



ARTUR JACQUES DELFES VARELA

MICHEL MARTINENGHI

MAIKO ARCARO

**ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO MECÂNICO ENTRE
ADIÇÕES DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ, METACAILIM E
SÍLICA ATIVA NA PRODUÇÃO DE CONCRETO AUTO ADENSÁVEL
DE ALTA RESISTÊNCIA**

Projeto de pesquisa desenvolvido para
apresentação de Trabalho de Conclusão do
Curso de Pós Graduação em Tecnologia do
Concreto para obtenção do grau de especialista.

**Prof. Orientador: Denis Fernandes
Weidmann, M.Sc.**

FLORIANÓPOLIS

2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a DEUS, por nos ter dado força, saúde e ter iluminado nosso caminho para que pudéssemos concluir com sucesso mais uma etapa de nossas vidas.

Ao engenheiro civil prof. Denis Fernandes Weidmann por suas valiosas colaborações, orientações, paciência e amizade.

A todos os professores que nos passaram grandes ensinamentos ao longo do curso, que com grande dedicação e conhecimento pudemos absorver novos aprendizados profissionais e até mesmo pessoais.

As nossas famílias e amigos que nos deram enorme suporte em todos os momentos desta jornada.

Aos colegas da turma 2016/1 de Florianópolis que passamos um ano e meio juntos. Tempo em que tivemos ótimos momentos de companhia e trocas de experiências, que com toda certeza somaram ao conhecimento de todos. Criamos grandes amizades com vocês.

A BPM Pré-Moldados®, principalmente ao seu diretor Eng. Nivaldo de Loyola Richter, pela disponibilidade do espaço de seus laboratórios, materiais necessários para pesquisa, equipamento e total suporte necessário.

Ao laboratorista da BPM Pré-Moldados, Fernando Moraes Stano por sua grande ajuda durante a etapa de ensaios e por sua vontade de aprender mais sobre concreto conosco.

A GCP Applied Technologies®, Metacaulim do Brasil®, Silcca Nobre® e Tecnosil®, pelo fornecimento do aditivo e das adições para realização da pesquisa.

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO MECÂNICO ENTRE ADIÇÕES DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ, METACULIM E SÍLICA ATIVA NA PRODUÇÃO DE CONCRETO AUTO ADENSÁVEL DE ALTA RESISTÊNCIA

Por

ARTUR JACQUES DELFES VARELA

MICHEL MARTINENGHI

MAIKO ARCARO

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM TECNOLOGIA DO
CONCRETO, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS
PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

Florianópolis (SC) ____ de ____ de ____.

Eng. Denis Fernandes Weidmann, M.Sc.

Eng. Joelcio Luiz Stocco, M.Sc.

Eng. Luiz Fernando Trilha Ribeiro, Esp.

RESUMO

Os tecnologistas do concreto têm buscado formas de produzir concretos mais duráveis e economicamente viáveis, para isto, a descoberta de aditivos superplastificantes foi crucial, pois permitiu a produção de concretos com menores relações água/aglomerante, além disto a utilização de materiais suplementares também auxilia para a redução do alto consumo de cimento na produção de CAR. O presente trabalho compara o desempenho mecânico dos concretos auto adensáveis de alta resistência produzidos com adição de sílica de casca de arroz, metacaulim e sílica ativa. Através de 240 corpos de prova analisou-se a resistência à compressão obtida aos 1, 7, 28 e 63 dias de idade para os teores de 3%, 6%, 9% em cada pozolana estudada substituído ao cimento em 3 diferentes relações água/aglomerante de 0,41; 0,36 e 0,31. Em relação a viabilidade econômica o uso de adições não se tornou satisfatório para resistências iniciais de 24h. O metacaulim apresentou as mais altas resistências á compressão axial na idade de 28 dias em todas as relações a/a na substituição de 9%, porém nas relações a/a 0,36 e 0,31 os concretos ficaram muito coesos. A sílica ativa e a sílica de casca de arroz apresentaram as melhores reologias no estado fresco, demonstrando uma boa fluidez para o concreto auto adensável.

Palavras chave: concreto de alta resistência, auto adensável, adições , resistência à compressão axial.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Efeito fíler da sílica ativa.....	28
Figura 2: Curva granulométrica da areia natural fina	38
Figura 3: Curva granulométrica da areia natural média.....	39
Figura 4: Curva granulométrica da brita 0	40
Figura 5: Betoneira de eixo inclinado – 240 litros.....	47
Figura 6: Armazenamento de corpos de prova durante as primeiras 24 horas	48
Figura 7: Retífica horizontal automática faceadora de corpo de prova	49
Figura 8: Aspecto do concreto com substituição de cimento por metacaulim em 3%	50
Figura 9: Evolução das resistências à compressão axial dos concretos de relação água/aglomerante 0,41	54
Figura 10: Evolução de resistências à compressão de concreto produzido com adição de sílica ativa	55
Figura 11: Evolução das resistências à compressão axial dos concretos de relação água/aglomerante 0,36.....	56
Figura 12: Evolução das resistências à compressão axial dos concretos de relação água/aglomerante 0,31	57
Figura 13: Ruptura no agregado graúdo	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes diferentes de concreto de alto desempenho	21
Tabela 2: Classes de espalhamento (Slump-flow)	23
Tabela 3: Classes de viscosidade plástica aparente t500 (sob fluxo livre)	23
Tabela 4: Classes de habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre)	23
Tabela 5: Classes de habilidade passante caixa L (sob fluxo confinado)	24
Tabela 6: Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado)	24
Tabela 7: Classes de resistência a segregação pela coluna de segregação	24
Tabela 8: Caracterização mecânica do cimento CII-F-40	36
Tabela 9: Caracterização física do cimento CII-F-40	36
Tabela 10: Caracterização química do cimento CII-F-40	37
Tabela 11: Composição granulométrica da areia fina	37
Tabela 12: Composição granulométrica da areia natural média	38
Tabela 13: Composição granulométrica da brita 0	40
Tabela 14: Caracterização química da sílica ativa	40
Tabela 15: Caracterização física da sílica ativa	41
Tabela 16: Propriedades físicas e químicas Metacaulim	41
Tabela 17: Propriedades químicas da sílica de casca de arroz	41
Tabela 18: Teor de atividade pozzolânica da sílica de casca de arroz ..	42
Tabela 20: Planejamento de ensaios e quantidade de corpos de prova	44
Tabela 21: Quantidade de material utilizado para produção de 20 litros para relação água aglomerante 0,41	45
Tabela 22: Quantidade de material utilizado para produção de 20 litros para relação água aglomerante 0,36	46

Tabela 25: Traço final para produção de 1m ³ para relação água aglomerante 0,36	60
Tabela 26: Traço final para produção de 1m ³ para relação água aglomerante 0,31	60
Tabela 28: Análise econômica da relação água/ aglomerante 0,41	61
Tabela 29: Análise econômica da relação água/ aglomerante 0,36	62
Tabela 30: Análise econômica da relação água/ aglomerante 0,31	62
Tabela 31: Resultados de eficiência econômica	63

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
FOLHA DE APROVAÇÃO	4
RESUMO.....	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	6
LISTA DE TABELAS.....	7
SUMÁRIO.....	9
1.INTRODUÇÃO	12
1.1. PROBLEMA	13
1.2. OBJETIVOS.....	14
1.2.1.Objetivo Geral.....	14
1.2.2.Objetivos Específicos.....	14
1.3.HIPÓTESE.....	14
1.4. JUSTIFICATIVAS.....	15
1.4.1.Tecnológicas	15
1.4.2.Econômicas	16
1.4.3.Sociais	17
1.4.4.Ecológicas	17
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1.CAD.....	19
2.1.1.Diferentes Classes de Concreto de Alto Desempenho.....	20
2.1.2.Aplicações do CAD	21
2.2.CONCRETO AUTO ADENSÁVEL	22

2.2.1.Classificações	no	Estafo
Fresco.....	23	
2.3.POZOLANAS	25	
2.3.1.Metacaulim	26	
2.3.2.Sílica Ativa.....	26	
2.3.3.Sílica de Casca de		
Arroz.....	29	
2.4.SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	30	
2.4.1.Cimento		
Portland.....	30	
2.4.2.Agregados.....	31	
2.4.3.Aditivos Superplastificantes	32	
2.5.MÉTODOS DE DOSAGEM	34	
3.METODOLOGIA	35	
3.1.PERSPECTIVA DA PESQUISA	35	
3.2.POPULAÇÃO.....	35	
3.3.CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	35	
3.4.MATERIAIS E MÉTODOS	42	
3.5.DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS.....	45	
4.APRESENTAÇÃO DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS		
RESULTADOS.....	49	
4.1.ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO	49	
4.2.RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	53	
4.3.TRAÇOS PARA PRODUÇÃO DE 1 M ³	59	
4.4.VIABILIDADE ECONÔMICA	60	

5.CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
5.1.CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
5.2.RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
7.APÊNDICES.....	72
7.1.SLUMP FLOW	72
7.2.CAIXA L.....	72
7.3.FUNIL V.....	73
7.4.RESULTADOS DE ROMPIMENTOS DE CORPO DE PROVA A/A 0,41.....	74
7.5.RESULTADOS DOS ROMPIMENTOS DE CORPOS DE PROVA A/A 0,36.....	75
7.6.RESULTADOS DE ROMPIMENTOS DE CORPO DE PROVA A/A 0,31.....	76
7.7.EVOLUÇÃO DAS RESISTÊNCIAS RELAÇÃO A/A 0,41	77
7.8.EVOLUÇÃO DAS RESISTÊNCIAS RELAÇÃO A/A 0,36	78
7.9.EVOLUÇÃO DAS RESISTÊNCIAS RELAÇÃO A/A 0,31	79

1. INTRODUÇÃO

O concreto destaca-se de outros materiais utilizados na construção civil principalmente pela sua resistência a água e a sua plasticidade no estado fresco, que permite a utilização de diferentes projetos de formas e aplicação in-loco (PEDROSO, 2009).

O cimento é o principal componente do concreto, e o segundo material mais consumido do mundo. Em 2010 foram consumidos 3,7 bilhões de toneladas de clínquer de cimento Portland, sendo que para a fabricação de uma tonelada é liberado, em média 1 tonelada de CO₂ para a atmosfera. A produção mundial de cimento é responsável por 7% do total de emissões de CO₂ no mundo. (MEHTA, 2014)

Uma pesquisa encomendada pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) revela que no ano de 2012 as usinas de concreto no país produziram 51 milhões de metros cúbico (ABCP, 2013).

A prática da ecologia industrial apresenta uma solução de curto prazo quanto ao desenvolvimento sustentável. Estima-se que o consumo de concreto no mundo segue nas seguintes proporções de uso, 15% em nova infraestrutura, 45% para na construção de novos edifícios e 40% para reparo e renovação do ambiente construído. Para que haja grandes economias no futuro dependemos do consumo de bens de consumo mais duráveis. (MEHTA, 2014)

O uso do CAD se torna vantajoso não apenas pela sua resistência a compressão, mas também por estar intimamente relacionado as características microestruturais do concreto que governam outras propriedades como o módulo de elasticidade e durabilidade. Para isto são utilizados alguns materiais com certas propriedades específicas como os aditivos superplastificantes que permitem a utilização de baixa relação A/C. E também o uso de materiais cimentícios suplementares como a sílica ativa, escória de alto-forno e cinza volante, (AITCIM, 2000) essas propriedades tornam o material mais apropriado

para garantir uma maior vida útil e menores custos de manutenção durante seu uso.

O interesse, uso e estudo de concretos de alto desempenho não está apenas na propriedade de resistência a compressão axial, mas também em relação a sua durabilidade (LACERDA, 2005).

Um dos princípios éticos de um profissional é promover o desenvolvimento sustentável. A responsabilidade ambiental é inerente a qualquer intervenção sobre o meio natural ou artificial, considerando o consumo de materiais, energia, emissão de poluentes e geração de resíduos. (AZEVEDO, 2009)

Em Medeiros (2011, p.773) em função dos crescentes problemas de degradação precoce nas estruturas, das novas necessidades competitivas e exigências de sustentabilidade no setor da Construção Civil, há uma tendência mundial, nas últimas duas décadas no sentido de privilegiar projetos com aspectos voltados à durabilidade e à extensão da vida útil das estruturas de concreto (apud, Clifton, 1993).

Neste contexto as adições pozolânicas em substituição de cimento Portland, são uma das alternativas técnicas que, em proporções adequadas, apresentam diversos benefícios nos estados fresco e endurecido. Podem melhorar a resistência do concreto a fissuração térmica, à expansão causada pela reação álcali-agregado, a ataques por cloretos ou sulfatos. Além disto, também traz economia de energia e de tempo de extração de matéria-prima, tratando-se do cimento especificamente, as jazidas de calcário. (MEHTA, 2014)

Neste trabalho serão utilizadas três adições pozolânicas ativas, que são o Metacaulim e a Sílica Ativa e Sílica de Casca de Arroz.

1.1. PROBLEMA

A substituição parcial de cimento Portland por adição de Sílica de casca de arroz, Metacaulim ou Sílica Ativa na produção de concreto auto-

adensável de alta resistência, segue a mesma proporção para manter o mesmo desempenho mecânico?

1.2. OBJETIVOS

Aqui serão mencionados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

1.2.1. Objetivo Geral

Comparar o desempenho mecânico dos concretos auto adensáveis de alta resistência produzidos com adição de Sílica de casca de arroz, Metacaulim e Sílica Ativa.

1.2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Verificar o comportamento mecânico dos concretos com e sem adição;
- ✓ Verificar o consumo de aditivo para o mesmo *slump flow* para um mesmo percentual de cada adição, mantendo as demais dosagens do traço.
- ✓ Verificar o custo por metro cúbico de cada traço elaborado e compara-los;

1.3. HIPÓTESE

Com a substituição de cimento por adições pozolânicas na ordem de 1:1, em volume, espera-se obter resultados de resistência à compressão maiores

que nos concretos referência e melhora na reologia dos concretos com adições no estado fresco.

1.4. JUSTIFICATIVAS

A utilização em escala crescente de quantidades elevadas de subprodutos ou resíduos industriais e agrícolas como, por exemplo, pozolanas, na construção e, em particular, nas estruturas de concreto, tem sido a resposta dos pesquisadores para inquietações que preocupam a comunidade científica e a população em geral, quais sejam: sustentabilidade, ecoeficiência e poluição ambiental, de um lado, economia e durabilidade das construções, de outro (MOREIRA, B. P.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.).

Neste item serão apresentadas as justificativas tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas para elaboração da pesquisa.

1.4.1. Tecnológicas

A incorporação de adições minerais em geral resulta na produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas, uma vez que modificam a estrutura interna do concreto no estado fresco.

A introdução de um material fino no concreto, tal como a cinza volante, tende a proporcionar um aumento da sua trabalhabilidade ou uma menor necessidade de água para o mesmo valor de abatimento. No caso do uso de pozolanas de alta reatividade que apresentam grande área superficial como, por exemplo, a sílica ativa e o metacaulim, este comportamento se repete somente quando se utilizam pequenos teores. Outra vantagem técnica do uso de pozolanas no concreto é o aumento da durabilidade e a melhoria de suas propriedades mecânicas.

De acordo com GUEDERT (1989) *apud* SANTOS (2006), o uso de pozolanas em adição ao cimento confere ao concreto e argamassa características como:

- menor calor de hidratação, pela troca de reações exotérmicas (hidratação do cimento), por reações atérmicas (pozolânicas);
- melhor resistência ao ataque ácido em função da estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do clínquer Portland e à formação um C-S-H com menor relação CaO/SiO_2 de menor basicidade;
- maior durabilidade, contribuindo para a inibição da reação álcali-agregado e diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo o ataque do material por substâncias externas como cloretos e sulfatos.

1.4.2. Econômicas

No concreto, o cimento Portland é, geralmente, o material com maior custo e a utilização de pozolanas, via de regra, acarreta diminuições no seu consumo, na economia de energia e na redução do custo de fabricação do cimento. Isto aumenta o período de exploração das jazidas de calcário e argila e, conseqüentemente, o período de produção da fábrica de cimento.

Além disso, há um aumento da capacidade de produção sem necessidade de novos investimentos (SANTOS, 2006). Assim sendo, a redução do uso do cimento resulta em economia para a produção do concreto. Por outro lado, grande parte das pozolanas utilizadas no concreto é derivada de resíduos industriais, fazendo com que o uso destes materiais necessite de pouco ou nenhum custo adicional para sua aplicação no concreto.

A substituição do cimento Portland por pozolanas, segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), pode variar de 20% a 60%. Este procedimento pode representar uma considerável economia de custo e de energia. No caso de pozolanas com alta reatividade, a adição tende a ocorrer em teores que se situam em torno de 10%.

1.4.3. Sociais

A redução do impacto ambiental e aumento da sustentabilidade na construção civil também estão associados ao aumento da vida-útil do concreto, que pode ser alcançada com alguns tipos de adições, que reduzem os gastos com recuperação ou reconstrução das estruturas no médio ou longo prazo.

As adições pozolânicas atuam nesse sentido, e como ação principal, conferem ao concreto maiores propriedades de durabilidade e resistência aos agentes externos.

1.4.4. Ecológicas

Dos componentes básicos do concreto, o cimento aparece como a principal fonte geradora de poluição devido ao seu processo de fabricação. A produção do cimento é responsável, ainda, pela emissão de cerca de uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂), por tonelada de clínquer produzido.

Buscar alternativas para diminuição do seu consumo, utilizando adições que diminuam a emissão de CO₂ na atmosfera e demais poluentes é o grande desafio do século (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Os materiais pozolânicos são energeticamente mais econômicos que o clínquer do cimento Portland, tendo ainda implicações ecológicas, pois contribuem para um melhor aproveitamento dos resíduos industriais poluidores, como é caso das cinzas volantes transportadas pelos gases de exaustão das termelétricas, e da microssílica oriunda das indústrias de ferro-silício e silício metálico, e até mesmo os resíduos de cerâmica moída e resíduos agrícolas como a casca de arroz (ZAMPIERI, 1989) *apud* (OLIVEIRA, BARBOSA, 2006).

Outra vantagem das pozolanas é a de preservar as jazidas de calcário, o principal componente do cimento comum. Para o meio ambiente, o uso das pozolanas reduz a emissão de dióxido de carbono, visto que, a temperatura e o

tempo necessário para o processo de ativação da argila é inferior à produção do clínquer de cimento Portland.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas as considerações a respeito do concreto de alto desempenho, concreto auto adensável e das adições minerais ativas.

2.1. CAD

Ainda não existe um consenso relativo as terminologias utilizadas *concreto de alta resistência* ou *concreto de alto desempenho*. Aitcin (2000, p. 1) aborda este assunto no início do livro *Concreto de Alto Desempenho* explicando que não existe dúvida que este tipo de concreto tem muito mais que apenas uma alta resistência a compressão, que num futuro próximo o concreto de alto desempenho será especificado principalmente por sua durabilidade.

O concreto de alto desempenho é fruto do avanço dos estudos relativos a este material, é a evolução dos concretos convencionais.

O American Concrete Institute no ano de 1998 traz a seguinte definição:

Define-se concreto de alto desempenho como um concreto que atenda uma combinação especial entre desempenho e requisitos de uniformidade que não pode ser atingida sempre rotineiramente com o uso de componentes convencionais e práticas normais de mistura lançamento e cura (ACI, 1998)

Diversas pesquisas em laboratório relatam que a durabilidade das estruturas expostas a intempéries e ambientes agressivos deve ter pouca ou nenhuma permeabilidade. Esta característica é alcançada com concretos produzidos com misturas adequadamente proporcionadas, uso de aditivos químicos superplastificantes, relação a/mc de 0,4 ou menos e uso de adições minerais. (MEHTA, 2014)

Tratando-se de fraturas mecânicas o concreto pode ser considerado um material homogêneo dividido em três fases, a pasta hidratada de cimento, a zona

de transição entre pasta e agregado, e a fase agregado. Nos concretos usuais os elos mais fracos são a zona de transição e a pasta de cimento quando submetidos a cargas de compressão, esta fragilidade se deve a grande quantidade de poros na pasta originados pela alta quantidade de água utilizada. Quando usado o CAD esta fratura se dá na fase agregado, por isso, o agregado graúdo utilizado na produção de CAD se torna muito importante. (AITCIN,2000)

O CAD do ponto de vista dos materiais nada mais é do que um concreto de baixa porosidade, tal característica é alcançada pela baixa relação a/mc de modo que as partículas de cimento e as partículas dos materiais cimentícios suplementares fiquem muito próximas. (AITCIN,2000)

A ACI 363.2R-98 no *Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete* define concreto de alta resistência como um concreto com resistência maior ou igual que 40 MPa. Explica também que as dificuldades e cuidados na produção do concreto são mais notáveis com resistências à compressão em cerca de 55 MPa.

2.1.1. Diferentes Classes de Concreto de Alto Desempenho

O termo alto desempenho abrange uma larga faixa de resistência com o intuito de facilitar a exposição da importância dos diferentes fatores que devem ser considerados no projeto de um concreto de alto desempenho, os concretos foram divididos em cinco classes diferentes, definidas pela resistência a compressão correspondente àquilo que pode ser considerado como um intervalo tecnológico no presente estado da arte.

Essa classificação é baseada nas experiências, com o tempo poderá ser normatizada conforme o avanço de estudos e compreensão dos diferentes fenômenos envolvidos na produção de concreto de alto desempenho. As faixas de resistências têm sido divididas em cinco classes com incrementos de 25 MPa conforme tabela 1.

Resistência à compressão (MPa)	50	75	100	125	150
Classe de concreto de alto desempenho	I	II	III	IV	V

Tabela 1: Classes diferentes de concreto de alto desempenho. (AITCIN,2000)

A NBR 8953:2015 classifica os concretos de fins estruturais em classe I com valores de resistência de 20 a 50 MPa e classe II com valores de 55 a 100 MPa. A classe II indica concretos resistências não convencionais, sendo assim, parece ser razoável considerar esta classe para concretos de alta resistência.

2.1.2. Aplicações do CAD

O CAD tem sido utilizado para estruturas sofisticadas que exigem maior vida útil, de 100 a 120 anos. Em ambientes altamente agressivos que necessitam de um concreto livre de fissuras e impermeável por um longo período. É utilizado em boa parte do mundo em plataformas marítimas de prospecção de petróleo, pontes com vãos longos, tabuleiros, pavimentos e estruturas de estacionamento. (MEHTA, 2014)

No Brasil a utilização de concretos com resistências acima de 40 Mpa e concretos de alto desempenho tem sido bastante difundido nos últimos anos. Usados principalmente em estruturas de grandes edifícios possibilitando a diminuição das seções dos pilares e cargas nas fundações. No Brasil destaca-se o edifício E-Tower localizado na Vila Olímpia em São Paulo, a resistência de projeto foi de 80 MPa porém os resultados chegaram a 115 Mpa. Estes altos resultados refletiram também no maior módulo de elasticidade já empregado em uma obra, com valor de 47,9 GPa. (HARTMANN, 2004)

Na cidade de Curitiba no estado do Paraná o edifício Evolution Towers usou em blocos de fundações e diversos pilares da estrutura concretos de classe de resistência de 60MPa. Até o ano de 2002 este era o único edifício que tinha exigências de resistência maior que 50 MPa. (MENDES, 2002)

A ponte estaiada *Port de Normandie* na França foi a mais longa quando construída em 1993. Foram utilizados 35.000 m³ de concreto de alto desempenho de resistência específica aos 28 dias de 60 MPa. O concreto foi composto por 425 kg/m³ de cimento Portland combinado com 8% de sílica ativa, 770 kg/m³ de agregados finos, 1065 kg/m³ de agregado graúdo com dimensão máxima de 20mm, 153 kg/m³ de água ($a/mc = 0,36$) e 11 l/m³ de aditivo superplastificante a base de melanina. (MEHTA, 2014)

No Canadá a *Confederation Bridge* com 12,9 km de extensão possuía exigências de resistência a compressão mínima de 55 a 80 MPa dependendo da peça a ser concretada. Para as duas classes deste concreto foram utilizados 7,5% de sílica ativa em relação aos materiais cimentícios, em massa. (MEHTA, 2014)

2.2. CONCRETO AUTO ADENSÁVEL

A NBR 15823-1:2017 define concreto auto adensável como concreto que é capaz de fluir, auto adensar pelo seu peso próprio, preencher a forma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

A partir de 1983, no Japão, a durabilidade de estruturas de concreto era um assunto de grande interesse. Um concreto durável requeria uma mão de obra qualificada para garantir a uma compactação adequada. Nesta mesma época houve uma grande redução no número de trabalhadores no ramo da construção civil, desta forma, reduzindo a mão de obra qualificada. Uma das soluções foi o emprego de um concreto auto adensável, com capacidade de preencher todos os espaços vazios da forma sem a necessidade de vibração para adensamento, somente com seu peso próprio. (OKAMURA e OUCHI, 2003)

Os mecanismos para alcançar a auto-compatibilidade envolvem não somente um alta deformabilidade da pasta, mas também resistência a segregação entre o agregado graúdo e a pasta quando o concreto flui pelas zonas confinadas.

Okamura e Ouchi (2003) empregaram os seguintes métodos para adquirir auto-compactação:

- Limitação da composição de agregados;
- Baixa relação água/aglomerante;
- Uso de superplastificante;

2.2.1. Classificações no Estafo Fresco

O concreto auto adensável deve ser classificado no seu estado fresco conforme as tabelas a seguir, apresentadas na NBR 15823-01:2017:

Classe	Espalhamento mm	Método de ensaio
<i>SF1</i>	550 a 650	ABNT NBR 15823-2
<i>SF2</i>	660 a 750	
<i>SF3</i>	760 a 850	

Tabela 2: Classes de espalhamento (Slump-flow). (NBR 15823-01,2017)

Classe	<i>t</i> 500 s	Método de ensaio
<i>VS 1</i>	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
<i>VS 2</i>	>2	

Tabela 3: Classes de viscosidade plástica aparente *t*500 (sob fluxo livre). (NBR 15823-01,2017)

Classe	Anel <i>J</i> mm	Método de ensaio
<i>PJ1</i>	0 a 25 com 16 barras de aço	ABNT NBR 15823-3
<i>PJ2</i>	25 a 50 com 16 barras de aço	

Tabela 4: Classes de habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre) . (NBR 15823-01,2017)

Classe	Caixa L (H2/H1)	Método de ensaio
<i>PL1</i>	$\geq 0,80$ com duas barras de aço	ABNT NBR 15823-4
<i>PL2</i>	$\geq 0,80$ com três barras de aço	

Tabela 5: Classes de habilidade passante caixa L (sob fluxo confinado) . (NBR 15823-01,2017)

Classe	Funil V s	Método de ensaio
<i>VF1</i>	< 9	ABNT NBR 15823-5
<i>VF2</i>	9 a 25	

Tabela 6: Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado). (NBR 15823-01,2017)

Classe	Coluna de segregação %	Método de ensaio
<i>SR1</i>	≤ 20	ABNT NBR 15823-6
<i>SR2</i>	≤ 15	

Tabela 7: Classes de resistência a segregação pela coluna de segregação. (NBR 15823-01,2017)

As tabelas citadas acima propiciam uma especificação adequada do concreto auto adensável para cobrir esses requisitos, que são caracterizados por quatro parâmetros de ensaios:

- fluidez e escoamento (*SF*);
- Viscosidade Plástica aparente (*VF* ou *VS*);
- habilidade passante (*PL* ou *PJ*);
- resistência a segregação (*SR*).

2.3. POZOLANAS

Segundo NBR 12653:2014 os materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos finamente cominuídos que possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante em presença de água, mas que na presença do hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 – reagem à temperatura ambiente, formando compostos com propriedade aglomerante.

O material pozolânico pode ser caracterizado como artificial e natural. Conforme NBR 12653:2014 pozolana natural é aquela de origem vulcânica ou de origem sedimentar com atividade pozolânica. Já a pozolana artificial é definida como um material proveniente do tratamento térmico ou subproduto industrial também com atividade pozolânica. Além da caracterização de sua origem, o material pozolânico é dividido em três classes, N, C e E, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014). A classe N corresponde às pozolanas naturais e artificiais como certos materiais vulcânicos de caráter ácido, silicosos, argilas calcinadas e terras diatomáceas. A classe C é composta por cinzas da queima de carvão mineral proveniente de termelétricas, e a classe E refere-se às pozolanas que apresentam características diferentes das demais classes.

Por razões ecológicas e econômicas, o uso de subprodutos pozolânicos e cimentícios, como adições minerais, está crescendo gradualmente. Quando usado como uma substituição parcial para o cimento Portland, adições minerais costumam ter um efeito retardador sobre a resistência das primeiras idades. Entretanto, a capacidade de uma adição mineral reagir às temperaturas normais com hidróxido de cálcio (presente na pasta de cimento Portland hidratada) e de formar silicato de cálcio hidratado adicional pode levar a uma redução significativa na porosidade da matriz e da zona de transição na interface. Conseqüentemente, melhorias consideráveis na resistência final e na estanqueidade do concreto são obtidas com a incorporação de adições minerais. Deve-se observar que adições minerais são especialmente efetivas no aumento da resistência à tração do concreto. (METHA & MONTEIRO, 2008).

2.3.1. Metacaulim

A NBR 15894:2010 define metacaulim como sendo produto de calcinação e moagem de argilominerais cauliníticos, formada essencialmente por partículas lamelares com estrutura predominantemente não cristalina.

O metacaulim é uma adição mineral aluminossilicosa obtida, normalmente, da calcinação, entre 600°C e 900°C, de alguns tipos de argilas, como as cauliníticas e os caulins de alta pureza. A pureza do caulin afeta tanto a reatividade como a cor do mineral. Quanto mais puro, mais claro e reativo resultará o metacaulin produzido. Quanto menor a quantidade de sílica e alumínio, menor a reatividade e menor a brancura do material. (IBRACON, 2011)

As argilas por si só não são pozolânicas, a menos que a estrutura cristalina dos materiais aluminossilicosos (argilominerais) seja transformada em uma estrutura amorfa e desordenada por meio de tratamento térmico. Quando a caulinita é submetida a temperatura entre 600°C e 900°C, ocorre a remoção dos íons hidroxila de sua estrutura cristalina, ocasionando a destruição do seu arranjo atômico. Forma-se, então, um componente amorfo e de grande instabilidade química, denominado matacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), que é responsável pela atividade pozolânica, com formação predominante de C-S-H e C_4AH_x . Para temperaturas acima de 900°C, são formados compostos cristalinos estáveis com reduzida ou praticamente nenhuma atividade pozolânica (IBRACON *apud* BARATA, 1998).

2.3.2. Sílica Ativa

O interesse inicial no uso de sílica ativa se deu principalmente para que as medidas rigorosas de controle de vários países fossem cumpridas, impedindo a liberação do material na atmosfera. Estudos abriram novas possibilidades para o uso da sílica ativa como parte do material cimentício dos

concretos para produzir concretos de alta resistência ou níveis altos de durabilidade ou ambos. (ACI 234R-96)

Conforme NBR 13956:2012 a sílica ativa é decorrente do processo de produção do silício metálico ou ligas de ferro-silício em fornos elétricos. Durante o processo, é gerado o gás SiO que, ao sair do forno, oxida-se formando partículas de SiO₂, captadas por sistemas de filtros coletores, formada essencialmente por partículas esféricas no estado amorfo.

Nesta forma amorfa, as partículas são extremamente reativas e o seu pequeno tamanho relativo facilita a reação química com o Ca(OH)₂ produzido na hidratação do cimento Portland (KORMANN et al., 2001).

Muito usada em concretos de alto desempenho, a sílica ativa é umas das adições minerais de maior reatividade, graças ao tamanho extremamente pequeno de suas partículas e à sua natureza amorfa. Suas partículas são esféricas, de diâmetro cem vezes menor que o do cimento. Por terem uma área específica elevada e granulometria mais fina que os cimentos, as partículas da sílica ativa densificam a zona de transição por ação física e química, gerando uma microestrutura mais densa e homogênea, com reduzido volume de vazios. Para o aproveitamento ideal deste material altamente pozzolânico faz-se necessária à utilização de aditivos redutores de água, pois sua finíssima distribuição granulométrica tende a provocar um considerável consumo de água no concreto (DA FONSECA, 2010).

Em composições cimentícias, a sílica ativa tem sido utilizada para aumentar a resistência mecânica e compacidade, graças à ocorrência de reações pozzolânicas e ao efeito físico filler. As reações pozzolânicas ocorrem devido à interação com o hidróxido de cálcio do cimento, produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), material mais resistente e estável, que favorece a durabilidade dos compósitos, aumentando a resistência e diminuindo a permeabilidade do sistema devido ao processo de refinamento dos poros. Já o efeito fíler ocorre em função da diminuição da porosidade total do sistema promovida pelo preenchimento dos vazios de empacotamento, de poros capilares e de gel (ROMANO et al., 2006)

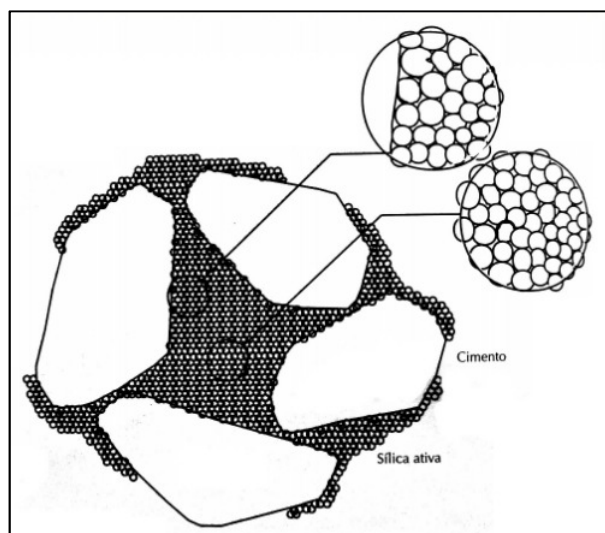


Figura 1: Efeito fíler da sílica ativa. (AITCIN,2000)

A adição de sílica ativa geralmente aumenta a demanda de água. Aditivos redutores de água ou aditivos de alta redução de água, ou ambos, devem ser utilizados a fim de manter a trabalhabilidade necessária. Um abatimento um pouco maior será necessário para manter o mesmo grau aparente de trabalhabilidade devido ao aumento da coesão. (ACI 234R-96)

Devido ao alto preço atual e a disponibilidade limitada, a sílica ativa tem sido usada como um material que fornece melhorias as propriedades de resistência e durabilidade do concreto. Nos Estados Unidos, a utilização é feita em concretos com especificações de baixa permeabilidade como, por exemplo, estruturas de pontes. (ACI 234R-96)

A sílica ativa consiste principalmente de partículas vítreas esféricas lisas extremamente finas com área superficial próxima de 20.000 m²/kg quando medida pelo método de adsorção de nitrogênio. A seguir comparação com outros materiais finos:

- Sílica Ativa: 13.000 – 30.000 m²/kg, método de adsorção de nitrogênio;
- Cinza volante: 400 a 700 m²/kg, método de Blaine;
- Escória granulada de alto forno moída: 350 a 600 m²/kg, método de Blaine;
- Cimento Portland: 300 a 400 m²/kg, Blaine;

2.3.3. Sílica de Casca de Arroz

A Sílica de Casca de Arroz (SCA) é um resíduo agroindustrial decorrente do processo da queima da casca de arroz que devido às suas propriedades pozolânicas como alto teor de sílica e área de superfície específica tende a promover melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade de concretos (SOUZA et al. 2014).

Cada tonelada de arroz colhido produz cerca de 200 kg de casca que, na combustão, gera aproximadamente 40 kg de uma cinza leve e volumosa, fazendo deste um processo com uma enorme quantidade de matéria acumulada comumente descartada de forma inadequada, ocasionando graves problemas ambientais por ter em sua constituição certa quantidade de carbono residual (POUEY, 2006; BEZERRA et al., 2011).

No Brasil o prognóstico para produção de arroz em 2018 é de 11,7 milhões de toneladas (IBGE, 2018). O Rio Grande do Sul, maior produtor de arroz do País, deve participar com 71,0% do total a ser colhido. Segundo produtor nacional, Santa Catarina, estima colher 1,1 milhão de toneladas.

De acordo com as pesquisas realizadas o emprego da SCA tende a promover melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade de concretos, além de reduzir a temperatura de hidratação (CORDEIRO et al., 2009), e pode ser utilizada como uma fonte alternativa da sílica ativa, devido a suas excelentes características (TASHIMA, 2006).

Essas melhoras se devem ao fato que durante o processo de hidratação do cimento, além de se formar produtos cimentantes caracterizados como gel do tipo C-S-H, também é liberado cerca de 20% de hidróxido de cálcio que acabam por reagir com a pozolana para formar novos produtos cimentantes, similares aos iniciais, diferenciados apenas pela relação Si/Ca (TASHIMA et al., 2011), tendo como resultado a produção de fases químicas com maior estabilidade e poder aglomerante (CARMO; PORTELLA, 2008).

A incorporação da SCA também modifica a microestrutura da pasta de cimento, atuando fisicamente como filler inerte, através do efeito filler, pois devido ao menor diâmetro de suas partículas, a SCA exerce o papel de material de preenchimento, melhorando o empacotamento do sistema (MENEZES et al., 2009), diminuindo a quantidade de poros existentes e proporcionando uma melhor coesão à matriz cimentícia (TASHIMA et al., 2011), essencialmente na microestrutura da zona de transição.

2.4. SELEÇÃO DE MATERIAIS

A produção do concreto de alto desempenho exige uma seleção de materiais constituintes específica para atingir altas resistências e características diversas de durabilidade. Todas têm seu grau de importância e quanto maior a elevação da resistência, melhor deverá ser especificado os materiais constituintes do concreto.

2.4.1. Cimento Portland

Segundo Aitcin (2000, p. 183) a primeira escolha para a produção de concreto de alto desempenho é a do cimento, pois o desempenho do mesmo em relação a reologia e resistência torna-se um item crítico a medida que se aumenta a resistência a compressão. Atualmente os cimentos disponíveis atendem facilmente a classe I (50 MPa), já concretos da classe II (75 MPa) alguns tipos de cimento definitivamente não podem ser utilizados.

Os cimentos tipo II e V são satisfatórios em relação a quantidade de C_3S mas comumente não são finamente moídos e seu teor de C_3A é mantido baixo para baixar o calor de hidratação. Os cimentos do tipo III tem bons resultados de quantidade de C_3S , mas não em finura e teor de C_3A . Os cimentos

do tipo I tem a finura correta, porém o seu teor de C_3A pode ser alto demais em alguns casos. (AITCIN, 2000)

Para os cimentos Portland existentes é normalmente impossível encontrar um que supra as necessidades para produzir um CAD de classe II. Para os concretos da classe III as possibilidades de escolha caem drasticamente, para estes casos o emprego simultâneo de materiais cimentícios suplementares é bem vinda. (AITCIN, 2000)

O valor da quantidade da matriz cimentícia para concretos de alto desempenho de classe IV e V, por razões de reologia tem que ser abaixo dos 550 kg/m³ com consumo de água entre 120 l/m³ a 130 l/m³, sendo assim em poucas circunstâncias esses concretos poderão ser produzidos. (AITCIN, 2000)

2.4.2. Agregados

Embora sejam utilizados agregados comuns para produzir concretos de alto desempenho, quando se trata de concretos de alta resistência as propriedades dos agregados podem ser um fator limitante. No entanto devem ser utilizados agregados de boa qualidade, para garantir uma boa ligação entre as partículas do agregado gráudo e matriz cimentícia, estas partículas devem ser aproximadamente equidimensionais. (NEVILLE, 1997)

As formas das partículas dependem além de sua rocha matriz também do método de britagem, britadores de impacto tendem a produzir menores quantias de partículas em forma de escama ou alongadas. O cascalho pode ser usado na produção de concreto de alto desempenho, porém a ligação da matriz com o agregado pode ser prejudicada se a textura da superfície for muito lisa. (NEVILLE, 1997)

Um agregado limpo ausente de poeira e uniformidade de classificação é essencial.

A seleção do agregado graúdo deve passar por uma inspeção mineralógica e petrográfica para assegurar a boa qualidade, evitando rupturas precoces no concreto de alta resistência. (AITCIN, 2000)

Em concretos usuais pode se obter uma redução de água com aumento do tamanho máximo do agregado, se tratando de concreto de alta resistência esse cenário pode sofrer efeitos adversos, primeiramente o aumento do tamanho máximo do agregado graúdo torna a zona de transição mais heterogênea e em segundo as partículas menores de agregado graúdo são geralmente mais resistentes do que as grandes. Isso ocorre, pois, o processo de diminuição do tamanho elimina os defeitos internos do agregado como poros, microfissuras e inclusões de minerais moles. Sendo assim torna-se mais seguro trabalhar com tamanhos máximos entre 10 e 12 mm. Um agregado com 20 mm também pode ser utilizado desde que sua rocha matriz seja suficientemente resistente e homogênea. (AITCIN, 2000)

Devido ao alto teor de partículas finas utilizadas na produção de concreto de alto desempenho, provenientes do alto consumo de cimento e de materiais cimentícios suplementares, um agregado fino mais grosso, com módulo de finura variando entre 2,8 e 3,2 é recomendado. Segundo Aitcin (2000, p. 225) por esta mesma razão, indica o uso de areias com módulo de finura variando entre 2,7 e 3,0. O uso de uma areia grossa leva também a um pequeno decréscimo na quantidade de água da mistura, que é vantajoso tanto do ponto de vista de resistência como também econômico. Geralmente não existe vantagem em se utilizar um tipo de areia ou outra, desde que sejam limpas e livre de argila e silte. Deve ser também arredondado e uniformemente graduado. (NEVILLE, 1997; AITCIN, 2000)

2.4.3. Aditivos Superplastificantes

Somente no final dos anos 60 que os superplastificantes foram utilizados pela primeira vez no concreto, ocorrendo quase que simultaneamente

no Japão e na Alemanha. Essa demora se deu principalmente pelo nível de desempenho exigido na época, onde os lignossulfonatos satisfaziam as resistências de usuais de 15 MPa a 25MPa e também por ser muito barato, visto que, se trata de um resíduo das fábricas de polpa e papel que requer um processamento simples para ser usado no concreto.

Os lignossulfonatos são utilizados para reduzir a água em 5% a 10%, teores maiores podem gerar dificuldades como forte retardamento devido à presença de açúcares de madeira e aprisionamento de grandes bolhas de ar. Essa redução não é suficientemente alta para eliminar toda a água e mistura desnecessária para hidratar totalmente as partículas de cimento.

Na busca por uma maior redução de água foram redescobertas no Japão as qualidades dispersantes do condensado sulfonado de naftaleno-formaldeído e na Alemanha poderosos redutores de água baseada em condensados sulfonados de melamina-formaldeído, estes produtos são conhecidos como superplastificantes ou redutores de água de faixa ampla. (Hewlett na Rixom, 1977; Hattori, 1978; Meyer, 1978; em PIERRE AITCIN pág 136)

Esses superplastificantes eram feitos de matéria prima sintética que não continham impurezas de ação de superfície e não continham açúcar, possibilitando o uso de dosagens mais altas que os redutores de água comumente usados. Porém foi verificado por Young, 1983; Ramachandran, Beaudoin and Shilua, 1989 apud AITCIN que sua ação fluidificante eram eficientes por 15 ou 30 minutos. A tecnologia de fabricação dos superplastificantes evoluíram elevando o tempo de abatimento mantido por um tempo de 45 min a 90 min.

Essas moléculas sintéticas proporcionaram para a tecnologia do concreto a possibilidade de produzir um concreto fluido com relação água/aglomerante menor que 0,30. Consequentemente nos últimos anos a resistência a compressão cresceu de forma inimaginável.

2.5. MÉTODOS DE DOSAGEM

Um método de dimensionamento oferece apenas um traço inicial que terá que ser adaptado para que sejam atendidas as características desejadas para o concreto. Será sempre difícil desenvolver um método de dosagem que possa ser usado universalmente com qualquer tipo de cimento Portland, materiais cimentícios suplementares, quaisquer agregados e quaisquer aditivos. Mesmo que os componentes do concreto devam respeitar critérios de aceitação, esses critérios são muito amplos.

Numa certa medida, as próprias propriedades do concreto fresco e endurecido podem ser conseguidas de diferentes maneiras com a utilização de materiais iguais. Porém é inquestionável que alguns princípios científicos essenciais possam ser utilizados como uma base de cálculo de traços. O objetivo de um método de dosagem é determinar uma combinação adequada e econômica dos constituintes do concreto (AITCIN,2000).

Enquanto o concreto usual era composto por uma mistura de cimento Portland, água, agregados e, em algumas vezes incorporadores de ar os métodos de dosagem obtinham resultados satisfatórios, porém AITCIN, 2000 traz algumas afirmações de que este não é mais o caso, por que:

- A faixa das relações água/cimento ou água/aglomerante foi drasticamente ampliada no sentido de valores muito baixos, graças ao uso de superplastificantes;
- Os concretos modernos contêm, muito frequentemente um ou mais materiais cimentícios suplementares que estão, em alguns casos, substituindo uma quantidade significativa de cimento;
- Algumas vezes os concretos modernos contêm sílica ativa, que a modifica drasticamente as propriedades do concreto tanto fresco como endurecido;

- O abatimento pode ser ajustado pelo uso de superplastificante no lugar de água sem alterar a relação água/cimento e a relação água/aglomerante;

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia usada para o desenvolvimento do trabalho, iniciando-se pela perspectiva da pesquisa e população, seguida da caracterização dos materiais e métodos, encerrando pela dosagem e produção dos concretos.

3.1. PERSPECTIVA DA PESQUISA

A abordagem da pesquisa será de natureza quantitativa e qualitativa, com relação ao delineamento será exploratório, descritivo, analítico e comparativo. Quanto aos procedimentos para a coleta de dados adotou-se o método experimental.

3.2. POPULAÇÃO

A pesquisa foi realizada em uma indústria de pré-moldados de grande porte da região de Criciúma – SC, que forneceu os materiais constituintes do concreto, como também toda sua estrutura de equipamentos do seu laboratório de controle tecnológico de concreto para execução dos ensaios necessários.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

a) Cimento:

Foi utilizado o cimento Portland do tipo CII-F-40 fabricado pela empresa ITAMBÉ®. As tabelas 8, 9 e 10 apresentam respectivamente os ensaios mecânicos, físicos e químicos do cimento utilizado neste trabalho.

ENSAIOS MECÂNICOS	RESULTADOS (MPa)	LIMITES DA NBR 11578:1991
Resistência a compressão - 1 dia	22,6	-
Resistência a compressão - 3 dias	37,6	≥ 15
Resistência a compressão - 7 dias	44,3	≥ 25
Resistência a compressão - 28 dias	52,9	≥ 40

Tabela 8: Caracterização mecânica do cimento CII-F-40. (Cimentos Itambé (2018))

ENSAIOS FÍSICOS	RESULTADOS	LIMITES DA NBR 11578/91
Resíduo na peneira ABNT 200 (%)	0,36	≤ 10
Resíduo na peneira ABNT 325 (%)	0,05	-
Área específica Blaine (m^2/kg)	453	≥ 280
Expansibilidade a quente (mm)	0,3	≤ 5
Tempo de início de pega (h:mm)	03:16	≥ 1
Tempo de fim de pega (h:mm)	04:05	≤ 10
Consistência Normal (%)	30,80	-
Massa Específica (g/cm^3)	3,09	-

Tabela 9: Caracterização física do cimento CII-F-40. (Cimentos Itambé (2018))

ENSAIOS QUÍMICOS	TEORES (%)	LIMITES DA NBR 11578:1991
Perda ao fogo	5,36	$\leq 6,5$
Resíduo insolúvel	1,14	$\leq 2,5$
Óxidos de Silício (SiO_2)	18,45	-
Óxidos de Alumínio (Al_2O_3)	4,13	-
Óxidos de Ferro (Fe_2O_3)	2,90	-
Óxidos de Cálcio (CaO)	60,90	-
Óxidos de Magnésio (MgO)	3,30	$\leq 6,5$

Óxidos de Enxofre (SO ₃)	3,18	≤4,0
Óxidos de Cálcio livre (CaO)	0,86	-
Equivalente Alcalino em Na ₂ O	0,70	-

Tabela 10: Caracterização química do cimento CII-F-40. (Cimentos Itambé (2018))

b) Agregados miúdos:

Foram utilizados dois agregados miúdos: a areia natural fina e areia natural média.

Os resultados obtidos com os ensaios de granulometria descritos na NBR 7211:2009 são apresentados na tabela 11 e figura 2 para a areia natural fina e tabela 12 e figura 3 para areia natural média.

PENEIRAMENTO				
PENEIRAS	MATERIAL RETIDO			% MATERIAL PASSANTE
mm	PESO(g)	% AMOSTRA	% ACUMULADA	
9,5	0	0	0	100
6,3	0	0	0	100
4,8	0	0	0	100
2,4	0	0	0	100
1,2	0	0	0	100
0,6	0	0	0	100
0,3	124	12,4	12,4	87,6
0,15	854	85,4	97,8	2,2
0,075	18	1,8	99,6	0,4
fundo	4	0,4	100	0
TOTAL	1000			
Módulo de Finura		1,10		
Massa Específica		2,65 g/cm ³		

Tabela 11: Composição granulométrica da areia fina. (Autor)

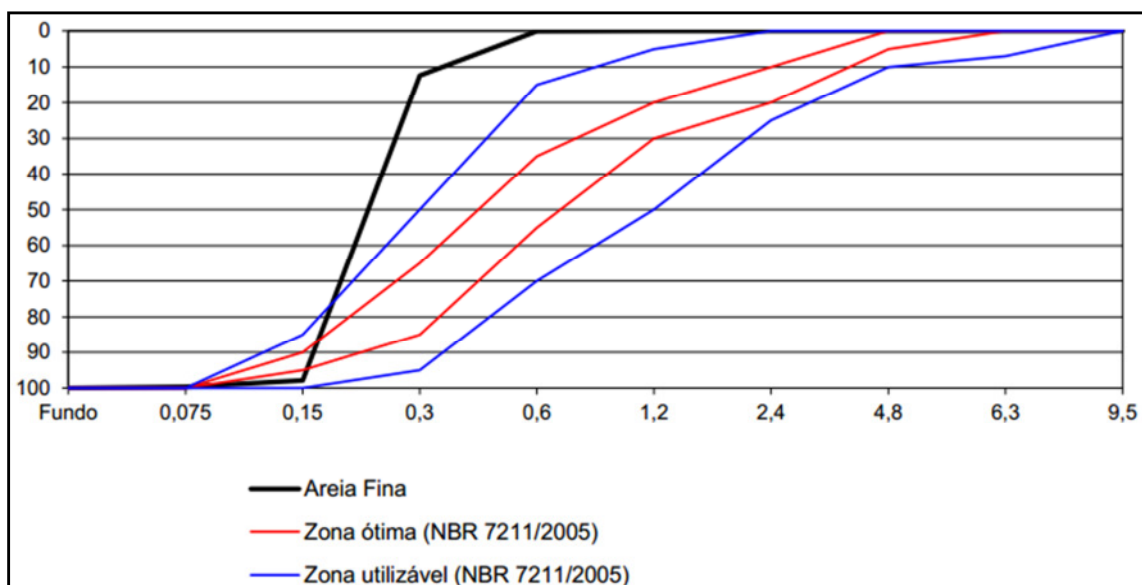


Figura 2: Curva granulométrica da areia natural fina. (Autor)

PENEIRAMENTO				
PENEIRAS		MATERIAL RETIDO		% MATERIAL PASSANTE
mm	PESO(g)	% AMOSTRA	% ACUMUL.	
9,5	0	0	0	100
6,3	0	0	0	100
4,8	0	0	0	100
2,4	3	0,28	0,28	99,72
1,2	46	4,58	4,86	95,14
0,6	260	25,96	30,82	69,18
0,3	318	31,81	62,63	37,37
0,15	340	33,95	96,58	3,42
0,075	23	2,29	98,87	1,13
fundo	11	1,13	100	0
TOTAL	1001			
Módulo de Finura		1,95		
Massa Específica		2,63 g/cm ³		

Tabela 12: Composição granulométrica da areia natural média. (Autor)

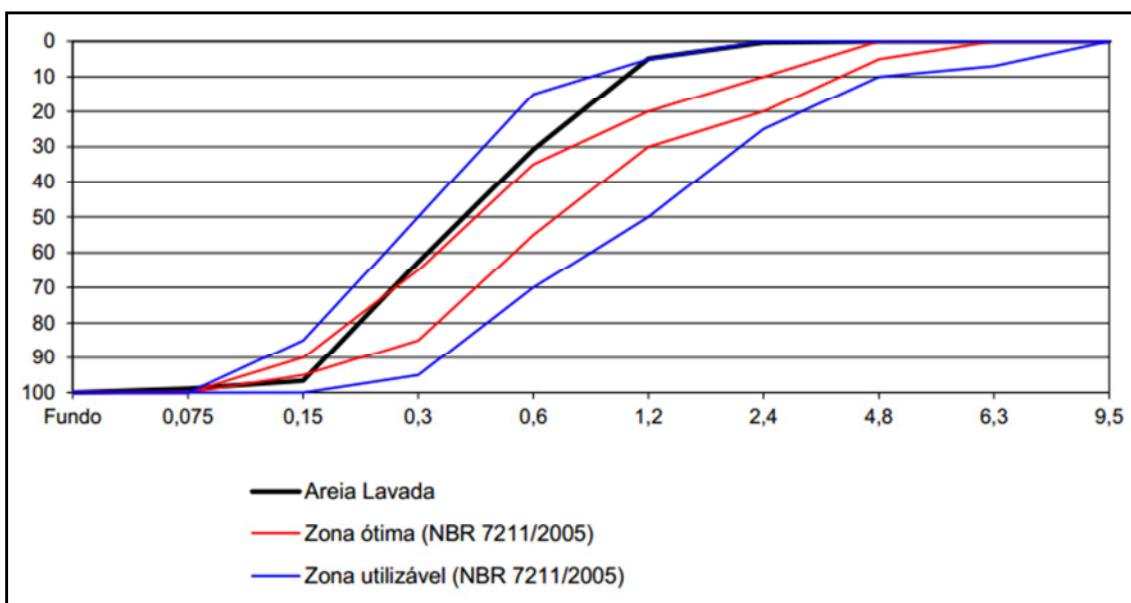


Figura 3: Curva granulométrica da areia natural média. (Autor)

c) Agregados graúdos:

Foi utilizado um tipo de agregado graúdo a brita 0. Os resultados dos ensaios granulométricos são apresentados na tabela 13 e figura 4.

PENEIRAMENTO				
PENEIRAS	MATERIAL RETIDO			
mm	PESO(g)	% AMOSTRA	% ACUMUL.	% MATERIAL PASSANTE
32	0	0	0	100
25	0	0	0	100
19	0	0	0	100
12,5	0	0	0	100
9,5	2	0,18	0,18	99,82
6,3	338	30,70	30,88	69,12
4,8	400	36,33	67,21	32,79
2,4	301	27,34	94,55	5,45
1,2	27	2,45	97,00	3,00
0,6	5	0,45	97,46	2,54
0,3	3	0,27	97,73	2,27
0,15	3	0,27	98,00	2,00
0,075	4	0,36	98,37	1,63
fundo	18	1,63	100,00	0,00
TOTAL	1101			
Módulo de Finura		5,52		

Massa Específica	2,98 g/cm ³
Diâmetro Máximo	6,3 mm
Mat. Pulverulento	1,80%

Tabela 13: Composição granulométrica da brita 0. (Autor)

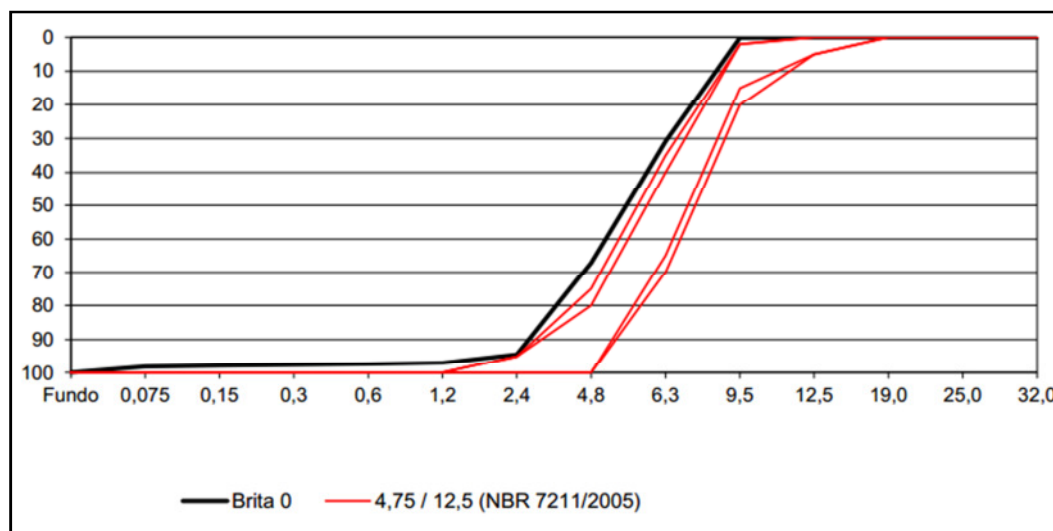


Figura 4: Curva granulométrica da brita 0. (Autor)

d) Sílica Ativa:

Foi utilizada uma sílica ativa de produção nacional, do tipo não densificada proveniente de um mesmo lote de fabricação. A sílica foi empregada em teores de 3, 6 e 9 %. As tabelas 14 e 15 apresentam as características físicas e químicas desta adição.

Ensaio Químico	Teores (%)	Limites da NBR 13956/2012
SiO ₂	94,59	≥ 85,00
Na ₂ O ₃	1,01	≤ 1,50

Tabela 14: Caracterização química da sílica ativa. (Tecnosil®, 2018)

Ensaio Físico	Resultados	Limites da NBR 13956/2012
Massa específica (g/cm ³)	2,22	-
Umidade (%)	0,31	≤ 3,0%

Tabela 15: Caracterização física da sílica ativa. (Tecnosil®, 2018)

e) Metacaulim:

Foi utilizado um metacaulim de produção nacional, proveniente de um mesmo lote de fabricação. O metacaulim foi empregado nos teores de 3, 6 e 9 %.

Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites (NBR 15.894)
SiO ₂	57%	44% a 65%
Al ₂ O ₃	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0,1%	< 1,5%
SO ₃	< 0,1%	< 1%
Na ₂ O	< 0,1%	< 0,5%
Eq.Alcalino Na ₂ O	< 1,5%	< 1,5%
Fe ₂ O ₃	2,00%	-
TiO ₂	1,50%	-
Umidade	0,50%	< 2%
Perda ao Fogo	3,00%	< 4%
Resíduo #325	6,00%	< 10%
Atividade Pozolânica Chapelle	880mg	> 750mg
Área Específica BET	Ca(OH) ₂ /g	Ca(OH) ₂ /g
Massa Específica	230.000cm ² /g	150.000cm ² /g
	2,56kg/dm ³	-

Tabela 16: Propriedades físicas e químicas Metacaulim. (<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>, 2018)

f) Sílica de Casca de Arroz:

Foi utilizada uma sílica de casca de arroz de produção nacional, proveniente de um mesmo lote de fabricação. A sílica foi empregada também nos teores de 3, 6 e 9 %. As tabelas 17, 18 e 19 apresentam as características químicas, teor de atividade pozolânica e propriedades físicas respectivamente desta adição.

Elemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	PF
%	93,99	0,2	0,05	0,003	0,51	0,14	1,16	0,02	0,36	3,3

Tabela 17: Propriedades químicas da sílica de casca de arroz. (GOMES & MARTON, 2015)

Produto	Teor mg Ca(OH) ₂ /g de material
Sílica casca de	1379,37

Tabela 18: Teor de atividade pozolânica da sílica de casca de arroz. (GOMES & MARTON, 2015)

Área superficial	Diâmetro médio	Massa específica
21.150 m ² /kg	14µm	2,17 g/cm ³

Tabela 19: Propriedades físicas da sílica de casca de arroz. (GOMES & MARTON, 2015)

g) Aditivo:

Em todas as dosagens dos concretos foi utilizado o aditivo TECFLOW® 7000 da GCP applied technologies, que é um aditivo superplastificante com alto poder de redução de água. É indicado principalmente quando se busca produzir concretos fluidos ou auto adensáveis.

A dosagem do TECFLOW pode variar de acordo com a redução de água desejada, podendo variar nas faixas entre 0,3 a 1,2 % sobre o peso de cimento utilizado.

3.4. MATERIAIS E MÉTODOS

Pelo concreto ser um material muito heterogêneo é de extrema importância fixar alguns valores de determinadas propriedades para minimizar os fatores que podem influenciar diretamente ou indiretamente os resultados. Os fatores foram:

- Relação água/aglomerante: 0,41; 0,36; e 0,31. Estas relações foram inferidas com base em outros trabalhos como MENDES 2002, FREITAS 2005 e BIANCHINI 2010.
- Idade: 1, 7, 28 e 63 dias para o ensaio de resistência a compressão axial. A idade de um dia é de grande relevância devido ao tempo

de desforma, saque e desprotensão das peças pré-moldadas. 7 dias para ter o ponto complementar da curva e 28 dias por ser comumente utilizado nas análises de concretos e 63 dias para analisar as evoluções do crescimento da resistência em idade superior aos 28 dias.

Foram moldados 2 (dois) corpos-de-prova para ensaio de resistência a compressão axial para cada idade, sendo as idades 1, 7, 28 e 63 dias.

A tabela a seguir mostra o planejamento dos ensaios bem como a quantidade corpos de prova, relações água aglomerante e porcentagens de substituições.

ENSAIO REALIZAD O	TIPO DE POZOLANA	A/A GL	% ADIÇ ÃO	CP/IDADE				QUA NT.	TOT AL
				1 DI A	7 DIA S	28 DIA S	63 DIA S		
	REFERENCIA	0,41	-	2	2	2	2	8	80
	METACaulim	0,41	3%	2	2	2	2	8	
	METACaulim	0,41	6%	2	2	2	2	8	
	METACaulim	0,41	9%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	0,41	3%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	0,41	6%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	0,41	9%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA ATIVA	0,41	3%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA ATIVA	0,41	6%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA ATIVA	0,41	9%	2	2	2	2	8	
RESISTÊN CIA À COMPRES SÃO AXIAL	REFERENCIA	0,36	-	2	2	2	2	8	80
	METACaulim	0,36	3%	2	2	2	2	8	
	METACaulim	0,36	6%	2	2	2	2	8	
	METACaulim	0,36	9%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	0,36	3%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	0,36	6%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	0,36	9%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA ATIVA	0,36	3%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA ATIVA	0,36	6%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA ATIVA	0,36	9%	2	2	2	2	8	
	REFERENCIA	0,31	-	2	2	2	2	8	80
	METACaulim	0,31	3%	2	2	2	2	8	
	METACaulim	0,31	6%	2	2	2	2	8	
	METACaulim	0,31	9%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	0,31	3%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	0,31	6%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	0,31	9%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA ATIVA	0,31	3%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA ATIVA	0,31	6%	2	2	2	2	8	
	SÍLICA ATIVA	0,31	9%	2	2	2	2	8	

Quantidade de corpos de prova para ensaio mecânico

240

Tabela 19: Planejamento de ensaios e quantidade de corpos de prova. (Autor)

3.5. DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

As dosagens dos concretos “referência” partiram de traços consagrados da indústria de pré-moldados da região de Criciúma-SC.

Após a determinação dos proporcionamentos passou-se a produção dos concretos e moldagens dos corpos de prova.

Para reduzir a possibilidade de erros na leitura da umidade dos materiais e posterior erro na dosagem, os materiais utilizados foram secos ao ar.

As tabelas 21 a 23 ilustram as quantidades dos materiais utilizados na produção dos concretos.

Traço	Cimento (kg)	Areia F (kg)	Areia M (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Adição (g)	Aditivo Calculado (g)	Aditivo Dosado (g)	% Aditivo Dosado (Total Aglomerante)	Flow (mm)
Cimento	9,02	3,42	13,60	18,64	3,70		81,22	38,30	0,42%	745,00
Metac. 3%	8,75	3,42	13,60	18,64	3,70	224,30	78,78	49,10	0,55%	767,00
S. ATIVA 3%	8,75	3,42	13,60	18,64	3,70	194,51	78,78	46,30	0,52%	770,00
SCA 3%	8,75	3,42	13,60	18,64	3,70	190,13	78,78	41,20	0,46%	753,00
Metac. 6%	8,48	3,43	13,61	18,64	3,70	448,59	76,35	50,00	0,56%	750,00
S. ATIVA 6%	8,48	3,43	13,61	18,64	3,70	389,01	76,35	62,90	0,71%	768,00
SCA 6%	8,48	3,43	13,61	18,64	3,70	380,25	76,35	58,40	0,66%	763,00
Metac. 9%	8,21	3,43	13,61	18,65	3,70	672,89	73,91	68,50	0,77%	760,00
S. ATIVA 9%	8,21	3,43	13,61	18,65	3,70	583,52	73,91	60,80	0,69%	750,00
SCA 9%	8,21	3,43	13,61	18,65	3,70	570,38	73,91	52,60	0,60%	753,00

Tabela 20: Quantidade de material utilizado para produção de 20 litros para relação água aglomerante 0,41. (Autor)

Traço	Cimento (kg)	Areia F (kg)	Areia M (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Adição (g)	Aditivo Calculado (g)	Aditivo Dosado (g)	% Aditivo Dosado (Total Aglomerante)	Flow (mm)
CIMENTO	10,28	3,21	12,73	18,63	3,70		92,50	65,60	0,64%	795,00
Metac. 3%	9,97	3,21	12,74	18,63	3,70	255,45	89,73	62,20	0,61%	825,00
S. ATIVA 3%	9,97	3,21	12,74	18,63	3,70	221,52	89,73	60,60	0,59%	778,00
SCA 3%	9,97	3,21	12,74	18,63	3,70	216,53	89,73	45,90	0,45%	793,00
Metac. 6%	9,66	3,21	12,74	18,63	3,70	510,90	86,95	64,40	0,63%	785,00
S. ATIVA 6%	9,66	3,21	12,74	18,63	3,70	443,04	86,95	60,60	0,60%	802,00
SCA 6%	9,66	3,21	12,74	18,63	3,70	433,06	86,95	52,40	0,52%	778,00
Metac. 9%	9,35	3,21	12,74	18,64	3,70	766,34	84,18	85,50	0,84%	798,00
S. ATIVA 9%	9,35	3,21	12,74	18,64	3,70	664,56	84,18	87,80	0,88%	765,00
SCA 9%	9,35	3,21	12,74	18,64	3,70	649,60	84,18	73,90	0,74%	773,00

Tabela 21: Quantidade de material utilizado para produção de 20 litros para relação água aglomerante 0,36. (Autor)

Traço	Cimento (kg)	Areia F (kg)	Areia M (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Adição (g)	Aditivo Calculado (g)	Aditivo Dosado (g)	% Aditivo Dosado (Total Aglomerante)	Flow (mm)
CIMENTO	11,94	2,92	11,59	18,61	3,70		107,42	55,80	0,47%	815,00
Metac. 3%	11,58	2,92	11,59	18,61	3,70	296,65	104,20	68,80	0,58%	813,00
S. ATIVA 3%	11,58	2,92	11,59	18,61	3,70	257,25	104,20	68,30	0,58%	818,00
SCA 3%	11,58	2,92	11,59	18,61	3,70	251,46	104,20	60,60	0,51%	823,00
Metac. 6%	11,22	2,92	11,59	18,62	3,70	593,30	100,97	73,00	0,62%	798,00
S. ATIVA 6%	11,22	2,92	11,59	18,62	3,70	514,50	100,97	64,40	0,55%	823,00
SCA 6%	11,22	2,92	11,59	18,62	3,70	502,91	100,97	66,50	0,57%	830,00
Metac. 9%	10,86	2,92	11,60	18,62	3,70	889,95	97,75	100,00	0,85%	815,00
S. ATIVA 9%	10,86	2,92	11,60	18,62	3,70	771,75	97,75	99,80	0,86%	793,00
SCA 9%	10,86	2,92	11,60	18,62	3,70	754,37	97,75	88,50	0,76%	863,00

Tabela 23: Quantidade de material utilizado para produção de 20 litros para relação água aglomerante 0,31. (Autor)

As misturas dos concretos do experimento foram realizadas em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 240 litros (figura 5). Antes de colocar os materiais constituintes do concreto a parte interna da betoneira era molhada a fim de umidificar as paredes internas.



Figura 5: Betoneira de eixo inclinado – 240 litros. (Autor)

Os materiais foram colocados na betoneira seguindo sempre a ordem de, brita 0, cimento, adições, areia fina, areia média e água total. A quantidade de aditivo superplastificante foi dosada após 1 minuto de mistura dos materiais acima citados, dosando o aditivo até conseguir a abertura do *slump flow* desejado.

Encerrado o período de mistura (8 minutos) foram realizados os ensaios de espalhamento *slump flow* (Anexo 7.1), viscosidade aparente t500 (Anexo 7.1), habilidade passante na caixa L (Anexo 7.2) e viscosidade plástica aparente pelo funil V (Anexo 7.3), conforme a NBR 15823-01:2010.

Os corpos de prova, após a moldagem, foram acondicionados em uma câmara úmida (figura 6) nas primeiras 24 horas com a finalidade de evitar perda de água do concreto e, a partir da desforma, foram imersos e armazenados até o momento do ensaio em solução saturada de hidróxido de cálcio a $(23 \pm 2^\circ\text{C})$ conforme a NBR 5738:2015.



Figura 6: Armazenamento de corpos de prova durante as primeiras 24 horas.
(Autor)

A retificação dos topos dos corpos de prova foi realizada com a utilização de retífica horizontal automática faceadora de corpo de prova (figura 7).



Figura 7: Retífica horizontal automática faceadora de corpo de prova.
(Autor)

4. APRESENTAÇÃO DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os dados e discutidos os resultados obtidos com a pesquisa. Os resultados estão divididos de acordo com características do concreto no estado fresco, compressão axial e análise econômica.

4.1. ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco dos concretos dividido em três análises, relação água/aglomerante de 0,41, água/aglomerante de 0,36, água/aglomerante de 0,31.

Com o intuito de facilitar uma das análises comparativas, criou-se um indicador sobre a relação entre a quantidade de aditivo dosado e a abertura de *slump flow*, conforme a fórmula a seguir:

$$Indicador = \left(\frac{(\% \text{aditivo dosado} * 100)}{\text{slump flow}} \right) * 1000$$

No quadro 1 é apresentado os resultados dos ensaios no estado fresco com relação água/aglomerante de 0,41.

	Aditivo Dosado	FLOW		FUNIL V	CAIXA L			Ar Incorp.	Indicador
		Flow (mm)	T500 (s)	T30 (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	Fator		
Ref	0,42%	745	0,57	8,71	10	7,3	0,73	0,53%	0,56
Metac. 3%	0,55%	767	0,84	6,84	13,2	5,4	0,41	2,08%	0,72
S. ATIVA 3%	0,52%	770	1,24	6,72	11,6	7,4	0,64	2,31%	0,68
SCA 3%	0,46%	753	0,7	5,74	9,2	7,4	0,80	4,46%	0,61
Metac. 6%	0,56%	750	0,84	7,11	10,4	6,6	0,63	3,82%	0,75
S. ATIVA 6%	0,71%	768	0,58	5,95	8,6	7,9	0,92	1,87%	0,92
SCA 6%	0,66%	763	0,59	6,93	8,4	8,1	0,96	1,28%	0,87
Metac. 9%	0,77%	760	0,84	8,61	8,5	7,4	0,87	1,94%	1,01

S. ATIVA 9%	0,69%	750	0,8	5,56	8,6	7,6	0,88	2,52%	0,92
SCA 9%	0,60%	753	0,74	7,19	8,3	8,1	0,98	1,23%	0,80

Quadro 1: Resultados dos ensaios no estado fresco para água/aglomerante 0,41. (Autor)

Analisando por percentual de substituição de cimento por adição, ou seja, classe 3%, 6% e 9% de substituição, os concretos com a substituição por metacaulim apresentaram maior consumo de aditivo, conforme coluna INDICADOR, e menor habilidade passante na caixa L, com exceção da substituição em 6%.

Na substituição de 6% de metacaulim obteve menor consumo de aditivo por *slump flow*, porém maior tempo de escoamento no funil V.

O concreto com substituição de metacaulim em 3% apresentou o menor desempenho quanto à habilidade passante no ensaio de caixa L, fator 0,41, mesmo com resultado de *slump flow* 767 mm, maior que o concreto referência. O concreto com 6% de metacaulim tem obtido baixo desempenho na habilidade passante.

O concreto com substituição de sílica ativa em 3% apresentou o terceiro menor resultado na caixa L, fator 0,64, mesmo com a melhor abertura de *slump flow*.

Notou-se que o fator de habilidade passante na caixa L melhora a medida que se aumenta a substituição de cimento por adição.

O aspecto do concreto com substituição de cimento por metacaulim em 3% é apresentado na figura 8. Concreto que apresentou a menor habilidade passante.



Figura 8: Aspecto do concreto com substituição de cimento por metacaulim em 3%. (Autor)

No quadro 2 é apresentado os resultados dos ensaios no estado fresco com relação água/aglomerante de 0,36.

	Aditivo Dosado	FLOW		FUNIL V	CAIXA L			Ar Incorp.	Indicador
		Flow (mm)	T500 (s)	T30 (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	Fator		
Ref	0,64%	795	1,07	10,74	8,5	8,5	1,00	0,37%	0,81
Metac. 3%	0,61%	825	0,86	9,78	8,5	8,3	0,98	2,47%	0,74
S. ATIVA 3%	0,59%	778	1,99	16,2	12,2	5,9	0,48	1,44%	0,76
SCA 3%	0,45%	793	1,72	12,48	8,5	8,3	0,98	1,71%	0,57
Metac. 6%	0,63%	785	1,11	11,69	8,3	8,3	1,00	2,43%	0,80
S. ATIVA 6%	0,60%	802	1,08	7,69	8,5	8,5	1,00	3,31%	0,75
SCA 6%	0,52%	778	1,26	10,8	8,5	8,5	1,00	1,08%	0,67
Metac. 9%	0,84%	798	1,01	10,52	8,3	8,2	0,99	1,70%	1,05
S. ATIVA 9%	0,88%	765 *	1,32	10,34	8,5	8,5	1,00	1,15%	1,15
SCA 9%	0,74%	773 *	1,06	8,31	8,6	8,3	0,97	1,40%	0,96

* CONCRETO APRESENTOU SEGREGAÇÃO ELEVADA NO ENSAIO DE *SLUMP FLOW*.

Quadro 1: Resultados dos ensaios no estado fresco para água/aglomerante 0,36. (Autor)

De maneira geral os concretos com a/a 0,36 apresentaram melhor habilidade passante quando comparados aos concretos de a/a 0,41, com exceção da substituição de Sílica Ativa 3%, que apresentou fator 0,48 no ensaio de caixa L. Este comportamento deve ser relacionado a sua maior quantidade de finos no traço que melhora sua capacidade de rolagem dos grãos.

Mesmo com melhor habilidade passante, os concretos com a/a 0,36 obtiveram resultados de tempos maiores no ensaio de funil V. Este comportamento deve ser relacionado a maior coesão do traço.

A substituição de 6% de sílica ativa obteve a melhor viscosidade plástica aparente pelo funil V. Já para a substituição de 9% a sílica de casca de arroz teve melhor desempenho.

No ensaio de *slump flow* as adições de sílica ativa e sílica de casca de arroz apresentaram elevada segregação na substituição de 9%.

No quadro 3 é apresentado os resultados dos ensaios no estado fresco com relação água/aglomerante de 0,31.

	Aditivo Dosado	FLOW		FUNIL V	CAIXA L			Ar Incorp.	Indicador
		Flow (mm)	T500 (s)	T30 (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	Fator		
Ref	0,47%	815	1,45	14,23	8,5	8,4	0,99	1,34%	0,58
Metac. 3%	0,58%	813	1,99	15,6	8,5	8,5	1,00	0,99%	0,71
S. ATIVA 3%	0,58%	818	1,26	12,34	8,4	8,4	1,00	1,47%	0,71
SCA 3%	0,51%	823	1,76	14,77	8,5	8,5	1,00	1,76%	0,62
Metac. 6%	0,62%	798	1,79	22,13	10,3	7,6	0,74	2,23%	0,78
S. ATIVA 6%	0,55%	823	1,86	21,09	12,0	7,4	0,62	2,52%	0,67
SCA 6%	0,57%	830	1,37	19,22	8,6	7,6	0,88	1,59%	0,69
Metac. 9%	0,85%	815	1,06	18,9	8,3	8,2	0,99	1,38%	1,04
S. ATIVA 9%	0,86%	793	1,99	14,19	8,6	8,4	0,98	0,96%	1,08
SCA 9%	0,76%	863	1,06	11,29	8,6	8,6	1,00	1,09%	0,88

Quadro 3: Resultados dos ensaios no estado fresco para água/aglomerante 0,31. (Autor)

Analisando as tabelas a cima notou-se que o consumo de aditivo para os concretos referência foram menores para todas as relações a/a estudadas. Isto deve-se provavelmente pelo fato de que pela alta finura das adições é demandado um maior consumo de aditivo.

4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A seguir serão apresentados os resultados de resistência à compressão axial dos concretos dividido em três análises, relação água/aglomerante de 0,41, água/aglomerante de 0,36, água/aglomerante de 0,31.

Na figura 9 é apresentado evolução das resistências à compressão axial dos concretos de relação água/aglomerante 0,41.

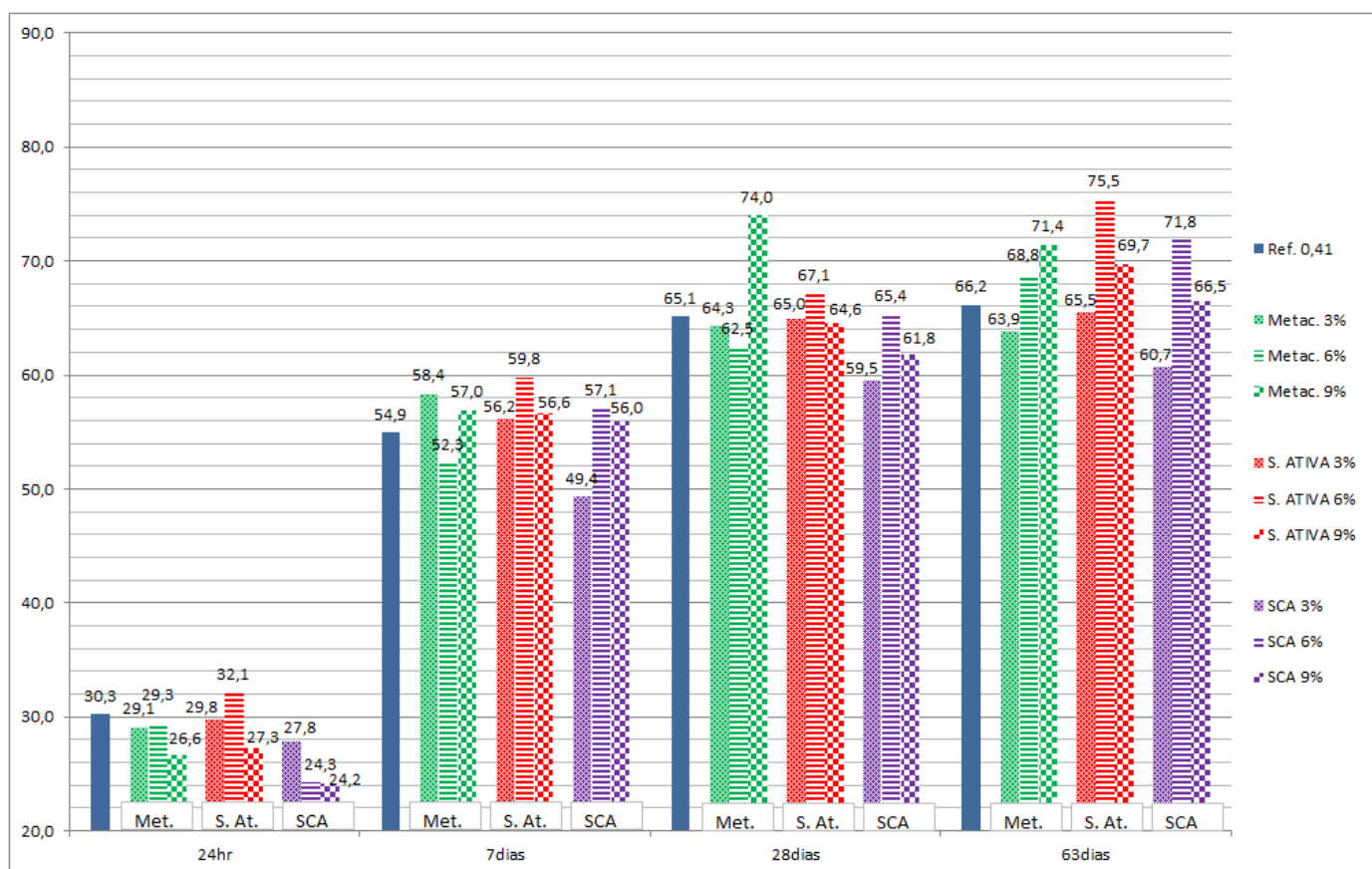


Figura 9: Evolução das resistências à compressão axial dos concretos de relação água/aglomerante 0,41. (Autor)

Notou-se que para a idade de 24 horas que independentemente da adição utilizada na substituição de 9% todas obtiveram menores resistências iniciais dos concretos produzidos, sendo assim, não contribuíram com incremento de resistência a compressão axial. Com destaque para a SCA (Sílica de Casca de Arroz), que a partir dos resultados imagina-se que tenha uma reatividade inicial mais lenta que as outras adições utilizadas neste trabalho.

Pode-se observar que para idades posteriores a SCA tem seus resultados mais equilibrados em comparação as demais adições.

Supõe-se que aos 7 dias as resistências dos concretos produzidos com as adições iniciam um ganho de resistência, provavelmente pelo início das reações pozolânicas de cada adição. Este aumento de resistência ainda pode ser observado nas idades de 63 dias, onde por exemplo, o crescimento do concreto com 28 dias produzido com sílica ativa na substituição de 6% tem um incremento de 12,5%.

Para a idade de 28 dias podemos analisar que a substituição de 6% foi a que teve as resistências mais altas para a adição de sílica ativa e sílica de casca de arroz, fica mais claro essa afirmação ao analisarmos os resultados de rompimentos com 63 dias. Já o metacaulim teve melhor desempenho com a substituição de 9%.

A substituição de 9% de sílica ativa e sílica de casca de arroz teve uma queda de resistência comparada aos resultados com 6 %. Como podemos observar na figura 10, os resultados de BIANCHINI (2010) não tiveram este mesmo comportamento. Apesar de ter ganhos de resistência não significativos, em todos seus resultados, ao aumentar a porcentagem de substituição, também aumentaram as resistências à compressão.

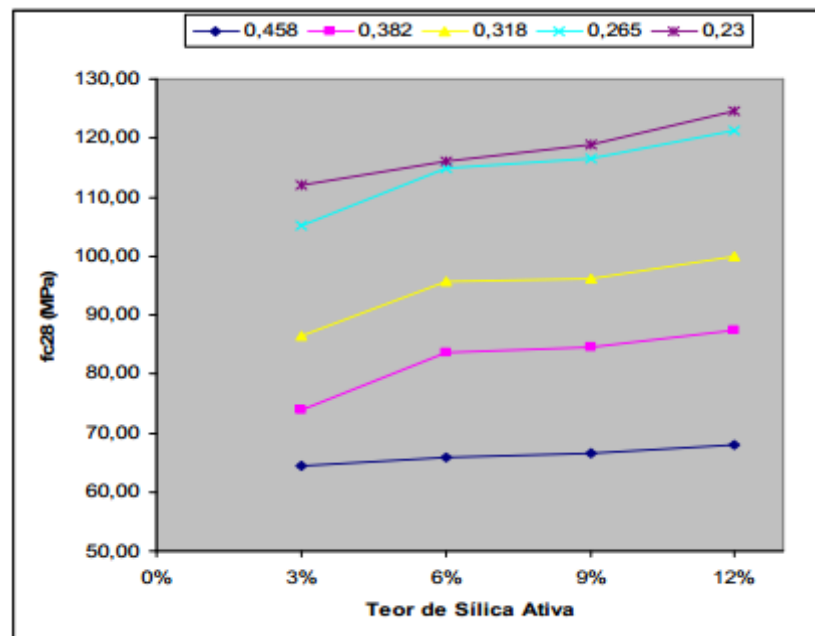


Figura 10: Evolução de resistências à compressão de concreto produzido com adição de sílica ativa. (BIANCHINI, 2010)

Na figura 11 é apresentada evolução das resistências à compressão axial dos concretos de relação água/aglomerante 0,36.

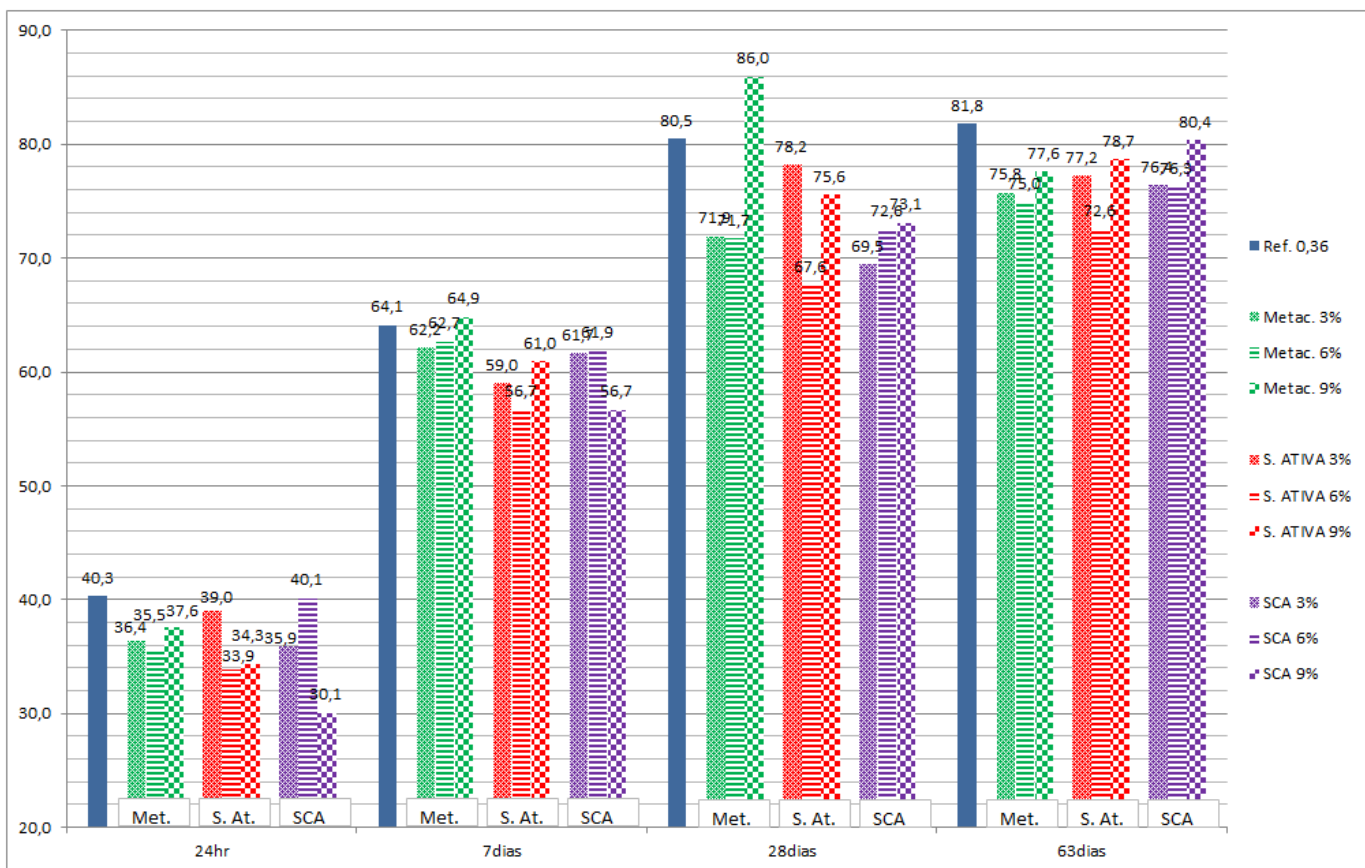


Figura 11: Evolução das resistências à compressão axial dos concretos de relação água/aglomerante 0,36. (Autor)

Na relação a/a de 0,36 a substituição em 9% de metacaulim aos 28 dias a resistência foi maior que a observada aos 63 dias, diferentemente do comportamento das outras adições que, apesar de pequenos, obtiveram ganhos de resistência.

Resultado que se assemelha ao encontrado por Souza e Camara (2016) onde após analisarem a substituição de parte do cimento em proporções de metacaulim de 5, 10, 15 e 20% alcançaram os melhores resultados a utilização do teor de 10% de metacaulim em substituição ao cimento.

Imagina-se que os corpos de prova com 63 dias de idade, referente ao metacaulim, tenham rompido no agregado graúdo. Ao analisar essa situação também podemos analisar que as resistências dificilmente passam de 80 MPa, tanto na idade de 28 dias, quanto na idade de 63 dias.

Na figura 12 é apresentada evolução das resistências à compressão axial dos concretos de relação água/aglomerante 0,31.

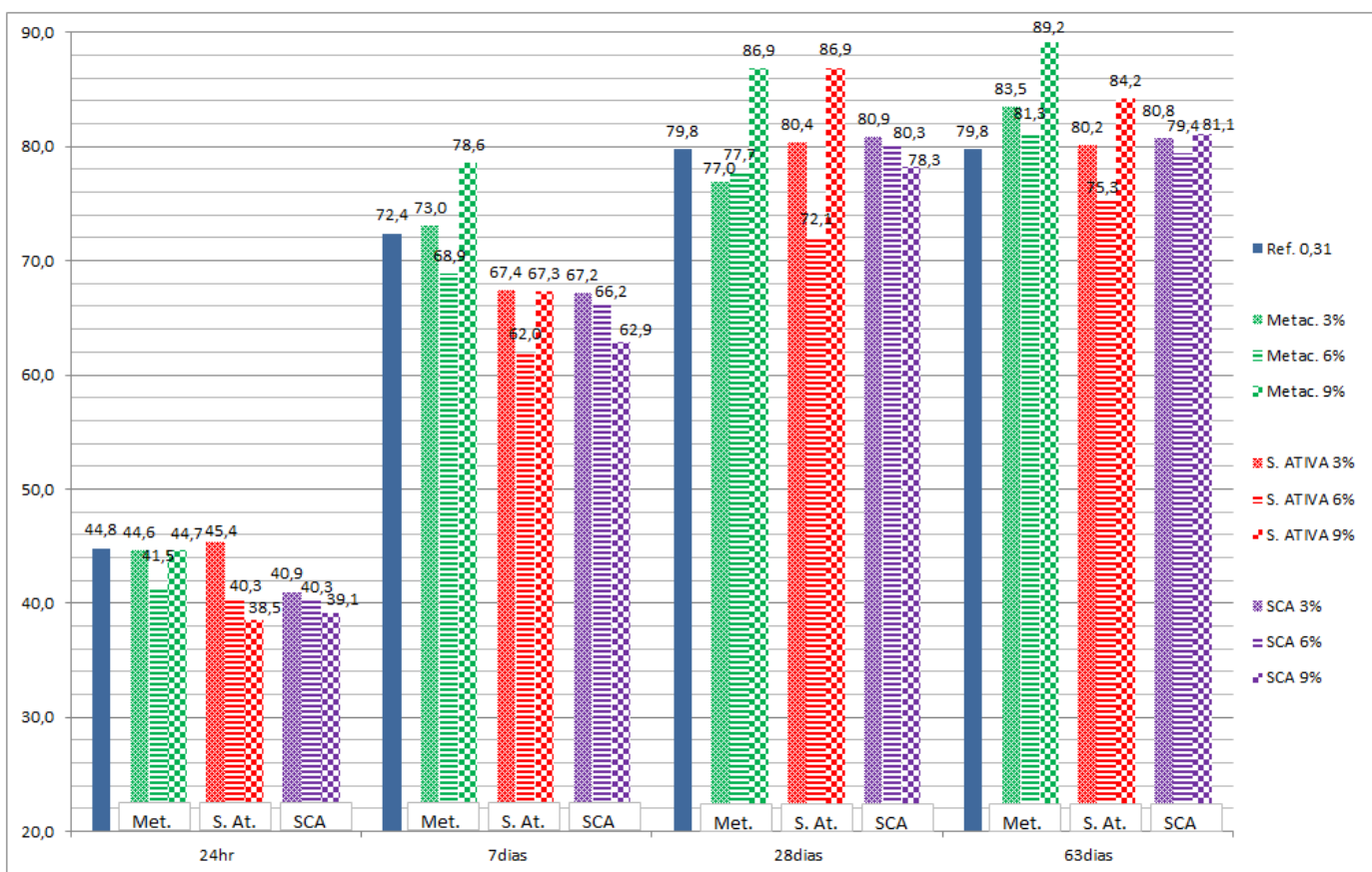


Figura 12: Evolução das resistências à compressão axial dos concretos de relação água/aglomerante 0,31. (Autor)

Assim como nas relações a/a de 0,41 e 0,36 na relação a/a 0,31 a substituição de 9% na idade de 24h apresenta as menores resistências. Com exceção do metacaulim. Isso pode-se explicar a partir de uma análise feita por BIANCHINI, 2010 onde comenta que ao aumentar o teor de sílica ativa utilizada, se faz necessário aumentar o consumo de aditivo, o que causa um período maior de dormência no concreto. Desta forma são indicados para melhores desempenhos de resistência nas idades iniciais, menores teores de sílica ativa.

Para a idade de 28 dias os concretos produzidos com 9% de substituição tiveram a mesma resistência potencial. Sendo que foram as maiores resistências obtidas, chegando no resultado de 7,1 MPa a mais que o concreto referência.

Nos concretos produzidos com relação a/a de 0,31 podemos observar que entre a idade de 28 dias e 63 dias, praticamente não foi obtido ganhos de

resistência, em alguns casos as resistências foram até mesmo menores. Acredita-se que nesta faixa de relação a/a o agregado graúdo utilizado neste trabalho se tornou o elo mais fraco. Na figura 13 é um dos exemplos em que o corpo de prova apresentou rupturas nos agregados graúdos. Esta ruptura foi observada nos corpos de prova com idade de 28 dias ou mais quando produzidos com a/a de 0,36 e 0,31.

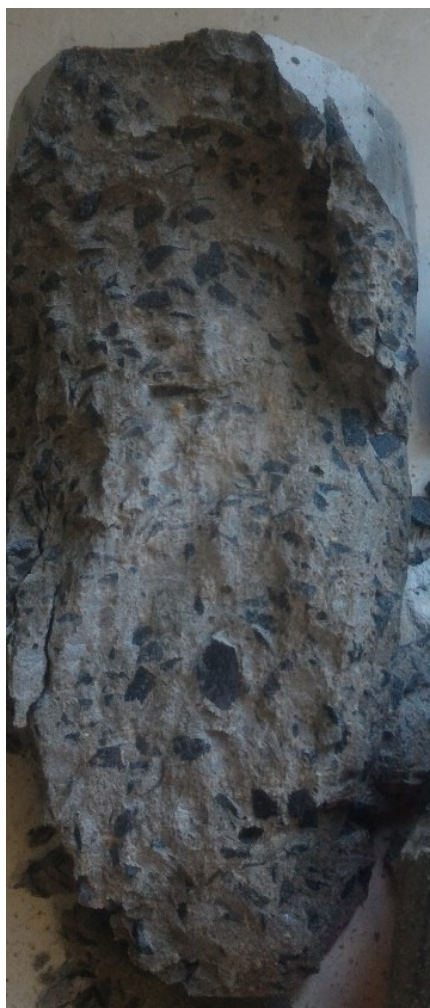


Figura 13: Ruptura no agregado graúdo. (Autor)

Tratando-se de resistência a compressão axial, a substituição de cimento por uma das adições deste trabalho, levando em consideração a resistência inicial como parâmetro de içamento para peças pré-moldadas, não obtiveram resultados interessantes para a indústria. No capítulo 7.4. Serão tratados os resultados de viabilidade econômica.

O metacaulim para a idade de 28 dias com substituição de 9% obteve as maiores resistências à compressão comparado as outras adições. Apenas na

relação a/a 0,31 a sílica ativa com 9% de substituição se igualou na resistência potencial.

Este trabalho visou a produção de concreto de alta resistência auto adensáveis, principalmente para uso em peças pré-moldadas.

Analizou-se a propriedade mecânica de resistência a compressão axial, porém o uso de adições como metacaulim, sílica ativa ou sílica de casca de arroz podem trazer diversos outros benefícios não analisados neste trabalho.

No trabalho de BIANCHINI, 2010 são apresentados significativos ganhos na redução do calor de hidratação, no teor de substituição de 3% já é possível ver esta redução, e essa redução aumenta ao aumentar o teor para 6%, sendo que para o teor de 9% a esse ganho se torna praticamente imperceptível.

LACERDA, 2005 apresenta melhorias de resistividade elétrica, no índice de vazios e diminuição de penetração de íons cloretos, nos concretos produzidos ao utilizar um teor de 8% de metacaulim e também para a adição de sílica ativa.

4.3. TRAÇOS PARA PRODUÇÃO DE 1 M³

As tabelas 24 a 26 ilustram as quantidades dos materiais utilizados na produção dos concretos de relação água/aglomerante 0,41, 0,36 e 0,31, respectivamente.

Traço	Cimento (kg)	Areia F (kg)	Areia M (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)	Adição (kg)	a/a	Aditivo
CIMENTO	463	176	698	956	190	1,96	0	0,41	0,42%
Metac. 3% S. ATIVA	442	173	687	941	187	2,48	11,32	0,41	0,56%
3%	441	173	685	939	186	2,33	9,80	0,41	0,53%
SCA 3%	432	169	671	919	182	2,03	9,37	0,41	0,47%
Metac. 6% S. ATIVA	421	170	675	925	184	2,48	22,26	0,41	0,59%
6%	429	173	688	943	187	3,18	19,68	0,42	0,74%
SCA 6%	432	174	692	949	188	2,97	19,35	0,42	0,69%
Metac. 9% S. ATIVA	415	173	688	942	187	3,46	34,00	0,42	0,83%
	413	172	684	937	186	3,06	29,32	0,42	0,74%

9%

SCA 9% - 418 174 693 949 188 2,68 29,04 0,42 0,64%

Tabela 24: Traço final para produção de 1m³ para relação água aglomerante 0,41. (Autor)

Traço	Cimento (kg)	Areia F (kg)	Areia M (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)	Adição (kg)	a/a	Aditivo
CIMENTO	528	165	654	956	190	3,37		0,36	0,64%
Metac. 3%	501	161	641	937	186	3,13	12,85	0,36	0,62%
S. ATIVA 3%	507	163	647	947	188	3,08	11,26	0,36	0,61%
SCA 3%	505	163	646	944	188	2,33	10,98	0,36	0,46%
Metac. 6%	486	161	641	937	186	3,24	25,70	0,36	0,67%
S. ATIVA 6%	482	160	635	929	185	3,02	22,09	0,37	0,63%
SCA 6%	493	164	650	950	189	2,67	22,09	0,37	0,54%
Metac. 9%	474	162	645	944	187	4,33	38,81	0,37	0,91%
S. ATIVA 9%	476	163	649	949	188	4,47	33,84	0,37	0,94%
SCA 9% -	475	163	648	947	188	3,75	33,01	0,37	0,79%

Tabela 22: Traço final para produção de 1m³ para relação água aglomerante 0,36. (Autor)

Traço	Cimento (kg)	Areia F (kg)	Areia M (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)	Adição (kg)	a/a	Aditivo
CIMENTO	607	148	590	947	188	2,84		0,31	0,47%
Metac. 3%	591	149	592	950	189	3,51	15,14	0,31	0,59%
S. ATIVA 3%	588	148	589	946	188	3,47	13,07	0,31	0,59%
SCA 3%	589	148	590	947	188	3,08	12,79	0,31	0,52%
Metac. 6%	566	147	584	939	187	3,68	29,91	0,31	0,65%
S. ATIVA 6%	564	147	583	936	186	3,24	25,87	0,32	0,57%
SCA 6%	569	148	588	945	188	3,37	25,52	0,32	0,59%
Metac. 9%	552	148	589	946	188	5,08	45,22	0,31	0,92%
S. ATIVA 9%	554	149	592	950	189	5,09	39,37	0,32	0,92%
SCA 9% -	554	149	591	949	189	4,51	38,45	0,32	0,81%

Tabela 23: Traço final para produção de 1m³ para relação água aglomerante 0,31. (Autor)

4.4. VIABILIDADE ECONÔMICA

Neste capítulo será analisado o custo-benefício dos concretos produzidos. Na tabela 27 estão apresentados os valores de compra dos materiais constituintes, que são utilizados para montar as tabelas 28, 29 e 30 onde estão as análises econômicas dos concretos com a/a de 0,41, 0,36 e 0,31 respectivamente.

Areia Fina	22,87 R\$/Ton
Areia Grossa	28,47 R\$/Ton
Brita 0	36,01 R\$/Ton
Cimento	0,362 R\$/kg
Aditivo Superplastificante	12,73 R\$/kg
Metacaulin	1,12 R\$/kg
Sílica Ativa	0,95 R\$/kg
Sílica de Casca de Arroz	0,67 R\$/kg

Tabela 27: Custo dos insumos utilizados na pesquisa. (Autor)

	Resistência (MPa) 24hr	R\$/MPa	Resistência (MPa) 7dias	R\$/MPa	Resistência (MPa) 28dias	R\$/MPa	Resistência (MPa) 63dias	R\$/MPa
Ref.	30,3	8,29	54,9	4,57	65,1	3,85	66,2	3,79
Metac. 3%	29,1	8,31	58,4	4,15	64,3	3,77	63,9	3,79
S. Ativa 3%	29,8	7,95	56,2	4,21	65,0	3,64	65,5	3,61
SCA 3%	27,8	8,10	49,4	4,57	59,5	3,79	60,7	3,71
Metac. 6%	29,3	8,41	52,3	4,71	62,5	3,94	68,8	3,58
S. Ativa 6%	32,2	7,86	59,8	4,22	67,1	3,76	75,5	3,35
SCA 6%	24,3	10,10	57,1	4,29	65,4	3,75	71,8	3,41
Metac. 9%	26,7	10,14	57,0	4,75	74,0	3,65	71,4	3,78
S. Ativa 9%	27,3	9,32	56,6	4,48	65,0	3,93	69,8	3,64
SCA 9%	24,2	10,05	56,0	4,34	61,8	3,93	66,5	3,65

Tabela 24: Análise econômica da relação água/ aglomerante 0,41. (Autor)

Para a resistência de 24h as substituições de 3 e 6% de sílica ativa foram as que obtiveram o menor custo por MPa, chegando a R\$0,43 reais a menos que o concreto referência. De maneira geral, a SCA foi a que teve o pior custo-benefício nas primeiras idades.

	Resistência (MPa) 24hr	R\$/MPa	Resistência (MPa) 7dias	R\$/MPa	Resistência (MPa) 28dias	R\$/MPa	Resistência (MPa) 63dias	R\$/MPa
Ref	40,3	6,76	64,1	4,25	80,5	3,38	81,8	3,33
Metac. 3%	36,4	7,50	62,2	4,40	71,9	3,80	75,8	3,61
S. Ativa 3%	39,0	6,95	59,0	4,59	78,2	3,47	77,3	3,51
SCA 3%	35,9	7,17	61,7	4,18	69,5	3,71	76,4	3,37
Metac. 6%	35,5	8,00	62,7	4,52	71,7	3,95	75,0	3,78
S. Ativa 6%	33,9	8,00	56,7	4,78	67,6	4,01	72,6	3,73
SCA 6%	40,1	6,61	61,9	4,28	72,6	3,65	76,3	3,48
Metac. 9%	37,6	8,18	64,9	4,75	86,0	3,58	77,6	3,97
S. Ativa 9%	34,3	8,73	61,0	4,91	75,6	3,96	78,7	3,81
SCA 9%	30,1	9,31	56,7	4,93	73,1	3,83	80,4	3,48

Tabela 25: Análise econômica da relação água/ aglomerante 0,36. (Autor)

Notou-se que são poucos os concretos produzidos com adições, independente de qual seja, que o custo R\$/MPa é menor que o produzido somente com cimento.

	Resistência (MPa) 24hr	R\$/MPa	Resistência (MPa) 7dias	R\$/MPa	Resistência (MPa) 28dias	R\$/MPa	Resistência (MPa) 63dias	R\$/MPa
Ref	44,8	6,55	72,4	4,06	79,8	3,68	79,8	3,68
Metac. 3%	44,6	7,02	73,1	4,29	77,0	4,07	83,5	3,75
S. Ativa 3%	45,4	6,77	67,4	4,56	80,4	3,82	80,2	3,83
SCA 3%	40,9	7,30	67,2	4,44	80,9	3,69	80,8	3,70
Metac. 6%	41,5	7,77	68,9	4,68	77,7	4,15	81,3	3,97
S. Ativa 6%	40,3	7,63	62,0	4,96	72,1	4,26	75,3	4,08
SCA 6%	40,3	7,53	66,2	4,59	80,3	3,78	79,4	3,82
Metac. 9%	44,7	7,90	78,6	4,49	86,9	4,06	89,2	3,95
S. Ativa 9%	38,5	8,84	67,3	5,06	86,9	3,92	84,2	4,04
SCA 9%	39,1	8,22	62,9	5,11	78,3	4,10	81,1	3,96

Tabela 26: Análise econômica da relação água/ aglomerante 0,31. (Autor)

Nas idades de 28 e 63 dias a substituição em 3% sílica de casca de arroz foi a que atingiu um valor de R\$/MPa mais próximo do concreto referência, destacando que não houve nenhuma adição, seja qual for o teor de substituição que alcançou um custo por MPa menor do que o concreto referência.

Para tentar ser mais objetivo na análise comparativa dos desempenhos dos concretos produzidos, foi utilizado a eficiência econômica como parâmetro. A Eficiência Econômica é obtida pelo valor da resistência à compressão (**R**) dividido pelo consumo de aglomerantes (Cimento, **C** + adição, **A** + aditivo, **Ad**) multiplicado pelos seus respectivos custos unitários (**CC**= custo do cimento, **CA**= custo da adição e **Cad**= custo do aditivo), como fórmula apresentada a seguir:

$$E.E. = \frac{R}{C * CC + A * CA + Ad * Cad}$$

Na tabela 31 são apresentados todos os resultados das análises da eficiência econômica.

Idade	24 horas			7 dias			28 dias			63 dias		
a/a	0,41	0,36	0,31	0,41	0,36	0,31	0,41	0,36	0,31	0,41	0,36	0,31
Ref.	0,16	0,17	0,18	0,29	0,27	0,28	0,34	0,34	0,31	0,34	0,35	0,31
Metac. 3%	0,14	0,15	0,16	0,29	0,26	0,27	0,31	0,31	0,28	0,31	0,32	0,30
S. Ativa 3%	0,15	0,17	0,17	0,28	0,25	0,25	0,33	0,33	0,30	0,33	0,33	0,30
SCA 3%	0,15	0,16	0,16	0,26	0,28	0,26	0,32	0,32	0,31	0,32	0,35	0,31
Metac. 6%	0,14	0,14	0,15	0,25	0,25	0,24	0,30	0,29	0,27	0,33	0,30	0,28
S. Ativa 6%	0,15	0,14	0,15	0,28	0,24	0,23	0,31	0,29	0,27	0,35	0,31	0,28
SCA 6%	0,12	0,18	0,15	0,28	0,27	0,25	0,32	0,32	0,30	0,35	0,34	0,30
Metac. 9%	0,11	0,14	0,14	0,25	0,24	0,25	0,32	0,32	0,28	0,31	0,29	0,28
S. Ativa 9%	0,13	0,13	0,13	0,26	0,23	0,22	0,30	0,29	0,29	0,32	0,30	0,28
SCA 9%	0,12	0,12	0,14	0,27	0,23	0,22	0,30	0,30	0,28	0,32	0,33	0,29

Tabela 27: Resultados de eficiência econômica. (Autor)

Em todas as relações água/aglomerante, para todas as substituições utilizadas neste trabalho e em todas as idades analisadas praticamente nenhuma

das adições apresentou um valor de eficiência econômica superior ao concreto referência. Isto deve-se principalmente pelos preços consideravelmente mais altos das adições em comparação ao do cimento. Também demanda de aditivo, que conforme o aumento da porcentagem de utilização das adições aqui apresentadas maior o consumo de aditivo.

Na idade de 24h na relação a/a de 0,36 a sílica de casca de arroz apresentou valor de E.E.= 0,18 maior que os 0,17 do concreto referência.

Fazendo uma comparação entre as adições podemos notar que para a idade de 24 horas na relação a/a de 0,41 a sílica ativa apresentou melhores eficiências que as demais adições. Com exceção da substituição de 6%, onde a sílica de casca de arroz também obteve o mesmo valor de E.E.=0,15. Para a relação a/a de 0,36 destaca-se a sílica de casca de arroz.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentar-se à as considerações finais deste trabalho, bem como as sugestões para novos estudos na área.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos neste trabalho podemos afirmar que o teor ótimo de cada adição está ligado à relação a/a, para a idade de 28 dias a sílica ativa na substituição de 6% alcançou os melhores resultados para relação a/a de 0,41, 3% para relação a/a 0,36 e 6% para a/a 0,31. O metacaulim obteve seu melhor desempenho com a substituição de 9% para todas as relações água/aglomerante estudadas. A sílica de casca de arroz para relação a/a 0,41 a substituição ideal foi de 6%, para relação a/a 0,36 substituição de 9% e para a relação de 0,31 a substituição ideal foi a de 3%.

De forma geral os usos das adições utilizadas neste trabalho não foram satisfatórios no ponto de vista de resistência inicial, pensando em uma indústria de pré-moldados onde os içamentos de peças precisam ser feitos com a menor idade possível para liberação de novas produções e também desprotensões de peças com 24h de idade.

A sílica de casca de arroz apesar de não ser tão difundida no mercado das adições, obteve bons resultados, mostrando ser uma boa adição comparada a sílica ativa e ao metacaulim. Principalmente na idade de 63 dias.

O metacaulim no teor de 9% obteve os melhores resultados nos ensaios de resistência à compressão axial para todas as relações água/aglomerante estudadas. Porém os concretos produzidos ficaram muito coesos, sendo que esta coesão aumenta conforme se diminui a relação a/a.

O uso da sílica da casca de arroz apresentou um bom comportamento reológico, com boa fluidez. Comportamento que também foi parecido com a

sílica ativa. Desta forma, essas duas adições têm melhor aptidão em ser aplicadas, por serem menos coesas. O que se torna uma boa opção para melhorar a auto adensabilidade, principalmente em pequenas relações água/aglomerante.

A influência do agregado utilizado em concretos de alta resistência exerce grande influência, podendo limitar as resistências potenciais dos concretos produzidos. Sendo assim, é preciso se fazer uma seleção de materiais de boa qualidade.

A utilização de adições contribui na redução de emissão CO₂ pois o consumo de cimento utilizado é reduzido.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se para próximos trabalhos, afim de complementar o estudo, os seguintes assuntos:

- Ampliar os ensaios no estado endurecido do concreto como módulo de elasticidade e tração na flexão;
- Medir desempenhos de durabilidade como resistividade elétrica, absorção, índice de vazios e penetração de íons cloretos;
- Duplicar os ensaios produzidos, com intuito de obter resultados mais confiáveis. Tratá-los estatisticamente;
- Como os resultados de resistência deste estudo se limitaram a aproximadamente 80 a 90 MPa aos 28 dias, com a utilização de agregado graúdo lamelar, recomenda-se a repetição deste estudo com utilização de agregado graúdo mais próximo da forma cúbica;
- Ampliar as faixas de relação água/aglomerante afim de verificar os comportamentos dos concretos para relações menores que as estudadas;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto.** <http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto>. Acesso em 19 de nov. 2016.

AÏTCIN, P. -C. **Concreto de Alto Desempenho**. Trad. Geraldo G. Serra. São Paulo, ed. PINI, 2000, 667 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 363.2R-98. Guide to quality control na testing of high-strenght.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7223**: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, 1992.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais: Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

BEZERRA, I. M. T. et al. **Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 639-645, 2011.

BIANCHINI, M. **Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto**. 2010. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto**. Cerâmica, v. 54, n. 331, p. 309-318, 2008.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIN, E. M. R. **Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com**

elevado teor de carbono nas propriedades do concreto. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 99-107, 2009.

DA FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica.** 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

G.C. Isaia, **Concreto: Ciência e Tecnologia** 1. Ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v

GOMES, C. M; MARTON, L.M. Concreto de Cimento Portland Tipo III e Sílica Da Casca Do Arroz (SCA): Uma Contribuição à Sustentabilidade. In: 57º Congresso Brasileiro do Concreto. Bonito, MS: IBRACON, 2015.

HARTMANN, C. T.; HELENE, P. Tecnologia: concretos de alta resistência. **TECHNE**, São Paulo, n.81, dez. 2004. Disponível em:< <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/81/artigo285299-1.aspx>>. Acesso em: 04 dez. 2016.

KORMANN, A.C.M. et al.. Metodologias de reparos em estruturas hidráulicas de barragens. Parte I, Estudos preliminares. In: 43º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACON, 2001

LACERDA, C. S. **Estudo da influência da Substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos.** 2005. 230 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, 2005.

MEDEIROS, Marcelo H. F. ; ANDRADE, J. J. O. ; HELENE, Paulo . **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto.** In: Geraldo Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011, v. 1, p. 773-808.

MENDES, S. E. D. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** 2002. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Ibracon, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Estrutura, propriedades e materiais.** – São Paulo: PINI, 2014, p. 729 a 739).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Estrutura, propriedades e materiais.** – São Paulo: PINI, 2014, p. 307).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: Estrutura, propriedades e materiais.** – São Paulo: PINI, 2014, p. 524 a 537).

MENEZES, R. R. et al. **Atividade pozzolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 13, n.6, p. 795-801, 2009.

MOREIRA, B. P.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Durabilidade da camada de cobrimento ao ataque por cloretos de protótipos de concreto estrutural com altos teores de cinza volante.** Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, 2004.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto.** Tradução de GIAMMUSSO, Salvador E. 2a ed. São Paulo: PINI, 1997.

OLIVEIRA, M. P. de, BARBOSA, N. P. **Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.v.10, n.2, p.490–496,2006. Disponível em [Http://www.agriambi.com.br/revista/v10n2/490.pdf](http://www.agriambi.com.br/revista/v10n2/490.pdf). Acessado em novembro/2016.

OKAMURA, Hajime; OUCHI, Masahiro. **Self-Compacting Concrete.** Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, n. 1, p. 5-15 April. Japan Concrete Institute, 2003, 11p.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto**, São Paulo, n. 53, p. 14-19, jan./fev./mar. 2009.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozzolânico.** 2006. 320 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozzolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 267p.

SOUZA, F.B. et al. **Análise comparativa das propriedades de concretos convencionais com substituição parcial do cimento portland por cinza da**

casca de arroz. Revista Iniciação Científica, v. 12, n. 1, 2014, Criciúma, Santa Catarina.

SOUZA, M. M.; CAMARA, T.A. **Estudo do Teor de Metacaulim em Concretos de Alto Desempenho.** Revista Científica ANAP Brasil, v. 9, n .17, 2016, São Paulo.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2006.

TASHIMA, M. M. et al. **Reaproveitamento da cinza de casca de arroz na construção civil.** HOLOS Environment, v. 11, n. 1, p. 81-89, 2011.

7. APÊNDICES

7.1. SLUMP FLOW



7.2. CAIXA L



7.3. FUNIL V



7.4. RESULTADOS DE ROMPIMENTOS DE CORPO DE PROVA A/A
0,41

24hr	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2	7dias	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2
	ref	23,78	23,2	30,28	29,54		ref	43,15	42,1	54,94	53,60
metacaulim 3%	t1	22,88	22,83	29,13	29,07		t1	41,78	45,84	53,20	58,37
S. ATIVA 3%	t2	22,65	23,37	28,84	29,76		t2	41,83	44,12	53,26	56,18
SCA 3%	t3	21,86	21,04	27,83	26,79		t3	38,7	38,76	49,27	49,35
metacaulim 6%	t4	22,99	22,26	29,27	28,34		t4	41,04	39,57	52,25	50,38
S. ATIVA 6%	t5	25,25	23,61	32,15	30,06		t5	40,5	46,99	51,57	59,83
SCA 6%	t6	17,27	19,07	21,99	24,28		t6	44,88	39,81	57,14	50,69
metacaulim 9%	t7	20,92	20,93	26,64	26,65		t7	44,74	42,8	56,96	54,49
S. ATIVA 9%	t8	21,41	19,86	27,26	25,29		t8	37,6	44,48	47,87	56,63
SCA 9%	t9	18,77	19,01	23,90	24,20		t9	40,4	43,98	51,44	56,00
28dias	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2	63dias	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2
	ref	51,16	47,48	65,14	60,45		ref	50,88	51,96	64,78	66,16
metacaulim 3%	t1	50,49	49,85	64,29	63,47		t1	50,15	49,43	63,85	62,94
S. ATIVA 3%	t2	51,03	48,67	64,97	61,97		t2	51,43	50,43	65,48	64,21
SCA 3%	t3	45,77	46,75	58,28	59,52		t3	47,7	46,41	60,73	59,09
metacaulim 6%	t4	47,85	49,12	60,92	62,54		t4	51,7	54,04	65,83	68,81
S. ATIVA 6%	t5	51,47	52,72	65,53	67,13		t5	50,5	59,27	64,30	75,46
SCA 6%	t6	48,95	51,38	62,32	65,42		t6	56,42	56,11	71,84	71,44
metacaulim 9%	t7	50,94	58,15	64,86	74,04		t7	54,96	56,1	69,98	71,43
S. ATIVA 9%	t8	50,73	49,32	64,59	62,80		t8	53,19	54,78	67,72	69,75
SCA 9%	t9	47,82	48,56	60,89	61,83		t9	52,26	48,7	66,54	62,01

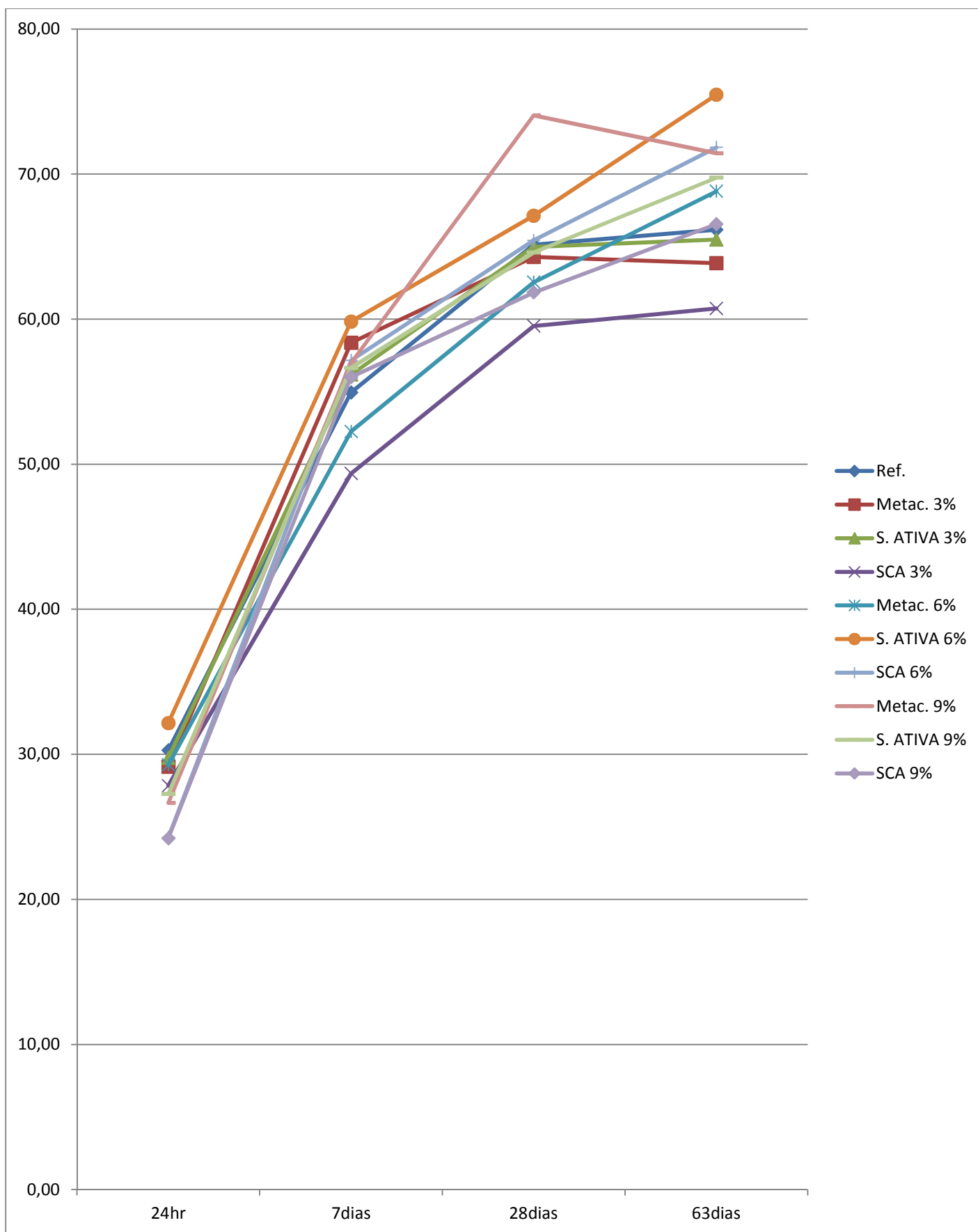
7.5. RESULTADOS DOS ROMPIMENTOS DE CORPOS DE PROVA
A/A 0,36

24hr	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2	7dias	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2
Ref	ref	31,29	31,64	39,84	40,29		ref	49,54	50,36	63,08	64,12
metacaulim 3%	t1	28,61	28,16	36,43	35,85		t1	44,02	48,82	56,05	62,16
S. ATIVA 3%	t2	29,96	30,63	38,15	39,00		t2	46,37	45,39	59,04	57,79
SCA 3%	t3	28,23	28,21	35,94	35,92		t3	47,18	48,45	60,07	61,69
metacaulim 6%	t4	27,59	27,85	35,13	35,46		t4	47,58	49,24	60,58	62,69
S. ATIVA 6%	t5	26,09	26,63	33,22	33,91		t5	44,53	42,83	56,70	54,53
SCA 6%	t6	31,52	28,2	40,13	35,91		t6	48,64	45,8	61,93	58,31
metacaulim 9%	t7	29,55	28,65	37,62	36,48		t7	50,94	50,23	64,86	63,95
S. ATIVA 9%	t8	26,47	26,96	33,70	34,33		t8	44,08	47,88	56,12	60,96
SCA 9%	t9	23,61	23,61	30,06	30,06		t9	43,81	44,55	55,78	56,72
28dias	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2	63dias	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2
Ref	ref	58,77	63,22	74,83	80,49		ref	63,43	64,24	80,76	81,79
metacaulim 3%	t1	53,1	56,48	67,61	71,91		t1	59,5	53,19	75,76	67,72
S. ATIVA 3%	t2	56,02	61,41	71,33	78,19		t2	60,67	59,13	77,25	75,29
SCA 3%	t3	54,55	53,6	69,46	68,25		t3	58,08	60	73,95	76,39
metacaulim 6%	t4	54,38	56,34	69,24	71,73		t4	58,9	55,56	74,99	70,74
S. ATIVA 6%	t5	52,24	53,11	66,51	67,62		t5	57,02	54,78	72,60	69,75
SCA 6%	t6	54,49	57,03	69,38	72,61		t6	58,87	59,91	74,96	76,28
metacaulim 9%	t7	58,01	67,52	73,86	85,97		t7	60,74	60,95	77,34	77,60
S. ATIVA 9%	t8	55,41	59,36	70,55	75,58		t8	61,81	60,89	78,70	77,53
SCA 9%	t9	57,42	56,94	73,11	72,50		t9	63,12	61,76	80,37	78,64

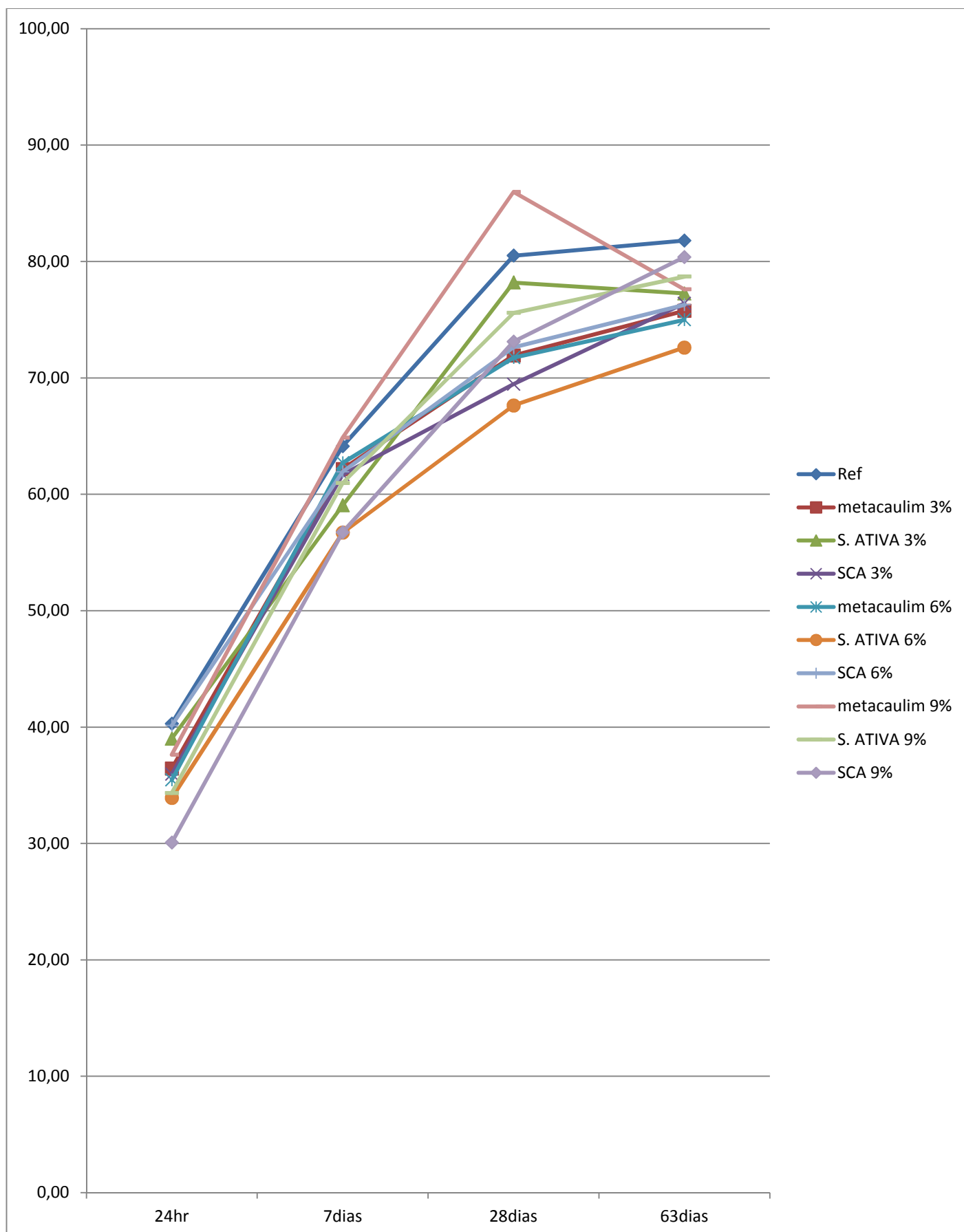
7.6. RESULTADOS DE ROMPIMENTOS DE CORPO DE PROVA A/A
0,31

24hr	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2	7dias	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2
Ref	ref	35,19	34,58	44,81	44,03		ref	56,85	53,26	72,38	67,81
metacaulim 3%	t1	32,85	35,06	41,83	44,64		t1	55,28	57,37	70,38	73,05
S. ATIVA 3%	t2	35,64	34,75	45,38	44,24		t2	52,94	51,77	67,41	65,92
SCA 3%	t3	32,13	31,8	40,91	40,49		t3	52,78	51,25	67,20	65,25
metacaulim 6%	t4	31,88	32,59	40,59	41,49		t4	53,59	54,08	68,23	68,86
S. ATIVA 6%	t5	31,63	30,98	40,27	39,44		t5	48,68	47,63	61,98	60,64
SCA 6%	t6	31,68	29,94	40,34	38,12		t6	52,02	49,03	66,23	62,43
metacaulim 9%	t7	33,02	35,08	42,04	44,67		t7	61,51	61,71	78,32	78,57
S. ATIVA 9%	t8	30,27	29,15	38,54	37,11		t8	52,88	48,65	67,33	61,94
SCA 9%	t9	30,71	29,14	39,10	37,10		t9	49,37	48,94	62,86	62,31
28dias	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2	63dias	traço	cp1	cp2	mpa1	mpa2
Ref	ref	58,47	62,64	74,45	79,76		ref	61	62,67	77,67	79,79
metacaulim 3%	t1	56,37	60,45	71,77	76,97		t1	65,56	65,07	83,47	82,85
S. ATIVA 3%	t2	63,11	60,11	80,35	76,53		t2	60,82	62,95	77,44	80,15
SCA 3%	t3	62,08	63,5	79,04	80,85		t3	62,39	63,47	79,44	80,81
metacaulim 6%	t4	61,06	57,97	77,74	73,81		t4	59,64	63,82	75,94	81,26
S. ATIVA 6%	t5	56,61	54,5	72,08	69,39		t5	59,15	58,84	75,31	74,92
SCA 6%	t6	59,69	63,05	76,00	80,28		t6	62,36	62,37	79,40	79,41
metacaulim 9%	t7	68,22	62,95	86,86	80,15		t7	67,38	70,05	85,79	89,19
S. ATIVA 9%	t8	68,28	59,26	86,94	75,45		t8	62,79	66,14	79,95	84,21
SCA 9%	t9	61,5	57,67	78,30	73,43		t9	63,71	61,58	81,12	78,41

7.7. EVOLUÇÃO DAS RESISTÊNCIAS RELAÇÃO A/A 0,41



7.8. EVOLUÇÃO DAS RESISTÊNCIAS RELAÇÃO A/A 0,36



7.9. EVOLUÇÃO DAS RESISTÊNCIAS RELAÇÃO A/A 0,31

