é usado juntamente com o concreto que o protege.

Quanto a sustentabilidade, segundo Arnaldo Forti Battagin chefe dos laboratórios da associação brasileira de cimento portland, citado por IBRACON (2009), “em termos de sustentabilidade, o concreto armado consome muito menos energia do que o alumínio, o aço e o vidro”.

**Figura 1 - Concreto**



Fonte: disponível em: CIMENTARE

#### 4.1.1 Composição do concreto

O concreto é composto por aglomerante, agregado miúdo, agregado graúdo e água, podendo conter ou não aditivos e adições. O aglomerante utilizado é o cimento portland, o agregado miúdo é areia e o graúdo brita. A adição de cimento portland com água forma a pasta, na qual a adição de areia forma a argamassa que adicionada com agregado graúdo da origem ao concreto.

**Figura 2 – Pasta de cimento**



Fonte: elaborado pelo autor

**Figura 3 – Argamassa**



Fonte: elaborado pelo autor



Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.1.1.1 Cimento

O cimento é um pó fino com propriedades aglutinantes, que endurece sob ação da água, se caracterizando assim um aglomerante hidráulico. Depois de endurecido e mesmo sob a ação de água, não se decompõe mais.

Cimento Portland é um produto obtido pela pulverização do clínquer constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego.(OLIVEIRA, 2000, p.35).

O clínquer é um produto de natureza granulosa com nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de um material sinterizado. É obtido pela mistura pré determinada de matérias primas formando uma farinha que é aquecida a altas temperaturas (AMBROZEWICZ, 2012).

Os Silicatos de cálcio são os principais constituintes do cimento portland, assim as matérias primas para a sua produção, ou seja, composição do clínquer devem fornecer cálcio e sílica em proporções adequadas. O cálcio é obtido na natureza em fontes de carbonato de cálcio como mármore, giz, pedra calcária e conchas do mar. A Sílica é obtida preferencialmente de argilas e xistos argilosos do que em quartzos e arenitos, pois a sílica quartizítica não reage facilmente. Além disso, as argilas contem alumina ( $Al_2O_3$ ) e frequentemente óxidos de ferro ( $Fe_2 O_3$ ) e álcalis, que presentes na mistura da matéria prima têm um efeito mineralizante na formação dos silicatos de cálcio, ou seja, ajuda na sua formação com temperaturas consideravelmente mais baixas do que se utilizasse outra matéria

prima. Quando não presente em quantidade suficiente na matéria prima a alumina e os óxidos de ferro são adicionados propositalmente a mistura por meio de materiais secundários como o minério de ferro e a bauxita (AMBROZEWICZ, 2012).

A formação dos compostos desejados no clínquer é alcançada pela mistura de matérias primas bem homogeneizadas antes do tratamento térmico. Por isso os materiais extraídos passam por uma série de operações de britagem, moagem e mistura. A partir de uma análise química dos materiais estocados é feito o seu proporcionamento para alcançar a composição desejada no clínquer (AMBROZEWICZ, 2012).

Após o proporcionamento, britagem e moagem da matéria prima é obtida a farinha que será clínquerizada em um forno rotativo a temperaturas que podem chegar até 1550°C formando o clínquer. Ao clínquer são realizadas algumas adições, dando origem aos diferentes tipos de cimento existentes. O gesso é adicionado em todos tipos de cimento portland para controlar o tempo de pega, em geral na proporção de 3% para 97% de clínquer (AMBROZEWICZ, 2012).

### **a) Tipos**

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2016) o mercado nacional dispõe de oito opções de cimento portland que atendem aos mais variados tipos de obras. O cimento portland comum é referencia, por suas características e propriedades, aos onze tipos básicos de cimento portland disponíveis no mercado brasileiro. São eles:

1. Cimento portland comum (CP I)
  - a. CP I - Cimento portland comum
  - b. CP I - S - Cimento portland comum com adição
2. Cimento portland composto (CP II)
  - a. CP II - E - Cimento portland composto com escória
  - b. CP II - Z - Cimento portland composto com pozolana
  - c. CP II - F - Cimento portland composto com fíler
3. Cimento portland de alto forno (CP III)

4. Cimento portland pozolânico (CP IV)
5. Cimento portland de alta resistência inicial (CP V - ARI)
6. Cimento portland resistente a sulfatos (RS)
7. Cimento portland de baixo calor de hidratação (BC)
8. Cimento portland branco (CPB)

A diferenciação de cada um dos tipos de cimento portland é de acordo com a quantidade de clínquer e sulfatos de cálcio, material carbonático e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, que são acrescidas no processo de moagem. Eles também podem se diferenciar em função das propriedades intrínsecas, como alta resistência inicial e cor branca (ABCP, 2016).

### **1) Cimento portland comum – CP I**

O cimento portland comum (CP I) não possui nenhum tipo de adição além do gesso (utilizado como retardador de pega), é recomendado o seu uso em construções de concreto, em geral quando não há exposição a sulfatos do solo ou em águas subterrâneas. O cimento portland comum com adições (CP I – S) possui 5% de material pozolânico em massa, e tem as mesmas recomendações do CPI (ABCP, 2016).

### **2) Cimento portland composto – CP II**

O cimento portland composto (CPII) é modificado, ele gera menor quantidade de calor em sua hidratação e por isso seu uso é mais indicado em lançamentos maciços de concreto, onde o grande volume de concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento (ABCP, 2016). Tem adições de escória, pozolana ou fíler em pequenas proporções. As recomendações de cada tipo de cimento portland composto são:

CP II – Z: Cimento com adição de material pozolânico, o concreto dosado com esse tipo de cimento é mais impermeável e por isso mais resistente. Tem recomendação de uso em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais (ABCP, 2016).

CP II – E: Cimento com adição de escória granulada de alto-forno tem composição intermediária entre o cimento portland comum e o cimento portland com adições (alto forno e pozolânico). É recomendado em estruturas onde há um grande volume de concretagem e que necessitam de um desprendimento de calor lento para minimizar a retração (ABCP, 2016).

CP II – F: Cimento com adição de material carbonático – filer, seu uso é recomendado em aplicações gerais como no preparo de argamassas de assentamento e revestimento, argamassa armada, concreto simples, armado, pró tendido, projetado, rolado, magro, concreto massa, elementos pré-moldados e artefatos de concreto, pisos e pavimentos de concreto, solo cimento, entre outras aplicações (ABCP, 2016).

### **3) Cimento portland de alto forno – CP III**

O cimento portland de alto forno (CP III) apresenta maior impermeabilidade e conseqüentemente durabilidade. É resistente a sulfatos e possui alta resistência a expansão devido a reação álcali agregado. É muito vantajoso em obras de concreto massa, como por exemplo, barragens, peças de grandes dimensões, pilares, obras em ambientes agressivos, concretos com agregados reativos, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos (ABCP, 2016). Pode conter escoria de alto forno variando de 35 % a 70 % de sua massa.

### **4) Cimento portland pozolânico – CP IV**

O cimento portland pozolânico (CP IV) é indicado para obras do dia a dia, é empregado na confecção de argamassas, concreto simples, armado e pró tendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. Apresenta resistência mecânica superior ao do concreto com cimento portland comum, em idades mais avançadas. Devido ao seu baixo calor de hidratação sua aplicação em grandes volumes de concretagem é favorável (ABCP, 2016). Possui pozolana em quantidade que varia de 15 % a 50 % de sua massa.

## **5) Cimento portland de alta resistência inicial – CP V**

O cimento portland CP V ARI é recomendado para usos onde há a necessidade altas resistências em pouco tempo. A rápida evolução da resistência desse cimento é obtida pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer e uma moagem mais fina. Possuem valores aproximados de resistência a compressão de 26 MPa a 1 dia de idade e de 53 Mpa aos 2 dias. É muito empregado em indústrias de médio e grande porte, como as fábricas de blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, postes, elementos pré moldados e pré fabricados (ABCP, 2016).

## **6) Cimento portland resistente a sulfatos – CP RS**

O cimento portland resistente a sulfatos (CP – RS) oferece resistência a meios agressivos em que há presença de sulfato, como redes de esgotos, água do mar e alguns tipos de solo (ABCP, 2016). Os cinco tipos básicos de cimento, CP I; CP II; CP III; CP IV; e CP V – ARI, podem ser resistentes a sulfatos desde que se enquadrem em pelo menos uma das seguintes condições dispostas na ABNT NBR 5737, que são:

- Teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) do clínquer e teor de adições carbonáticas de no máximo 8% e 5% em massa, respectivamente;
- Cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- Cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;
- Cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

## **7) Cimento portland com baixo calor de hidratação – CP BC**

O cimento de baixo calor de hidratação (BC) tem a capacidade de retardar o desprendimento de calor em peças onde há um grande volume de concreto, evitando o aparecimento de fissuras de origem térmica que ocorrem devido ao

calor gerado na hidratação do cimento. Ele é designado por siglas e classes do seu tipo, como por exemplo: CP III - 32 (BC) (ABCP, 2016).

## **8) Cimento portland branco – CP B**

O cimento portland branco (CPB) é diferenciado devido a sua coloração, ele se divide em estrutural e não estrutural. O estrutural é aplicado em estruturas que por fins arquitetônicos requisitam alguma coloração específica. Possui resistência similar aos demais tipos, 25, 32 e 40 MPa. O não estrutural tem aplicação, por exemplo, no rejuntamento de azulejos. A coloração branca é obtida por meio de matéria prima com baixos teores de oxido de ferro e manganês, e com condições especiais durante a fabricação, geralmente é utilizado o caulim no lugar da argila. O índice de brancura deve ser maior que 78%. Concretos dosados com esse tipo de aglomerante podem ter uma coloração diversa, já que há a possibilidade de adição de pigmentos coloridos, conforme a cor desejada (ABCP, 2016).

### **4.1.1.2 Agregados**

Segundo Albuquerque (2000, p. 63), “agregado é o material particulado, incoesivo de atividade química praticamente nula, constituído de mistura de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos.” Classificam-se segundo a origem, as dimensões das partículas e o peso específico aparente.

Quanto à origem classificam-se em naturais e artificiais. Os naturais são os que já se encontram em forma particulada na natureza, como o cascalho e a areia. Os industrializados são os que têm a composição particulada obtida por processos industriais, neste caso a matéria prima pode ser rocha, escoria de alto forno e argila (ALBUQUERQUE, 2000).

Em relação à dimensão das partículas, o agregado usado na tecnologia do concreto é dividido em miúdo; as areias, e graúdo; os cascalhos. Quanto ao peso específico aparente classificam-se em leves, médios e pesados (ALBUQUERQUE, 2000).

Os agregados utilizados no concreto são o gráudo e o miúdo, sendo o gráudo os de partículas maiores que 4,8 mm (peneira Nº 4) e os miúdos os que possuem partículas menores que 4,8mm e maiores que 75 um (peneira Nº 200).

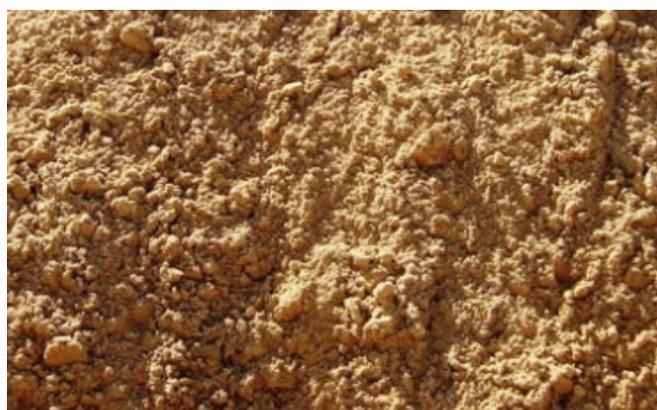
São utilizados como agregado gráudo o pedregulho, que é resultante da desintegração natural e abrasão da rocha ou processo mecânico, e a pedra britada que segundo Mehta (1994, p.09), é um “produto resultante da britagem industrial de rochas, seixos rolados ou pedras arredondadas gráudas”. Pode ser utilizado também como agregado gráudo a escória de alto forno que é um subproduto da indústria do aço que se solidifica sob condições atmosféricas, e que passa por uma operação de britagem (MEHTA, 1994). Como agregado miúdo é utilizado à areia, que é resultante da desintegração natural e da abrasão de rochas ou processamento de rochas arenosas friáveis (MEHTA, 1994).

**Figura 5 – Pedra britada Nº 01**



Fonte: Arquivo pessoal

**Figura 6 – Areia média**



Fonte: Arquivo pessoal

A resistência do agregado no concreto não é levada em conta, pois normalmente ele é mais resistente que a matriz e a zona de transição, porém existem outras características do agregado além da resistência que devem ser consideradas, tais como o tamanho, forma, textura da superfície, granulometria e mineralogia, que influem na resistência do concreto em vários níveis (MEHTA, 1994).

Nos concretos de elevada resistência, como os que se obtêm com cimentos de elevada resistência e adição de microsilica, a resistência dos grãos do agregado podem ser insuficiente, rompendo-se o concreto por fratura dos grãos (ALBUQUERQUE, 2000).

#### **4.1.1.3 Água**

Deve-se dar atenção para água de amassamento e cura, pois segundo Neville (1997,p.193), “impurezas contidas na água podem influenciar negativamente a resistência do concreto ou causar manchamento da sua superfície, ou também provocar corrosão da armadura.” A água de amassamento não deve conter materiais orgânicos indesejáveis, nem substâncias inorgânicas em teores excessivos.

Não existem normas muito específicas em relação à água de amassamento, sendo recomendado a utilização de água potável, segundo Mehta(1994, p. 54) “em geral a água de amassamento raramente é um fator na resistência do concreto porque nas especificações para a execução das misturas de concreto a qualidade da água é garantida pela exigência de potabilidade”.

#### **4.1.1.4 Aditivos e adições**

Cada vez mais cresce a utilização de aditivos e adições no concreto visando melhorar uma ou mais propriedades. As adições minerais são particularmente eficazes para aumentar a resistência a compressão e tração no concreto, enquanto que as químicas para modificar as características de pega e

endurecimento da pasta, influenciando na taxa de hidratação do cimento (MEHTA, 1994).

Se tratando de aditivos químicos Mehta (1994) cita que os aditivos redutores de água podem tornar plásticos concretos frescos, reduzindo a tensão superficial da água e podem melhorar a durabilidade do concreto exposto ao frio. Os aditivos redutores de água são os superplastificantes e os hiperplastificantes, que são modificadores superficiais de partículas. O princípio desses aditivos é atuar quimicamente na partícula do cimento formando um filme superficial com cargas elétricas idênticas que acabam fazendo com que haja repulsão entre as partículas e conseqüente fluidez ao concreto (MEHTA,1994). Com esses aditivos é possível o desenvolvimento de concreto fluido e concretos de alta resistência, já que há diminuição do consumo de água e assim diminuição da relação água/cimento.

As adições pozolânicas são segundo Rocha (2005), materiais com diâmetro médio de partículas semelhante ao do cimento ou até 20 vezes menor. O uso desse tipo de adição vêm crescendo cada vez mais.

Por razões ecológicas e econômicas, o uso de subprodutos pozolânicos e cimentícios como adições minerais no concreto está aumentando gradualmente. Quando utilizadas como uma adição parcial do cimento portland, as adições minerais normalmente reduzem a velocidade de desenvolvimento de resistência. A capacidade do aditivo mineral em reagir sob temperaturas normais com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento hidratada e formar mais silicato de cálcio hidratado pode levar a uma redução significativa da porosidade da matriz e da zona de transição. Conseqüentemente uma melhora considerável pode ser alcançada com a incorporação de aditivos minerais no concreto. (MEHTA, 1994,p.291)

Existem diversos tipos de adições minerais as mais usadas são as escórias de alto forno moídas, as cinzas volantes originadas das usinas termoelétricas, a sílica ativa, o metacaulim e ainda cinzas vulcânicas e alguns tipos de argilas encontradas diretamente no solo (ROCHA, 2005).

#### **4.1.2 Estrutura do concreto**

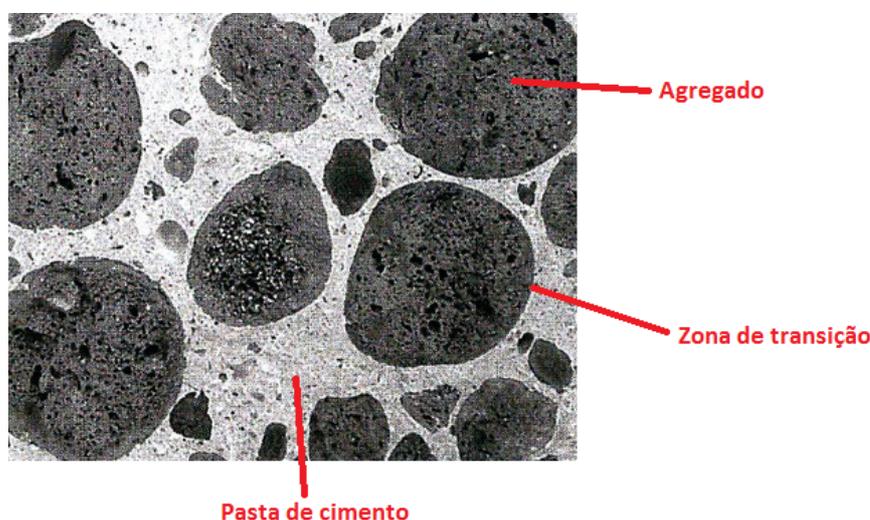
As propriedades de um material têm origem na sua estrutura interna, ou seja, as suas propriedades podem ser modificadas por mudanças em sua estrutura. A

estrutura de um sólido depende do tipo, quantidade, tamanho, forma e distribuição de suas fases.

Ao analisar a seção transversal de um corpo de prova de concreto, duas fases podem ser facilmente distintas que são as partículas de agregado de tamanho e formas variados, e o meio ligante, composto de uma massa contínua de pasta endurecida (MEHTA, 1994). Observando em nível microscópico é possível ver a complexidade que há entre a pasta de cimento e o agregado. A estrutura grosseira é chamada de macroestrutura, já a parte microscópica é chamada de microestrutura.

O concreto possui uma estrutura muito heterogênea e complexa, por isso não existem modelos exatos de previsão do comportamento desse material. São três constituintes que compõem a estrutura do concreto, são eles: o agregado, a pasta de cimento endurecida, e a zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado (MEHTA, 1994).

**Figura 7 – Estrutura do concreto**



Fonte: elaborado pelo autor a partir de imagem disponível em: <<http://docplayer.com.br/docs-images/23/2014119/images/4-0.png>>.

#### **4.1.2.1 Estrutura da fase agregado**

As características do agregado grão que afetam as propriedades do concreto são a forma, textura e a porosidade. Geralmente o seixo natural tem uma

forma arredondada e uma superfície de textura lisa, as rochas britadas tem uma textura rugosa e dependendo da rocha ou do tipo de britador o agregado pode ter uma forma chata e/ou arredondada.

O agregado é geralmente mais resistente que as outras duas fases do concreto, não exercendo influência direta sobre a sua resistência, exceto no caso de serem altamente porosos. De forma indireta o formato e o tamanho do agregado podem afetar a resistência do concreto. Quanto maior o tamanho do agregado e mais elevada a proporção de partículas chatas e alongadas, maior será a tendência do filme de água se acumular próximo a superfície do agregado, enfraquecendo a zona de transição pasta – agregado (MEHTA, 1994).

Agregados grandes tendem a formar zonas de transição mais frágeis formando microfissuras, concretos dosados com eles requerem menos água de amassamento do que aqueles com agregados menores, esses dois fatores devem ser levados em conta, pois interferem diretamente na resistência do concreto. Quanto à textura, o concreto tem maior resistência quando utilizado agregados rugosos ou britados, pois há aumento da aderência entre pasta e agregado na zona de transição.

#### **4.1.2.2 Estrutura da pasta endurecida**

As características desejáveis para um concreto como resistência, estabilidade dimensional e durabilidade são influenciadas não somente pela proporção, mas também pelas propriedades da pasta que dependem de aspectos microestruturais. A fonte principal de resistência nos produtos sólidos da pasta é função das forças de atração que dependem da área específica e dos tipos de cristais formados na hidratação do cimento (MEHTA, 1994).

Quando o cimento é disperso em água o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio tendem a entrar em solução, e como resultado dessas combinações após alguns minutos de hidratação do cimento portland aparecem os primeiros cristais aciculares de um sulfoaluminato de cálcio hidratado chamado estringita, e algumas horas mais tarde cristais prismáticos grandes de hidróxido de cálcio e pequenos cristais de silicato de cálcio hidratado (MEHTA, 1994).

A fase silicato de cálcio hidratado constitui de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento portland completamente hidratado e, é a mais importante na determinação das propriedades da pasta. Os cristais de hidróxido de cálcio constituem de 20% a 25 % do volume de sólidos na pasta hidratada, sua presença em quantidade considerável no cimento portland hidratado tem efeitos desfavoráveis sobre a resistência química a soluções ácidas (MEHTA, 1994).

#### **4.1.2.3 Zona de transição**

A estrutura e as propriedades da zona de transição são responsáveis pelo comportamento do concreto, pois é devido a ela que o concreto é frágil sobre tração e dúctil sobre compressão; que os constituintes do concreto quando ensaiados separadamente a compressão uniaxial permanecem elásticos até a ruptura, enquanto o concreto mostra comportamento elasto-plástico; que para um dado teor de cimento, uma relação água/cimento e idade de hidratação, a argamassa de cimento será sempre mais resistente que o concreto correspondente; que a resistência do concreto diminui com o tamanho do agregado grúdo; que a permeabilidade do concreto será maior por uma ordem de magnitude do que a permeabilidade da pasta de cimento correspondente (MEHTA, 1994).

A presença de microfissuras é um fator responsável pela baixa resistência do concreto na zona de transição. A quantidade de microfissuras depende de diversos parâmetros como o tamanho do agregado, distribuição granulométrica, teor de cimento, relação água/cimento, grau de adensamento do concreto fresco, condições de cura, umidade ambiente e história térmica do concreto (NEVILLE, 1997).

A zona de transição, geralmente o elo mais fraco da corrente, é considerada a fase de resistência limite do concreto. É devido à presença da zona de transição que o concreto se rompe a um nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência dos dois constituintes principais. (MEHTA, 1994, p.40).

Há pouca informação sobre a zona de transição no concreto devido a dificuldades experimentais, o que se sabe por observação, é que a

microfissuração se inicia na interface entre o agregado graúdo e a pasta que o envolve, e que a ruptura padrão inclui essa interface (NEVILLE, 1997). A microestrutura da pasta de cimento hidratado ao redor do agregado é diferente da microestrutura do restante da pasta.

A superfície do agregado é coberta com uma camada de  $\text{Ca(OH)}_2$  cristalino orientado, com cerca de 0,5  $\mu\text{m}$  de espessura, depois da qual vem uma camada de C-S-H com espessura aproximadamente igual. Esse conjunto é mencionado como uma película duplex. Distanciando-se mais do agregado, encontra-se a zona de interface principal com cerca de 50  $\mu\text{m}$  de espessura, contendo produtos de hidratação do cimento com cristais maiores de  $\text{Ca(OH)}_2$  mas sem nenhum cimento não hidratado.(NEVILLE, 1997, p.307).

Os cristais grandes de hidróxido de cálcio na zona de transição possuem menor capacidade de adesão por possuírem área específica e força de atração menor e também por servirem como ponto de clivagem devido a sua estrutura orientada (MEHTA, 1994). A resistência da interface entre a pasta e agregado pode aumentar com o tempo em função da reação do hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  com pozolanas ( NEVILLE,1997).

#### **4.2 Metacaulim de Alta Reatividade**

É considerada uma adição mineral de alta eficácia para concretos, que tem como objetivo melhorar a resistência mecânica e a durabilidade. As suas propriedades físicas e químicas, bem como a quantidade que é utilizado em substituição do cimento em concretos, e também o tipo de cimento utilizado, influenciam nas características do concreto obtido. Seu princípio básico de ação no concreto é a reação com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento portland, e o fechamento dos poros devido ao reduzido tamanho de suas partículas.

O uso do metacaulim não é exclusivo no concreto, este possui aplicações na fabricação de materiais refratários, papel e celulose, cerâmicas e louças, entre outros, sendo que em cada tipo de aplicação há diferentes exigências físicas e químicas (ROCHA, 2005). Na aplicação com o cimento portland ele deve possuir uma boa reatividade, por isso é chamado de metacaulim de alta reatividade (MCAR). Vale ressaltar que neste trabalho o metacaulim de alta reatividade

também será simplesmente mencionado como metacaulim, já que o estudo se dirige apenas na sua utilização juntamente com o cimento portland na obtenção de concretos.

**Figura 8 - Metacaulim**



Fonte: Rocha, 2005

Segundo Rocha (2005) as primeiras aplicações de metacaulim em concreto a base de cimento portland só se deram mais recentemente, nos Estados Unidos, Europa e Brasil. No Brasil há destaque para a aplicação em obras civis como as usinas hidrelétricas de Irapé e Capim Branco I e II, ambas em Minas Gerais, o metacaulim foi utilizado para aumentar a resistência química e mecânica do concreto.

**Figura 9 – Usina hidrelétrica de Irapé**



Fonte: Rocha, 2005

**Figura 10 – Usina hidrelétrica de Capim Branco I**



Fonte: Rocha, 2005

**Figura 11: Usina hidrelétrica de Capim branco II**



Fonte: Rocha, 2005

O metacaulim tem sido muito usado para a obtenção de concretos de alto desempenho (CAD), visto que só a diminuição da relação água/ cimento pra esses concretos às vezes é insuficiente, necessitando assim de uma adição que propicie resistência mecânica e aumento da durabilidade (ROCHA, 2005).

O metacaulim é uma pozolana artificial desenvolvida especificamente para atuar como adição mineral substituta parcial do cimento portland. Trata-se de um

material de alta pureza proveniente da calcinação de argilas cauliniticas a temperaturas entre 600° e 900°C.

O metacaulim é constituído basicamente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na fase amorfa, capaz de reagir com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  gerado durante a hidratação do cimento portland, formando produtos hidratados similares aos decorrentes da hidratação direta do clínquer portland. (MEDINA, 2011, p. 2).

A reatividade do metacaulim é influenciada diretamente pela sua finura, ou seja, sua superfície especifica. Assim quanto maior for sua superfície especifica maior será o teor de hidróxido de cálcio consumido na reação e maior será a reatividade e em conseqüência qualidade do concreto. O metacaulim vem sendo estudado e adotado em muitos países, no Brasil há uma norma que entrou em vigor em novembro de 2010, que versa suas propriedades para usos com cimento portland, a ABNT NBR 15894, partes 1, 2 e 3.

#### **4.2.1 Processo de fabricação**

Produto derivado da calcinação de argilas caulinitcas cuidadosamente selecionadas, a temperaturas de 600° a 900°C, onde a perda dos íons de hidroxila da sua estrutura cristalina a altas temperaturas transforma-se em metacaulinita ( $\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ).

##### **4.2.1.1 Matéria prima**

A matéria para a produção do metacaulim é o caulim de alta reatividade com baixo teor de impurezas, obtido pela calcinação de argilas, cujos teores de caulim situam-se acima de 50%. Segundo Souza (2003), argilas com maiores teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  resultam em um metacaulim com maior atividade pozolânica.

As argilas caulinitas apresentam elevados teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e ao sofrerem tratamento térmico ativam seus componentes originando o caulim. Este tipo de argila é a mais apropriada para a obtenção do metacaulim de alta reatividade não só pela sua composição química, mas também pela sua estrutura cristalina que é

destruída com mais facilidade no tratamento térmico, essencial no desenvolvimento da atividade pozolânica (SOUZA, 2003).

**Figura 12 – Argila Caulinita**



Fonte: disponível em: <<https://www.dreamstime.com/stock-photo-two-pieces-kaolinite-kaolin-china-clay-stone-macro-shooting-specimen-natural-rock-mineral-isolated-white-background-image65140602>>. Acesso em 31 out. 2016.

#### **4.2.1.2 Industrialização**

É importante que o metacaulim seja industrializado em larga escala, para viabilizar seu uso como adição nas obras em geral, mantendo o nível de qualidade e homogeneidade sempre altos e dentro dos parâmetros estipulados por norma ou especificação técnica do usuário (ROCHA, 2005).

O processo de industrialização do metacaulim é semelhante ao do cimento portland, pois nesse processo também há o beneficiamento e preparo da matéria prima, calcinação, moagem e estocagem do produto final (ROCHA, 2005).

Em resumo as etapas para a produção do metacaulim são as seguintes:

- Prospecção de argila caulinítica
- Beneficiamento e eliminação de impurezas
- Secagem
- Calcinação
- Moagem e micronização

As etapas de calcinação e micronização são muito importantes para o desempenho do metacaulim. A calcinação deve ser bem criteriosa caso contrario

pode levar a perda de reatividade do metacaulim, e é na micronização que se reduz o tamanho das partículas de modo a garantir o nível de reatividade com o cimento portland (ROCHA, 2005).

#### **4.2.2 Características físicas e químicas**

As características químicas do metacaulim estão ligadas a dois pontos principais: composição química e estrutura interna, que se relacionam diretamente com a argila utilizada na sua produção. Segundo Souza (2003), a composição química tem uma grande influência na definição do nível ótimo de substituição do cimento portland por metacaulim.

Quanto às características físicas os principais fatores são o tamanho da partícula e a superfície específica, pois estes garantem a alta reatividade pozolânica (SOUZA, 2003). Durante o processo de industrialização do metacaulim na etapa de calcinação tem-se a aglomeração de partículas que fazem com que haja aumento da granulometria, sendo necessária a realização da moagem até atingir os valores aceitáveis que constam em normas. O maior custo de produção do metacaulim está no processo de moagem visto a necessidade de obtenção de uma menor granulometria (SOUZA, 2003).

Segundo Wild et al. citado por Souza (2003) a finura do metacaulim tem grande influência nos ganhos obtidos nas primeiras idades, tal como a resistência a compressão, e pouca influência nas resistências em idades superiores a 90 dias.

O aumento da superfície específica do metacaulim aumenta a sua reatividade, isso foi verificado por Ambroise et al. citado por Souza (2003) que utilizou argamassas de cimento portland com teores de substituição de 10% a 20% em massa de cimento, por MCAR com superfície específica de 20000 m<sup>2</sup>/Kg. E por Malhotra citado por Souza (2003) que utilizou MCAR com superfície específica de 16800 m<sup>2</sup>/Kg.

A ABNT NBR 15894 - metacaulim para usos com cimento portland em concreto, argamassa e pasta, é a norma que fixa valores para a aceitação do produto. Ela é dividida em três partes: Parte 1 – Requisitos; Parte 2 –

Determinação do índice de desempenho com cimento aos 7 dias; Parte 3 -  
Determinação da finura por meio da peneira 45 um.

**Figura 13 – Requisitos químicos e físicos do metacaulim segundo NBR 15894**

Componente	Unidade	Limite	Método de ensaio
SiO <sub>2</sub>	%	≥ 44,0 e ≤ 65,0	ABNT NBR NM 22 ou ABNT NBR 14656
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	≥ 32,0 e ≤ 46,0	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14656
CaO + MgO	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14656
SO <sub>3</sub>	%	≤ 1,0	ABNT NBR NM 16
Na <sub>2</sub> O	%	≤ 0,5	ABNT NBR NM 17
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 17
Umidade	%	≤ 2,0	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	%	≤ 4,0	ABNT NBR NM 18
Resíduo na peneira com abertura de malha de 45 µm	%	≤ 10,0	ABNT NBR 15894-3
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias	%	≥ 105	ABNT NBR 15894-2
Índice de atividade pozolânica Chapelle (opcional)	mgCa(OH) <sub>2</sub> /gmaterial	≥ 750	ABNT NBR 15895
Área específica B.E.T. (opcional)	m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>	≥ 15	ASTM C-1069

A análise química, incluindo a perda ao fogo, deve ser realizada na base seca, ou seja, após determinação do teor de umidade a (105 ± 5) °C.

A critério do consumidor, podem ser solicitados os ensaios de atividade pozolânica pelo método preconizado pela ABNT NBR 15895 (método de Chapelle) e ensaio para determinação da área específica pelo método ASTM C-1069, de acordo com o princípio proposto por Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T.), que devem, quando solicitados, atender aos valores mínimos apresentados na Tabela 1.

NOTA Equivalente alcalino em Na<sub>2</sub>O → Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> = 0,658 %K<sub>2</sub>O + %Na<sub>2</sub>O.

Fonte: ABNT NBR 15894

### 4.2.3 Adição de Metacaulim de Alta Reatividade em Concretos a base de Cimento Portland

O desempenho de concretos produzidos com a adição de metacaulim depende do percentual adicionado e do tipo de cimento utilizado, assim cada tipo de concreto tem um percentual ótimo de adição. Segundo Rocha (2005, p. 33), “em geral a dosagem típica em concretos varia de 4% a 12% sobre a quantidade total de cimento, podendo chegar até 25% em casos especiais.” Sua adição diminui a porosidade e aumenta a compacidade, propiciando ganhos de resistência a fadiga, impacto e vibrações. Em resumo sua adição propicia melhoras na resistência mecânica e durabilidade, sendo requisitado em obras de grande porte.

O mercado tem demandado cada vez mais por concretos com resistências superiores a 40 MPa, com baixa permeabilidade a todo tipo de fluido e gases, muito duráveis e com boa relação custo x benefício. (ROCHA, 2005, p. 4).

Para atingir elevadas resistências a relação água/cimento deve diminuir, em consequência há aumento do consumo de cimento e também dos impactos ambientais de sua produção. O uso de metacaulim ajuda a reduzir a quantidade de cimento e traz vantagens as estruturas e peças fabricadas com esse material. Por fazer parte da matriz água cimento durante o processo de reação de endurecimento da pasta ele reduz a quantidade de cimento necessário nas misturas sem deixar de atender as especificações de desempenho do produto final, tanto em termos de resistência mecânica quanto de durabilidade, e ainda melhora a interface entre a pasta de cimento e os agregados de modo significativo, reduzindo as porosidades decorrentes do processo de endurecimento (ROCHA, 2005).

Um estudo da influência da adição de MCAR como substituto parcial do cimento portland no concreto, foi realizado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP), sob coordenação do Eng. Charles Lacerda (teor de 8% de adição) e Eng. M.Sc. Marcelo Medeiros (teor de 10 % de adição), e tendo como coordenação geral do projeto o professor Dr. Paulo Helene.

Os agregados utilizados nesse estudo foram à areia com módulo de finura de 1,21 e densidade de massa específica de 2650 Kg/m<sup>3</sup>, e a brita 01 granítica, com modulo de finura de 6,91 e densidade de massa específica 2660 Kg/m<sup>3</sup>. O cimento utilizado foi o CPV ARI PLUS RS. Para os traços em que houve substituição parcial de 8% do cimento por MCAR foi utilizado 1% de aditivo polifuncional, já para os traços com substituição de 10% foi utilizado 0,65% de aditivo superplastificante. Na figura 14 e 15 apresentam - se os traços que foram utilizados nesse estudo.

**Figura 14 – Traços para substituição de 8 % de cimento por metacaulim**

traço	nome	Substituição	cimento : adição : areia : brita ; a/c	$\gamma_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	ar apris. (%)	C (Agl.) (kg/m <sup>3</sup> )
1 : 3	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 0,96 : 2,04 ; 0,31	2,412	1,7	560
	M	<b>MetacaulimHP (8%)</b>	<b>0,92 : 0,08 : 0,96 : 2,04 ; 0,34</b>	<b>2,391</b>	<b>1,2</b>	<b>550</b>
1 : 4	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 1,45 : 2,55 ; 0,42	2,382	2,0	439
	M	<b>MetacaulimHP (8%)</b>	<b>0,92 : 0,08 : 1,45 : 2,55 ; 0,46</b>	<b>2,361</b>	<b>1,3</b>	<b>432</b>
1 : 5	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 1,94 : 3,06 ; 0,52	2,369	1,9	363
	M	<b>MetacaulimHP (8%)</b>	<b>0,92 : 0,08 : 1,94 : 3,06 ; 0,58</b>	<b>2,341</b>	<b>1,9</b>	<b>356</b>

- ( $\gamma_c$ ) = densidade no estado fresco
- Foi utilizado 1,0 % do aditivo polifuncional 395N da MBT em todos os concretos estudados com 8% de adição

Fonte: Poli/USP, 2003

**Figura 15 – Traços para substituição de 10 % de cimento por metacaulim**

traço	nome	substituição	cimento : adição : areia : brita ; a/c	$\gamma_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	ar apris. (%)	C (Agl.) (kg/m <sup>3</sup> )
1 : 2,8	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 0,82 : 1,98 ; 0,24	2,424	1,5	600
	M	<b>MetacaulimHP (10%)</b>	<b>0,90 : 0,10 : 0,75 : 2,05 ; 0,26</b>	<b>2,361</b>	<b>1,2</b>	<b>582</b>
1 : 3,6	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 1,21 : 2,39 ; 0,28	2,475	1,9	507
	M	<b>MetacaulimHP (10%)</b>	<b>0,90 : 0,10 : 1,12 : 2,48 ; 0,29</b>	<b>2,409</b>	<b>1,4</b>	<b>492</b>
1 : 4,4	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 1,59 : 2,81 ; 0,32	2,470	2,4	432
	M	<b>MetacaulimHP (10%)</b>	<b>0,90 : 0,10 : 1,48 : 2,92 ; 0,33</b>	<b>2,359</b>	<b>2,2</b>	<b>411</b>

- ( $\gamma_c$ ) = densidade no estado fresco
- Foi utilizado 0,65 % do aditivo superplastificante Glenium 54 da MBT em todos os concretos estudados com 10% de adição

Fonte: Poli/USP, 2003

Para fins de organização do presente trabalho de conclusão de curso, ressalto que as figuras de tabelas de dados apresentadas nos itens 4.2.3.1; 4.2.3.2; 4.2.3.3; 4.2.3.6; 4.2.3.7, se referem ao estudo realizado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

#### **4.2.3.1 Resistência Mecânica**

A resistência mecânica é o principal parâmetro de qualidade dos concretos, pois estruturas de diversos tipos, tais como lajes, vigas e pilares, por exemplo, precisam alcançar determinadas resistências, que vão desde as de compressão que é a mais requisitada e mais comum até as de cisalhamento, tração e flexão.

No que tange as estruturas de concreto a resistência mecânica mais importante é a de compressão, visto que a partir dela de forma indireta é possível determinar outros parâmetros do concreto, como a sua resistência a tração e módulo de elasticidade. Ela é obtida diretamente pela compressão de corpos de prova moldados com dimensões padronizadas segundo normas técnicas.

O estudo visando identificar a sua influência da adição de metacaulim na resistência a compressão ainda se encontra num estágio bem inferior quando comparado com os estudos envolvendo outras pozolanas com alta reatividade, como a sílica ativa e a casca de arroz.

Quanto ao acréscimo da resistência a compressão de concretos dosados com metacaulim esta “pode chegar até 50 % em condições específicas, situando-se em média a 25 % de aumento, quando utilizado como adição suplementar ao cimento portland” (ROCHA, 2005, p.40). Ainda segundo Rocha (2005) a resistência ao cisalhamento, tração ou flexão do concreto são menos influenciadas, obtendo-se aumentos médios de 15 %. Embora a resistência a tração não seja considerada diretamente no calculo estrutural, ela é muito importante para evitar/restringir o surgimento de fissuras.

Wild e Khatib citado por Souza (2003) verificaram que a resistência de argamassas e pastas obtiveram os melhores valores no décimo quarto dia, com melhoras na ordem de 40%. Sabir et al. citado por Souza, (2003) estudando misturas com 10% e 30% de MCAR, também constataram uma maior eficiência no

décimo quarto dia, sendo que após isso houve um declínio dessa eficiência. Wild et al. citado por Souza (2003) realizando a substituição parcial de cimento portland por MCAR (superfície específica 12000 m<sup>2</sup>/Kg) em teores de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, na produção do concreto, constatou que até o décimo quarto dia há melhora na resistência a compressão do concreto.

No trabalho de Curcio et al. citado por Souza (2003) utilizando argamassas com teor de substituição de 15 % verificou-se que as melhoras na resistência a compressão se estenderam até o vigésimo oitavo dia. Kostuch et al. citado por Souza (2003) também constataram melhoras após o vigésimo oitavo dia, porem após um ano os resultados para os traços com substituição de 10% e 15% de MCAR tiveram resultados semelhantes ao concreto de referencia.

No estudo desenvolvido pela Poli/USP os dados referentes as resistências mecânicas como a de compressão e tração são os das figuras 16, 17 e 18, respectivamente.

**Figura 16 – Resistência a compressão relativa a 1, 7, 28, 63, 91 e 182 dias de cura úmida para slump de 80 mm.**

traço	1 dia (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	63 dias (MPa)	91 dias (MPa)	182 dias (MPa)
8% de substituição de cimento por adição						
<b>1 : 3,0 R</b>	34,0	47,6	60,0	61,7	61,9	66,6
<b>1 : 3,0 M</b>	<b>27,6</b>	<b>58,0</b>	<b>68,8</b>	<b>72,1</b>	<b>76,4</b>	<b>83,2</b>
<b>1 : 4,0 R</b>	32,3	40,3	49,9	50,7	51,9	55,6
<b>1 : 4,0 M</b>	<b>20,2</b>	<b>50,5</b>	<b>56,7</b>	<b>59,6</b>	<b>62,2</b>	<b>70,0</b>
<b>1 : 5,0 R</b>	24,9	35,4	40,3	41,9	45,6	48,2
<b>1 : 5,0 M</b>	<b>20,1</b>	<b>38,2</b>	<b>42,8</b>	<b>57,4</b>	<b>60,3</b>	<b>66,5</b>
10% de substituição de cimento por adição						
<b>1 : 2,8 R</b>	42,1	65,4	85,2	87,5	88,9	92,6
<b>1 : 2,8 M</b>	<b>39,7</b>	<b>75,3</b>	<b>96,2</b>	<b>102,0</b>	<b>104,5</b>	<b>110,4</b>
<b>1 : 3,6 R</b>	38,5	59,0	71,5	73,2	74,8	79,5
<b>1 : 3,6 M</b>	<b>38,0</b>	<b>65,6</b>	<b>79,2</b>	<b>84,6</b>	<b>87,8</b>	<b>97,1</b>
<b>1 : 4,4 R</b>	31,5	54,4	62,5	64,8	65,8	69,8
<b>1 : 4,4 M</b>	<b>30,6</b>	<b>60,4</b>	<b>72,8</b>	<b>77,7</b>	<b>81,8</b>	<b>92,6</b>

Fonte: Poli/USP, 2003

**Figura 17 – Resistência a tração por compressão diametral relativa a 7 e 28 dias de cura úmida para slump de 80 mm.**

traço	$f_{ctk.min}$	7 dias (MPa)	$f_{ctk.max}$	$f_{ctk.min}$	28 dias (MPa)	$f_{ctk.max}$
8% de substituição de cimento por adição						
1 : 3,0 R	2,3	3,9	4,6	2,8	4,4	5,5
1 : 3,0 M	2,7	4,1	5,3	3,1	4,7	6,1
1 : 4,0 R	2,0	3,8	4,0	2,4	4,1	4,7
1 : 4,0 M	2,5	4,1	4,8	2,7	4,2	5,2
1 : 5,0 R	1,8	3,2	3,5	2,0	3,9	4,0
1 : 5,0 M	1,9	3,8	3,8	2,1	4,0	4,2
10% de substituição de cimento por adição						
1 : 2,8 R	2,6	5,8	5,1	3,7	6,4	7,2
1 : 2,8 M	2,8	6,0	5,5	4,0	6,6	7,8
1 : 3,6 R	2,5	5,1	4,9	3,2	5,9	6,3
1 : 3,6 M	2,7	5,1	5,3	3,5	6,1	6,8
1 : 4,4 R	2,4	4,4	4,6	2,9	5,7	5,7
1 : 4,4 M	2,5	4,5	4,8	3,3	5,7	6,4

\* Para a estimativa de  $f_{ctk}$  empregou-se  $f_{ck}=f_c-1,65x5,5$

Fonte: Poli/USP, 2003

**Figura 18 – Resistência a tração por compressão diametral relativa a 63, 91 e 182 dias de cura úmida para slump de 80 mm.**

traço	$f_{ctk.min}$	63 dias (MPa)	$f_{ctk.max}$	$f_{ctk.min}$	91 dias (MPa)	$f_{ctk.max}$	$f_{ctk.min}$	182 dias (MPa)	$f_{ctk.max}$
8% de substituição de cimento por adição									
1 : 3,0 R	2,9	4,4	5,6	2,9	4,5	5,6	3,1	4,7	5,9
1 : 3,0 M	3,2	4,9	6,3	3,5	5,5	6,8	3,6	5,7	7,0
1 : 4,0 R	2,5	4,1	4,8	2,5	4,3	4,9	2,7	4,5	5,2
1 : 4,0 M	2,8	4,3	5,5	2,9	4,7	5,6	3,2	4,8	6,2
1 : 5,0 R	2,1	3,9	4,1	2,3	4,1	4,4	2,4	4,3	4,6
1 : 5,0 M	2,7	4,1	5,3	2,8	4,5	5,5	3,0	4,6	5,9
10% de substituição de cimento por adição									
1 : 2,8 R	3,8	6,4	7,3	3,8	6,4	7,4	3,9	6,8	7,6
1 : 2,8 M	4,2	6,6	8,2	4,3	6,7	8,3	4,5	7,1	8,7
1 : 3,6 R	3,3	6,0	6,4	3,3	6,3	6,5	3,5	6,7	6,8
1 : 3,6 M	3,7	6,2	7,1	3,8	6,5	7,3	4,1	6,8	7,9
1 : 4,4 R	3,0	5,6	5,8	3,0	5,7	5,9	3,2	5,9	6,2
1 : 4,4 M	3,4	5,8	6,7	3,6	5,9	6,9	3,9	6,1	7,6

\* Para a estimativa de  $f_{ctk}$  empregou-se  $f_{ck}=f_c-1,65x5,5$

Fonte: Poli/USP, 2003

Os concretos de referência apresentam resistência à tração menor que os com a substituição parcial de cimento por metacaulim. Segundo Mehta(1994), isso ocorre devido as adições pozolanicas promoverem reações químicas que reduzem

o tamanho e a concentração de cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição, que é um dos principais pontos frágeis do concreto submetido ao esforço de tração.

A resistência a tração e a de compressão aumentam como tempo devido as reações químicas de hidratação do cimento, que ao reagir vai liberando hidróxido de cálcio, que é absorvido pelo metacaulim formando um novo composto aglomerante que aumenta as ligações internas do concreto (Poli/USP, 2003).

#### 4.2.3.2 Módulo de elasticidade

Todas as peças estruturais de concreto e também outros materiais se deformam quando submetidas a esforços externos, quando comprimidas sofrem encurtamento e quando tracionadas alongamento. A deformação é tanto maior quanto menor for o módulo de elasticidade do material em questão.

A adição suplementar de metacaulim em concretos dosados com cimento portland pode ajudar no aumento do módulo de elasticidade, de acordo com algumas pesquisas realizadas observa-se que esse aumento pode chegar a no máximo 15 %, ou seja, não sofre um aumento tão significativo quanto a resistência a compressão (ROCHA, 2005).

Os resultados obtidos quanto ao módulo de elasticidade no estudo desenvolvidos pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo encontram-se resumidos nas tabelas 1 e 2.

**Quadro 1 – Módulo de elasticidade tangente inicial relativo à 7 e 28 dias de cura úmida, para slump de 80 mm**

Traço	7 Dias (Gpa)	28 Dias (Gpa)	Traço	7 Dias (Gpa)	28 Dias (Gpa)
8% de substituição			10% de substituição		
1:3,0 R	37,6	40,8	1:2,8 R	56,5	58,0
1:3,0 M	39,4	43,0	1:2,8 M	56,7	58,7
1:4,0 R	33,1	35,7	1:3,6 R	44,3	50,8
1:4,0 M	34,5	37,6	1:3,6 M	45,3	54,8
1:5,0 R	27,9	29,8	1:4,4 R	42,6	48,5
1:5,0 M	29,7	32,4	1:4,4 M	43,4	51,1

Fonte: elaborado pelo autor a partir de Poli/USP (2003)

**Quadro 2 – Módulo de elasticidade tangente inicial relativo à 91 e 182 dias de cura úmida, para slump de 80 mm**

Traço	91 Dias (Gpa)	182 Dias (Gpa)	Traço	91 Dias (Gpa)	182 Dias (Gpa)
8% de substituição			10% de substituição		
1:3,0 R	41,7	43,1	1:2,8 R	63,3	65,3
1:3,0 M	44,8	46,7	1:2,8 M	67,0	70,1
1:4,0 R	38,6	40,2	1:3,6 R	56,2	58,8
1:4,0 M	39,6	41,9	1:3,6 M	58,7	63,2
1:5,0 R	30,8	32,1	1:4,4 R	52,3	55,2
1:5,0 M	33,5	34,8	1:4,4 M	55,6	57,8

Fonte: elaborado pelo autor a partir de Poli/USP (2003)

#### 4.2.3.3 Retração por secagem

As retrações em peças de concreto em baixos níveis não influenciam significativamente na resistência mecânica, porém em níveis mais elevados gera fissuração excessiva, sendo porta de entrada para agentes agressivos que provocam oxidação das armaduras. A adição de metacaulim em substituição parcial do cimento na elaboração de concretos pode diminuir as retrações durante o processo de endurecimento.

A avaliação da retração por secagem em concretos com a substituição parcial de cimento portland por metacaulim realizada pela Poli/USP, usou um percentual de substituição de 10%. O ensaio foi realizado conforme a ASTM C157, os resultados são os da figura 19.

**Figura 19 – Retração por secagem dos concretos com substituição de 10 % após cura úmida de 28 dias**

Traço	Retração (‰)							
	Tempo a partir da moldagem (dias)							
	3	7	14	28	56	63	91	182
1 : 2,8 R	0,03	0,09	0,12	0,13	0,16	0,20	0,24	0,26
<b>1 : 2,8 M</b>	<b>0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>0,05</b>	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	<b>0,12</b>	<b>0,15</b>	<b>0,16</b>
1 : 3,6 R	0,06	0,12	0,19	0,21	0,22	0,25	0,35	0,38
<b>1 : 3,6 M</b>	<b>0,03</b>	<b>0,09</b>	<b>0,15</b>	<b>0,17</b>	<b>0,18</b>	<b>0,19</b>	<b>0,23</b>	<b>0,25</b>
1 : 4,4 R	0,19	0,38	0,47	0,54	0,60	0,61	0,64	0,65
<b>1 : 4,4 M</b>	<b>0,07</b>	<b>0,14</b>	<b>0,27</b>	<b>0,30</b>	<b>0,34</b>	<b>0,34</b>	<b>0,35</b>	<b>0,37</b>

Fonte: Poli/USP, 2003

#### **4.2.3.4 Calor de hidratação**

Quando o concreto inicia suas reações de hidratação há geração de calor que depende de diversos fatores, como o cimento utilizado, quantidade utilizada na mistura, temperatura externa entre outros. A geração excessiva de calor provoca expansão volumétrica e conseqüentemente a fissuração superficial das peças concretadas, principalmente em estruturas de grande volume. A diminuição do calor de hidratação é possível com a adição de metacaulim.

Metacaulim tem sido utilizado no sentido de minimizar e controlar a liberação de calor nas reações de endurecimento do concreto, em substituição parcial do cimento portland, com um percentual que varia de 10 a 20 %. (SOUZA, 2003, p. 49).

Porém existe estudos que demonstram que o metacaulim pode aumentar o calor de hidratação liberado, principalmente nas primeiras horas. Em geral os concretos que apresentam esse tipo de comportamento possuem elevado consumo de aglomerantes (cimento e metacaulim), baixo consumo de água e altas resistências mecânicas (SOUZA, 2003).

#### **4.2.3.5 Resistência a abrasão**

Com a adição de metacaulim ao cimento portland há o aumento da resistência a abrasão, devido a diminuição da porosidade e do índice de vazios, sendo assim uma ótima opção para a aplicação em locais que necessitam de resistência desse tipo, tais como os citados por Souza (2003), que são: pisos industriais, vertedouros de barragens e canais hidráulicos, tubos para obras de saneamento e esgotos e dormentes de ferrovias.

#### **4.2.3.6 Porosidade e absorção de água**

A análise da durabilidade de concretos se passa pelo controle da água, pois ela é responsável por muitos processos físicos e químicos de desagregação, e também pelo controle da porosidade que é uma via de entrada para agentes agressivos (Poli/USP, 2003).

A durabilidade do concreto esta ligada diretamente a porosidade e a capacidade do concreto de absorver líquido e gases. O metacaulim diminui a porosidade, segundo Poli/USP (2003), para um mesmo consumo de cimento a migração de cloretos é muito inferior para concretos com adição de metacaulim, indicando que sua adição propicia ganhos de resistência a cloretos, sendo indicado seu uso em ambientes sujeitos a esse tipo de agressividade.

Poli/USP (2003) realizou a determinação da absorção de água por imersão e do índice de vazios em concretos a 28, 63 e 91 dias de idade, segundo o procedimento de ensaio do método ASTM C642.

**Figura 20 – Absorção de água e índice de vazios a 28, 63 e 91 dias de cura úmida, para concretos com slump de 80 mm**

Traço	28 dias			63 dias			91 dias		
	absorção de água (%)	índice de vazios (%)	classificação do concreto	absorção de água (%)	índice de vazios (%)	classificação do concreto	absorção de água (%)	índice de vazios (%)	classificação do concreto
8% de substituição de cimento por adição									
1 : 3,0 R	5,1	12,5	normal	4,5	11,8	normal	4,3	11,6	normal
1 : 3,0 M	<b>4,0</b>	<b>9,6</b>	<b>durável</b>	<b>3,9</b>	<b>9,0</b>	<b>durável</b>	<b>3,1</b>	<b>8,3</b>	<b>durável</b>
1 : 4,0 R	5,7	13,7	normal	5,2	12,0	normal	4,7	12,4	normal
1 : 4,0 M	<b>4,4</b>	<b>10,5</b>	<b>durável</b>	<b>4,0</b>	<b>10,5</b>	<b>durável</b>	<b>3,3</b>	<b>9,0</b>	<b>durável</b>
1 : 5,0 R	6,1	14,5	deficiente	5,9	13,6	deficiente	5,2	13,4	deficiente
1 : 5,0 M	<b>5,2</b>	<b>12,2</b>	<b>normal</b>	<b>4,7</b>	<b>12,0</b>	<b>normal</b>	<b>4,2</b>	<b>9,9</b>	<b>durável</b>
10% de substituição de cimento por adição									
1 : 2,8 R	2,40	5,1	Durável	2,0	4,8	Durável	1,8	4,4	Durável
1 : 2,8 M	<b>1,44</b>	<b>3,6</b>	<b>Durável</b>	<b>1,4</b>	<b>3,4</b>	<b>Durável</b>	<b>1,3</b>	<b>3,1</b>	<b>Durável</b>
1 : 3,6 R	2,62	6,6	Durável	2,4	5,8	Durável	2,2	5,2	Durável
1 : 3,6 M	<b>2,21</b>	<b>5,1</b>	<b>Durável</b>	<b>1,9</b>	<b>4,6</b>	<b>Durável</b>	<b>1,8</b>	<b>4,3</b>	<b>Durável</b>
1 : 4,4 R	2,84	10,1	Durável	2,6	6,4	Durável	2,5	5,9	Durável
1 : 4,4 M	<b>2,46</b>	<b>6,0</b>	<b>Durável</b>	<b>2,0</b>	<b>4,7</b>	<b>Durável</b>	<b>1,9</b>	<b>4,5</b>	<b>Durável</b>

Fonte: Poli/USP, 2003

Segundo Poli/USP (2003), pode-se dizer que um concreto é durável quando ele apresenta absorção de água inferior a 4,5% e índice de vazios inferior a 11%.

#### 4.2.3.7 Corrosão de armaduras

O concreto é em geral utilizado em conjunto com o aço, essa união faz com que ele atinja altas resistências a tração e flexão. Por questão econômica o aço utilizado na construção civil não é inoxidável, assim há sua corrosão em contato com o ar poluído e na presença de certos gases e líquidos. O concreto com

cimento portland protege o aço devido ao seu pH, porém em estruturas de concreto armado há o problema de porosidade das peças, sendo por ela a entrada de agentes agressivos a armadura.

Um dos principais agentes agressivos causadores da corrosão de armaduras é os íons de cloreto que estão presente nas regiões litorâneas, atmosferas industriais, reservatórios de águas tratadas, piscinas e tratamento químico em indústria e águas contaminadas (Poli/USP,2003).

Um estudo desenvolvido pelo laboratório de furnas – GO, mostrou que em substituição de 10 % em volume na quantidade total de cimento do traço o uso do metacaulim pode reduzir a corrosão em até 43 % (ROCHA, 2005).

O estudo desenvolvido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo determinou a resistência a penetração de íons de cloreto nas idades de 28, 63 e 91 dias de cura, segundo o procedimento de ensaio e as recomendações quanto a classificação da resistência a penetração de íons de cloreto que constam na ASTM C1202.

**Figura 21: Resistência a penetração de cloretos relativa a 28, 63 e 91 dias de cura úmida, para slump de 80 mm**

	28 dias		63 dias		91 dias	
traço	Carga passante em Coulombs	resistência à penetração de cloretos	carga passante em Coulombs	resistência à penetração de cloretos	carga passante em Coulombs	resistência à penetração de cloretos
8% de substituição de cimento por adição						
1 : 3,0 R	2072	moderada	1860	moderada	1304	Alta
1 : 3,0 M	<b>764</b>	<b> muito alta</b>	<b>809</b>	<b> muito alta</b>	<b>632</b>	<b> muito alta</b>
1 : 4,0 R	2163	moderada	1897	Alta	1522	Alta
1 : 4,0 M	<b>943</b>	<b> muito alta</b>	<b>721</b>	<b> muito alta</b>	<b>705</b>	<b> muito alta</b>
1 : 5,0 R	2282	moderada	2073	Alta	1796	Alta
1 : 5,0 M	<b>998</b>	<b> muito alta</b>	<b>865</b>	<b> muito alta</b>	<b>736</b>	<b> muito alta</b>
10% de substituição de cimento por adição						
1 : 2,8 R	915	muito alta	758	muito alta	728	muito alta
1 : 2,8 M	<b>179</b>	<b> muito alta</b>	<b>123</b>	<b> muito alta</b>	<b>114</b>	<b> muito alta</b>
1 : 3,6 R	974	muito alta	812	muito alta	787	muito alta
1 : 3,6 M	<b>185</b>	<b> muito alta</b>	<b>151</b>	<b> muito alta</b>	<b>131</b>	<b> muito alta</b>
1 : 4,4 R	1295	alta	1154	alta	1041	alta
1 : 4,4 M	<b>308</b>	<b> muito alta</b>	<b>297</b>	<b> muito alta</b>	<b>290</b>	<b> muito alta</b>

Fonte: Poli/USP, 2003

#### 4.2.3.8 Reação Alkali – agregado

As reações químicas envolvendo os íons alcalinos do cimento portland, íons de hidroxila e certos constituintes silicosos que podem estar presente no agregado, gera expansão e fissuração no concreto. Uma forma de inibir essas reações é a adição de metacaulim ao concreto que segundo Poli/USP (2003, p. 44).

É muito eficiente no controle das reações expansivas causadas pela reação álcali agregado, sendo recomendado para situações de agregados potencialmente reativos em presença de umidade, tais como barragens, obras hidráulicas, fundações, galerias pluviais de água e esgotos, reservatórios, piscinas e outras.

O metacaulim tem sido usado mundialmente para combater os efeitos expansivos da reação álcali agregado com bastante êxito, em geral o percentual utilizado gira em torno de 10 % em substituição ao peso de cimento, mas esse valor pode chegar a 25 % quando o cimento apresentar altos níveis de álcalis (ROCHA, 2005).

## 5 METODOLOGIA

Tendo em vista avaliar o desempenho e a viabilidade do uso de metacaulim em concreto dosado em central, procedeu-se a elaboração deste programa de estudos.

Os procedimentos experimentais do presente trabalho de conclusão de curso foram desenvolvidos no laboratório de materiais de construção da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC durante o primeiro semestre do ano de 2017.

Os trabalhos se iniciaram com a coleta de materiais em uma central de dosagem da região do vale do Rio Pardo. O experimento envolveu a execução de concreto, ensaio de abatimento e a moldagem de corpos de prova para ensaio de resistência a compressão em diferentes idades de cura, segundo normas técnicas vigentes.

### 5.1 Planejamento dos ensaios

Como ponto de partida foi determinado o desenvolvimento de cinco tipos de concretos, são eles:

- Concreto de referência com cimento puro
- Concreto de referência com adição pozolânica usada na concreteira. 3,16 %, 2,77 % e 2,36 % em massa na substituição de cimento, nos traços A, B e C respectivamente.
- Concreto com substituição de 4 % em massa de cimento por metacaulim
- Concreto com substituição de 8 % em massa de cimento por metacaulim
- Concreto com substituição de 12 % em massa de cimento por metacaulim

Foram determinados três traços com diferentes relações de aglomerante e agregado para cada um dos concretos, são eles:

- Traço A: Baixa resistência
- Traço B: Média resistência
- Traço C: Forte resistência

Os procedimentos práticos seguiram as normas técnicas listadas a baixo.

**Quadro 3: Relação de normas utilizadas**

PROCEDIMENTO	NORMA
Preparo do concreto	ABNT NBR 12655: 2015
Moldagem e cura dos corpos de prova	ABNT NBR 5738: 2015
Ensaio de consistência	ABNT NBR NM 67: 1998
Ensaio de compressão	ABNT NBR 5739: 2007

Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.1.1 Variáveis independentes

As variáveis independentes fixadas no estudo são as seguintes:

- Cimento
- Agregado miúdo
- Agregado graúdo
- Abatimento do tronco de cone (160 mm a 210 mm)
- Relação entre o aglomerante e o agregado (Traço A, B e C)
- Aditivos

### 5.1.2 Variáveis dependentes

Com o intuito de avaliar a viabilidade do uso de metacaulim em concreto dosado em central, fez-se o uso do ensaio de resistência a compressão, da relação água e aglomerante e da perda de consistência como variáveis dependentes do estudo. Isso porque a resistência a compressão ( $F_{ck}$ ) é um fator requisitado na compra do concreto e a relação água e aglomerante influi diretamente sobre essa, tendo limites especificados na ABNT NBR 6118: 2014 segundo a classe de agressividade ambiental e o tipo de estrutura de concreto (armado ou protendido). A perda da consistência foi estudada, pois assim como o  $F_{ck}$ , ela é um requisito do projeto estrutural, e o concreto ao chegar à obra deve atender ao que foi solicitado pelo projetista.

Foram escolhidas as idades de 3, 7, 28 e 56 dias para o ensaio de resistência a compressão, para possibilitar o acompanhamento da atividade pozolânica do metacaulim.

## 5.2 Seleção dos materiais

Os materiais utilizados no estudo são os mesmos utilizados por uma concreteira da região, e para fins de análise do desempenho e da viabilidade da utilização de metacaulim, estes foram fornecidos pela mesma.

### 5.2.1 Cimento portland

Para a produção de todos os concretos foi utilizado o cimento portland composto com fíler de 40 MPa (CP II – F40) da marca Itambé, proveniente de lotes diferentes.

**Figura 22: Cimento portland CII F-40 e silo de armazenamento**



Fonte: Arquivo pessoal

**Figura 23: Resultados dos ensaios químicos do cimento**

Data	Químicos									
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
01	4,01	18,38	2,86	60,67	3,74	3,10	5,01	0,53	0,78	0,69
03	3,98	18,29	2,77	60,43	3,91	2,98	5,20	0,50	0,91	0,68
07	4,08	18,52	2,85	59,91	4,18	3,00	4,85	0,50	0,94	0,67
09	4,08	18,45	2,89	60,35	3,91	3,03	4,91	0,53	0,79	0,67
13	4,06	18,37	2,81	59,99	3,72	3,04	5,01	0,56	1,30	0,67
15	4,07	18,46	2,83	60,48	4,00	3,12	4,94	0,62	1,29	0,70
17	4,07	18,49	2,84	60,40	4,13	3,02	5,10	0,67	1,11	0,68
21	4,05	18,25	2,93	60,64	4,29	3,04	5,29	0,62	1,04	0,62
23	4,01	18,06	2,90	60,16	3,64	3,11	5,25	0,56	0,98	0,65
27	4,09	18,32	2,88	60,61	3,52	3,03	5,10	0,59	1,02	0,66
<b>Média</b>	<b>4,05</b>	<b>18,36</b>	<b>2,86</b>	<b>60,36</b>	<b>3,90</b>	<b>3,05</b>	<b>5,07</b>	<b>0,57</b>	<b>1,02</b>	<b>0,67</b>
<b>Sd</b>	<b>0,04</b>	<b>0,14</b>	<b>0,05</b>	<b>0,27</b>	<b>0,25</b>	<b>0,05</b>	<b>0,15</b>	<b>0,06</b>	<b>0,18</b>	<b>0,02</b>
<b>Min</b>	<b>3,98</b>	<b>18,06</b>	<b>2,77</b>	<b>59,91</b>	<b>3,52</b>	<b>2,98</b>	<b>4,85</b>	<b>0,50</b>	<b>0,78</b>	<b>0,62</b>
<b>Max</b>	<b>4,09</b>	<b>18,52</b>	<b>2,93</b>	<b>60,67</b>	<b>4,29</b>	<b>3,12</b>	<b>5,29</b>	<b>0,67</b>	<b>1,30</b>	<b>0,70</b>

Fonte: Itambé

**Figura 24: Resultados dos ensaios físicos do cimento**

Data	Físicos										
	Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
		Início	Fim					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
	mm	h : min	h : min	%	cm <sup>2</sup> /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
01	1,00	03:10	04:00	29,7	4.630	0,02	0,30	23,1	39,1	45,1	53,0
03	1,00	03:20	04:00	29,6	4.590	0,04	0,50	22,1	39,5	45,1	54,9
07	0,50	03:20	04:00	30,0	4.540	0,03	0,40	21,6	40,3	44,9	54,6
09	0,50	03:30	04:15	30,2	4.600	0,04	0,40	23,0	40,9	46,0	56,9
13	0,00	03:20	04:00	30,4	4.510	0,05	0,40	22,4	39,9	45,3	54,9
15	0,50	03:25	04:00	30,1	4.510	0,05	0,40	23,5	38,7	44,5	54,0
17	0,50	03:10	04:00	30,2	4.450	0,04	0,40	23,0	39,1	45,0	54,6
21	1,00	03:10	04:00	29,8	4.500	0,03	0,40	23,2	38,9	45,7	56,0
23	0,00	03:15	04:00	29,6	4.540	0,04	0,40	25,2	40,4	46,1	55,2
27	0,00	03:05	04:00	30,0	4.620	0,03	0,30	24,6	40,8	46,5	53,6
<b>Média</b>	<b>0,50</b>	<b>03:17</b>	<b>04:02</b>	<b>30,0</b>	<b>4.549</b>	<b>0,04</b>	<b>0,39</b>	<b>23,2</b>	<b>39,8</b>	<b>45,4</b>	<b>54,8</b>
<b>Sd</b>	<b>0,41</b>	<b>00:08</b>	<b>00:05</b>	<b>0,3</b>	<b>58,96</b>	<b>0,01</b>	<b>0,06</b>	<b>1,1</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>1,1</b>
<b>Min</b>	<b>0,00</b>	<b>03:05</b>	<b>04:00</b>	<b>29,6</b>	<b>4.450</b>	<b>0,02</b>	<b>0,30</b>	<b>21,6</b>	<b>38,7</b>	<b>44,5</b>	<b>53,0</b>
<b>Max</b>	<b>1,00</b>	<b>03:30</b>	<b>04:15</b>	<b>30,4</b>	<b>4.630</b>	<b>0,05</b>	<b>0,50</b>	<b>25,2</b>	<b>40,9</b>	<b>46,5</b>	<b>56,9</b>

Fonte: Itambé

### 5.2.2 Agregado miúdo

Foram utilizados dois tipos de agregado miúdo, a areia média natural e a industrial. Esses materiais passaram por processo de secagem natural e foram armazenados no laboratório em um ambiente isento de umidade.

## 1) Areia média natural

**Figura 25: Areia média natural**



Fonte: Arquivo pessoal

**Quadro 4: Análise granulométrica**

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - AREIA MÉDIA		
PENEIRAS	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
12,50	0,00	0,00
9,50	0,70	0,70
6,30	1,10	1,80
4,80	1,30	3,10
2,40	6,20	9,30
2,00	2,20	11,50
1,20	12,60	24,10
0,60	31,80	55,90
0,40	31,80	87,70
0,30	6,50	94,20
0,17	1,40	95,60
0,15	0,10	95,60
0,075	0,00	95,60
Fundo	4,40	100,00
Soma	100,00	282,90
Módulo de finura		2,83
Dimensão máx. característica		4,80

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela concreteira

**Quadro 5: Massa específica**

MASSA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )	
ABSOLUTA	RELATIVA
2648	1565

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela concreteira

## 2) Areia artificial

**Figura 26: Areia artificial**

Fonte: Arquivo pessoal

**Quadro 6: Análise granulométrica**

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - AREIA ARTIFICIAL		
PENEIRAS	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
4,80	0,00	0,00
2,40	24,00	24,00
2,00	5,60	29,60
1,20	18,00	47,60
0,60	17,60	65,20
0,40	5,30	70,50
0,30	4,80	75,30
0,17	7,80	83,10
0,15	2,20	85,40
0,075	4,50	89,90
Fundo	10,10	100,00
Soma	100,00	297,40
Módulo de finura		2,97
Dimensão máx. característica		4,80

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela concreteira

**Quadro 7: Massa específica**

MASSA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )	
ABSOLUTA	RELATIVA
2583	1400

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela concreteira

### 5.2.3 Agregado graúdo

Foram utilizados dois tipos de agregado graúdo, a brita # 0 e a brita # 1, ambas provenientes da pedreira da concreteira. Esses materiais passaram por processo de secagem natural e foram armazenados no laboratório em um ambiente isento de umidade.

#### 1) Brita 0

**Figura 27: Brita 0**

Fonte: Arquivo pessoal

**Quadro 8: Massa específica**

MASSA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )	
ABSOLUTA	RELATIVA
2941	1456

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela concreteira

**Quadro 9: Análise granulométrica**

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - BRITA 0		
PENEIRAS	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
12,5	0,0	0,0
9,5	0,7	0,7
6,3	44,6	45,4
4,8	32,0	77,3
2,4	20,0	97,4
2	0,7	98,1
1,2	0,6	98,7
0,6	0,1	98,8
0,4	0,0	98,8
0,3	0,0	98,8
0,17	0,0	98,8
0,15	0,0	98,8
0,075	0,2	99,0
Fundo	1,0	100,0
Soma	100,0	570,5
Módulo de finura		5,71
Dimensão máx. característica		9,5

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela concreteira

## 2) Brita 1

**Figura 28: Brita 1**

Fonte: Arquivo pessoal

**Quadro 10: Análise granulométrica**

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - BRITA 1		
PENEIRAS	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
22,00	0,00	0,00
19,00	1,00	1,00
12,50	49,90	50,80
9,50	33,80	84,60
6,30	13,90	98,60
4,80	0,60	99,10
2,40	0,10	99,30
2,00	0,00	99,30
1,20	0,00	99,30
0,60	0,00	99,30
0,40	0,00	99,30
0,30	0,00	99,30
0,17	0,00	99,40
0,15	0,00	99,40
0,075	0,10	99,60
Fundo	0,40	100,00
Soma	100,00	681,30
Módulo de finura		6,81
Dimensão máx. característica		19,00

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela concreteira

**Quadro 11: Massa específica**

MASSA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )	
ABSOLUTA	RELATIVA
2936	1415

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela concreteira

### 5.2.4 Água

Foi utilizada água proveniente de poços artesianos da Universidade de Santa Cruz do Sul.

### 5.2.5 Aditivos

- Eucon PL 300 da VIAPOL, que é um aditivo líquido plastificante de pega normal. Segundo o fabricante ele atende aos requisitos da NBR 11.768/2011, “Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos”.

**Quadro 12: Características técnicas do produto**

CARACTERÍSTICA	Eucon PL300
Base química	Sais sulfonados
Aspecto	Líquido
Cor	Marrom escuro
Massa específica	~1,16 g/cm <sup>3</sup>
pH	~7,3
Teor de cloretos	Não contém cloretos

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da VIAPOL

- Plastoflow 7025 da VIAPOL, que é um aditivo líquido superplastificante de pega normal. Segundo o fabricante ele atende aos requisitos da NBR 11.768/2011, “Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos”.

**Quadro 13: Características técnicas do produto**

CARACTERÍSTICA	Plastoflow7025
Base química	Solução de policarboxilatos em meio aquoso
Aspecto	Líquido
Cor	Amarelado
Massa específica	~1,070 g/cm <sup>3</sup>
pH	~4,5
Teor de cloretos	Não contém cloretos

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da VIAPOL

### 5.2.6 Metacaulim

Foi utilizado o metacaulim de alta reatividade da marca Metacaulim do Brasil, cujo nome comercial é Metacaulim HP ULTRA. Segundo instruções do fabricante, o produto não requer pré mistura com água e deve ser adicionado diretamente na mistura junto com o cimento portland em substituição do mesmo, em teores que

variam de 5 % a 15 % em massa, de acordo com especificações de desempenho do concreto.

**Figura 29: Metacaulim**



Fonte: Metacaulim do Brasil

**Figura 30: Propriedades físicas e químicas do metacaulim**

Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites (NBR 15.894)
SiO <sub>2</sub>	57%	44% a 65%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0,1%	< 1,5%
SO <sub>3</sub>	< 0,1%	< 1%
Na <sub>2</sub> O	< 0,1%	< 0,5%
Eq.Alcalino Na <sub>2</sub> O	< 1,5%	< 1,5%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2%	-
TiO <sub>2</sub>	1,5%	-
Umidade	0,5%	< 2%
Perda ao Fogo	3%	< 4%
Resíduo #325	6%	< 10%
Desempenho com Cimento (7 dias)	115%	> 105%
Atividade Pozolânica Chapelle	880mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g	> 750mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g
Área Específica BET	230.000cm <sup>2</sup> /g	150.000cm <sup>2</sup> /g
Massa Específica	2,56kg/dm <sup>3</sup>	-

Fonte: Metacaulim do Brasil. Disponível em: < <http://www.metacaulim.com.br> >. Acesso em 25 fev. 2017.

### 5.2.7 Adição pozolânica utilizada pela concreteira

Em um dos traços estudados foi realizada a adição de material pozolânico que a concreteira da região utiliza, o mesmo foi fornecido por ela. Este material é a cinza mineral leve da marca Silmin.

**Figura 31: Cinza mineral leve e silo de armazenamento**



Fonte: Arquivo pessoal

**Quadro 14: Propriedades químicas da cinza mineral leve**

PROPRIEDADES QUÍMICAS - CINZA MINERAL LEVE	
Determinação	%
Óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ )	59,93
Óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	27,77
Óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ )	4,28
Óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	3,00
Óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ )	1,16
Óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ )	0,50
Óxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	<0,03
Óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0,17
Óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ )	1,02
Óxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ )	0,34
Perda ao fogo	1,80

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela concreteira

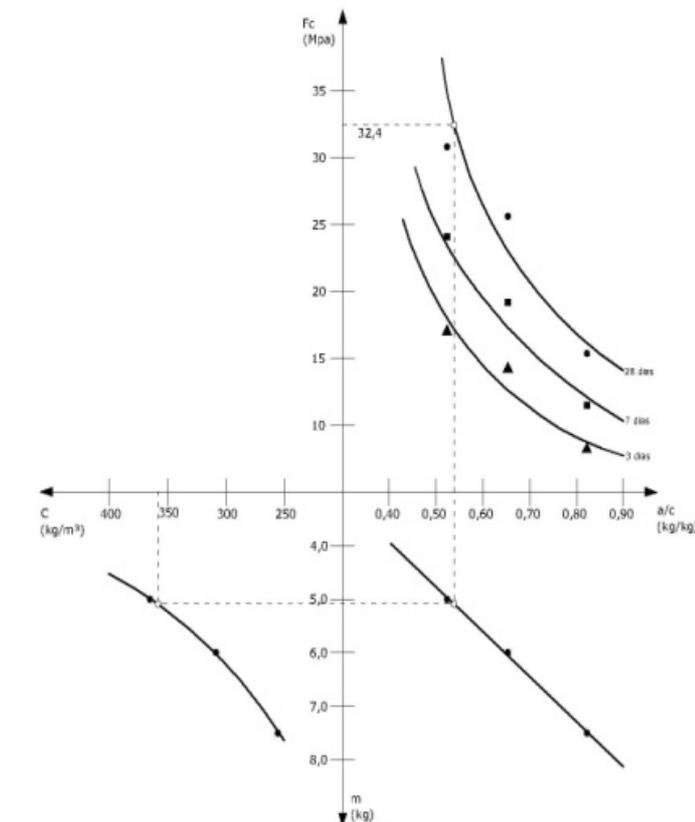
**Quadro 15: Propriedades físicas da cinza mineral leve**

PROPRIEDADES FÍSICAS - CINZA MINERAL LEVE		
Finura	Resíduo retido na peneira nº 200 %	0,20
	Resíduo retido na peneira nº 325 %	2,00
Superfície específica "Blaine" (cm <sup>2</sup> /g)		5260,00
Massa específica(g/cm <sup>3</sup> )		2,25

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados fornecidos pela concreteira

### 5.3 Dosagem dos materiais

Utilizando um processo racional de dosagem adotou se os procedimentos do IPT para elaboração dos traços iniciais e determinação das correlações existentes como, consumo de cimento e consumo de água.

**Figura 32: Diagrama de dosagem IPT**

Fonte: IPT/EPUSP

#### 5.4 Produção do concreto e preparo dos corpos de prova

Para a produção do concreto foi utilizada betoneira de eixo móvel com a capacidade de 120 litros. A adição dos materiais ocorreu com a betoneira em movimento na seguinte ordem:

- 100 % de agregado graúdo
- 80% de água
- 100 % de cimento mais a adição
- 100 % de agregado miúdo
- 20% de água
- 100% de aditivo

**Figura 33: Materiais separados e pesados para execução do concreto**



Fonte: Arquivo pessoal

A mistura foi realizada por aproximadamente 5 minutos, contados a partir do primeiro lançamento de água. Após isso foi realizado o ensaio de abatimento com o tronco de cone, para verificar se a consistência pré estabelecida foi atingida.

**Figura 34: Execução do ensaio de abatimento**



Fonte: Arquivo pessoal

Estando o abatimento dentro dos parâmetros pré estabelecidos, deixou-se a betoneira em repouso por 30 minutos e sobre sua boca foi colocado um pano úmido. Decorrido o tempo de repouso a betoneira foi posta em movimento durante 1 minuto e em seguida realizado novo ensaio de abatimento para verificar sua consistência.

Após isso se prosseguiu para a moldagem de dois corpos de prova para cada idade de cura, totalizando 120 corpos de prova moldados ao fim do estudo. Foram adotados corpos de prova cilíndricos com dimensões 10 cm X 20 cm para o ensaio de resistência a compressão. Para a execução da moldagem foi utilizado adensamento manual. Os moldes foram untados com óleo veicular.

**Figura 35: Moldagem dos corpos de prova**



Fonte: Arquivo pessoal

Após a moldagem os corpos de prova foram cobertos por um filme plástico para evitar a evaporação da água de amassamento para o meio externo. A desmoldagem ocorreu após três dias de cura para não danificar os corpos de prova.

**Figura 36: Corpos de prova protegidos por filme plástico**



Fonte: Arquivo pessoal

Após a desmoldagem os corpos de prova que seriam ensaiados a compressão há três dias foram sujeitos ao processo. Os demais foram submetidos à cura úmida por imersão na água. Para a realização do ensaio de compressão foi realizado o capeamento dos corpos de prova por meio de retífica.

**Figura 37: Procedimentos do ensaio a compressão**



Fonte: Arquivo pessoal

## 6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados todos os dados que abrangem as variáveis dependentes e independentes do estudo.

### 6.1 Concretos estudados

Encontra se abaixo a síntese dos traços estudados em cada tipo de concreto. O aditivo denominado de X trata se do Eucon PL 300, e o aditivo Z do Plastoflow 7025.

**Quadro 16: Síntese de traços**

SÍNTESE DE TRAÇOS ESTUDADOS - kg										
	CONCRETO	CIMENTO	POZOLANA	AREIA NAT.	AREIA INDUST.	BRITA # 1	BRITA # 0	ÁGUA	ADITIVO X	ADITIVO Z
A	RCP	6,05	0,00	12,80	8,53	14,70	6,30	4,63	0,030	0,060
	RAP	4,09	1,89	12,50	8,33	14,70	6,30	3,99	0,030	0,060
	M4	5,80	0,24	12,78	8,52	14,70	6,30	4,35	0,030	0,060
	M8	5,56	0,48	12,77	8,51	14,70	6,30	4,93	0,030	0,060
	M12	5,31	0,72	12,75	8,50	14,70	6,30	4,57	0,030	0,060
B	RCP	6,92	0,00	12,32	8,21	14,70	6,30	4,15	0,035	0,069
	RAP	4,95	1,89	12,03	8,02	14,70	6,30	3,90	0,034	0,068
	M4	6,64	0,28	12,29	8,20	14,70	6,30	4,12	0,035	0,069
	M8	6,36	0,55	12,28	8,19	14,70	6,30	4,59	0,035	0,069
	M12	6,08	0,97	12,26	8,17	14,70	6,30	4,49	0,035	0,069
C	RCP	8,09	0,00	11,68	7,78	14,70	6,30	4,12	0,040	0,081
	RAP	6,11	1,89	11,39	7,59	14,70	6,30	3,90	0,040	0,080
	M4	7,76	0,32	11,65	7,76	14,70	6,30	4,16	0,040	0,081
	M8	7,43	0,65	11,63	7,75	14,70	6,30	4,41	0,040	0,081
	M12	7,10	0,97	11,60	7,74	14,70	6,30	4,30	0,040	0,081

LEGENDA : RCP : Concreto de referência com cimento puro  
 RAP : Concreto de referencia com adição pozolânica  
 M4 : Concreto com substituição de 4 % de cimento por metacaulim  
 M8 : Concreto com substituição de 8 % de cimento por metacaulim  
 M12 : Concreto com substituição de 12 % de cimento por metacaulim  
 A : Traço de fraca resistência  
 B : Traço de média resistência  
 C : Traço de forte resistência

Fonte: Elaborado pelo autor

## 6.2 Resistência a compressão

No quadro abaixo consta os resultados do ensaio de resistência a compressão de acordo com o tempo de cura, dos três traços de cada concreto estudado.

**Quadro 17: Resistência a compressão**

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)						
CURA	TRAÇO	CONCRETO				
		RCP	RAP	M4	M8	M12
3 DIAS	A	17,94	9,28	19,61	15,35	15,75
	B	23,04	13,24	28,95	22,26	21,73
	C	33,38	27,48	37,84	31,13	28,19
7 DIAS	A	20,83	15,92	24,52	20,91	22,27
	B	28,99	22,72	35,53	28,52	30,86
	C	42,47	38,55	48,45	40,48	42,04
28 DIAS	A	26,67	24,02	32,28	26,49	27,43
	B	37,79	35,22	47,40	36,84	38,88
	C	50,35	51,48	52,65	51,28	51,84
56 DIAS	A	25,89	28,45	32,49	27,38	30,13
	B	43,85	39,57	50,01	38,30	41,34
	C	56,83	53,24	61,74	54,34	55,45

LEGENDA: RCP : Concreto de referência com cimento puro  
 RAP : Concreto de referencia com adição pozolânica  
 M4 : Concreto com substituição de 4 % de cimento por metacaulim  
 M8 : Concreto com substituição de 8 % de cimento por metacaulim  
 M12 : Concreto com substituição de 12 % de cimento por metacaulim  
 A : Traço de fraca resistência  
 B : Traço de média resistência  
 C : Traço de forte resistência

Fonte: Elaborado pelo autor

### 6.3 Relação água e aglomerante

Apresenta-se abaixo os resultados da relação água e aglomerante.

**Quadro 18: Relação água e aglomerante**

RELAÇÃO ÁGUA E AGLOMERANTE					
TRAÇO	CONCRETO				
	RCP	RAP	M4	M8	M12
A	0,77	0,67	0,72	0,82	0,76
B	0,60	0,57	0,60	0,66	0,64
C	0,51	0,51	0,51	0,55	0,53

LEGENDA: RCP : Concreto de referência com cimento puro  
 RAP : Concreto de referencia com adição pozolânica  
 M4 : Concreto com substituição de 4 % de cimento por metacaulim  
 M8 : Concreto com substituição de 8 % de cimento por metacaulim  
 M12 : Concreto com substituição de 12 % de cimento por metacaulim  
 A : Traço de fraca resistência  
 B : Traço de média resistência  
 C : Traço de forte resistência

Fonte: Elaborado pelo autor

### 6.4 Verificação da consistência pelo ensaio de abatimento

Apresenta-se abaixo os resultados do ensaio de abatimento.

**Quadro 19: Resultados do ensaio de abatimento**

TRAÇO	SLUMP (mm)									
	RCP		RAP		M4		M8		M12	
	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º
A	170	150	165	150	170	170	170	160	165	155
B	185	185	190	180	165	165	170	170	175	160
C	200	200	210	200	200	200	190	195	195	200

LEGENDA : RCP : Concreto de referência com cimento puro  
 RAP : Concreto de referencia com adição pozolânica  
 M4 : Concreto com substituição de 4 % de cimento por metacaulim  
 M8 : Concreto com substituição de 8 % de cimento por metacaulim  
 M12 : Concreto com substituição de 12 % de cimento por metacaulim  
 A : Traço de fraca resistência  
 B : Traço de média resistência  
 C : Traço de forte resistência

Fonte: Elaborado pelo autor

## 7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste tópico serão apresentadas as análises de resultados das variáveis dependentes do estudo. Também será apresentado um diagrama de dosagem elaborado a partir dos resultados de compressão e uma composição de custos para analisar a viabilidade do uso do metacaulim em concreto dosado em central.

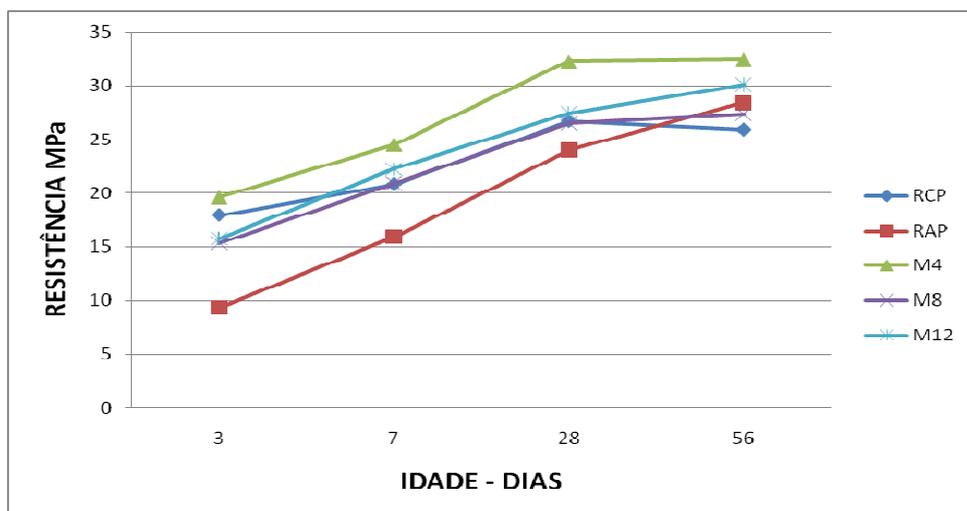
As siglas utilizadas durante a análise são as mesmas utilizadas na apresentação dos resultados e estão descritas a seguir:

- RCP: Concreto de referência com cimento puro
- RAP: Concreto de referência com adição pozolânica
- M4: Concreto com substituição de 4 % de cimento por metacaulim
- M8: Concreto com substituição de 8 % de cimento por metacaulim
- M12: Concreto com substituição de 12 % de cimento por metacaulim

### 7.1 Resistência à compressão

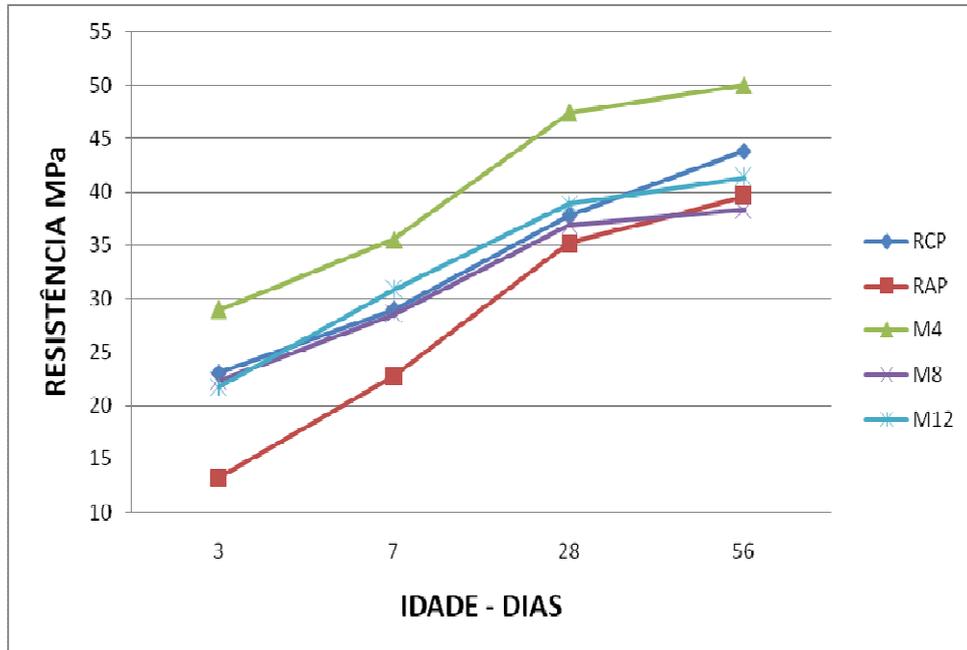
O maior ganho de resistência a compressão foi com a substituição de 4 % de cimento por metacaulim, nos três traços, em todas as idades. Dentre os traços com 4% de metacaulim o que apresentou maior ganho de resistência em relação ao concreto de referencia com a utilização de cimento puro foi o traço B.

**Gráfico 1: Evolução da resistência dos concretos do traço A**



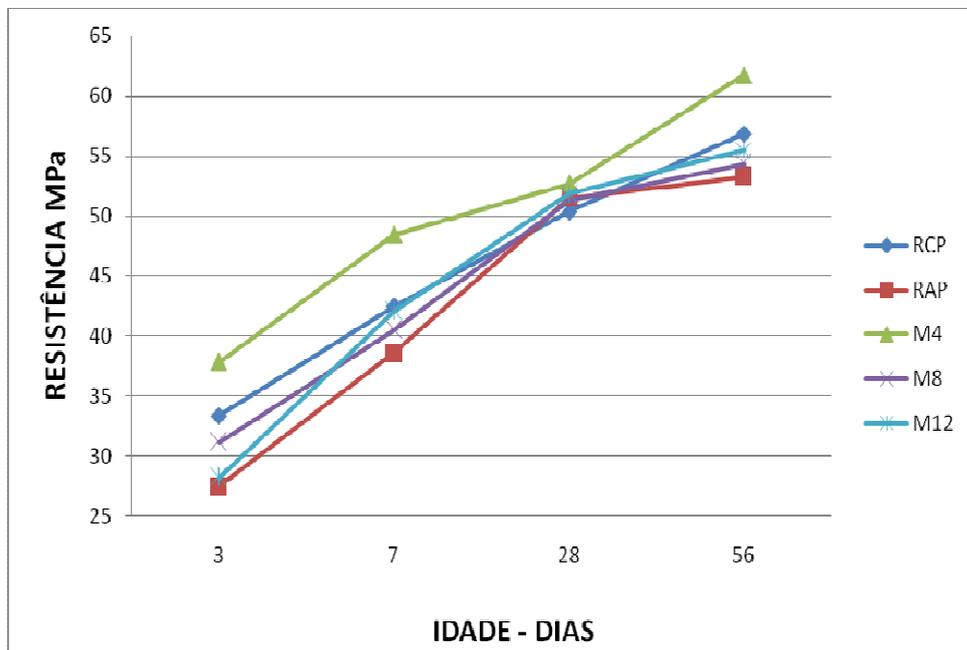
Fonte: Elaborado pelo autor

**Gráfico 2: Evolução da resistência dos concretos do traço B**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Gráfico 3: Evolução da resistência dos concretos do traço C**



Fonte: Elaborado pelo autor

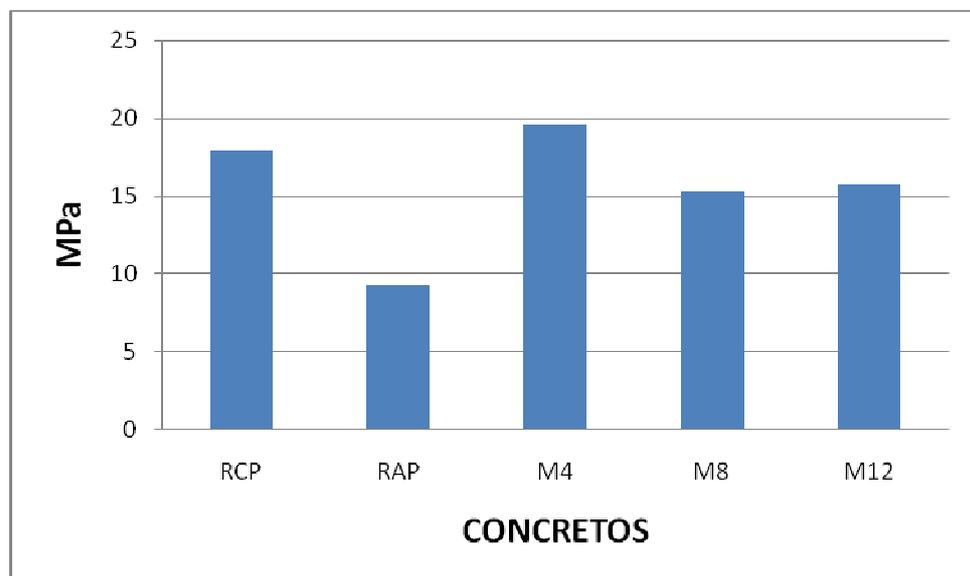
Nos itens 7.1.1 a 7.1.3 há uma análise detalhada dos resultados, organizados conforme o traço e a idade do ensaio de compressão.

### 7.1.1 Traço A

#### 1) 3 dias

Em relação ao concreto de referência com o uso apenas de cimento, o concreto com adição da concreteira teve uma baixa de 93,23 %, assim como os com adição de 8 % e 12 % de metacaulim que baixaram 16,87 % e 13,90 % respectivamente. Com o uso de 4 % de metacaulim houve aumento de 9,31 %.

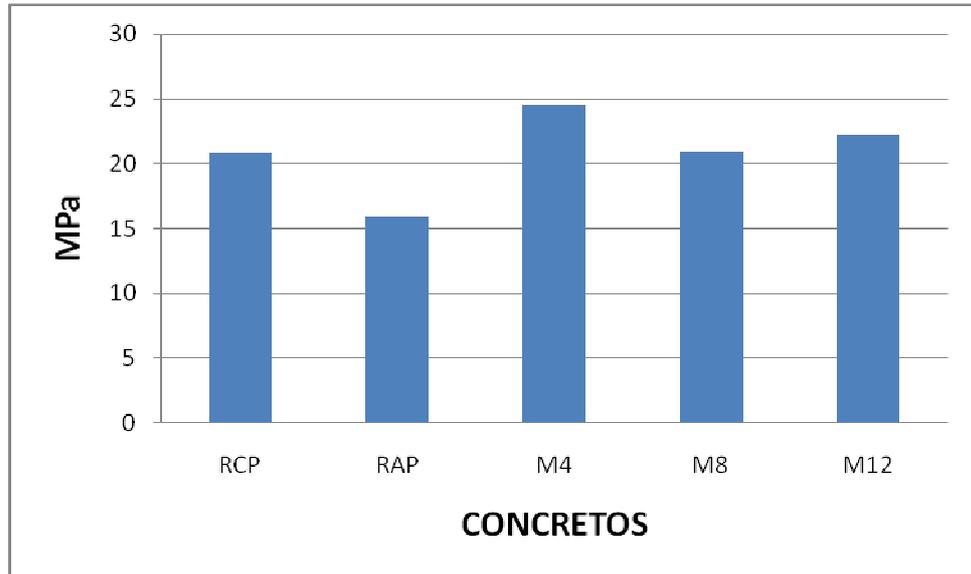
**Gráfico 4: Resistência à compressão há 3 dias traço A**



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 2) 7 dias

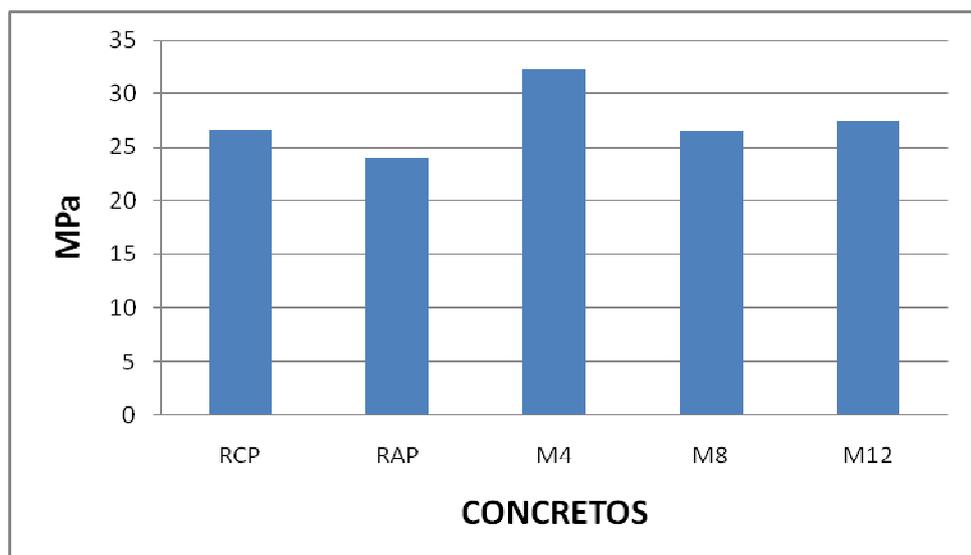
Em relação ao concreto de referencia com o uso apenas de cimento, o concreto com adição da concreteira teve uma baixa de 30,84 %. Com o uso de 4 %, 8 % e 12 % de metacaulim houve aumento de 17,81 %, 0,38 % e 6,91 % respectivamente.

**Gráfico 5: Resistência à compressão há 7 dias traço A**

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3) 28 dias

Em relação ao concreto de referencia com o uso apenas de cimento, o concreto com adição da concreteira teve uma baixa de 11,03 %, assim como com adição de 8 % de metacaulim que baixou 0,68 %. Com o uso de 4 % e 12 % de metacaulim houve aumento de 21,03 % e 2,85 % respectivamente.

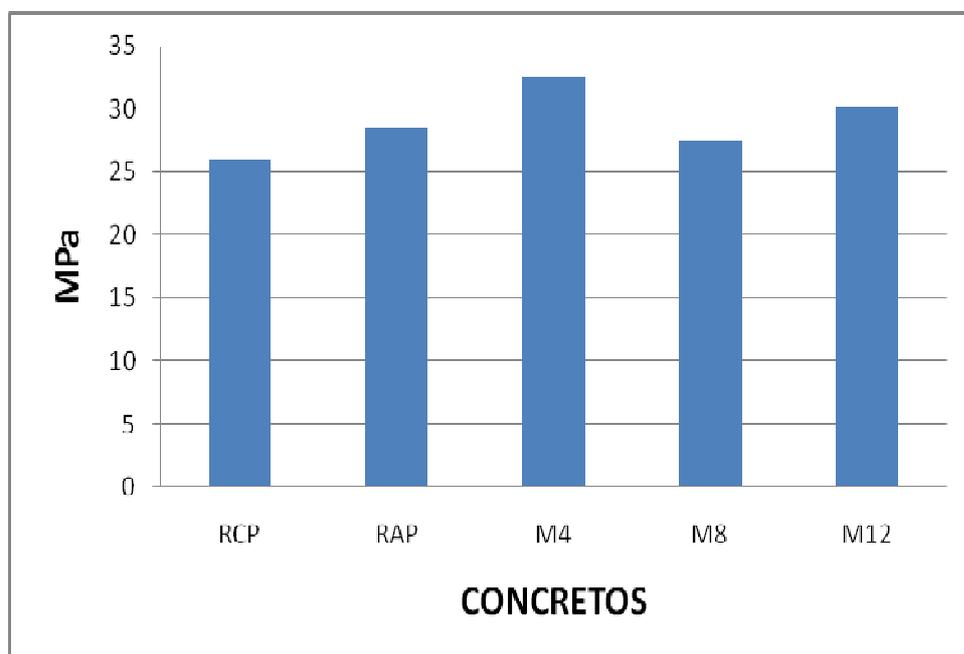
**Gráfico 6: Resistência à compressão há 28 dias traço A**

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4) 56 dias

Em relação ao concreto de referência com o uso apenas de cimento, todos os demais apresentaram ganho na resistência. O concreto com adição da concreiteira elevou sua resistência em 9,89 %, e os com substituição de cimento por metacaulim 25,49 %, 5,76 % e 16,38 % para as adições de 4%, 8 % e 12 % respectivamente.

**Gráfico 7: Resistência à compressão há 56 dias traço A**

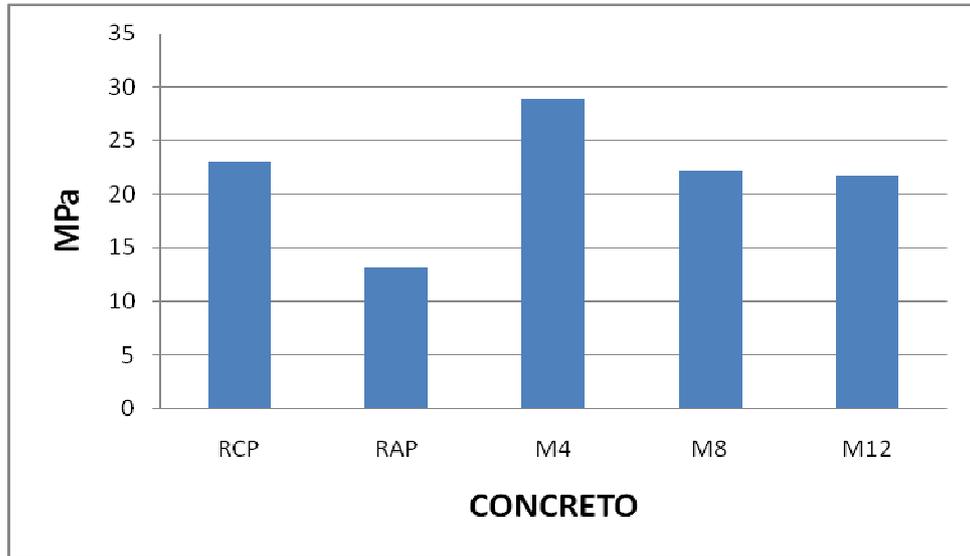


Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.1.2 Traço B

#### 1) 3 dias

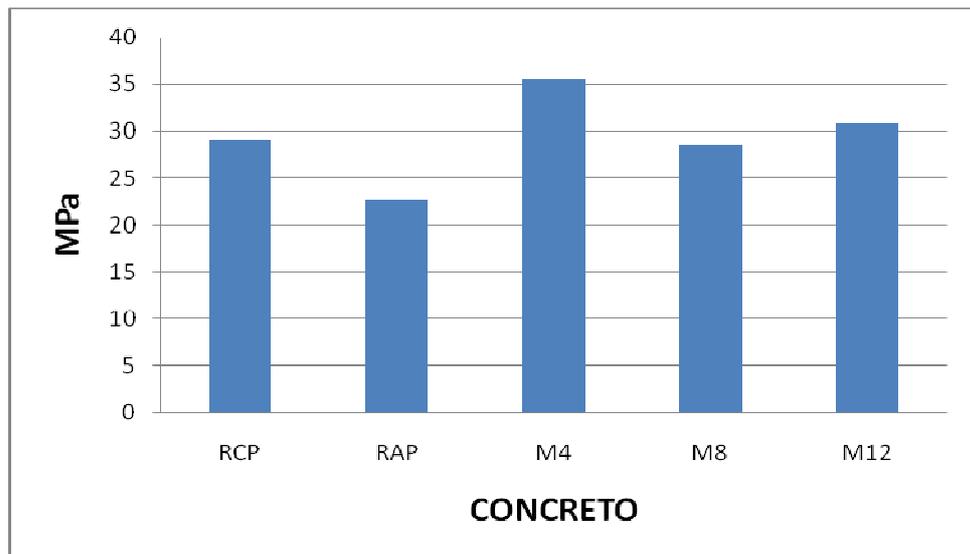
Em relação ao concreto de referência com o uso apenas de cimento, o concreto com adição da concreiteira teve uma baixa de 74,01 %, assim como os com adição de 8 % e 12 % de metacaulim que baixaram 3,50 % e 6,02 % respectivamente. Com o uso de 4 % de metacaulim houve aumento de 25,65 %.

**Gráfico 8: Resistência à compressão há 3 dias traço B**

Fonte: Elaborado pelo autor

## 2) 7 dias

Em relação ao concreto de referencia com o uso apenas de cimento, o concreto com adição da concreteira teve uma baixa de 27,59 %, assim como o com adição de 8 % de metacaulim que baixou 1,65 %. Com o uso de 4 % e 12 % de metacaulim houve aumento de 22,56 % e 6,45 % respectivamente.

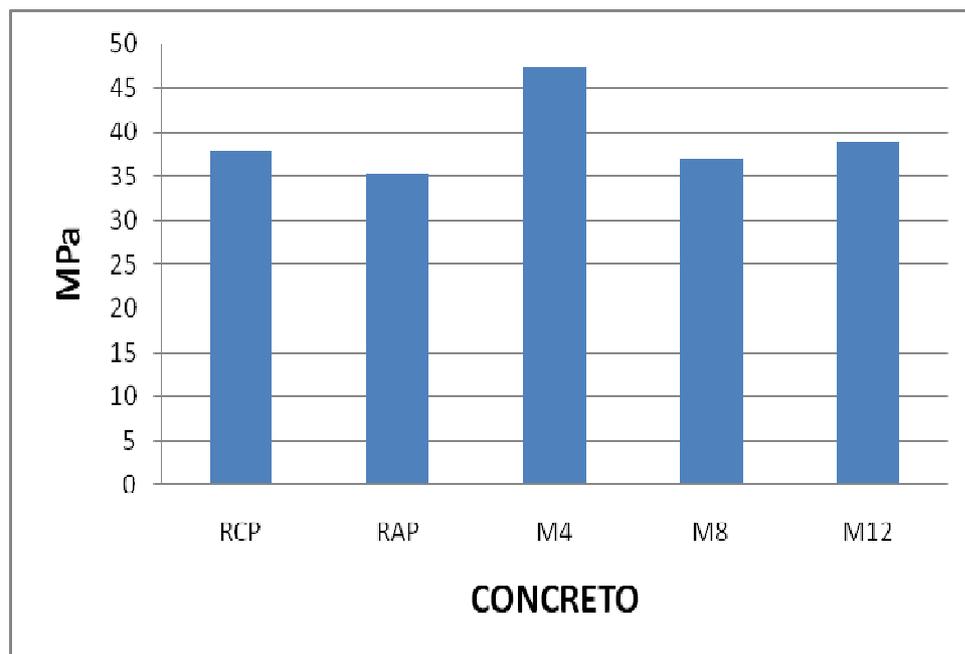
**Gráfico 9: Resistência à compressão há 7 dias traço B**

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3) 28 dias

Em relação ao concreto de referencia com o uso apenas de cimento, o concreto com adição da concreteira teve uma baixa de 7,29 %, assim como com adição de 8 % de metacaulim que baixou 2,58 %. Com o uso de 4 % e 12 % de metacaulim houve aumento de 25,43 % e 2,88 % respectivamente.

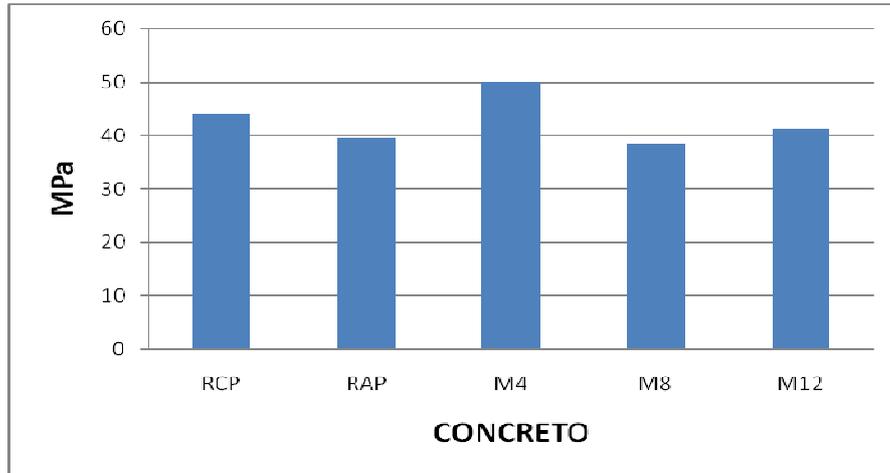
**Gráfico 10: Resistência à compressão há 28 dias traço B**



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4) 56 dias

Em relação ao concreto de referencia com o uso apenas de cimento, o concreto com adição da concreteira teve uma baixa de 10,81 %, assim como com adição de 8 % e 12 % de metacaulim que baixaram 14,49 % e 6,07 % respectivamente. Com o uso de 4 % de metacaulim houve aumento de 14,05 %.

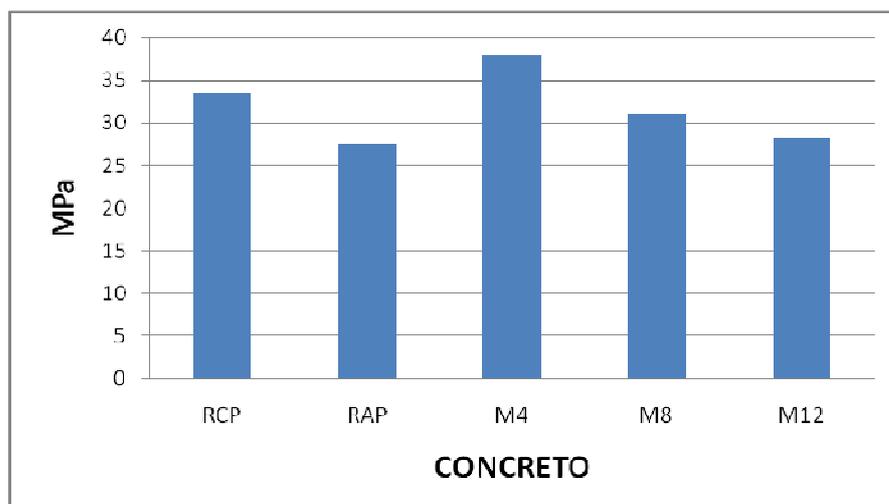
**Gráfico 11: Resistência à compressão há 56 dias traço B**

Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.1.3 Traço C

#### 1) 3 dias

Em relação ao concreto de referência com o uso apenas de cimento, o concreto com adição da concreteira teve uma baixa de 21,47 %, assim como os com adição de 8 % e 12 % de metacaulim que baixaram 7,22 % e 18,41 % respectivamente. Com o uso de 4 % de metacaulim houve aumento de 13,36 %.

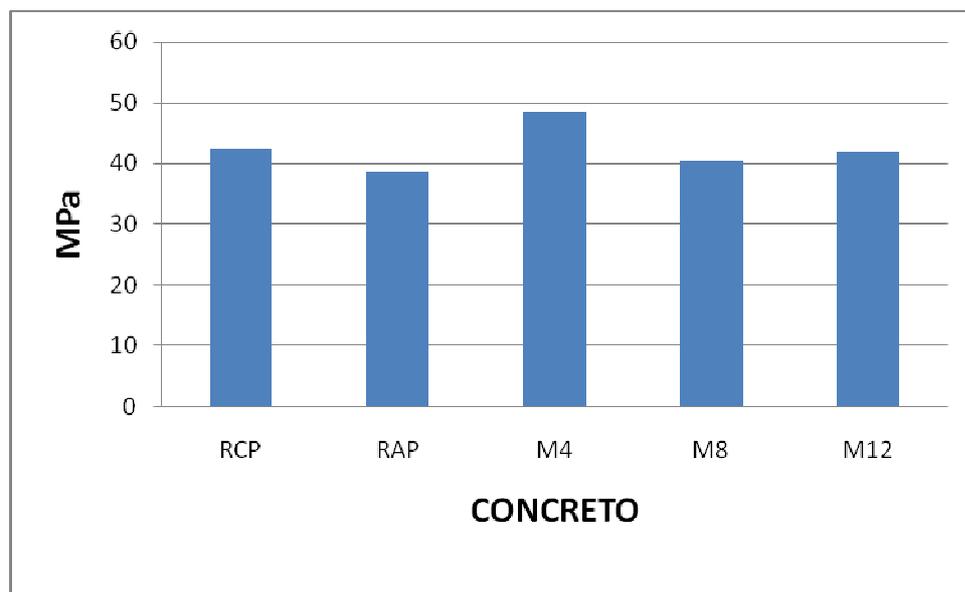
**Gráfico 12: Resistência à compressão há 3 dias traço C**

Fonte: Elaborado pelo autor

## 2) 7 dias

Em relação ao concreto de referencia com o uso apenas de cimento, o concreto com adição da concreteira teve uma baixa de 10,16 %, assim como o com adição de 8 % e 12 % de metacaulim que baixaram 4,92 % e 1,02 % respectivamente. Com o uso de 4 % de metacaulim houve aumento de 14,08 %.

**Gráfico 13: Resistência à compressão há 7 dias traço C**

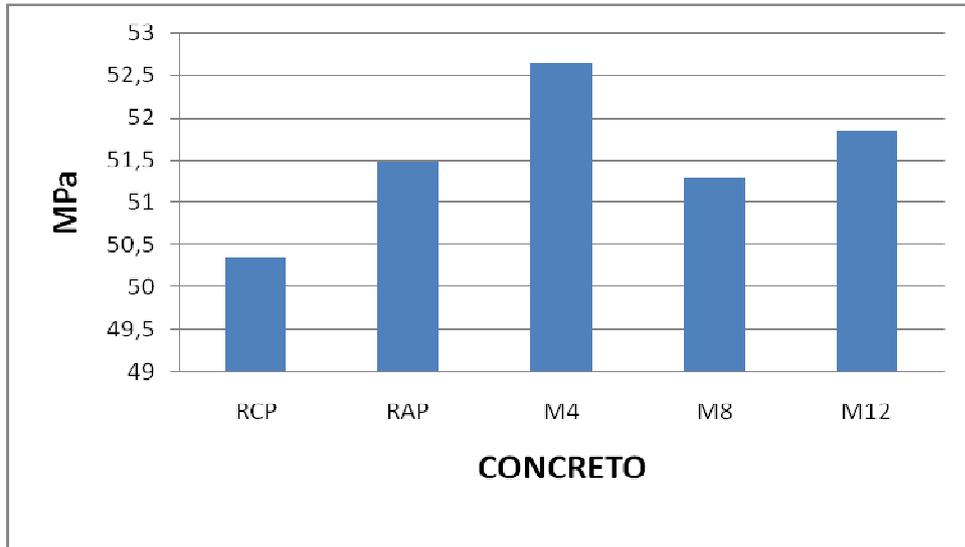


Fonte: Elaborado pelo autor

## 3) 28 dias

Em relação ao concreto de referencia com o uso apenas de cimento, os concretos com adição da concreteira e com adição de metacaulim obtiveram os seguintes aumentos:

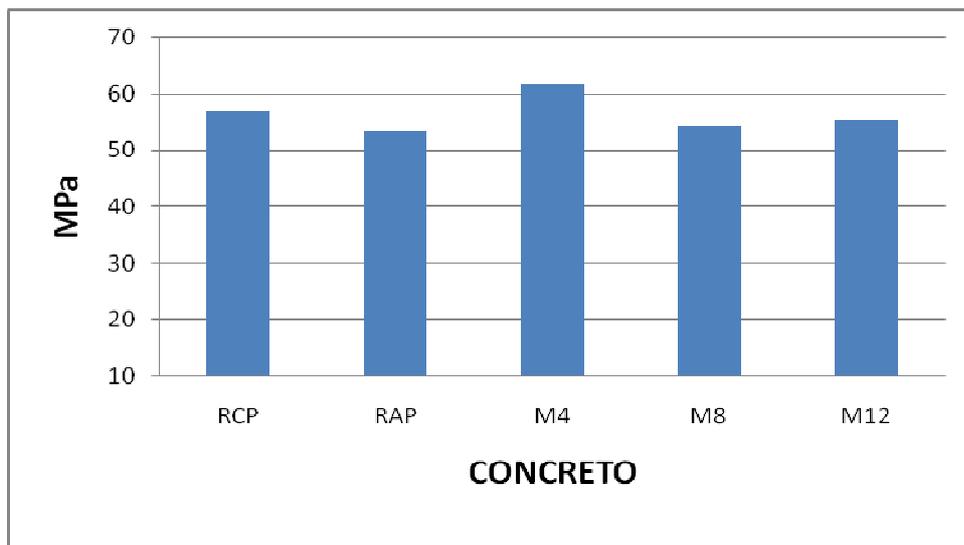
- adição usual da concreteira 2,24 %.
- 4 % de metacaulim 4,57 %.
- 8 % de metacaulim 1,85 %.
- 12 % de metacaulim 2,96 %.

**Gráfico 14: Resistência à compressão há 28 dias traço C**

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4) 56 dias

Em relação ao concreto de referência com o uso apenas de cimento, o concreto com adição da concreiteira teve uma baixa de 6,74 %, assim como com adição de 8 % e 12 % de metacaulim que baixaram 4,56 % e 2,49 % respectivamente. Com o uso de 4 % de metacaulim houve aumento de 8,64 %.

**Gráfico 15: Resistência à compressão há 56 dias traço C**

Fonte: Elaborado pelo autor

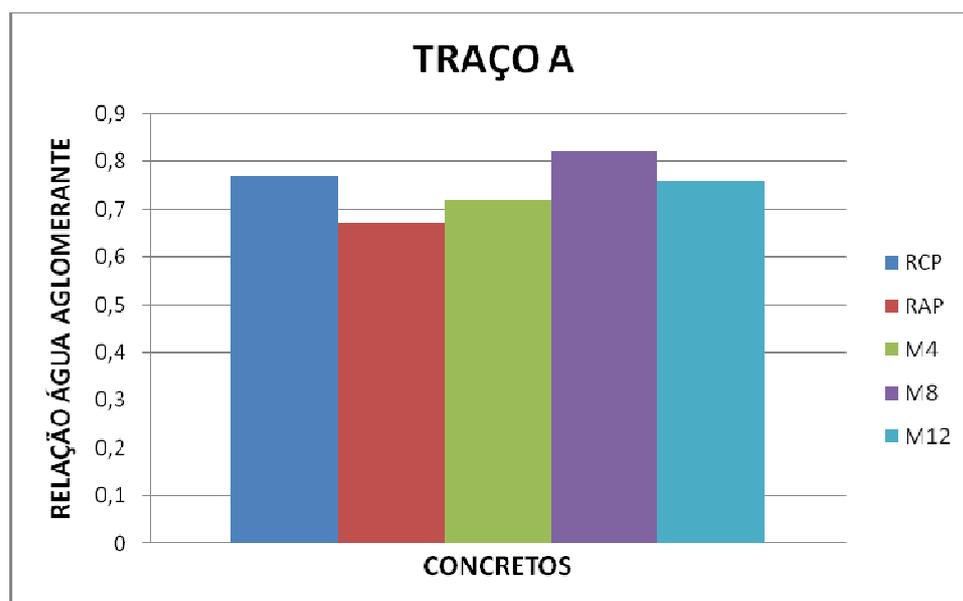
## 7.2 Relação água e aglomerante

Em uma análise geral verifica-se que a substituição de 8 % de cimento por metacaulim propicia valores maiores de relação água e aglomerante. Verificou-se que os três traços (A, B e C) seguiram um padrão na relação água aglomerante onde houve adição de metacaulim. Nos três os valores da relação água e aglomerante foram mais altos para a substituição de 8 %, baixando um pouco para a substituição de 12 % e um pouco mais para a de 4%. A adição utilizada pela concreteira baixou a relação água e aglomerante em todos os traços. Abaixo está descrita a análise de cada um dos traços estudados.

### 1) Traço A

O concreto de referência com cimento puro teve uma relação de água e aglomerante igual a 0,77, tomando-o como base, verificou-se que a substituição de 8 % de cimento por metacaulim provocou um aumento de 6,49 % na relação. Já os concretos com a utilização de adição usual da concreteira e substituição de 4 % e 12 % de cimento por metacaulim apresentaram uma baixa na relação água e aglomerante de 14,92 %, 6,94 % e 1,32 % respectivamente.

**Gráfico 16: Relação água e aglomerante dos concretos do traço A**

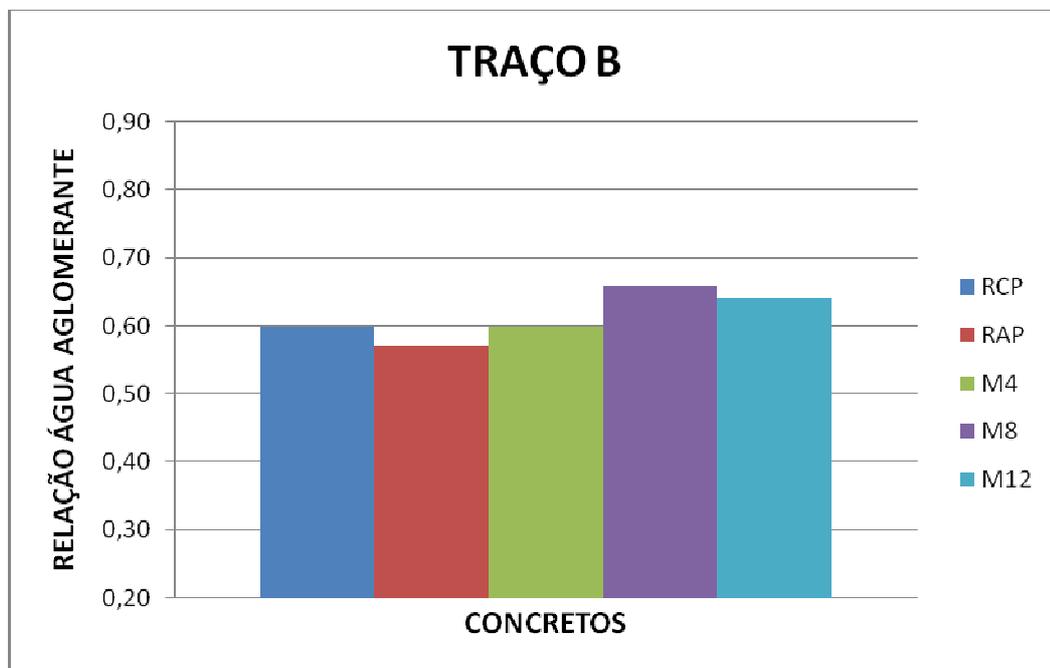


Fonte: Elaborado pelo autor

### 3) Traço B

O concreto de referência com cimento puro teve uma relação de água e aglomerante igual a 0,60, tomando o como base, verificou se que a substituição de 8 % e 12 % de cimento por metacaulim provocou um aumento de 10 % e 6,67 % respectivamente na relação. Já o concreto com a utilização de adição usual da concreteira apresentou uma baixa de 5,26 %. O concreto com substituição de 4 % de cimento por metacaulim manteve a mesma relação água e aglomerante do concreto de referencia com cimento puro.

**Gráfico 17: Relação água e aglomerante dos concretos do traço B**



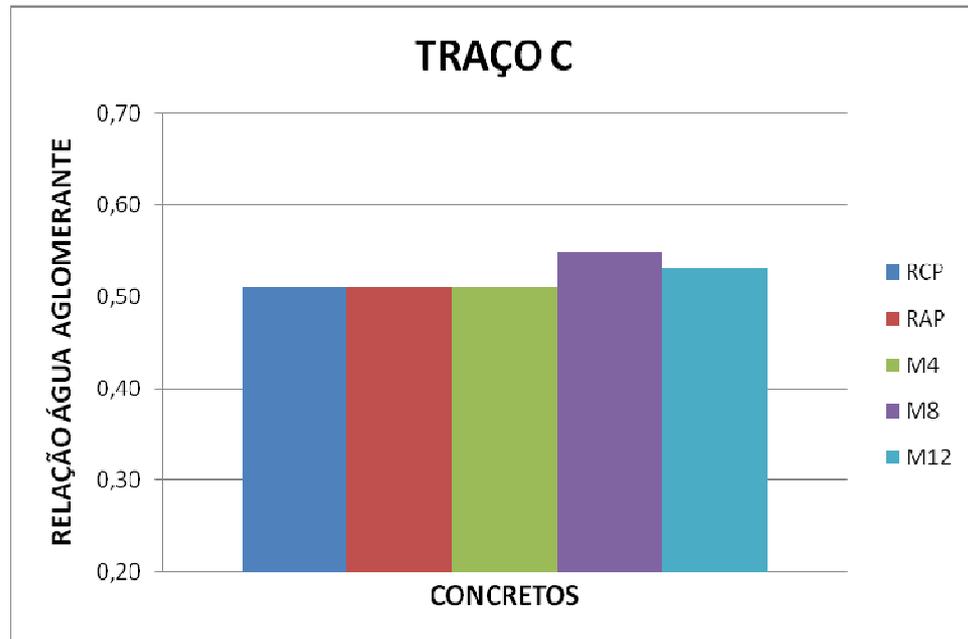
Fonte: Elaborado pelo autor

### 2) Traço C

O concreto de referência com cimento puro teve uma relação de água e aglomerante igual a 0,51, tomando o como base, verificou se que a substituição de 8 % e 12 % de cimento por metacaulim provocou um aumento de 7,84 % e 3,92 % respectivamente na relação. Já o concreto com a utilização de adição usual da concreteira, e concreto com substituição de 4 % de cimento por metacaulim

mantiveram a mesma relação água e aglomerante do concreto de referencia com cimento puro.

**Gráfico 18: Relação água e aglomerante dos concretos do traço C**



Fonte: Elaborado pelo autor

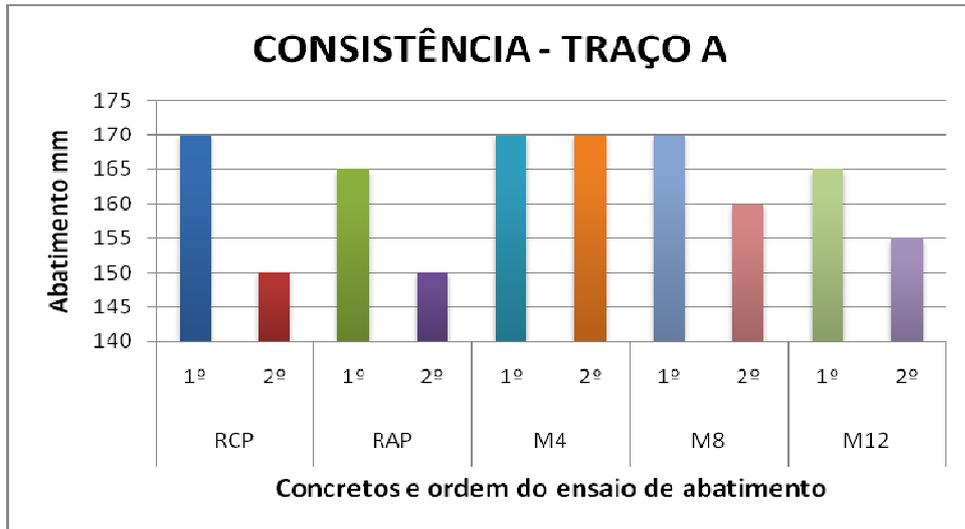
### 7.3 Consistência

Nos três traços estudados o concreto com 4 % de metacaulim manteve a trabalhabilidade, os demais tiveram variações que estão descritas detalhadamente do item 7.3.1 a 7.3.3.

#### 7.3.1 Traço A

Neste traço o único concreto que manteve a trabalhabilidade foi o com substituição de 4 % de cimento por metacaulim, os demais perderam, conforme o gráfico abaixo.

Gráfico 19: Consistência traço A

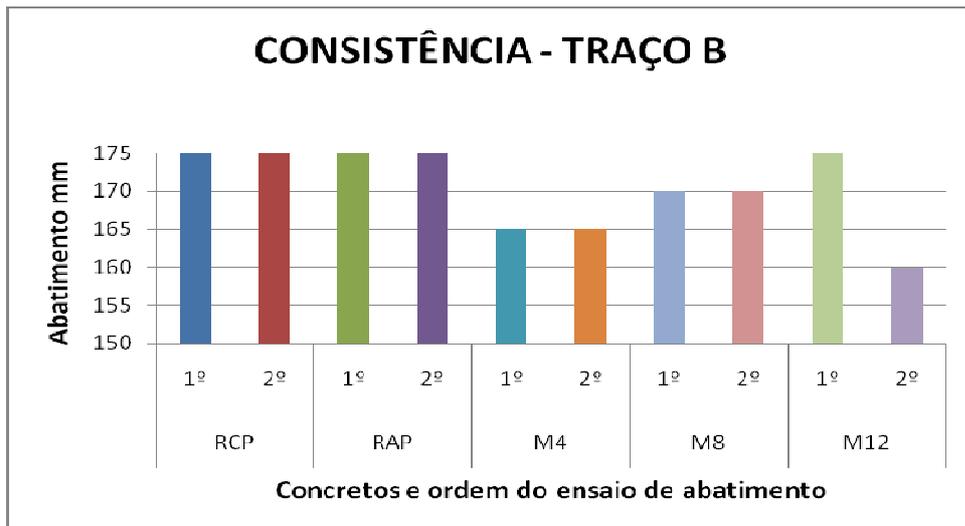


Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.3.2 Traço B

Neste traço o único concreto que não manteve a trabalhabilidade foi o com substituição de 12% de cimento por metacaulim, os demais apresentaram manutenção na trabalhabilidade, conforme demonstra o gráfico abaixo.

Gráfico 20: Consistência traço B

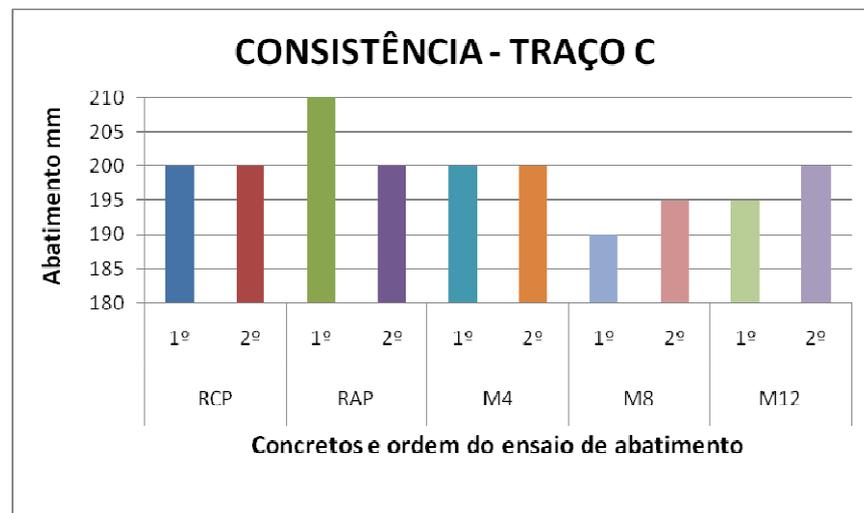


Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.3.3 Traço C

Neste traço o concreto com cimento puro manteve a trabalhabilidade, assim como o com substituição de 4 % de cimento por metacaulim. O concreto com adição usual da concreteira perdeu trabalhabilidade, diferente dos concretos com 8% e 12% de metacaulim que a aumentaram.

**Gráfico 21: Consistência traço C**



Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.4 Diagramas de dosagem

Com os resultados dos ensaios de resistência à compressão e consumo de água dos concretos estudados, foram desenvolvidos diagramas de dosagem que se referem à resistência a compressão x fator água / cimento, resistência a compressão x consumo de cimento, teor de agregados x consumo de cimento e teor de agregados x fator água / cimento. Em todos eles foi determinada a equação que representa a sua reta e também o respectivo erro. O maior erro foi de 0, 875 no diagrama que relaciona à resistência a compressão com o consumo de cimento do concreto com adição de 4 % de metacaulim.

## 7.5 Consumo de materiais segundo resistência característica (fck)

A partir dos diagramas de dosagem foi determinado o consumo de cada material para a obtenção de um metro cúbico de concreto para diferentes classes de resistência característica a compressão (fck), em todos os concretos estudados. Nos diagramas de dosagem deve – se entrar com o valor da resistência média de dosagem calculado por  $f_{ck} + 1,65 \times S_d$ . Sendo o valor de fck o que necessito, e o desvio padrão (Sd) de 3 MPa, usual de concreteiras.

**Quadro 20: Consumo de materiais segundo fck – cimento puro**

f <sub>ck</sub> (MPa)	CONSUMO DE MATERIAIS POR m <sup>3</sup> DE CONCRETO (kg) - CIMENTO PURO								
	Cimento	Pozolana	Areia Ind	Areia Nat	Brita #1	Brita #0	Água	PL- 300	PFW-7025
15	258	0	389	583	700	300	213	1,29	2,58
20	279	0	381	571	700	300	213	1,39	2,79
25	301	0	371	557	700	300	215	1,51	3,01
30	321	0	364	545	700	300	216	1,60	3,21
35	342	0	355	533	700	300	217	1,71	3,42
40	363	0	347	521	700	300	218	1,81	3,63
45	383	0	339	508	700	300	219	1,92	3,83
50	404	0	330	495	700	300	220	2,02	4,04

Fonte: Elaborado pelo autor

**Quadro 21: Consumo de materiais segundo fck – cinza mineral leve**

f <sub>ck</sub> (MPa)	CONSUMO DE MATERIAIS POR m <sup>3</sup> DE CONCRETO (kg) - CINZA MINERAL								
	Cimento	Pozolana	Areia Ind	Areia Nat	Brita #1	Brita #0	Água	PL- 300	PFW-7025
15	178	90	405	607	700	300	184	1,34	2,68
20	195	90	396	595	700	300	186	1,42	2,85
25	213	90	389	584	700	300	188	1,51	3,03
30	230	90	381	572	700	300	189	1,60	3,20
35	249	90	373	560	700	300	190	1,70	3,39
40	267	90	366	550	700	300	191	1,78	3,57
45	282	90	360	540	700	300	192	1,86	3,72
50	302	90	352	528	700	300	193	1,96	3,92

Fonte: Elaborado pelo autor

**Quadro 22: Consumo de materiais segundo fck – 4 % metacaulim**

f <sub>ck</sub> (MPa)	CONSUMO DE MATERIAIS POR m <sup>3</sup> DE CONCRETO (kg) - 4 % METACAULIM								
	Cimento	Pozolana	Areia Ind	Areia Nat	Brita #1	Brita #0	Água	PL- 300	PFW-7025
15	215	9	425	637	700	300	190	1,12	2,24
20	231	10	417	625	700	300	192	1,20	2,40
25	253	11	402	604	700	300	198	1,32	2,64
30	278	12	388	582	700	300	203	1,45	2,90
35	301	13	378	567	700	300	204	1,57	3,14
40	325	14	366	549	700	300	207	1,70	3,39
45	351	15	353	530	700	300	210	1,83	3,66
50	379	16	342	513	700	300	211	1,97	3,95

Fonte: Elaborado pelo autor

**Quadro 23: Consumo de materiais segundo fck – 8 % metacaulim**

f <sub>ck</sub> (MPa)	CONSUMO DE MATERIAIS POR m <sup>3</sup> DE CONCRETO (kg) - 8 % METACAULIM								
	Cimento	Pozolana	Areia Ind	Areia Nat	Brita #1	Brita #0	Água	PL- 300	PFW-7025
15	241	21	384	577	700	300	214	1,31	2,62
20	260	23	376	564	700	300	216	1,41	2,82
25	278	24	367	551	700	300	217	1,51	3,02
30	296	26	359	538	700	300	219	1,61	3,22
35	315	27	350	525	700	300	220	1,71	3,42
40	333	29	342	513	700	300	221	1,81	3,62
45	352	31	334	501	700	300	222	1,91	3,82
50	373	32	325	487	700	300	223	2,03	4,05

Fonte: Elaborado pelo autor

**Quadro 24: Consumo de materiais segundo fck – 12 % metacaulim**

f <sub>ck</sub> (MPa)	CONSUMO DE MATERIAIS POR m <sup>3</sup> DE CONCRETO (kg) - 12% METACAULIM								
	Cimento	Pozolana	Areia Ind	Areia Nat	Brita #1	Brita #0	Água	PL- 300	PFW-7025
15	225	31	397	595	700	300	204	1,28	2,55
20	242	33	389	584	700	300	205	1,38	2,75
25	260	36	381	572	700	300	206	1,48	2,96
30	278	38	373	559	700	300	207	1,58	3,16
35	296	40	364	546	700	300	208	1,68	3,37
40	314	43	355	533	700	300	209	1,78	3,56
45	332	45	346	519	700	300	211	1,88	3,77
50	352	48	335	503	700	300	214	2,00	4,00

Fonte: Elaborado pelo autor

## 7.6 Custos de produção

A partir do preço dos materiais e do consumo em cada tipo de concreto segundo uma faixa de resistência característica, foi determinado os custos de produção para um metro cúbico. Com o estudo pode-se verificar que a adição que propicia maiores ganhos econômicos é a cinza mineral leve (Silmin), adição usual da concreteira.

**Quadro 25: Preço dos materiais**

R\$/Kg	
CIMENTO	R\$ 0,39
METACAULIM	R\$ 0,93
SILMIN	R\$ 0,15
PL-300	R\$ 2,45
PFW - 7025	R\$ 7,00
A. NATURAL	R\$ 0,04
A. INDUSTRIAL	R\$ 0,025
BRITAS	R\$ 0,03

Fonte: Fornecedores de insumos da concreteira

**Quadro 26: Custos em relação ao fck – cimento puro**

f <sub>ck</sub> (MPa)	CUSTOS DE MATERIAIS POR m <sup>3</sup> DE CONCRETO (R\$) - CIMENTO PURO								TOTAL
	Cimento	Pozolana	Areia Ind	Areia Nat	Brita #1	Brita #0	PL- 300	PFW-7025	
15	100,58	0,00	9,72	23,34	21,01	9,00	3,16	18,05	184,86
20	108,79	0,00	9,52	22,85	21,01	9,00	3,42	19,53	194,13
25	117,48	0,00	9,28	22,27	20,99	9,00	3,69	21,09	203,80
30	125,14	0,00	9,09	21,82	21,00	9,00	3,93	22,46	212,44
35	133,19	0,00	8,88	21,32	21,00	9,00	4,18	23,91	221,50
40	141,46	0,00	8,68	20,82	21,01	9,00	4,44	25,39	230,81
45	149,50	0,00	8,47	20,33	21,01	9,01	4,70	26,83	239,85
50	157,50	0,00	8,26	19,81	21,00	9,00	4,95	28,27	248,78

Fonte: Elaborado pelo autor

**Quadro 27: Custos em relação ao fck – cinza mineral leve**

$f_{ck}$	CUSTOS DE MATERIAIS POR m <sup>3</sup> DE CONCRETO (R\$) - CINZA MINERAL								TOTAL
(MPa)	Cimento	Pozolana	Areia Ind	Areia Nat	Brita #1	Brita #0	PL- 300	PFW-7025	
15	69,59	13,48	10,12	24,30	21,00	9,00	3,29	18,78	169,57
20	76,00	13,44	9,91	23,79	21,01	9,00	3,49	19,92	176,56
25	82,94	13,48	9,73	23,34	21,00	9,00	3,71	21,18	184,36
30	89,66	13,54	9,53	22,87	21,01	9,00	3,92	22,41	191,95
35	97,25	13,49	9,34	22,41	21,00	9,00	4,16	23,75	200,38
40	104,08	13,49	9,16	21,98	21,00	9,00	4,37	24,98	208,06
45	110,11	13,52	9,00	21,60	20,99	9,00	4,56	26,07	214,86
50	117,64	13,51	8,81	21,13	20,99	9,00	4,80	27,42	223,31

Fonte: Elaborado pelo autor

**Quadro 28: Custos em relação ao fck – 4 % metacaulim**

$f_{ck}$	CUSTOS DE MATERIAIS POR m <sup>3</sup> DE CONCRETO (R\$) - 4 % METACULIM								TOTAL
(MPa)	Cimento	Pozolana	Areia Ind	Areia Nat	Brita #1	Brita #0	PL- 300	PFW-7025	
15	83,88	8,33	10,61	25,47	21,00	9,00	2,74	15,68	176,73
20	89,95	8,94	10,42	25,02	20,99	9,00	2,94	16,82	184,09
25	98,81	9,82	10,06	24,14	21,00	9,00	3,23	18,47	194,54
30	108,47	10,78	9,70	23,28	21,00	9,00	3,55	20,28	206,05
35	117,49	11,67	9,46	22,70	21,00	9,00	3,84	21,97	217,13
40	126,94	12,61	9,16	21,98	21,00	9,00	4,15	23,73	228,58
45	136,89	13,60	8,83	21,20	20,99	9,00	4,48	25,59	240,59
50	147,77	14,68	8,55	20,52	21,00	9,00	4,83	27,63	253,98

Fonte: Elaborado pelo autor

**Quadro 29: Custos em relação ao fck – 8 % metacaulim**

$f_{ck}$	CUSTOS DE MATERIAIS POR m <sup>3</sup> DE CONCRETO (R\$) - 8 % METACULIM								TOTAL
(MPa)	Cimento	Pozolana	Areia Ind	Areia Nat	Brita #1	Brita #0	PL- 300	PFW-7025	
15	93,84	19,46	9,61	23,07	21,01	9,00	3,20	18,31	197,50
20	101,27	21,00	9,39	22,55	20,99	9,00	3,46	19,76	207,42
25	108,35	22,47	9,18	22,02	21,00	9,00	3,70	21,14	216,85
30	115,36	23,92	8,96	21,51	21,01	9,00	3,94	22,51	226,23
35	122,76	25,46	8,75	21,00	21,00	9,00	4,19	23,95	236,11
40	129,80	26,91	8,56	20,54	21,00	9,00	4,43	25,32	245,56
45	137,15	28,44	8,35	20,04	21,00	9,00	4,68	26,76	255,41
50	145,39	30,15	8,12	19,48	20,99	9,00	4,96	28,36	266,45

Fonte: Elaborado pelo autor

**Quadro 30: Custos em relação ao fck – 12 % metacaulim**

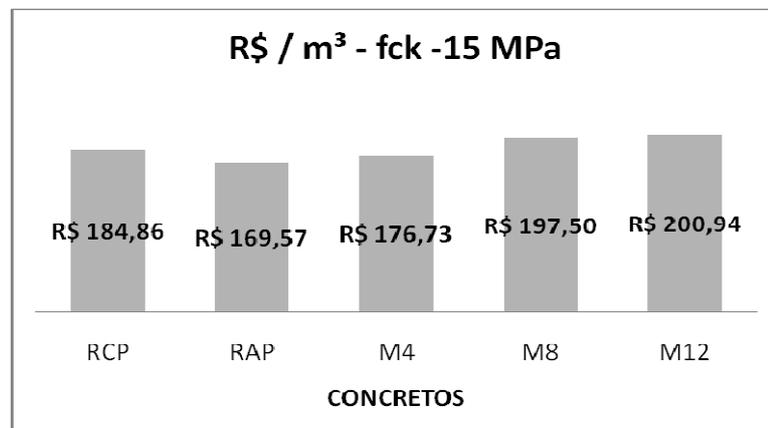
f <sub>ck</sub> (MPa)	CUSTOS DE MATERIAIS POR m <sup>3</sup> DE CONCRETO (R\$) - 12 % METACALIM								TOTAL
	Cimento	Pozolana	Areia Ind	Areia Nat	Brita #1	Brita #0	PL- 300	PFW-7025	
15	87,67	28,51	9,92	23,81	21,01	9,00	3,13	17,88	200,94
20	94,45	30,71	9,73	23,34	21,01	9,00	3,37	19,26	210,88
25	101,55	33,02	9,53	22,88	20,99	9,00	3,62	20,71	221,31
30	108,35	35,23	9,32	22,36	21,01	9,00	3,87	22,10	231,24
35	115,62	37,60	9,10	21,85	21,00	9,00	4,13	23,58	241,88
40	122,33	39,78	8,89	21,33	21,01	9,00	4,37	24,95	251,65
45	129,36	42,06	8,66	20,77	21,01	9,00	4,62	26,38	261,86
50	137,14	44,60	8,38	20,11	21,01	9,00	4,90	27,97	273,10

Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir estão os valores e a análise econômica de cada concreto em relação a faixas de resistência característica (fck). As análises foram todas realizadas em relação ao concreto de referencia (RCP).

### 7.6.1 Concreto de 15 MPa

O concreto com adição de cinza mineral leve (Silmin) apresentou economia de 9,02 %. A adição de 4 % metacaulim propiciou economia de 4,60 %, enquanto que as de 8 % e 12 % aumentaram o valor em 6,83 % e 8,70 % respectivamente.

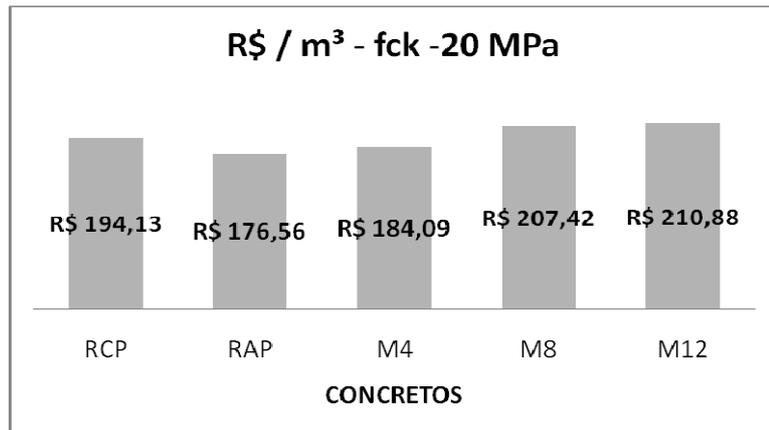
**Gráfico 22: Custos do concreto de fck 15 MPa**

Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.6.2 Concreto de 20 MPa

O concreto com adição de cinza mineral leve (Silmin) apresentou economia de 9,95 %. A adição de 4 % metacaulim propiciou economia de 5,45 %, enquanto que as de 8 % e 12 % aumentaram o valor em 6,85 % e 8,63 % respectivamente.

**Gráfico 23: Custos do concreto de fck 20 MPa**

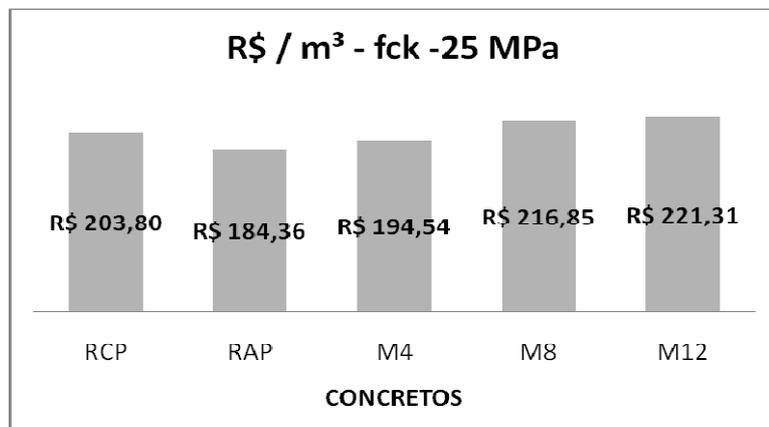


Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.6.3 Concreto de 25 MPa

O concreto com adição de cinza mineral leve (Silmin) apresentou economia de 10,54 %. A adição de 4 % metacaulim propiciou economia de 4,76 %, enquanto que as de 8 % e 12 % aumentaram o valor em 6,40 % e 8,59 % respectivamente.

**Gráfico 24: Custos do concreto de fck 25 MPa**

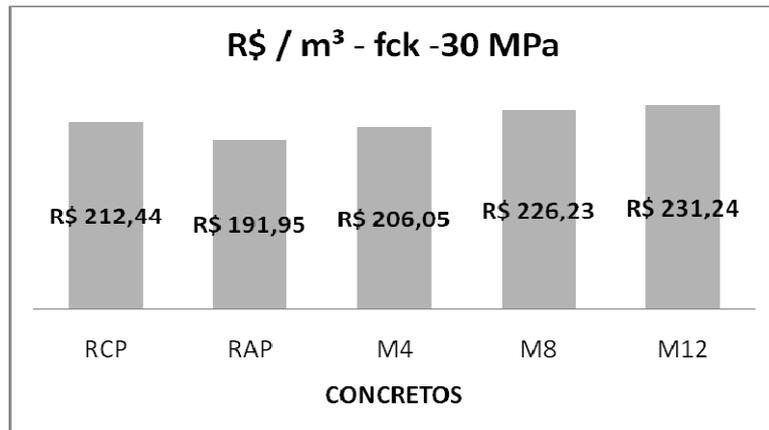


Fonte: Elaborado pelo autor

#### 7.6.4 Concreto de 30 MPa

O concreto com adição de cinza mineral leve (Silmin) apresentou economia de 10,67 %. A adição de 4 % metacaulim propiciou economia de 3,10 %, enquanto que as de 8 % e 12 % aumentaram o valor em 6,49 % e 8,85 % respectivamente.

**Gráfico 25: Custos do concreto de fck 30 MPa**

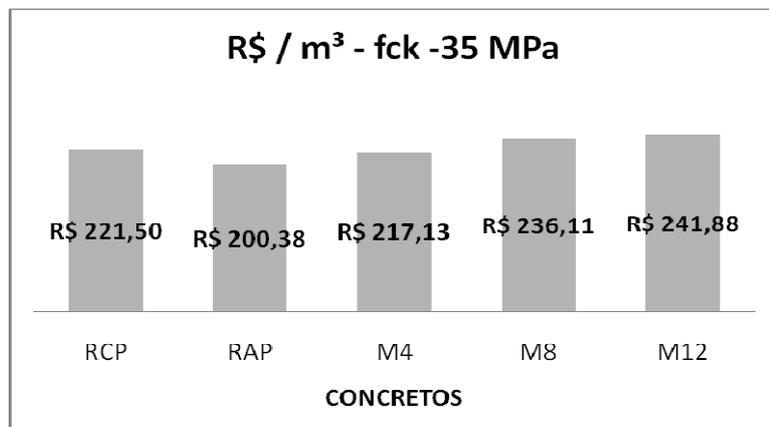


Fonte: Elaborado pelo autor

#### 7.6.5 Concreto de 35 MPa

O concreto com adição de cinza mineral leve (Silmin) apresentou economia de 5,55 %. A adição de 4 % metacaulim propiciou economia de 2,01 %, enquanto que as de 8 % e 12 % aumentaram o valor em 6,60 % e 9,20 % respectivamente.

**Gráfico 26: Custos do concreto de fck 35 MPa**

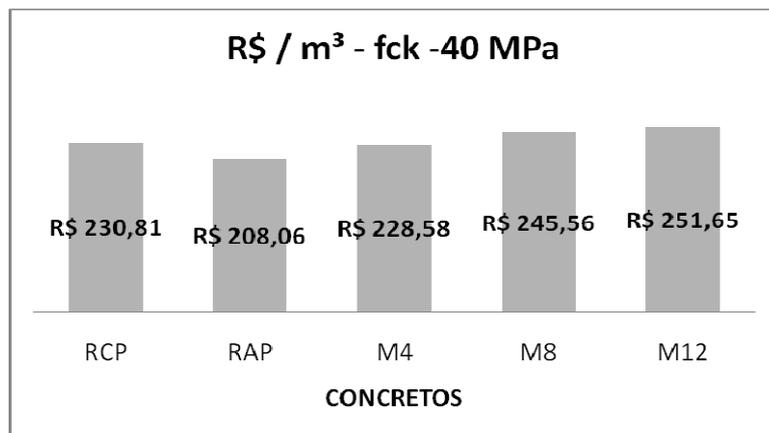


Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.6.6 Concreto de 40 MPa

O concreto com adição de cinza mineral leve (Silmin) apresentou economia de 10,93 %. A adição de 4 % metacaulim propiciou economia de 0,98 %, enquanto que as de 8 % e 12 % aumentaram o valor em 6,40 % e 9,03 % respectivamente.

**Gráfico 27: Custos do concreto de fck 40 MPa**

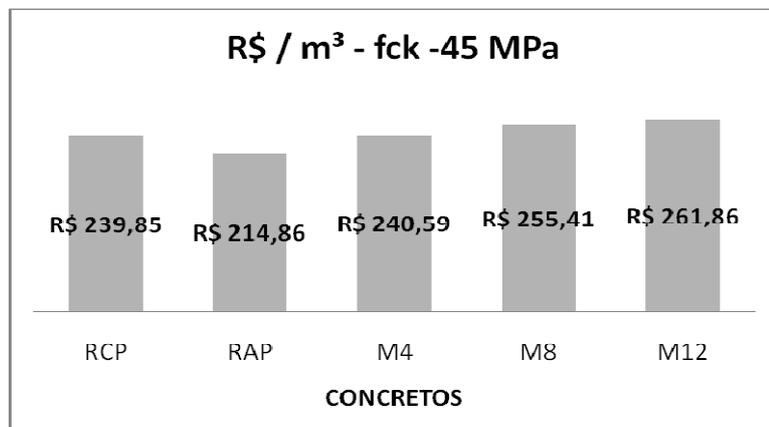


Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.6.7 Concreto de 45 MPa

O concreto com adição de cinza mineral leve (Silmin) apresentou economia de 11,63 %. As adições de metacaulim propiciaram aumentos de 0,31 %, 6,49 % e 9,18 %, para os concretos com adição de 4 %, 8 % e 12 % respectivamente.

**Gráfico 28: Custos do concreto de fck 45 MPa**

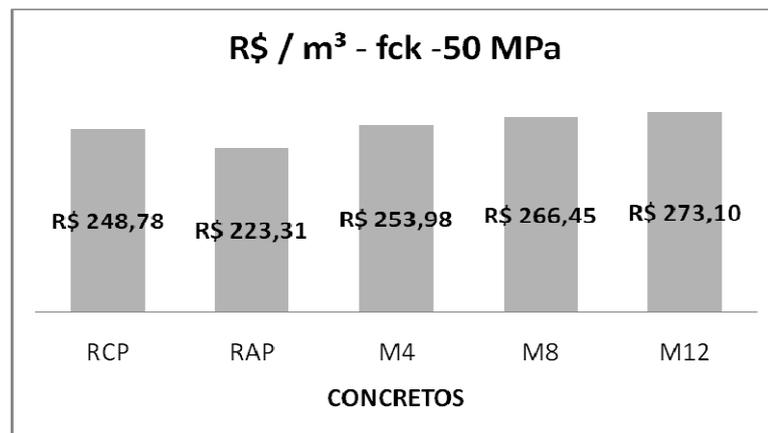


Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.6.8 Concreto de 50 MPa

O concreto com adição de cinza mineral leve (Silmin) apresentou economia de 11,41 %. As adições de metacaulim propiciaram aumentos de 2,09 %, 7,10 % e 9,78 %, para os concretos com adição de 4 %, 8 % e 12 % respectivamente.

**Gráfico 29: Custos do concreto de fck 50 MPa**



Fonte: Elaborado pelo autor

## 8 CONCLUSÕES

A utilização de metacaulim em concreto dosado em central economicamente não se torna atrativa se comparada com a utilização de cinza mineral leve, na idade de 28 dias de cura. A sua utilização só se torna viável se não houver disponibilidade da cinza mineral, em substituição de 4 % em massa de cimento, para concretos com fck de 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa. Em concretos com fck de 45 MPa e 50 MPa é mais econômico apenas a utilização de cimento. As adições de 8 % e 12 % não são viáveis economicamente, pois aumentam o custo de produção em média 6,70 % e 8,99 % respectivamente.

Quanto ao desempenho a utilização de 4 % de metacaulim propiciou maiores resistências à compressão em todas as idades analisadas, se destacando na aceleração do ganho de resistência principalmente aos 3 e 7 dias de cura, nos concretos com maior consumo de cimento (traços B e C). Portanto o seu uso quando há necessidade de resistência inicial mais elevada se torna viável, podendo ser usado, por exemplo, em empresas de pré fabricados que tem alto consumo de cimento em seus traços. Aos 28 dias de cura as resistências a compressão praticamente se igualaram exceto no concreto com adição de 4 % de metacaulim que teve uma evolução superior. A equivalência da resistência aos 28 dias de cura ocorre devido à maior produção de hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, e conseqüente mais reação deste com as adições pozolânicas utilizadas.

Aos 56 dias de cura houve pouca evolução de resistência comparada aos 28 dias, pois a geração de hidróxido de cálcio para a reação com as adições pozolânicas utilizadas já é mais lenta. Há de destacar que a produção de hidróxido de cálcio no concreto ocorre durante anos, e havendo alguma pozolana em sua composição há de haver algum ganho na resistência, que mesmo sendo baixo pode inibir o efeito da fluência nas estruturas de concreto armado.

Outro fator relacionado ao desempenho é a manutenção da consistência com a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes de pega normal. A betoneira ao ficar em repouso durante meia hora equivale há duas horas e meia dentro do caminhão betoneira. Dentre os concretos estudados o que apresentou

melhor manutenção de trabalhabilidade foi o com adição de 4 % de metacaulim que a manteve nos três traços. Nos demais concretos e em seus respectivos traços o uso dos aditivos não seguiu um padrão, porém o que pode ser notado foi que com maior consumo de cimento houve melhor manutenção de consistência.

## **9 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Como indicação para trabalhos futuros sugiro a realização de outro estudo semelhante a este com a utilização de cimento CP V. Também é de grande valor dar continuidade a este realizando as mesmas dosagens de concretos e ensaios além do de compressão axial, como retração por secagem, absorção de água e índice de vazios, penetração de cloretos e módulo de elasticidade.

## REFERÊNCIAS

ABCP. Desenvolvido pela associação brasileira de cimento portland. *Apresenta informações sobre os tipos de cimento portland*. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro/>>. Acesso em 16 ago. 2016.

ALBUQUERQUE, Paulo Henrique Laporte. *Materiais de construção*. São Paulo: Pini, 2012.

AMBROZEWICK, Alexandre Serpa. Agregados. In: L.A FALCÃO BAUER. *Materiais de construção*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000, p.63 – 120.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655: Concreto de cimento portland – preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento*. Rio de Janeiro, 2015.

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

\_\_\_\_\_. *NBR 5737: Cimentos portland resistente a sulfatos*. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. *NBR5738: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. . Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. *NBR5739: Concreto – ensaio de compressão de corpo de provas cilíndricos* . Rio de Janeiro, 2007.

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

HELENE, Paulo R. L. *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo: Pini, 1993.

eCycle. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/35/1569-processo-de-producao-do-cimento-gera-emissoes-e-pode-diminuir-biodiversidade.html>>. Acesso em: 05 de novembro de 2016.

MEDINA, Engler Apaza. *Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento portland e hidróxido de cálcio*. 2011. 151 f. Dissertação – Universidade de São Paulo, 2011.

MEHTA, Povindar Kumar. *Concreto: estrutura, propriedade e materiais*. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

NEVILLE, Adam M. *Propriedades do concreto*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

OLIVEIRA, Helio Martins. Cimento Portland. In: L.A FALCÃO BAUER. *Materiais de construção*. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC,2000, p.35 – 62.

Poli/USP. *Estudo da influência do MetacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento portland*. Relatório final desenvolvido para a empresa METACAULIM do Brasil Indústria e Comércio Ltda. São Paulo, 2003.

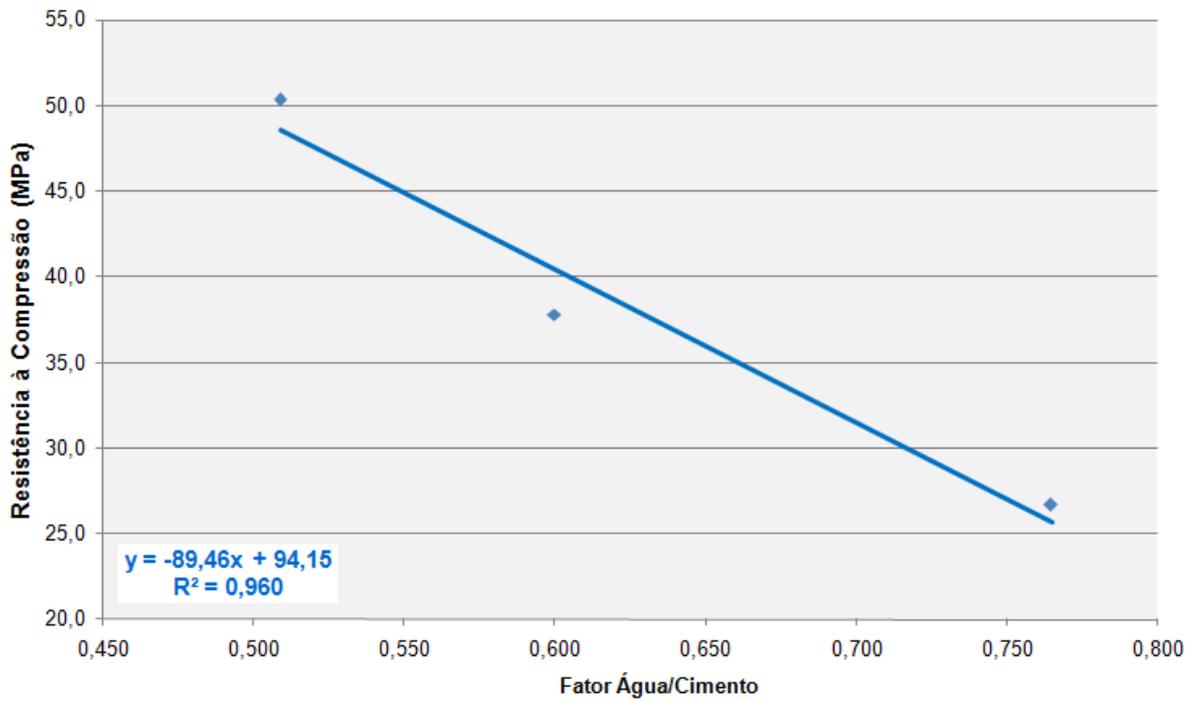
REVISTA CONCRETO & CONSTRUÇÕES. São Paulo: Ipsis gráfica e editora, 2009 -. Trimestral.

ROCHA, Guilherme Gallo Neves. *Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade*. 2005. 96 f. Dissertação – Universidade federal de Minas Gerais, 2005.

SOUZA, Paulo Sérgio Lima. *Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência*. 2003. 203 f. Tese – Universidade federal do Rio Grande do Sul, 2003.

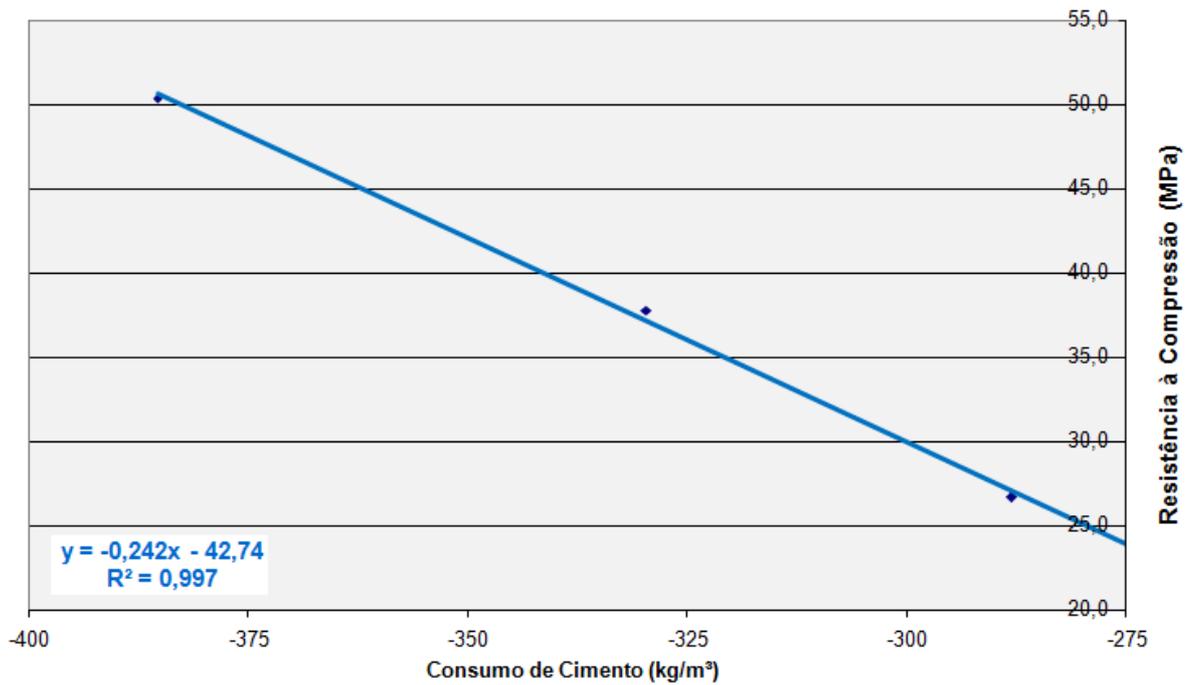
## ANEXO A

### ANEXO A.1 - Resistência à compressão x Fator água / cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

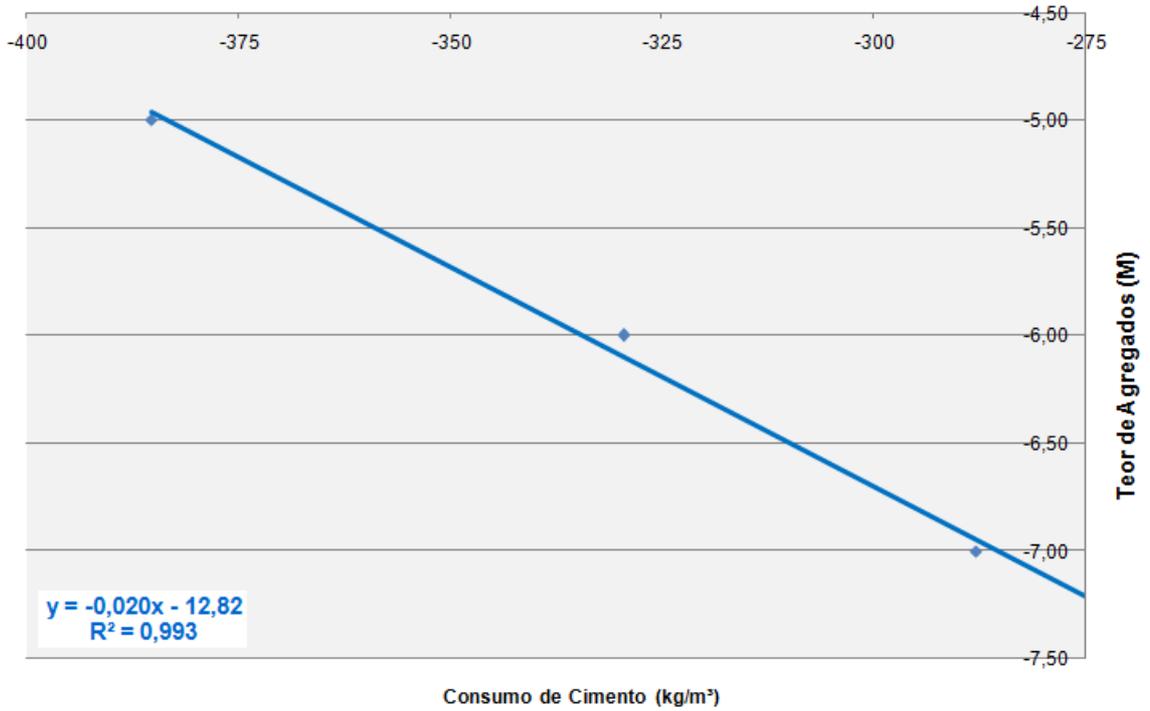
### ANEXO A.2 - Resistência à compressão x Consumo de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

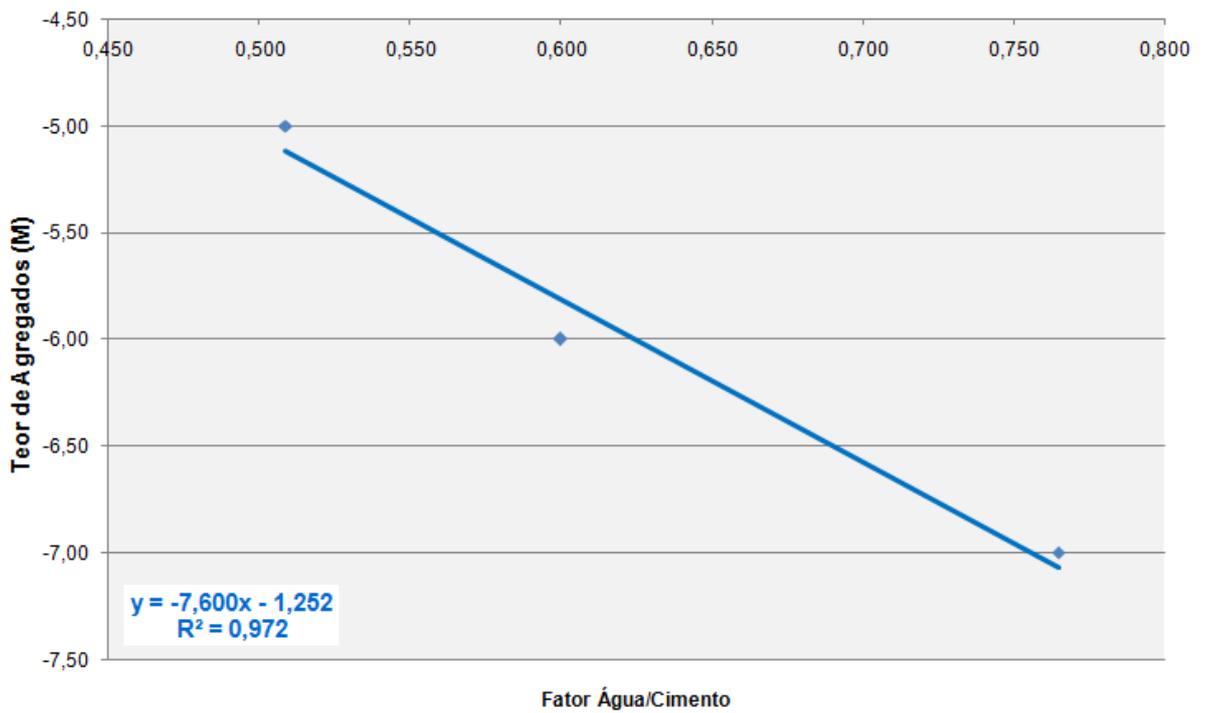
### ANEXO B

#### ANEXO B.1 - Teor de agregados x consumo de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

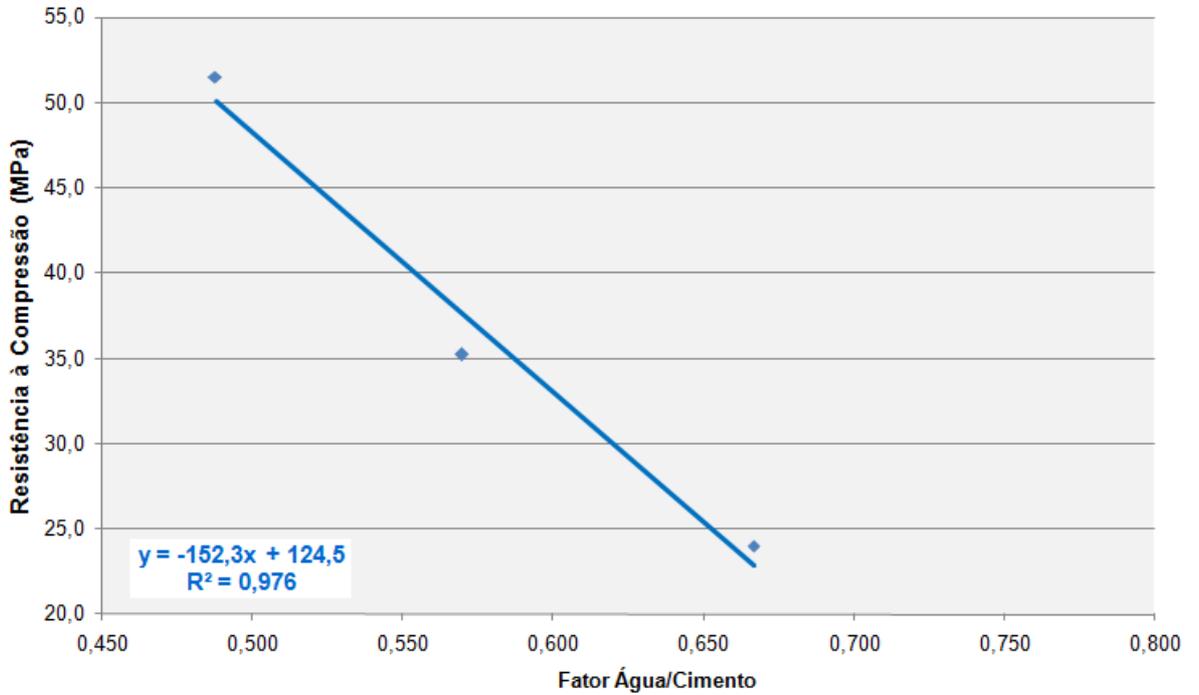
#### ANEXO B.2 - Teor de agregados x Fator água / cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

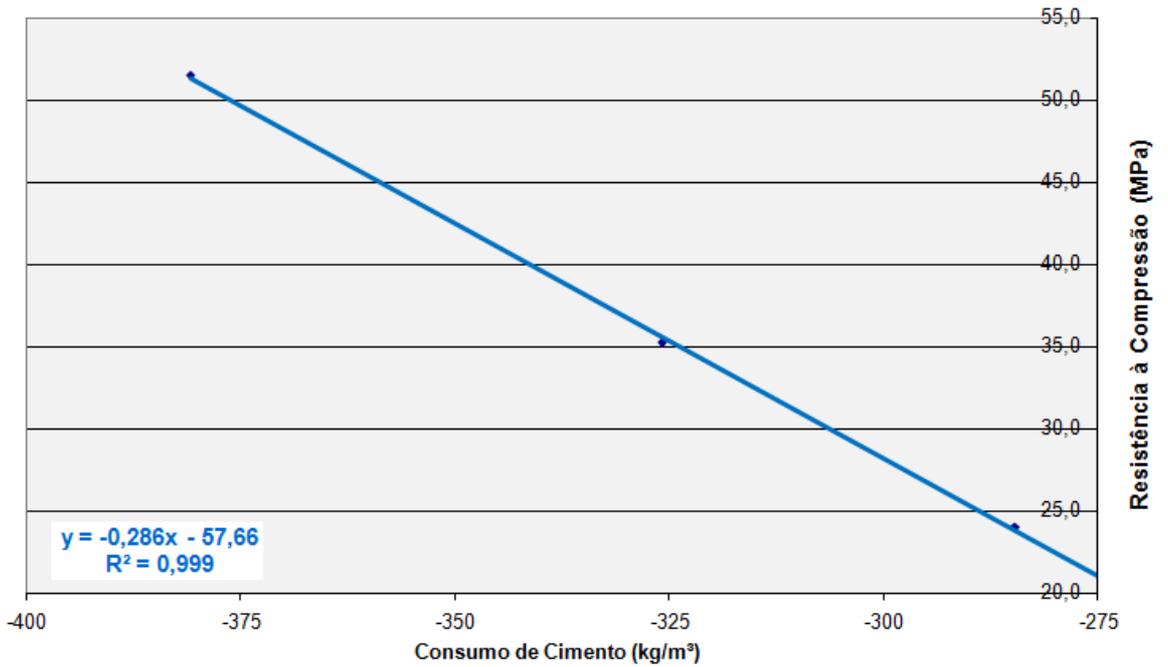
### ANEXO C

#### ANEXO C.1 - Resistência à compressão x Fator água / cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

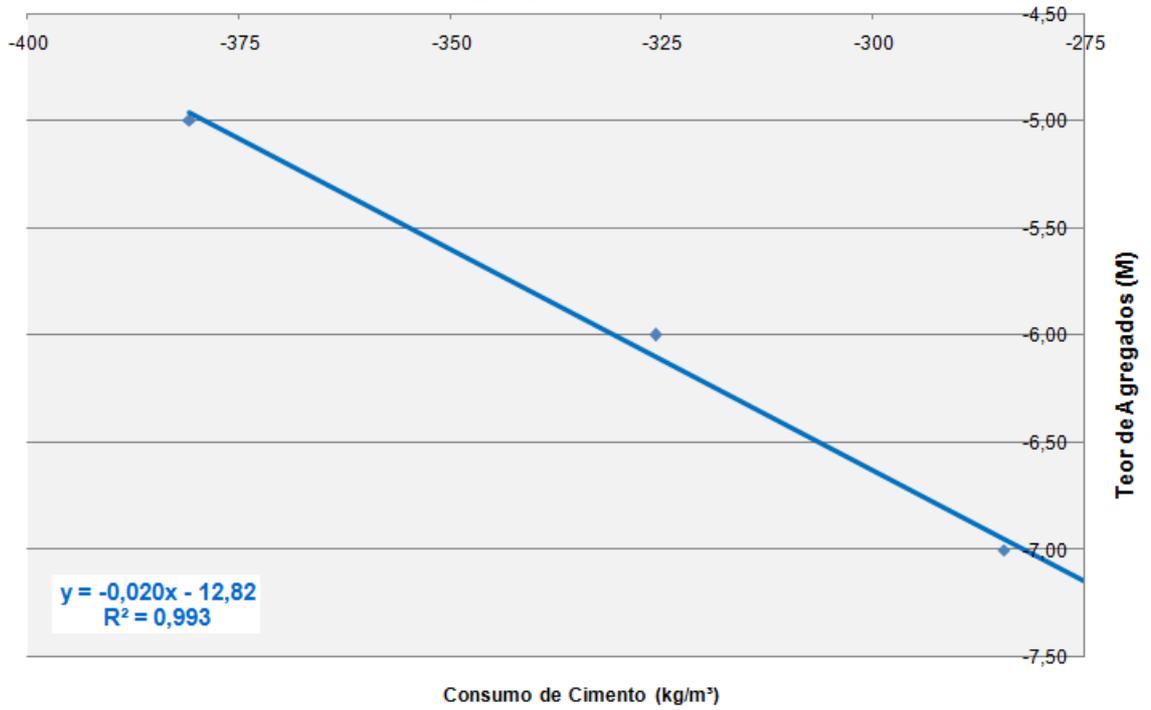
#### ANEXO C.2 - Resistência à compressão x Consumo de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

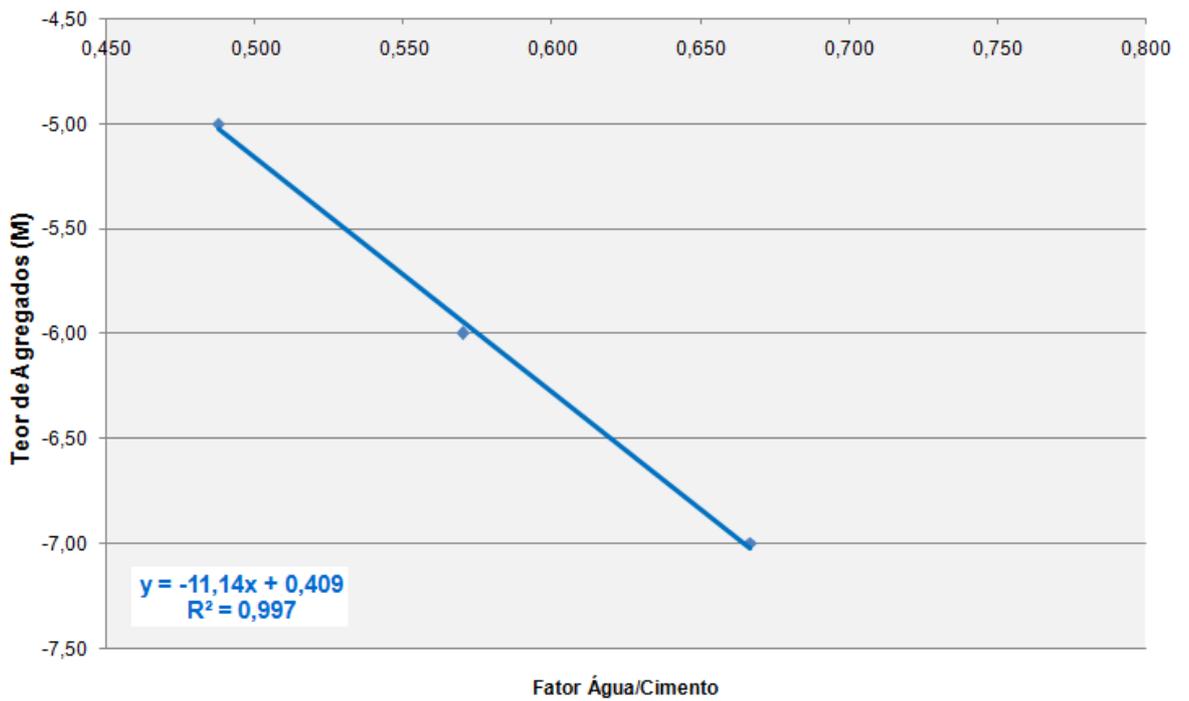
## ANEXO D

### ANEXO D.1: Teor de agregados x consumo de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

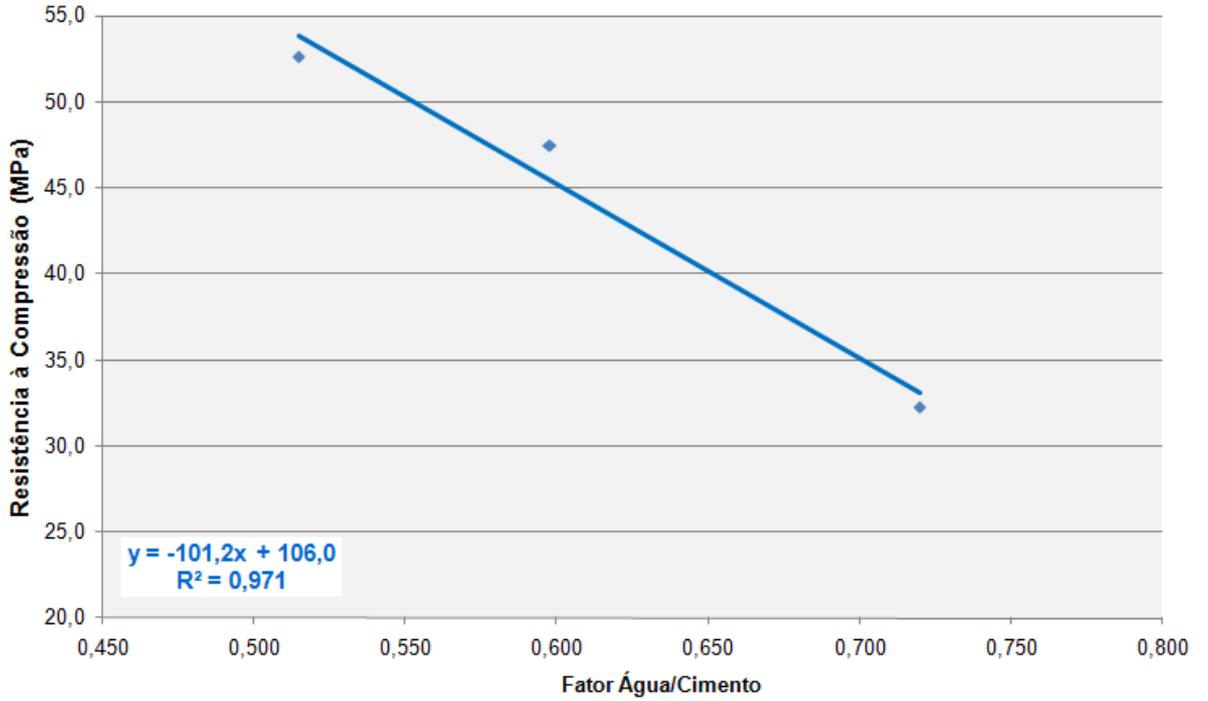
### ANEXO D.2: Teor de agregados x Fator água / cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

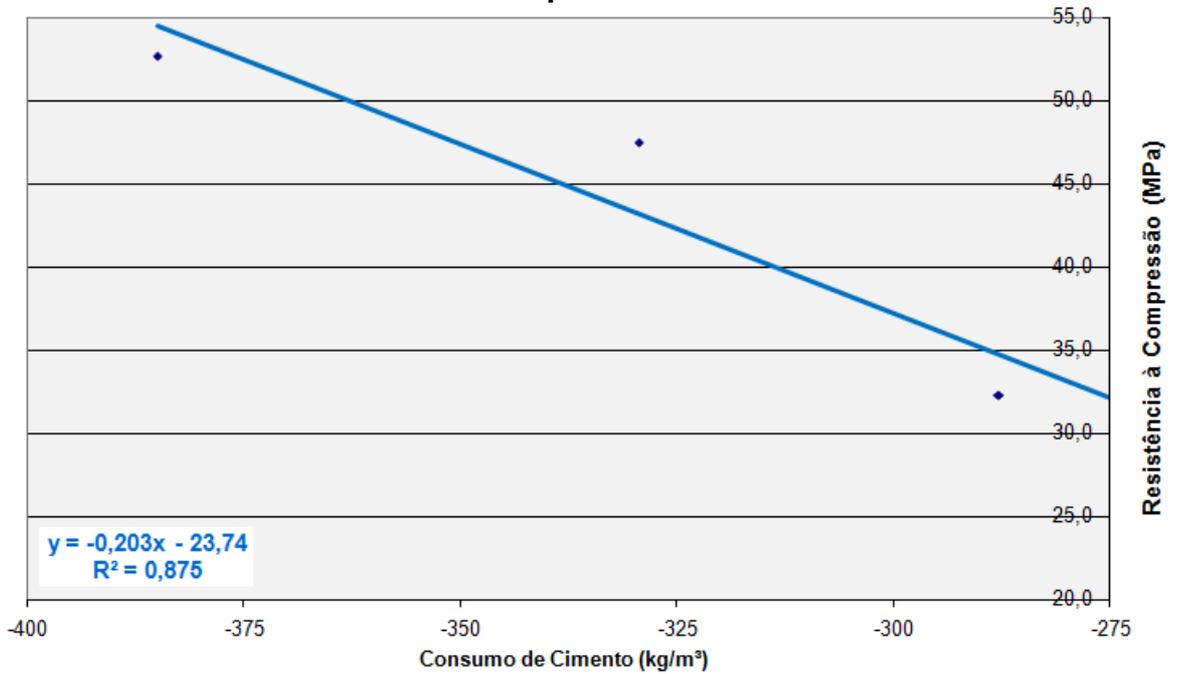
### ANEXO E

#### ANEXO E.1: Resistência à compressão x Fator água / cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

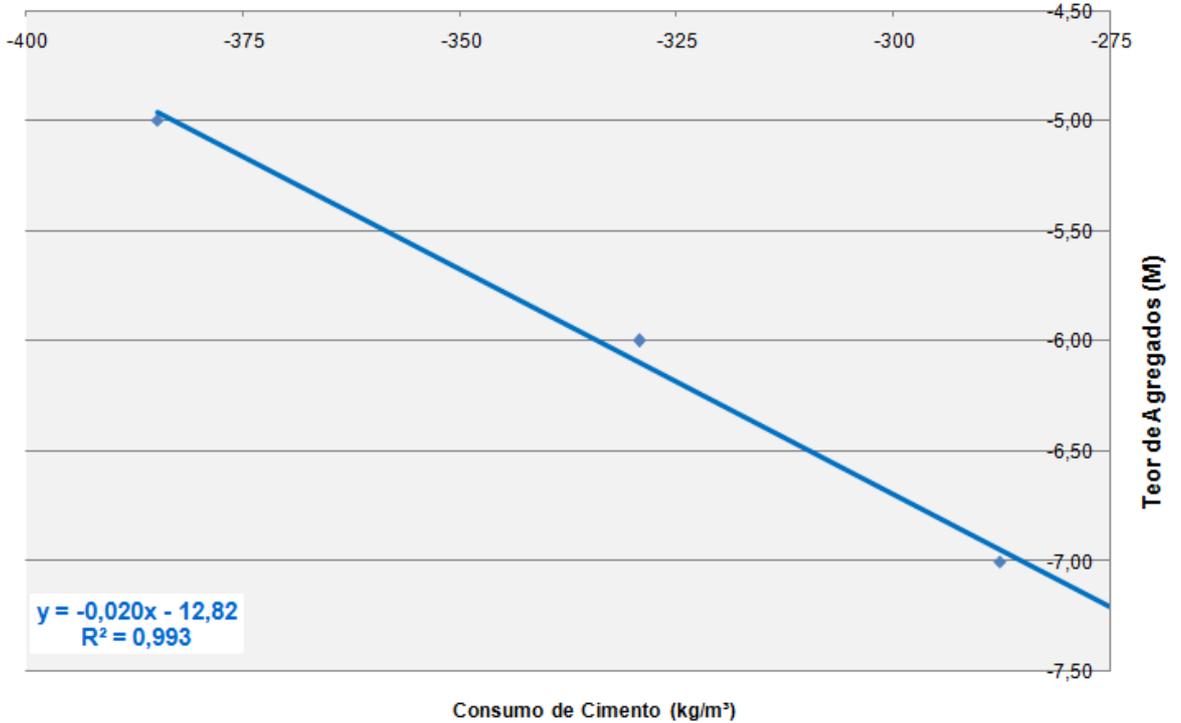
#### ANEXO E.2: Resistência à compressão x Consumo de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

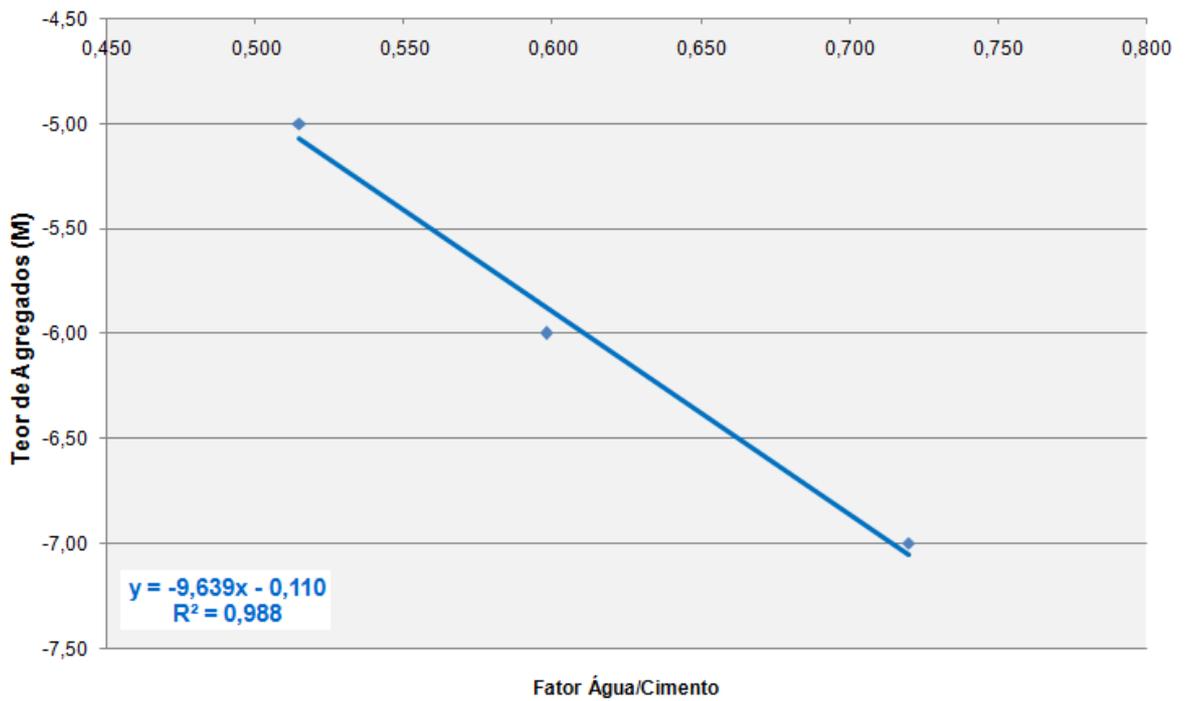
### ANEXO F

#### ANEXO F.1: Teor de agregados x consumo de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

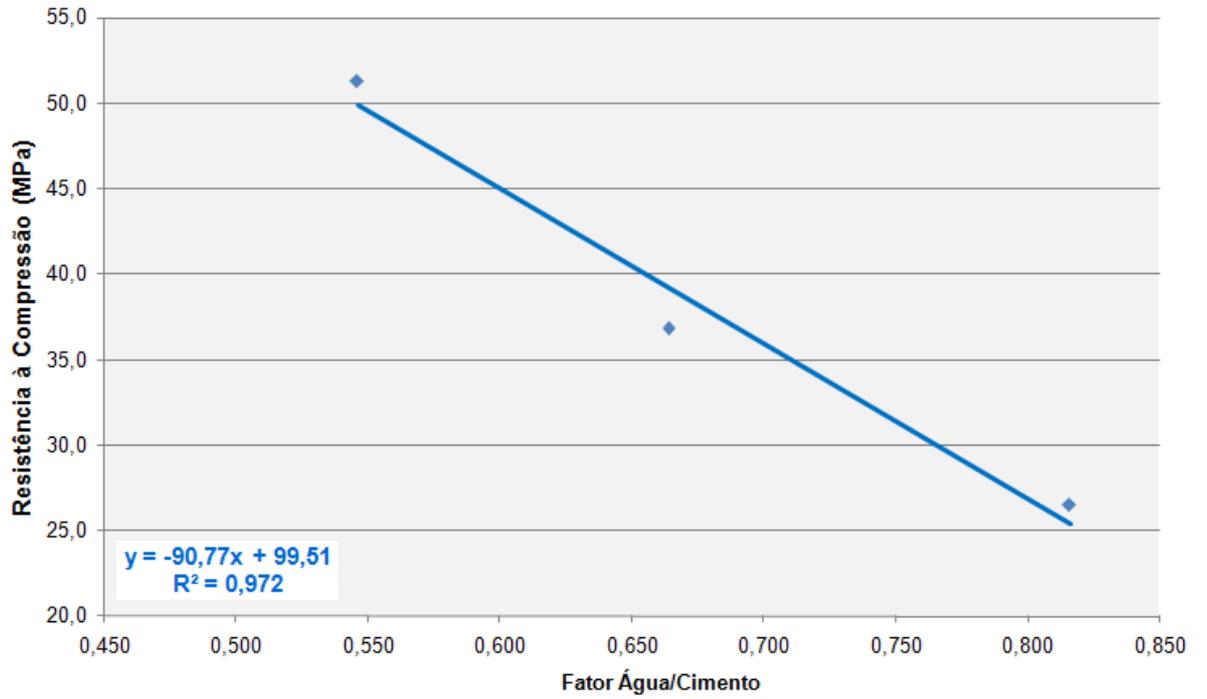
#### ANEXO F.2: Teor de agregados x Fator água / cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

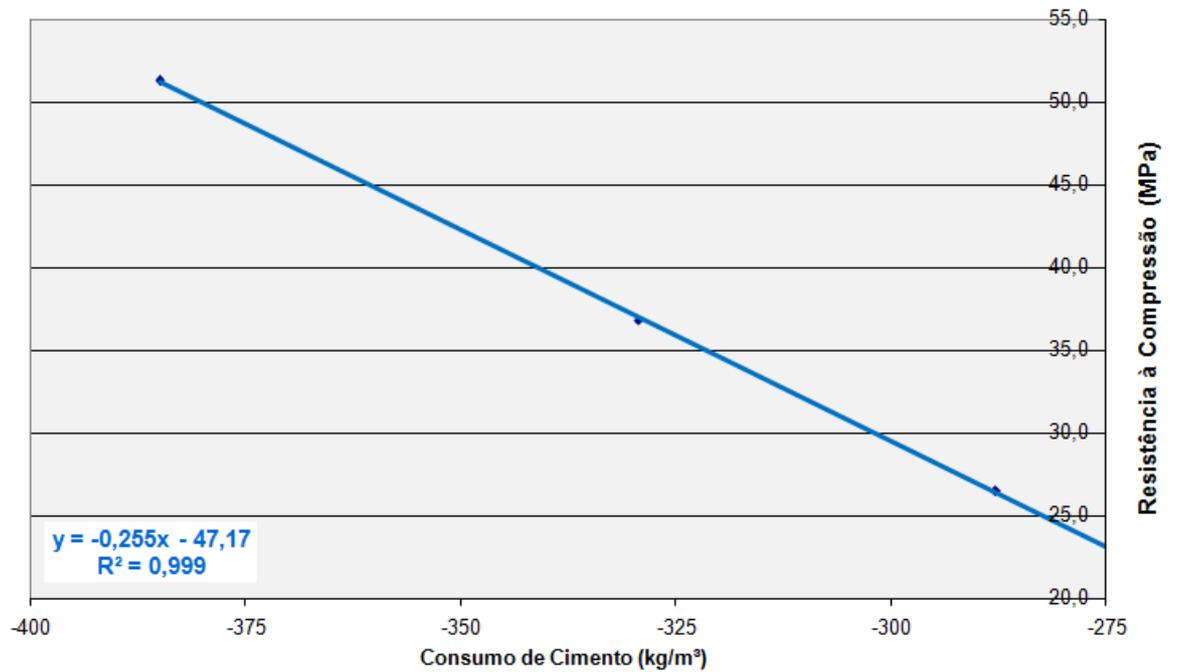
## ANEXO G

### ANEXO G.1: Resistência à compressão x Fator água / cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

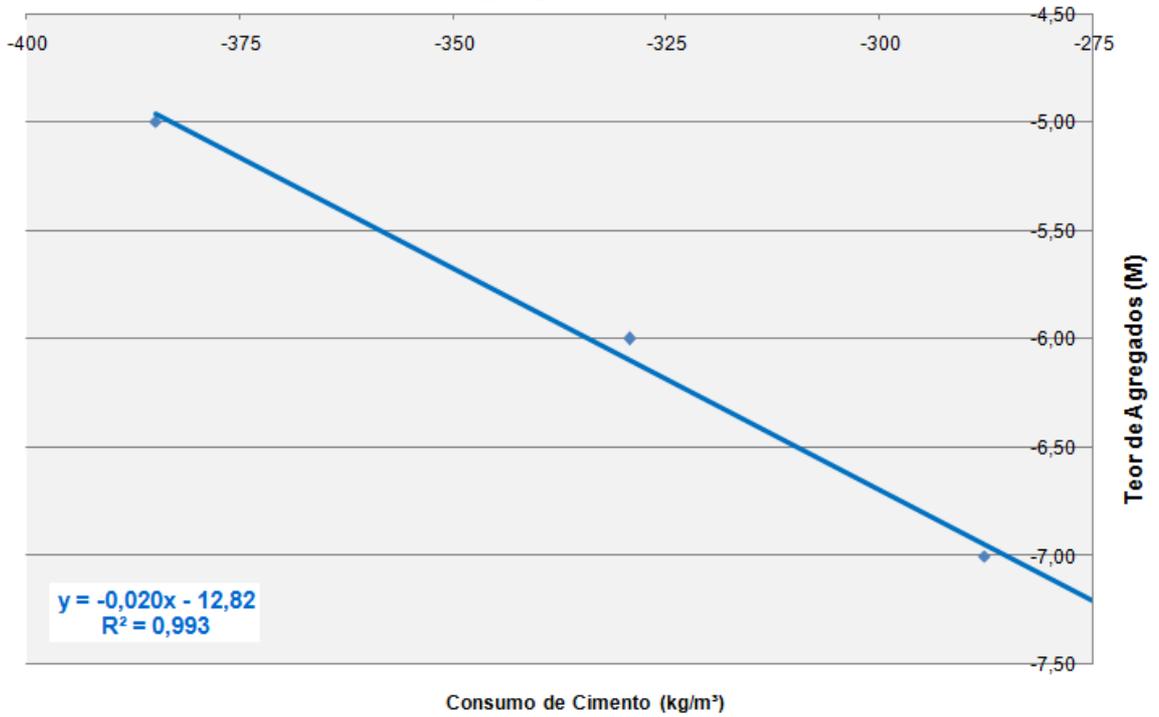
### ANEXO G.2: Resistência à compressão x Consumo de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

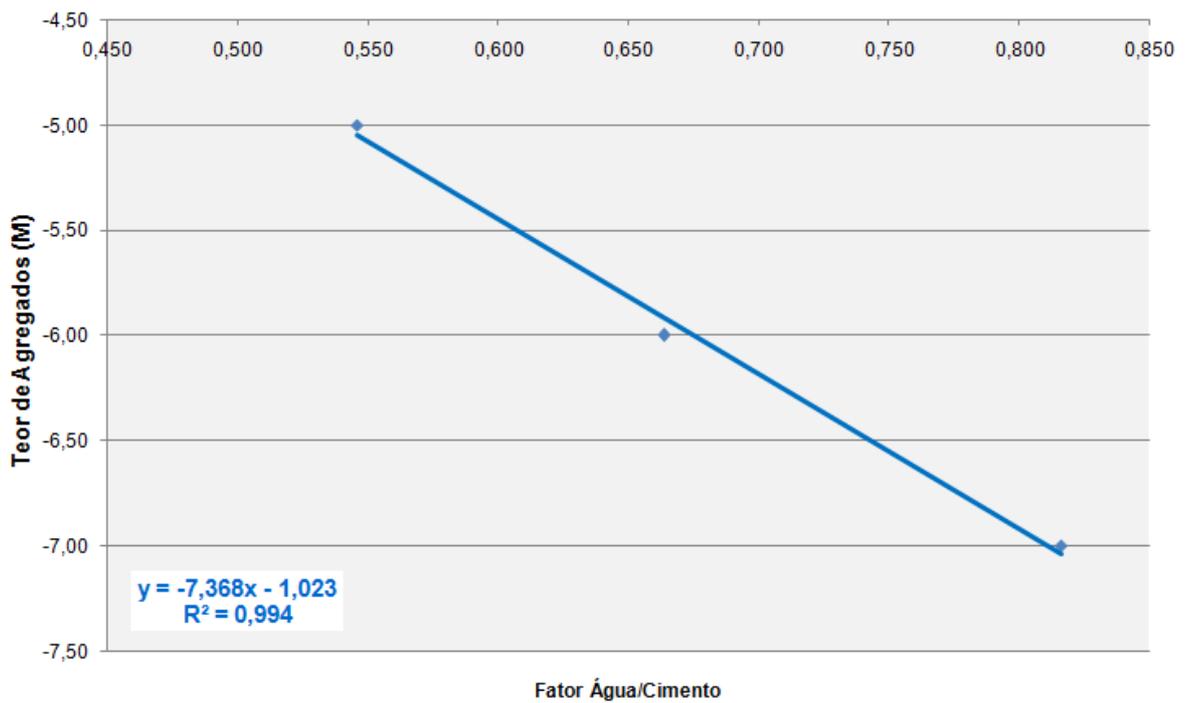
## ANEXO H

### ANEXO H.1: Teor de agregados x consumo de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

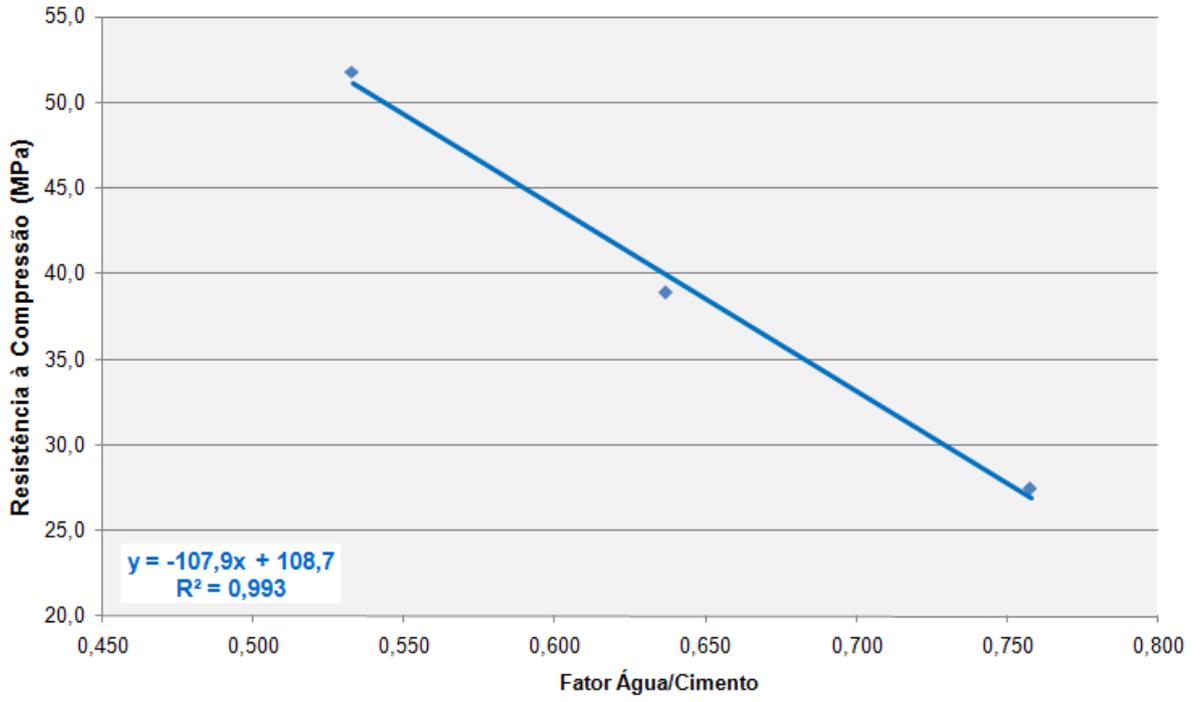
### ANEXO H.2: Teor de agregados x Fator água / cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

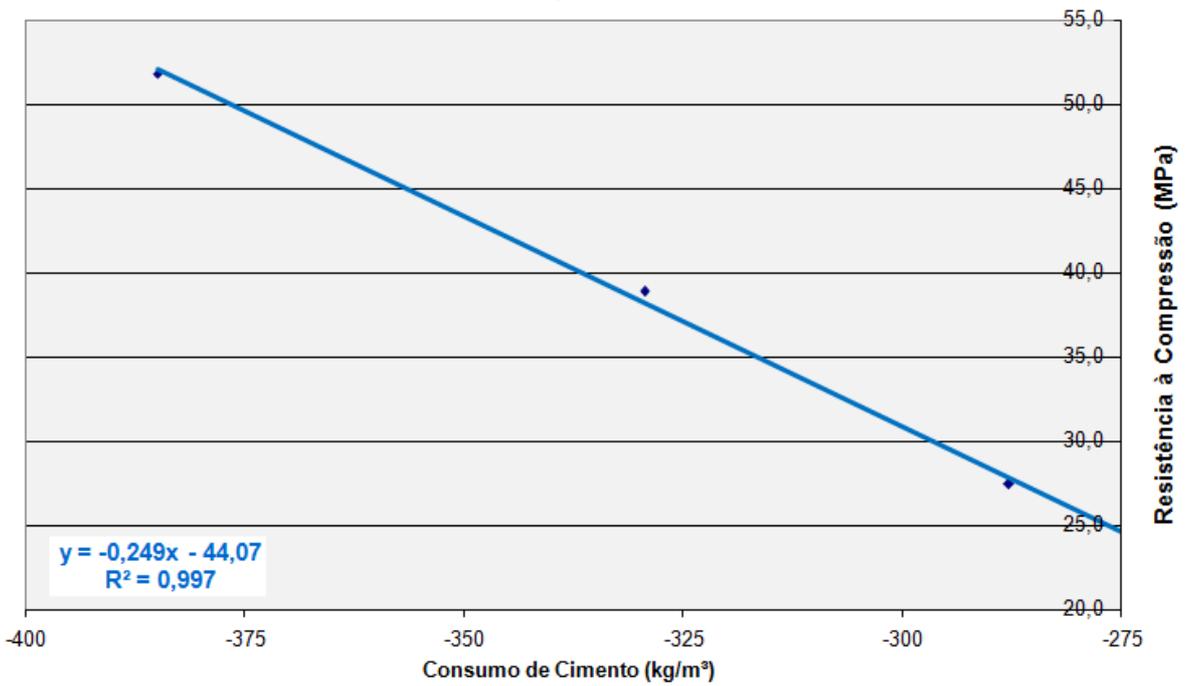
## ANEXO I

### ANEXO I.1: Resistência à compressão x Fator água / cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

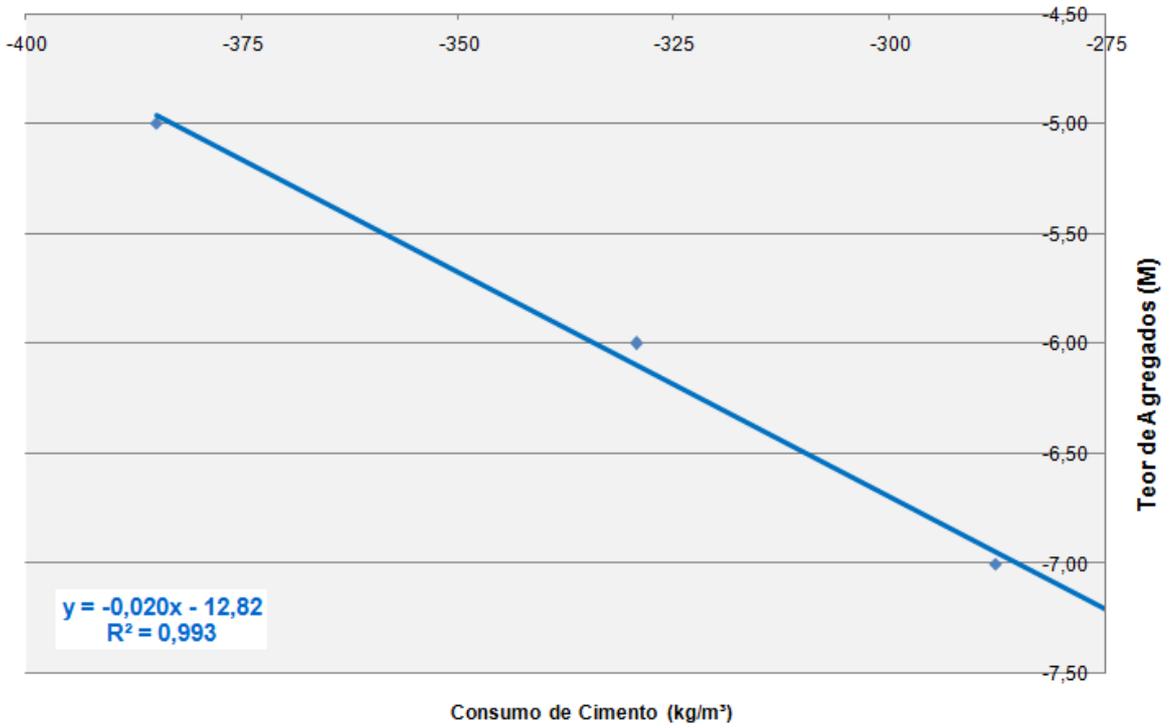
### ANEXO I.2: Resistência à compressão x Consumo de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

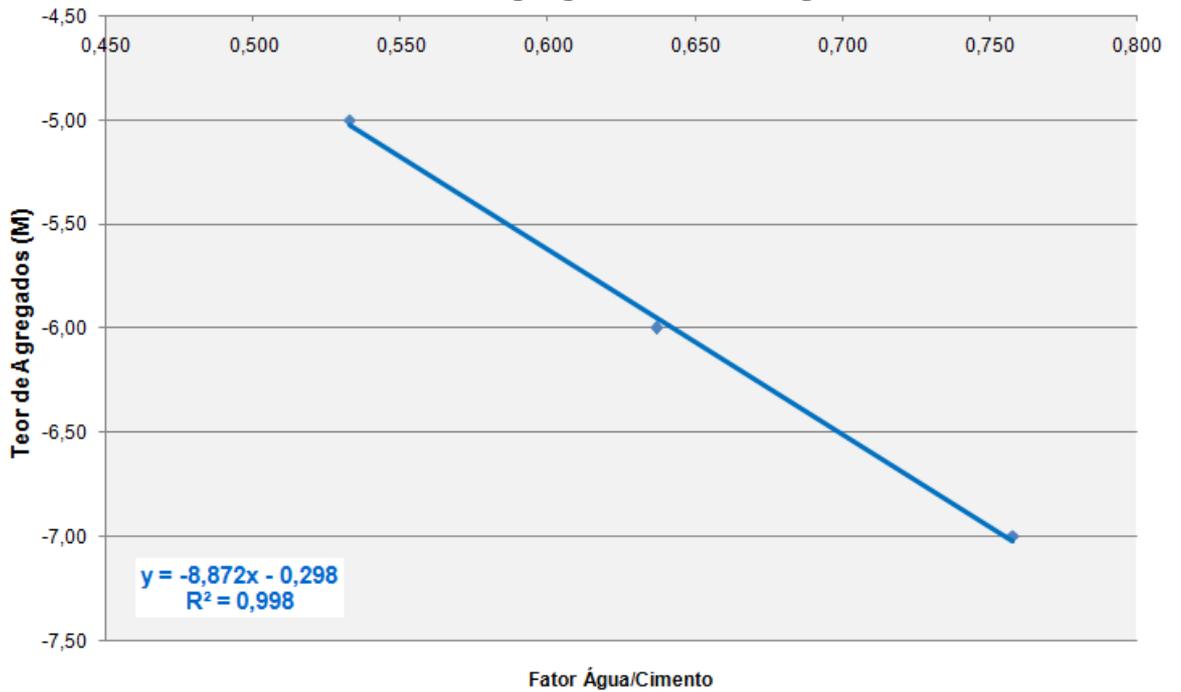
## ANEXO J

### ANEXO J.1: Teor de agregados x consumo de cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

### Gráfico J.2: Teor de agregados x Fator água / cimento



Fonte: Elaborado pelo autor