



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
ENGENHARIA CIVIL

ANA PAULA ANTONELLO SIEG

**CONCRETO DE PÓS REATIVOS – ESTUDO DAS ADIÇÕES MINERAIS: CINZA
DE CASCA DE ARROZ, METACAULIM E SÍLICA ATIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso

Alegrete
2012

ANA PAULA ANTONELLO SIEG

**CONCRETO DE PÓS REATIVOS – ESTUDO DAS ADIÇÕES MINERAIS: CINZA
DE CASCA DE ARROZ, METACAILIM E SÍLICA ATIVA**

Orientador: Prof. Dra. Elizabete Yukiko

Nakanishi Bavastri

Coorientador: Prof. Dr. Gihad

Mohamad

Alegrete

2012

ANA PAULA ANTONELLO SIEG

**CONCRETO DE PÓS REATIVOS – ESTUDO DAS ADIÇÕES MINERAIS: CINZA
DE CASCA DE ARROZ, METACAILIM E SÍLICA ATIVA**

Trabalho apresentado em: 19 de outubro de 2012.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Elizabete Yukiko Nakanishi Bavastri

Orientador

Engenharia Civil – UNIPAMPA

Prof. Dr. Gihad Mohamad

Coorientador - UFSM

Profa. Dra. Larissa Degliuomini Kirchhof

UFSM

Profa. Dra. Monica Regina Garcez

UFPEl

Dedico este trabalho aos meus pais,
Pedro e Diva. Tenho muito orgulho de
vocês.

AGRADECIMENTO

Quero agradecer, em primeiro lugar, à Deus, por ter me concedido o dom da vida e me proporcionado encontrar pessoas maravilhosas nessa jornada.

Quero agradecer a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, desde o apoio emocional, passando pelo ajuda em laboratório, até o apoio financeiro. Sem a ajuda de todos não chegaria até aqui.

À minha família, meu pai, Pedro, minha mãe, Diva, meu irmão, Paulo, minha cunhada, Scheila e meu sobrinho amado, Miguel. Pelo infinito amor e carinho concedido durante essa etapa.

Ao meu colega, amigo e namorado, Jackson, que não mediu esforços para ajudar, que contribui muito para meu crescimento acadêmico e pessoal. Muito obrigada por dividir os bons e maus momentos durante esse 4 anos e meio. Você faz parte desta conquista.

À minha família emprestada, meu sogro Luiz, minha sogra Inêz e meu cunhado Junior, por terem me acolhido e incentivado.

À minha Orientadora, Elizabete N. Bavastri, pelo auxílio e apoio proporcionado durante o seguimento da pesquisa.

Ao Professor André Lübeck, pela atenção e sugestões oferecidas que foram de grande importância.

Aos meus colegas, Cristian, Fernanda, Rodrigo, Ricardo, Eduardo Meirelles e demais que dividiram o laboratório e que mesmo realizando suas pesquisas não exitaram em auxiliar quando necessário.

Aos colegas, Everton e Eduardo Pachla, que contribuíram para a realização dos ensaios.

Aos demais colegas e amigos, que me amparão e me fizeram seguir em frente, Clarissa, Lucas, Marina, Patrícia, Raul, Rudy, Luis Fernando, Felipe, Rafael e Simone. Obrigada por tudo!

Ao Técnico de Laboratório Marcelo Dias, que sempre esteve disposto a contribuir e ensinar.

A empresa GRACE BRASIL LTDA, pela doação do aditivo utilizado no trabalho.

A FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, pelo apoio financeiro.

*“Não fique triste quando
ninguém notar o que fez de bom
Afinal...*

*O sol faz um enorme espetáculo
ao nascer, e mesmo assim, a
maioria de nós continua
dormindo”.*

Charlie Chaplin

RESUMO

O uso de adições minerais no concreto vem se difundindo cada vez mais por meio de estudos que visam as mais diversas características, como: aumento da durabilidade, aumento da resistência mecânica e aproveitamento de resíduos industriais. Os estudos sobre Concreto de Pós Reativos (CPR), também, estão ganhando espaço principalmente pelo aumento de resistência que proporcionam. Neste sentido, esta pesquisa pretende introduzir no CPR algumas adições minerais, como: cinza de casca de arroz, metacaulim e sílica ativa, de forma individual, em três percentuais: 0, 20, 25 e 30%. A mistura é composta de cimento Portland CPV ARI, areia fina ou areia de quartzo, pó de quartzo, aditivo superplastificante e com fator água/aglomerante em torno de 0,17. Foram realizados ensaios de caracterização nos materiais utilizados e as comparações entre os traços foram feitas a partir do ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos. Através dos valores encontrados constatou-se um desempenho satisfatório das adições utilizadas, caracterizado pelas altas resistências atingidas.

ABSTRACT

The use of mineral additions in concrete has become increasingly widespread by means of studies that aim the most diverse characteristics, such as: increasing the durability, increasing the mechanical resistance and utilization of industrial waste. Studies on Reactive Powder Concrete (RPC), also, are gaining ground mainly by the increase of resistance they provide. This sense, this research aims to introduce some additions minerals in CPR such as: rice husk ash, silica fume, and metakaolin, individually in three percentages: 0, 20, 25 and 30%. The mixture is composed of Portland cement CPV ARI, fine sand or quartz sand, quartz powder, superplasticizer and water/binder factor about 0,17. Assays were performed to characterize the materials used and comparisons were made between the traces from the axial compression test of cylindrical specimens. Through values found was found satisfactory performance of the additions used, characterized by high resistance achieved.

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

a/ag – Relação água/aglomerante

a/c – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Institute

ASTM - American Society for Testing and Materials

C₃A – Aluminato tricálcio

CA – Casca de Arroz

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CaOH₂ - Hidróxido de cálcio

CAR – Concreto de Alta Resistência

CAUAD - Concreto de Ultra-Alto Desempenho

CCA – Cinza de Casca de Arroz

CPR - Concreto de Pós Reativos

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

DSP - Densified System containing ultra-fine Particles

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MC – Metacaulim

MDF - Macro Defect Free MDF

MPa – Megapascal

NBR - Norma Brasileira

°C – Grau Célsius

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

USP – Universidade de São Paulo

μm – Micrometro

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Microestrutura de um CPR: C: grãos de cimento separados por faixa de pasta de cimento P: Nota-se a ausência de zona de transição e a extrema compacidade da pasta	21
Figura 2.2 - Passarela Sherbrooke, Canadá	22
Figura 2.3 – Empacotamento teórico máximo das partículas	25
Figura 2.4 – Micrografias das partículas de sílica ativa obtidas com microscópio eletrônico de varredura (elétrons secundários) Magnificação: a) 20.000 vezes, b) 80.000 vezes	28
Figura 2.5 - Ordem de mistura do CPR	30
Figura 3.1 – Cimento Portland	32
Figura 3.2 – (a) Areia A; (b) Areia B	34
Figura 3.3 – Pó de quartzo	34
Figura 3.4 – CCA	35
Figura 3.5 – Metacaulim	36
Figura 3.6 – Sílica ativa	36
Figura 3.7 – Argamassadeira	39
Figura 3.8 – Corpos-de-prova cilíndricos (5X10 cm)	39
Figura 3.9 – Prensa para o ensaio de compressão axial.	40
Figura 3.10 – Banho maria	41
Figura 4.1- Trabalhabilidade visual	45
Figura 4.2 – Resistência à compressão axial do concreto sem e com adição de pós, nos teores indicados e nas idades de estudo	47
Figura 4.3 – Comparação entre as resistências do concreto com adição de sílica versus concreto padrão	48
Figura 4.4 – Comparação entre as resistências do concreto com adição de CCA versus concreto padrão	49
Figura 4.5 – Comparação entre as resistências do concreto com adição de metacaulim versus concreto padrão	50
Figura 4.6 – Porcentagem de crescimento da resistência (28 dias = 100%).....	51
Figura 4.7 – Resistência à compressão (máximas) axial do concreto com adição de sílica (areia A), nos teores indicados e nas idades de estudo	52

Figura 4.8 – Resistência à compressão (máximas) axial do concreto com adição de sílica (areia B), nos teores indicados e nas idades de estudo	53
Figura 4.9 – Comparação das resistências à compressão (areia A e areia B), nos teores indicados e nas idades de estudo	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Composição típica do CPR original	21
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas comparadas ao concreto comum e de alto desempenho	22
Tabela 2.3 - Produção de arroz no Brasil na safra de 2010	26
Tabela 3.1 – Propriedades do Cimento Portland CPV ARI	33
Tabela 3.2 - Dosagens para Concreto de Pós Reativos	37
Tabela 3.3 - Composição e nomenclatura abreviada das dosagens	38
Tabela 3.4 - Composição e nomenclatura abreviada das dosagens	40
Tabela 4.1 – Resultados da massa específica do Cimento Portland e do pó de quartzo	42
Tabela 4.2 – Resultados da massa específica das adições minerais	42
Tabela 4.3 – Resultados da caracterização da areia A	43
Tabela 4.4 – Resultados da caracterização da areia B	43
Tabela 4.5 – Resultados do índice de atividade pozolânica com cimento (Sílica)	44
Tabela 4.6 – Resultados do índice de atividade pozolânica com cimento (CCA).....	44
Tabela 4.7 – Resultados do índice de atividade pozolânica com cimento (Metacaulim)	44
Tabela 4.8 – Ganho de resistência, na compressão axial, das amostras com adição de 20% de sílica aos 28 dias de idade em relação a 1 dia	55
Tabela 4.9 – Ganho de resistência, na compressão axial, das amostras com adição de 25% de sílica aos 28 dias de idade em relação a 1 dia	55
Tabela 4.10 – Ganho de resistência, na compressão axial, das amostras com adição de 30% de sílica aos 28 dias de idade em relação a 1 dia	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Delimitação do tema	14
1.2 Justificativas da Pesquisa	15
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 Metodologia	16
1.5 Estrutura do trabalho.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Breve histórico do concreto	18
2.1.1 Surgimento e definições do CPR	19
2.2 Materiais constituintes do CPR	23
2.2.1 Cimento	23
2.2.2 Areia	23
2.2.3 Pó de quartzo	24
2.2.4 Adições minerais.....	25
2.2.4.1 Cinza de Casca de Arroz.....	26
2.2.4.2 Metacaulim.....	27
2.2.4.3 Sílica	28
2.2.5 Aditivos	29
2.3 Produção	30
2.4 Cura térmica	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Materiais utilizados	32
3.1.1 Cimento	32
3.1.2 Areia	33
3.1.3 Pó de quartzo.....	34
3.1.4 Cinza de Casca de Arroz.....	35
3.1.5 Metacaulim.....	35
3.1.6 Sílica	36
3.1.7 Aditivos	37

3.2 Dosagem	37
3.2.1 Primeira dosagem	38
3.2.2 Segunda dosagem	40
3.3 Cura	41
4 RESULTADOS E ANÁLISES	42
4.1 Caracterização dos materiais da pesquisa	42
4.2 Índice de atividade pozolânica com cimento	44
4.3 Trabalhabilidade	45
4.4 Ensaio de resistência à compressão axial	46
4.4.1 Ensaio de resistência à compressão axial da primeira dosagem	46
4.4.2 Ensaio de resistência à compressão axial da segunda dosagem	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
5.1 Conclusões	56
5.2 Sugestão para trabalhos futuros	57
6 REFERÊNCIAS BIBLOGRÁFICAS	59
ANEXO A	61
ANEXO B	64

1 INTRODUÇÃO

Neste sentido, segundo Vanderlei (2004), as propriedades de resistência do concreto de pós reativos o colocam em situação entre o concreto e o aço, obrigando os projetistas a repensarem as formas estruturais e as metodologias de projeto e dimensionamento para possibilitar o melhor aproveitamento do material, já que as qualidades mecânicas deste concreto permitem realizar estruturas ou peças com grande liberdade de definição geométrica.

Concreto de pós reativos (CPR) conceitua-se pelo tamanho das partículas utilizadas para sua composição, já que o mesmo leva apenas partículas com diâmetros inferiores a 2 mm (VANDERLEI, 2004).

Levando em consideração os estudos já realizados, e incorporando ao CPR adições minerais como: sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz – material encontrado em abundância na região. Buscar-se-á criar uma metodologia experimental e teórica para desenvolver um concreto de pós reativos, utilizando esses materiais.

1.1 Delimitação do tema

A pesquisa refere-se ao desenvolvimento de um concreto de pós reativos, utilizando os seguintes materiais: cimento Portland CPV, areia quartzosa, pó de quartzo, cinza de casca de arroz, metacaulim e sílica ativa, sendo esses três últimos, utilizados separadamente nos traços, em três diferentes proporções: 20, 25, 30%, com o mesmo fator água/ aglomerante de 0,17.

As misturas serão moldadas em corpos de prova cilíndricos de 5 X 10 cm, a cura adotada será a cura térmica e as comparações entre as amostras limitam-se aos resultados da compressão axial correspondentes as idades de 1, 7 e 28 dias. Além disso, as curas dos concretos, limitaram-se as curas térmicas no vapor (banho maria), ou seja, mantendo-se constante a temperatura de 90°C.

1.2 Justificativas da Pesquisa

A história recente tem demonstrado que ainda vale à pena pesquisar, projetar, dosar, construir, sempre buscando tirar mais proveito desse versátil material de construção, explorando seu elevado desempenho e usando-o corretamente sob o ponto de vista da proteção e da sustentabilidade (ISAIA, 2007).

Neste sentido, a pesquisa que será desenvolvida com materiais encontrados no país, promovendo, principalmente, o uso da cinza de casca de arroz, encontrada em abundância na cidade de Alegrete-RS, onde se desenvolverá a pesquisa, além de utilizar metacaulim e sílica ativa, que são produtos produzidos e comercializados no país.

A partir desses materiais serão elaborados planos experimentais, variando e avaliando a influência dessas adições minerais na resistência à compressão do concreto de pós reativos de cimento Portland, esperando que essa resistência chegue a 200 MPa, para que o concreto desenvolvido seja considerado um CPR.

Em suma, o trabalho é de cunho inovador, pois existem apenas dois outros trabalhos técnicos que discutem o CPR no país: uma dissertação de mestrado na Unicamp escrita por Biz (2001) e uma tese de doutorado na USP/São Carlos redigida por Vanderlei (2004), além disso, o material utilizado (fibra de aço), nessa tese, foi trazido do exterior, e a dissertação não conseguiu atingir a resistência inicialmente proposta, devido as dificuldades na metodologia dos processos de fabricação dos concretos de pós reativos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral:

Desenvolver um concreto de pós reativos com adições minerais, que alcance resistência à compressão próxima a 200 MPa, variando o uso das adições minerais: cinza de casca de arroz, metacaulim e sílica ativa, utilizando-se cura térmica no vapor com temperatura de 90°C.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- caracterizar os agregados (areia e pó de quartzo) e os aglomerantes (cimento, cinza de casca de arroz, metacaulim e sílica ativa) que serão empregados nos ensaios;
- desenvolver traços que atinjam altíssimas resistências;
- elaborar, a partir dos resultados, comparativos da evolução de ganho de resistência a 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias;
- comparar os resultados das diferentes adições na massa de concreto à compressão axial.

1.4 Metodologia

O trabalho foi elaborado partindo-se de uma revisão bibliográfica dos aspectos envolvidos no mesmo. Dessa forma, e a partir dos objetivos estabelecidos foi elaborado o programa experimental, contendo ensaios de caracterização dos materiais, ensaios de concreto no estado fresco e ensaios de concreto no estado endurecido, elaboração do processo de cura. Assim, a metodologia de estudos para os ensaios realizados seguiram os procedimentos das normas vigentes, correlacionados abaixo:

- determinação da composição granulométrica dos agregados: NBR NM 248/2003;
- determinação da massa específica dos materiais em pó: NBR 6474/2000;
- determinação da massa específica dos agregados miúdos: NBR 9776/1987;
- determinação de atividade pozolânica: NBR 5752/1992;
- determinação da trabalhabilidade visual;
- determinação da resistência à compressão axial: NBR 5739:1994.

1.5 Estrutura do trabalho

A pesquisa contempla cinco Capítulos, sendo o capítulo 1 relativo à introdução do assunto e apresentação dos objetivos, delimitação, metodologia e estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 faz-se-ão uma abordagem geral sobre o concreto de pós reativos, bem como sobre concretos de alta resistência e alto desempenho. Além disso, conceitua os materiais constituintes, propriedades e aplicação.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais que foram utilizados na pesquisa, assim como os ensaios de caracterização que foram realizados nos mesmos.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados.

O Capítulo 5 foi dedicado as conclusões desta pesquisa e por fim as sugestões e recomendações para trabalhos futuros sobre o tema abordado. Ao final, estão disponíveis todas as referencias bibliográficas para realização desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Breve histórico do concreto

Em 1824, após o ter sido patenteado pelo inglês Joseph Aspdin, o cimento Portland foi difundido como aglomerante hidráulico, fazendo, assim, do concreto um líder entre os materiais utilizados na construção civil global. O uso de diversos outros cimentos é muito antigo, os povos egípcios usavam gesso impuro calcinado, já os gregos e romanos usavam, primeiramente, calcário calcinado e, posteriormente, a mistura passou a ser de cal, pozolanas, água, areia e pedra britada ou/e tijolos e telhas. Este concreto tornou-se o primeiro concreto da história (BIZ, 2001).

Inúmeros fatores fazem do concreto um dos materiais mais utilizados na construção civil, entre eles estão: sua versatilidade, sua composição, que é feita através de materiais de grande disponibilidade (água e agregados), o que o torna mais econômico e viável, e sua forma de uso e fabricação, que tem grande disseminação.

Desde o surgimento do concreto, no início do século XIX, novos estudos e pesquisas estão voltados para o desenvolvimento e aperfeiçoamento desse material. Cada pesquisa ou estudo busca novas tecnologias que incorporem a realidade e disponibilidade de novos materiais em suas regiões. A busca, cada vez maior, para desenvolver e encontrar novos aditivos químicos e adições, ou até mesmo uma formulação ecologicamente correta.

Segundo Biz (2001), o consumo de concreto, pela humanidade, fica somente atrás do consumo de água. O amplo emprego desse material e seu desenvolvimento, seja na área de protensão ou outras técnicas, faz com que as estruturas tenham as mais diversas formas e esbeltezes.

Com o crescimento na área de pesquisas voltadas ao concreto com maiores resistências, torna-se necessário o estudo da microestrutura dos componentes da mistura. Existem referências do estudo de concretos com alta resistência (CAR), do ano de 1929, que apresentaram valores na ordem de 28 MPa. Já na década de 50, nos Estados Unidos, os valores foram por volta de 34 MPa. A partir disso é possível observar que o conceito para concreto de altas resistências variou ao longo dos anos, o que faz ver a diferença usual de resistência de cada época. Na década de

60, por exemplo, concretos com resistência variando 41 a 60 MPa já eram comercializados. Em 1993, o American Concrete Institute – ACI definiu o concreto de alta resistência como sendo aquele que atinge resistência à compressão maior ou igual a 41 MPa. Porém essa definição pode variar em cada região, visto que em alguns locais já se comercializa concretos com resistência em torno de 60 MPa. Assim, para se chamar um concreto de CAR, sua resistência à compressão deve ficar entre 83 e 103 MPa. (BIZ, 2001).

À medida que as resistências usuais vão crescendo, o conceito sobre o CAR tem sua resistência aumentada. Com o passar dos tempos, a busca por concretos com maiores desempenhos e resistências fazem surgir outros conceitos que definem os novos concretos estudados.

Na última década a denominação dada por Mehta e Aïtcin foi de concreto de alto desempenho (CAD), que segundo eles, além de apresentar alta resistência, esse concreto, possui também maior rigidez, estabilidade dimensional e baixa permeabilidade, o que faz do CAD uma grande evolução, pois é capaz de englobar a alta resistência e durabilidade em um mesmo material (BIZ, 2001).

Recentemente surgiram duas novas linhas de pesquisa, a *Densified System Containing Ultra-Fine Particles* - DSP e a *Macro Defect Free* - MDF. A primeira refere-se a um concreto com matriz de granulométrica compacta, com alto teor de superplastificantes e sílica ativa, baixa concentração de água e uso de agregados muito resistentes (bauxita calcinada ou granito). A segunda trata de uma pasta de polímeros misturada com cimento aluminoso, que pode atingir resistência à tração elevada, chegando a 150 MPa (VANDERLEI, 2004).

Com base no CAD e com a evolução na área de pesquisa do Concreto de Pós Reativos (CPR), também chamado por Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CAUAD).

2.1.1 Surgimento e definições do CPR

A França e o Canadá são centros de referência para o Concreto de Pós Reativos. Pesquisadores, como Richard e Cheryrezy, iniciaram seus estudos em 1995, com o intuito de suprir a necessidade de concretos pré-fabricados expostos à

ambientes agressivos e posteriormente utilizaram o CPR para atender exigências militares (VANDERLEI, 2004).

Segundo Cheryrezy (1996) *apud* Vanderlei (2004), o princípio do CPR é baseado na formação de um material com o mínimo de defeitos, como microfissuras e poros capilares, obtidos pelo aumento da compacidade e resistência dos materiais que constituem o concreto. Vanderlei (2004) destaca que os princípios da pesquisa de Richard e Cheryrezy foram baseados em:

- a) eliminação do agregado graúdo, aumentando a homogeneidade;
- b) aumento da compacidade através da otimização granulométrica e aplicação de pressão antes e depois da pega;
- c) tratamento térmico após o endurecimento, proporcionado progresso na microestrutura;
- d) manutenção dos procedimentos de mistura e moldagem próximos aos padrões existentes.

A principal característica do CPR é sua composição com grande quantidade de cimento, materiais em pó e sílica ativa, além da baixa quantidade de água na mistura, chegando a uma relação água/(cimento+sílica) de 0,14.

Para Aïtcin (2008), o conceito de CPR consiste em alguns princípios básicos, os quais são:

- a) aumento da homogeneidade do material pela eliminação das partículas grossas, restrição da quantidade de areia para que a mesma não entre em contato entre si na pasta endurecida, eliminação da zona de transição agregado/pasta melhorando as propriedades mecânicas.
- b) aumento da compacidade pela otimização das dimensões dos pós da mistura;
- c) aprimoramento da microestrutura da pasta hidratada por tratamento térmico.

Para que os grãos não se toquem e formem um esqueleto rígido, o que impediria a movimentação da matriz durante a sua retração, fazendo que a matriz fique livre para se movimentar sem as barreiras causadas pelo agregado, deve-se limitar o teor de areia, conforme pode ser verificado na Figura 2.1.

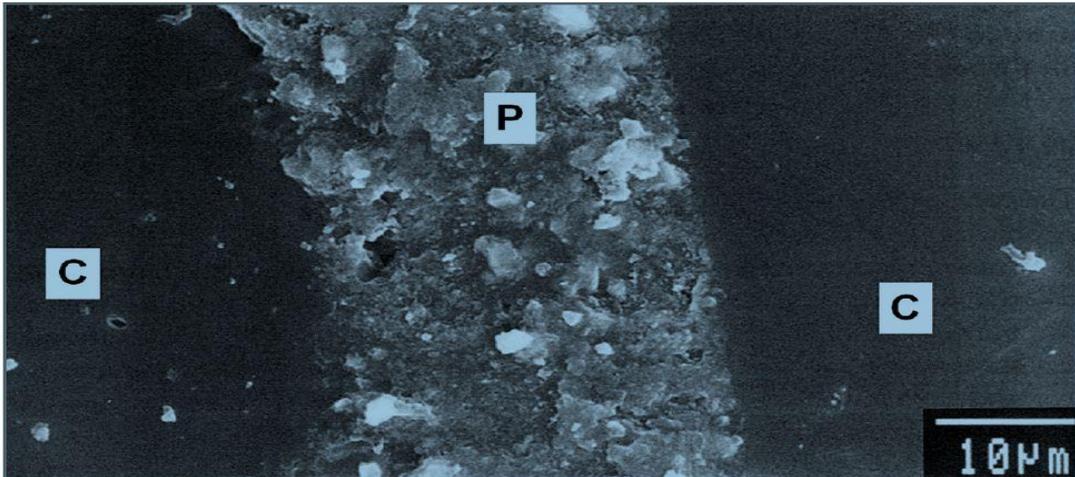


Figura 2.1 – Microestrutura de um CPR: C: grãos de cimento separados por faixa de pasta de cimento P: Nota-se a ausência de zona de transição e a extrema compacidade da pasta. Fonte: AITCIN, 2008.

Segundo Isaia (2010), com a análise da microestrutura do concreto constatou-se que a zona de ruptura, responsável pela maioria das falhas, se localiza na zona de transição do agregado com a pasta. Logo, se há diminuição dessa zona de transição a resistência aumenta e, para isso acontecer é preciso diminuir o diâmetro máximo dos agregados.

Os concretos de pós reativos foram divididos, originalmente, em duas famílias: CPR 200 e CPR 800. A Tabela 2.1 compara a composição dessas famílias e a Tabela 2.2 relaciona o CPR com outros concretos através de suas propriedades.

Tabela 2.1- Composição típica do CPR original

Material (Kg/m ³)	CPR 200	CPR 800
Cimento Portland Comum Tipo I (ASTM)	950	980
Sílica ativa	237	225
Pó de quartzo	-	382
Areia	997	490
Fibra de aço 13 mm	146	-
Fibra de aço 3 mm	-	617
Superplastificantes (sólidos)	17	18
Água	180	186
Relação $a/(c+s)$	0,15	0,14

Fonte: DUGAT *et al.*, 1996 *apud* BIZ, 2001

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas comparadas ao concreto comum e de alto desempenho

Propriedades	CC	CAD	CPR
Resistência à compressão Simples (MPa)	20 – 50	60 – 80	200 – 800
Resistência à flexão (MPa)	4 – 8	6 – 10	15 – 140
Energia de Fratura (J/m ²)	130	140	1000 – 4000
Deformação Última de Tensão (10 ⁻⁶)	100 - 150	100 –150	2000 – 8000

Fonte: DUGAT *et al.*, 1996 *apud* BIZ, 2001.

Para Richard (1996) *apud* Vanderlei (2004), os concretos CPR classificados em CPR 200 apresentam resistência a compressão entre 170 e 230 MPa, os CPR 800, tem seu parâmetro de resistência a compressão mais elevado, variando entre 500 a 800 MPa.

Atualmente o concreto de Pós Reativos é bastante utilizado em construções de estruturas espaciais leves, tabuleiros de pontes, vigas, colunas, passarelas, pré-fabricados de tuneis ou placas de revestimento de fachadas, entre outros.

Um exemplo da utilização do CPR é a passarela de Sherbrooke (Figura 2.2), no Canadá, com 56m de vão, composta por elementos pré-fabricados de apenas 15 cm de altura.

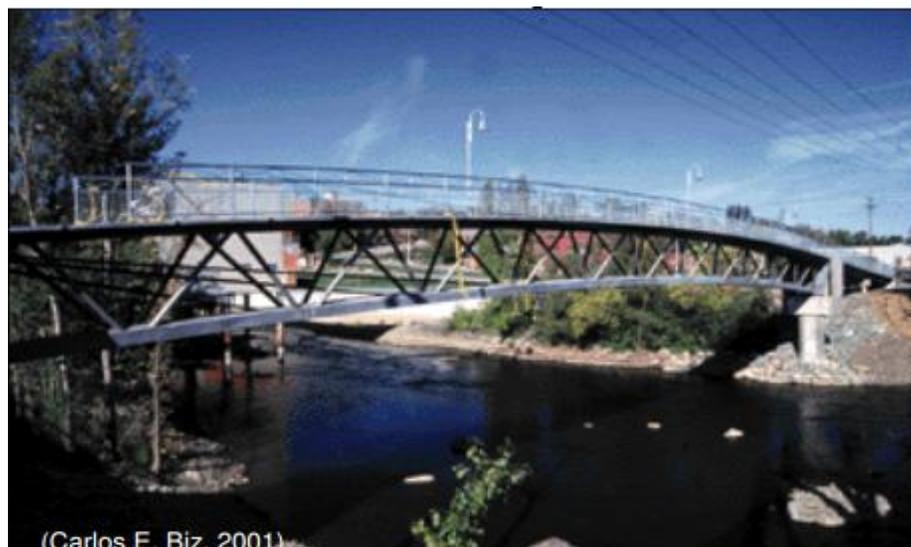


Figura 2.2 - Passarela Sherbrooke, Canadá. Fonte: Carlos E. Biz, 2001.

2.2 Materiais constituintes do CPR

A seleção de todos os materiais, de qualquer mistura, tem grande influência em suas propriedades e, se tratando de um CUAD, essa seleção torna-se fundamental.

2.2.1 Cimento

Segundo Isaia (2010), buscam-se os tipos mais puros de cimento, como o CP I. No Brasil, porém, esse tipo de cimento não é comercializado, uma das alternativas é o uso de CP II ou CP V ARI, que é comercializado no Brasil, mesmo o CP V ARI tendo alta finura e, demandando maior quantidade de água.

Cimentos com baixo teor de aluminato tricálcio hidratado (C_3A) proporcionam melhores resultados de espalhamento, já os cimentos com elevada finura Blaine não são os mais recomendados, devido a grande demanda de água para sua hidratação (COPPOLA *et al.*, 1997 *apud* BIZ, 2001).

De acordo com Richard (1995) *apud* Biz (2001), o cimento com alto módulo de sílica seria o mais indicado para o CPR, pois apresentam boas características reológicas e bom desempenho mecânico. Entretanto, esse tipo de cimento apresenta taxa lenta de pega, podendo comprometer o seu uso. Cimentos com pega rápida e alto desempenho oferecem atuação mecânica similar, apesar de maior consumo de água.

Segundo Aïtcin (2000), o controle da qualidade do cimento é simples e baseia-se em medir a finura Blaine, analisar o diagrama de raio X da estrutura do cimento, sendo que o mesmo tenha passado por um tratamento com ácido salicílico e medir indiretamente a atividade reológica do cimento, com a presença de superplastificante.

2.2.2 Areia

A composição granulométrica cumpre papel essencial para que haja bons resultados. Uma perfeita distribuição granulométrica visa eliminar os vazios da mistura. O uso de areia como agregado máximo fundamenta-se por proporcionar

menor permeabilidade no concreto e maior homogeneização dos materiais, visto que reduz os poros capilares e os vazios (VANDERLEI, 2004).

Alguns autores, como Zani (1996) *et al. apud* Biz (2001), limitam o diâmetro da areia de quartzo para o uso em CPR em $300 \mu m$. Porém, atingem-se resistências similares usando diâmetros máximos de $600 \mu m$, 2mm e até 8mm.

De acordo com Biz (2001), no concreto convencional os agregados graúdos e miúdos constituem grande parte do volume, formando um esqueleto rígido com granulometria contínua. Isso significa que a maior parte da retração da pasta é bloqueada por esse esqueleto, fazendo com que a porosidade aumente. No CPR, o volume da pasta é pelo menos 20% maior do que os vazios da areia não compactada da mistura. Assim, não há a formação de um esqueleto rígido e também o mesmo não bloqueia a retração global da pasta.

2.2.3 Pó de quartzo

O pó de quartzo entra na mistura do concreto de pós reativos para preencher os vazios deixados pelos grãos de areia (efeito filler), formando um ótimo empacotamento entre as partículas (Figura 2.3), e para estimular as reações pozolânicas quando submetidos ao tratamento térmico. Através do calor novas reações pozolânicas são ativadas e consomem o hidróxido de cálcio ($CaOH_2$) gerado na hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) em maior quantidade e tamanho superior ao original proveniente da hidratação do concreto. Essas reações melhoram muito a resistência da pasta na zona de transição – pasta/agregado miúdo (BIZ, 2001). A Figura 2.3 mostra o empacotamento das partículas que participam no concreto de pós reativos.

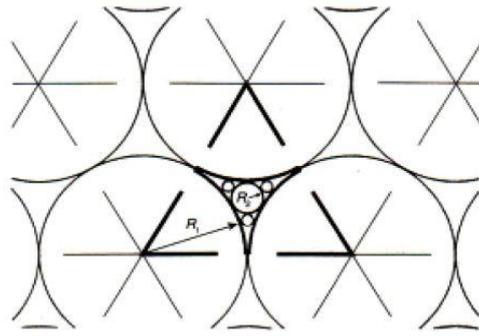


Figura 2.3 – Empacotamento teórico máximo das partículas. Fonte: WALRAVEN, 2000 *apud* ISAIA, 2010.

2.2.4 Adições minerais

As adições minerais, quando aplicadas no concreto, têm como objetivo melhorar algumas propriedades do mesmo. Contudo, a disparidade das propriedades físicas e químicas e até mesmo a origem, torna mais complexo a escolha e dosagem das adições minerais. Com isso, é indispensável o conhecimento das propriedades e modificações referentes à sua adição no concreto (CASTRO, 2003 *apud* FURQUIM, 2006).

As pozolanas podem ser naturais, materiais de origem vulcânica (geralmente ácidos), ou de origem sedimentar; podem também ser artificiais, materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica (NBR 5736/91).

Os principais efeitos que as pozolanas proporcionam, principalmente por suas partículas muito finas, são: efeito físico através do tamponamento dos poros, diminuindo o volume de vazios, e um efeito químico, pela produção de silicato de cálcio hidratado, através das reações pozolânicas. Os mesmos contribuem, assim, para uma menor porosidade, o que permite ganhos de resistência mecânica e proporcionam concretos com baixa permeabilidade, garantindo uma proteção à estrutura frente a agentes agressivos, cujos quais promovem a deterioração do concreto (DAL RI, 2002 *apud* FURQUIM, 2006).

As adições minerais mais utilizadas são aquelas que têm em sua composição sílica amorfa, entre elas estão: o metacaulim, a sílica ativa, a cinza volante, a escória de alto-forno e a cinza de casca de arroz (CCA).

Nesse sentido, a seguir são descritos as principais adições utilizadas na pesquisa.

2.2.4.1 Cinza de Casca de Arroz

A CCA é derivada da queima da casca de arroz produzida nas indústrias de beneficiamento desse cereal, cuja combustão é utilizada como fonte de calor e de vapor na secagem dos grãos.

Segundo o IBGE, o Brasil é responsável por 1,8 % da produção mundial, o que corresponde a aproximadamente 11 milhões de toneladas. A distribuição regional da produção esta expressa na Tabela 2.3.

Estima-se que uma tonelada de arroz produza 200 kg de casca e que após a combustão se transforma em 40 kg de cinza de casca de arroz (MEHTA E MONTEIRO, 2004).

A questão ambiental surge quando se trata do destino de CA, apesar de o material ser classificado como resíduo de classe II, não inerte e não prejudicial à saúde humana, segundo a NBR 10004:2004. Porém, a destinação desse resíduo ainda ocupa grandes volumes nos aterros sanitários, já que sua biodegradação é lenta (REGÔ, 2004).

Tabela 2.3 - Produção de arroz no Brasil na safra de 2010

Região/UF	Produção (ton)	%
Norte	999.647	8,82
Nordeste	913.228	8,06
Centro- oeste	1.076.503	9,50
Sudeste	213.600	1,88
Sul	8.128.635	71,73
Brasil	11.331.613	

Fonte: IBGE (www.ibge.com.br)

Considerando a quantidade produzida desse material e pensando no futuro ambiental, sua utilização é de suma relevância. Vários estudos mostram seu

potencial para a utilização na construção civil, principalmente como material pozolânico.

A eficácia da CCA como material pozolânico está ligada ao processo pelo qual passa a casca de arroz para a obtenção da cinza. O material oriundo da combustão não controlada geralmente não atinge grande valor pozolânico, pois sua composição apresenta minerais de sílica não reativos (cristalinos), que só passam a ter maior atividade pozolânica quando micronizados. Com o processo controlado de queima, entre 500 a 700°C, o produto gerado é uma cinza amorfa de alta pozolanicidade (ISAIA, 2010).

Para Isaia (2010), o teor de carbono afeta a coloração da CCA e, esta podendo variar entre as tonalidades mais escuras até as mais claras, que vão de preto/cinza a branco-roseado. Quanto mais escura, maior o teor de carbono, ou seja, maior a quantidade de matéria orgânica não queimada.

2.2.4.2 Metacaulim

O metacaulim (MC) é uma adição mineral aluminossilicosa derivada, principalmente, da calcinação entre 600°C e 900°C, de algumas argilas de alta pureza, como as caulínicas e os caulinis. A coloração pode indicar sua composição: quanto mais claro, mais puro e reativo será o metacaulim. Quanto menor a brancura, menor quantidade de sílica e alumínio (ISAIA, 2010).

O MC, basicamente, é constituído por sílica e alumínio no estado amorfo, que reagem com o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento Portland, e forma o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidroaluminossilicato de cálcio. A presença de metacaulim na pastas de cimento Portland aumenta a resistência à compressão e a durabilidade, pois há a formação de uma estrutura de poros de tamanhos menores. Suas propriedades físicas e químicas melhoram as propriedades mecânicas dos concretos (FONSECA, 2010).

2.2.4.3 Sílica

A sílica ativa, material utilizado como adição mineral, ganhou maior emprego a partir da década de 80 e tem seu uso aumentado gradativamente na indústria do concreto (MALHOTRA E MEHTA, 1996 *apud* FONSECA, 2010).

Comumente chamada de microssílica, a sílica ativa, é um derivado da produção do silício metálico (empregado na fabricação de componentes eletrônicos, alumínio e silicões), das ligas de ferro-silício (empregado na produção de aços comuns) e de outras ligas de silício, produzidos em grandes fornos de fusão.

Em sua forma amorfa, a microssílica tem partículas extremamente reativas e o seu pequeno tamanho relativo facilita a reação química com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produzido na hidratação do cimento Portland (KORMANN et al., 2001 *apud* FONSECA, 2010).

Considerando que o diâmetro médio de uma partícula é em torno de $0,10\mu\text{m}$ e possui superfície específica elevada, da ordem de $20\text{ m}^2/\text{g}$, como pode se ver através da micrografia da Figura 2.4, o emprego da sílica ativa está condicionado ao uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes, pois necessita de maior quantidade de água para obter trabalhabilidade.

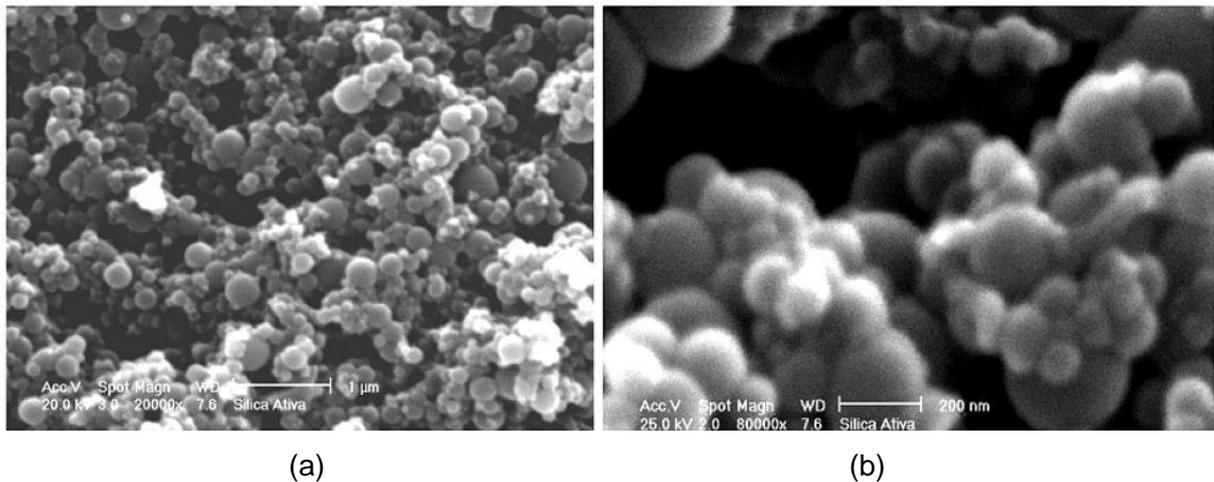


Figura 2.4 – Micrografias das partículas de sílica ativa obtidas com microscópio eletrônico de varredura (elétrons secundários) Magnificação: a) 20.000 vezes, b) 80.000 vezes. Fonte: ISAIA, 2010.

Segundo Richard *et al* (1996) e Larrard (1989) *apud* Biz, as três funções da adição de sílica ativa são:

- a) completar os vazios deixados pelas partículas de cimento (efeito filler);

- b) melhorar as características reológicas do concreto (efeito de lubrificação – forma esférica das partículas de sílica);
- c) produção secundária de hidratos, aumentada ainda mais pela cura térmica.

De acordo com Furquim (2006), a sílica ativa contribui efetivamente para a modificação da estrutura dos poros, provocando o aumento do seu volume de menor diâmetro e a diminuição da comunicação entre eles, o que reflete diretamente na diminuição da taxa de absorção e no aumento da resistência capilar.

2.2.5 Aditivos

Os aditivos são produtos químicos acrescentados ao cimento, em concretos ou argamassa, com objetivo de melhorar algumas de suas propriedades. Geralmente a quantidade de aditivo utilizado na mistura, pode variar de 0,05% e 5% da massa dos materiais cimentícios (ISAIA, 2010).

A definição apresentada pela ABNT NBR 11768:2011, considera que aditivos químicos são produtos que, adicionados em pequenas quantidades a concretos de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições. Apresentado a seguinte classificação para os aditivos:

- aditivo redutor de água/plastificante (PR, PA,PN);
- aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo I (SP-I R, SP-I A, SP-I N);
- aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo II (SP-II R, SP-II A, SP- II N);
- aditivo incorporador de ar (IA);
- aditivo acelerador de pega (AP);
- aditivo acelerador de resistência (AR);
- aditivo retardador de pega (RP).

Os aditivos de alta redução de água são os mais utilizados nas misturas de CPR, pois são eximes redutores de água, conferindo a esta uma maior resistência.

Para Hartmann (2002), há um aumento considerável no abatimento do concreto, uma significativa redução de água, fazendo esse concreto mais fluido e

autoadenssável. A redução de água confere maior resistência e durabilidade a esses concretos.

Prudêncio Jr. (2005) *apud* Fracalossi R.A.R (2011), afirma que os melhores e mais eficientes aditivos são os a base de policarboxilatos, pois proporcionam redução de água superiores a 20% e tempos de atuação de 30 a 60 min. Para a obtenção de concretos com mais de 40 MPa, ele é indispensável. Devido a sua redução de 3 a 4 vezes da água utilizada em determinados traços, os policarboxilatos também são denominados de redutores de água de alta eficiência.

A utilização do aditivo a base de policarboxilatos pode variar na proporção de 0,6 a 2 % do material cimentício, conferindo o aumento de aproximadamente 25% da resistência (FRACALOSSO, R.A.R, 2011).

2.3 Produção

Vanderlei (2004) define como principais cuidados na produção de um CPR, o tempo de mistura, pois garantem a qualidade constante da mistura e a dosagem precisa da água, já que é ela quem garante o baixo fator a/c.

A mistura dos componentes da mistura de um CPR deve ser realizada com o auxílio de um misturador forçado, já que esse concreto não apresenta o agregado graúdo – responsável pela dispersão do cimento e dos finos – presente nos concretos convencionais (BIZ, 2001).

O ciclo de mistura do CPR segue a Figura 2.5.

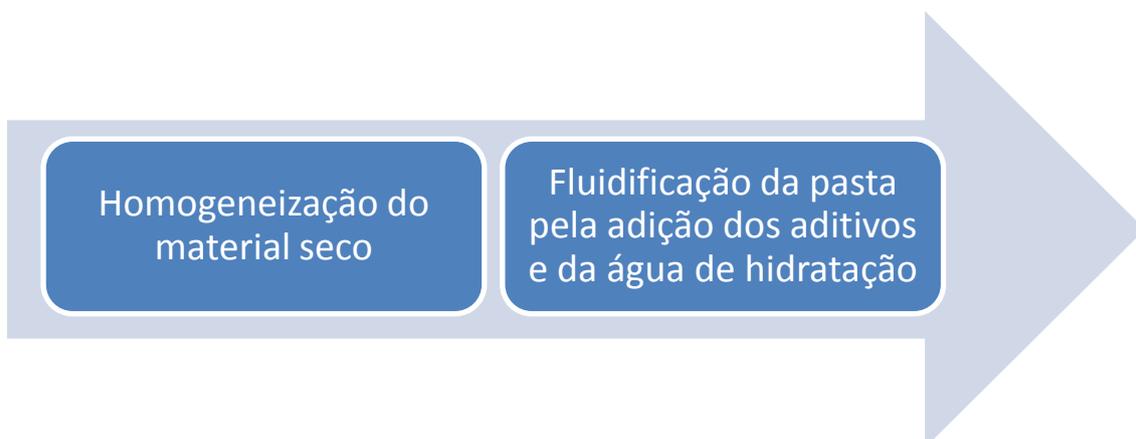


Figura 2.5 - Ordem de mistura do CPR. Fonte: própria.

2.4 Cura térmica

A cura térmica acelera as reações de hidratação do cimento. A elevada temperatura durante e depois do contato inicial do cimento com a água reduz a duração do período de latência, fazendo com que a estrutura da pasta de cimento já hidratada se defina mais rápido (Neville,1997).

Para Kanda et al (1992) *apud* Salvador Filho, J. A. A. (2001), a resistência conferida ao concreto aos 7 dias é tanto maior quanto for a temperatura empregada na cura. No entanto, aos 28 dias, há uma inversão dos valores. Em temperaturas menores o ganho de resistência aos 28 dias tem maior elevação. A temperatura afeta a resistência última que o material atingirá.

Devido à presença de sílica ativa há um efeito indesejável na cura acelerada - perda potencial da resistência à compressão nas idades avançadas. Porém, a mesma, proporciona o refinamento das estruturas dos poros e na homogeneização da distribuição dos hidratos, o que compensa o efeito da cura (CAO e DETWILER, 1995 *apud* SALVADOR FILHO J. A. A, 2001).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia experimental realizada nesta pesquisa e os materiais, predispondo as etapas do programa experimental, desenvolvido para atender os objetivos descritos no capítulo 1.

3.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados na pesquisa são todos produzidos e comercializados no País.

Os ensaios, para melhor caracterizar os materiais constituintes da mistura do CPR, foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil – UNIPAMPA, campus Alegrete – RS.

3.1.1 Cimento

Utilizou-se cimento Portland de alta resistência inicial, CPV ARI. Cujas propriedades físicas e químicas estão na Tabela 3.1.

Foi realizado o ensaio de massa específica, de acordo com a NBR 6474:2000. A Figura 3.1 ilustra o cimento Portland CPV ARI utilizado.



Figura 3.1 – Cimento Portland

Tabela 3.1 – Propriedades do Cimento Portland CPV ARI

Químicos										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P. Fogo	CaO L.	R. Ins.	Eq. Alc.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	4,13	18,30	2,51	59,69	5,36	2,85	3,17	1,04	0,72	0,62
Sd	0,02	0,04	0,03	0,03	0,07	0,05	0,16	0,26	0,09	0,02
Min	4,09	18,25	2,46	59,64	5,24	2,77	2,93	0,81	0,58	0,60
Max	4,15	18,38	2,54	59,73	5,46	2,94	3,46	1,65	0,86	0,68
Físicos										
Exp. Quente	Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão (MPa)					
Mm	%	cm ² /g	%	%	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias		
0,45	27,6	4.337	0,27	2,58	22,1	34,5	42,0	48,9		
0,50	0,2	100,78	0,05	0,61	0,8	1,2	0,6	1,0		
0,00	27,4	4.17	0,20	1,30	20,4	32,9	41,2	47,3		
1,00	27,8	4.48	0,30	3,70	23,0	36,2	43,2	50,2		

Fonte: Itambé (www.cimentoitambe.com.br)

3.1.2 Areia

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados dois tipos de areia, sendo do tipo advem da cava de Rio do município de Manuel Viana, considerada uma areia normal fina e denominada na pesquisa como areia A. A outra é uma areia muito fina, cuja qual é definida como areia quartzosa com grãos arredondados. A mesma foi chamada de areia B. A Figura 3.2a e a Figura 3.2b representam essas areias, respectivamente.

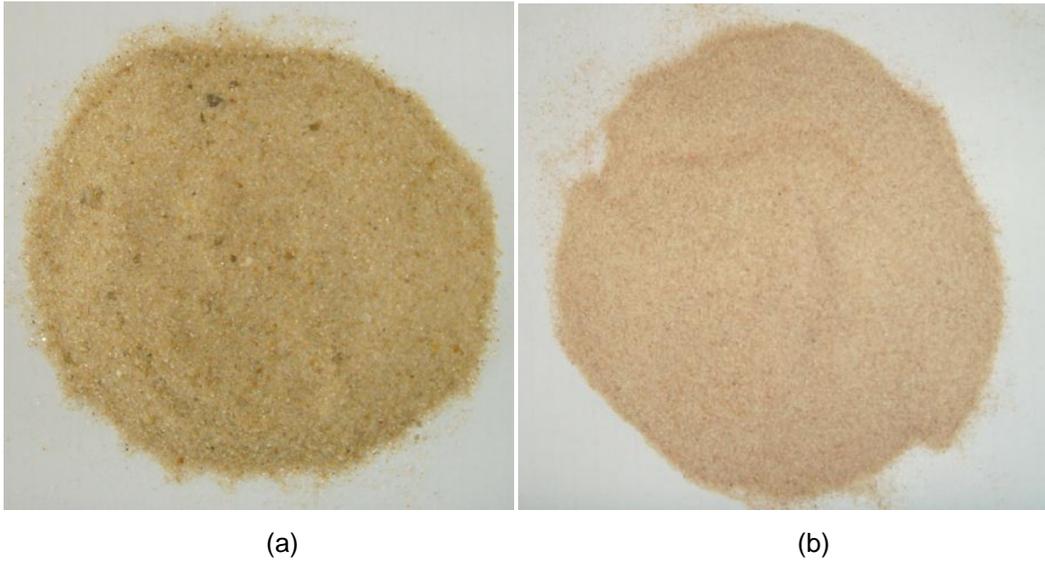


Figura 3.2 – (a) Areia A; (b) Areia B.

Foram realizados os ensaios de massa específica, segundo a NBR 9776:1987 e os ensaios de composição granulométrica a partir da NBR 7217:1987.

3.1.3 Pó de quartzo

O pó de quartzo cuja definição da massa específica deu-se através do ensaio da NBR 6474:2000. Sendo a amostra representada na Figura 3.3.

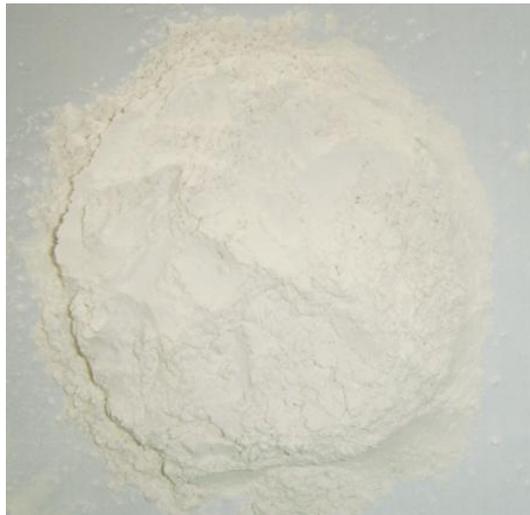


Figura 3.3 – Pó de quartzo.

3.1.4 Cinza de Casca de Arroz

A CCA empregada para o desenvolvimento da pesquisa é proveniente da região oeste do estado Rio Grande do Sul e processada no município de Alegrete, esta evidenciada na Figura 3.4.



Figura 3.4 – CCA.

Foi realizado o ensaio da massa específica, através da NBR 6474:2000 e para melhor considerar suas propriedades, foi realizado o ensaio do índice de pozolanicidade de acordo com NBR 5752:1992.

3.1.5 Metacaulim

O metacaulim, mostrado na Figura 3.5, foi analisado através da realização dos ensaios de massa específico (NBR 6474:2000) e ensaio de índice pozolanicidade (NBR 5752:1992).



Figura 3.5 – Metacaulim.

3.1.6 Sílica

A sílica ativa, amostra exibida na Figura 3.6, cuja determinação da massa específica foi realizada de acordo com NBR 6474:2000. Foi ainda realizado o ensaio de pozolanicidade pela NBR 5752:92.



Figura 3.6 – Sílica ativa.

3.1.7 Aditivos

O aditivo utilizado na composição do traço é considerado um aditivo de terceira geração. O mesmo está de acordo com a NBR 11768 e é classificado como Tipo SP II. Seu peso específico é de 1,06 kg/litro e pH 3,5 – 6,5.

3.2 Dosagem

Os traços que compõem as dosagens foram definidos em laboratório, partindo de uma relação água/aglomerante de 0.17 e baseados nos traços já utilizados em outros estudos, conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dosagens para concreto de pós reativos

Material	Vanderlei (2004)	Richard & Cheyrezy (1995)	Aïtcin & Richard (1996)
Cimento	1	1	1
Areia	1,101	1,1	1,432
Pó de Quartzo	0,235	0,39	0,298
Sílica Ativa	0,246	0,23	0,326
Superplastificante	0,02	0,019	0,027
Água	0,216	0,17	0,28

Fonte: Vanderlei, 2004.

Fundamentado nos traços da Tabela 3.2, optou-se por variar de 5 em 5 % a adição dos pós, ficando então definidos os acréscimos de 20, 25 e 30% das adições em relação ao consumo de cimento. As relações a/c foram modificadas individualmente usando como critério de trabalhabilidade visual. A Tabela 3.3 apresenta a composição e a nomenclatura adotada para cada dosagem da pesquisa. Além das adições minerais colocadas no concreto, realizou-se ainda a confecção de um concreto padrão, ou seja, um concreto sem nenhum tipo de adição, para servir de base (referência).

Tabela 3.3 - Composição e nomenclatura abreviada das dosagens

	Nomenclatura	Cimento	Areia (A)	Pó de quartzo	Adição mineral	Superplastificante	Água (a/agl.)
Sílica 20%	S20	1	1.1	0.235	0.2	0.024	0.17
Sílica 25%	S25	1	1.1	0.235	0.25	0.024	0.172
Sílica 30%	S30	1	1.1	0.235	0.3	0.024	0.172
CCA 20%	C20	1	1.1	0.235	0.2	0.024	0.193
CCA 25%	C25	1	1.1	0.235	0.25	0.024	0.211
CCA 30%	C30	1	1.1	0.235	0.3	0.024	0.224
Metac.20%	M20	1	1.1	0.235	0.2	0.024	0.203
Metac.25%	M25	1	1.1	0.235	0.25	0.024	0.226
Metac.30%	M30	1	1.1	0.235	0.3	0.024	0.234
Padrão 20%	P20	1.2	1.1	0.235	-	0.024	0.186
Padrão 25%	P25	1.25	1.1	0.235	-	0.024	0.199
Padrão 30%	P30	1.3	1.1	0.235	-	0.024	0.208

As dosagens foram divididas em duas partes. Na primeira foram realizados todos os traços referentes à Tabela 3.3, com a areia A, conforme descrito no item 3.2.1. Já na segunda dosagem, descrito no item 3.2.2, foram efetuados os traços referentes a adição de melhor desempenho da primeira dosagem, neste caso a sílica ativa, com o uso da areia B, conforme Tabela 3.4

Após realização dos ensaios e análises, decidiu-se pela segunda dosagem devido aos resultados não tão satisfatórios da primeira. Outro critério que motivou a nova tentativa foram às características da areia, já que diversos estudos fazem o uso dessa em concretos de pós reativos, pois é uma areia quartzosa de grãos arredondados, com granulometria muito fina, o que confere ao traço uma maior compacidade.

3.2.1 Primeira dosagem

Com os traços expressos na Tabela 3.3, foram realizadas as misturas seguindo o processo de homogeneização dos pós e em seguida a fluidificação da pasta por meio da adição do superplastificante e da água. O processo de mistura ocorreu com o auxílio da argamassadeira, mostrada na Figura 3.7. Foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos de 5 X 10 cm, para cada traço, conforme a NBR 5738:2003. A Figura 3.8 ilustra os moldes utilizados.



Figura 3.7 – Argamassadeira.



Figura 3.8 – Corpos-de-prova cilíndricos (5X10 cm).

A partir do ensaio de compressão axial, segundo a NBR 5739:1994, realizado em três idades, 1, 7 e 28 dias, utilizando a prensa exibida na Figura 3.9. Foram comparados e analisados os resultados para a verificação da influência das adições minerais no CPR.



Figura 3.9 – Prensa para o ensaio de compressão axial.

3.2.2 Segunda dosagem

No caso da segunda dosagem foram adotados os mesmos princípios de mistura. Porém apenas os traços referentes à adição de Sílica, S20, S25 e S30 foram refeitos. Para maior confiabilidade dos resultados foram moldados 3 corpos de prova para cada idade, resultando em 12 amostras. A Tabela 3.4 demonstra os traços utilizados nessa dosagem, sendo que mesmo partiram da primeira dosagem, havendo somente o ajuste da relação a/c.

Tabela 3.4 - Composição e nomenclatura abreviada das dosagens

	Nomenclatura	Cimento	Areia (B)	Pó de quartzo	Adição mineral	Superplastificante	Água (a/agl.)
Sílica 20%	*S20	1	1.1	0.235	0.2	0.024	0.17
Sílica 25%	*S25	1	1.1	0.235	0.25	0.024	0.17
Sílica 30%	*S30	1	1.1	0.235	0.3	0.024	0.17

Tanto as idades de rompimento, quanto o processo e a análise das amostras seguiram os mesmos sistemas da primeira dosagem.

3.3 Cura

Considerando o potencial que as adições minerais possuem de produzirem hidratos secundários e que os mesmos têm sua produção aumentada pela cura térmica, optou-se pelo emprego dessa cura, feita a partir de banho maria, em temperatura de 90°C e umidade de 100%, ambas constantes, equipamento mostrado na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Banho maria.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, são expostos os resultados obtidos através dos ensaios realizados nos concretos de pós reativos, conforme descritos no capítulo 3.

Para melhor análise dos pós utilizados foi realizado o ensaio de índice atividade pozolânica dos pós utilizados nas misturas, através da NBR 5752/92 – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento, assim como alguns ensaios de caracterização.

Como destacado no capítulo anterior, os concretos de pós reativos foram confeccionados para serem analisados em sua resistência à compressão axial, levou-se ainda em consideração como critério de moldagem a trabalhabilidade visual.

4.1 Caracterização dos materiais da pesquisa

Para o desenvolvimento da pesquisa os materiais foram caracterizados através dos processos já definidos no capítulo 3. As Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 expressão os valores obtidos.

Tabela 4.1 – Resultados da massa específica do Cimento Portland e do pó de quartzo

Materiais	Massa específica (g/cm ³)	Norma
Cimento	2,93	NBR 6474
Pó de quartzo	2,63	

Tabela 4.2 – Resultados da massa específica das adições minerais

Adições minerais	Massa específica (g/cm ³)	Norma
Sílica ativa	2,08	NBR 6474
Cinza de casca de arroz	2,15	
Metacaulim	2,50	

Tabela 4.3 – Resultados da caracterização da areia A

Determinações	Valores obtidos			Normas
Composição granulométrica	Abertura de peneiras ABNT (mm)	Porcentagem retida em massa (%)		NBR NM 248
		Individual	Acumulada	
	6,3	0	0	
	4,75	0	0	
	2,36	0,34	0,34	
	1,18	1,13	1,47	
	0,6	4,54	6,01	
	0,3	56,30	62,31	
	0,15	36,24	98,55	
	Fundo	1,45	100	
Total	100	-		
Dimensão máxima característica (mm)	1,18			NBR NM 248
Módulo de finura	1.68			NBR NM 248
Massa específica (g/cm ³)	2,645			NBR 9776

Tabela 4.4 – Resultados da caracterização da areia B

Determinações	Valores obtidos			Normas
Composição granulométrica	Abertura de peneiras ABNT (mm)	Porcentagem retida em massa (%)		NBR NM 248
		Individual	Acumulada	
	6,3	0	0	
	4,75	0	0	
	2,36	0	0	
	1,18	0,02	0,02	
	0,6	0,24	0,26	
	0,3	40,84	41,1	
	0,15	52,18	93,28	
	Fundo	6,72	100	
Total	100	-		
Dimensão máxima característica (mm)	0,6			NBR NM 248
Módulo de finura	1,35			NBR NM 248
Massa específica (g/cm ³)	2,652			NBR 9776

4.2 Índice de atividade pozolânica com cimento

Devido à incompatibilidade dos resultados esperados neste ensaio, realizado segundo a NBR 5752/92, foi refeito diversas vezes. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7, ensaios realizados com a Silica Ativa, Cinza da Casca de Arroz e metacaulim, respectivamente.

Tabela 4.5 – Resultados do índice de atividade pozolânica com cimento (Sílica)

Resistência à compressão axial					Índice pozolânico	
Argamassa	fc individual (MPa)			Média	Desvio padrão	IP=Média B/ Média A*100
						IP da Sílica
A- Somente cimento	26.8	23.4*	27.8	27.3	0.71	42.85%
B- 35% de Sílica	11.5	15*	11.8	11.7	0.21	

* resultados não considerados nos cálculos da média e do desvio padrão.

Tabela 4.6 – Resultados do índice de atividade pozolânica com cimento (CCA)

Resistência à compressão axial					Índice pozolânico	
Argamassa	fc individual (MPa)			Média	Desvio padrão	IP=Média B/ Média A*100
						IP da Sílica
A- Somente cimento	19.2	20.6	20.3	20	0.74	64.03%
B- 35% de CCA	13.7	12.6	13	13.1	0.56	

* resultados não considerados nos cálculos da média e do desvio padrão.

Tabela 4.7 – Resultados do índice de atividade pozolânica com cimento (Metacaulim)

Resistência à compressão axial					Índice pozolânico	
Argamassa	fc individual (MPa)			Média	Desvio padrão	IP=Média B/ Média A*100
						IP da Sílica
A- Somente cimento	26.8	23.4*	27.8	27.3	0.71	78.38%
B- 35% de Metacaulim	16.1*	22.2	20.5	21.4	1.2	

* resultados não considerados nos cálculos da média e do desvio padrão.

Considerando o resultado do índice de atividade pozolânica dos pós, de acordo com a NBR 12653/92, esse índice deve atingir, no mínimo de 75%, ou seja, apenas o índice obtido pelo metacaulim foi satisfatório.

De acordo com Nita (2007), a maior parte dos ensaios de atividade pozolânica resume-se na verificação das resistências mecânicas ao longo do tempo. Isso acontece pela facilidade do método utilizado para essa análise. Porém não caracteriza de forma precisa a pozolana, já que não é possível distinguir qual é a forma de ganho ou perda de resistência. Podendo a resistência variar devidos ao efeito químico ou físico da pozolana.

4.3 Trabalhabilidade

Levando em consideração a grande quantidade de finos nas misturas e que os mesmos retêm e perdem muita água durante o amassamento, tornou-se inviável a realização do teste de abatimento de cone. Sendo assim, a trabalhabilidade foi analisada visualmente e de forma tátil como mostra a Figura 4.4. Para cada traço foram observadas as consistências e posteriormente moldados os corpos de provas cilíndricos de 5 X 10 cm.



Figura 4.1- Trabalhabilidade visual.

4.4 Ensaio de resistência à compressão axial

A análise da resistência à compressão é ponto fundamental da pesquisa, pois é a referência para a comparação entre os pós utilizados e também parâmetro para que a misturas seja considerada como pós reativa, já que para isso a mesma deve atingir resistência aproximada de 200 MPa.

Considerado o uso de cimento CPV- ARI e que o mesmo tem maior ganho de resistência nas idades iniciais, os corpos de prova foram submetidos à ruptura a 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias.

De acordo com Helene (1992), para os corpos de prova de uma mesma mistura que foram confeccionados e curados nas mesmas condições, pode-se admitir como resistência *potencial* do concreto o maior valor, pois há grandes possibilidades de os valores mais baixos terem sido afetados por uma operação de ensaio. Sendo assim, o valor mais alto foi menos afetado negativamente pelo processo de ensaio, valor esse que se interessa medir. Sabendo que o mais alto valor deve-se não porque o processo de ensaio tenha elevado o seu valor real, mas sim porque essa é a máxima resistência à compressão que ele pode apresentar. Levando em consideração essa teoria, os resultados serão apresentados por suas resistências máximas atingidas.

Com o intuito de melhor analisar as amostras, serão consideradas, primeiramente, de forma independente a primeira e a segunda dosagem e posteriormente comparadas os traços de mesma composição.

4.4.1 Ensaio de resistência à compressão axial da primeira dosagem

Como já relatado anteriormente, o ensaio de resistência à compressão foi realizado em 4 idades distintas, 1, 3, 7 e 28 dias. Assim, encontram-se na Figura 4.2 os valores máximos obtidos nas referidas idades para os concretos sem adição de pós, denominado padrão, e para os concretos com a adição dos pós, além dos seus respectivos teores. Além disso, no anexo A estão mostrados todos os resultados obtidos nos ensaios, considerando-se todas as substituições e as idades de rompimento.

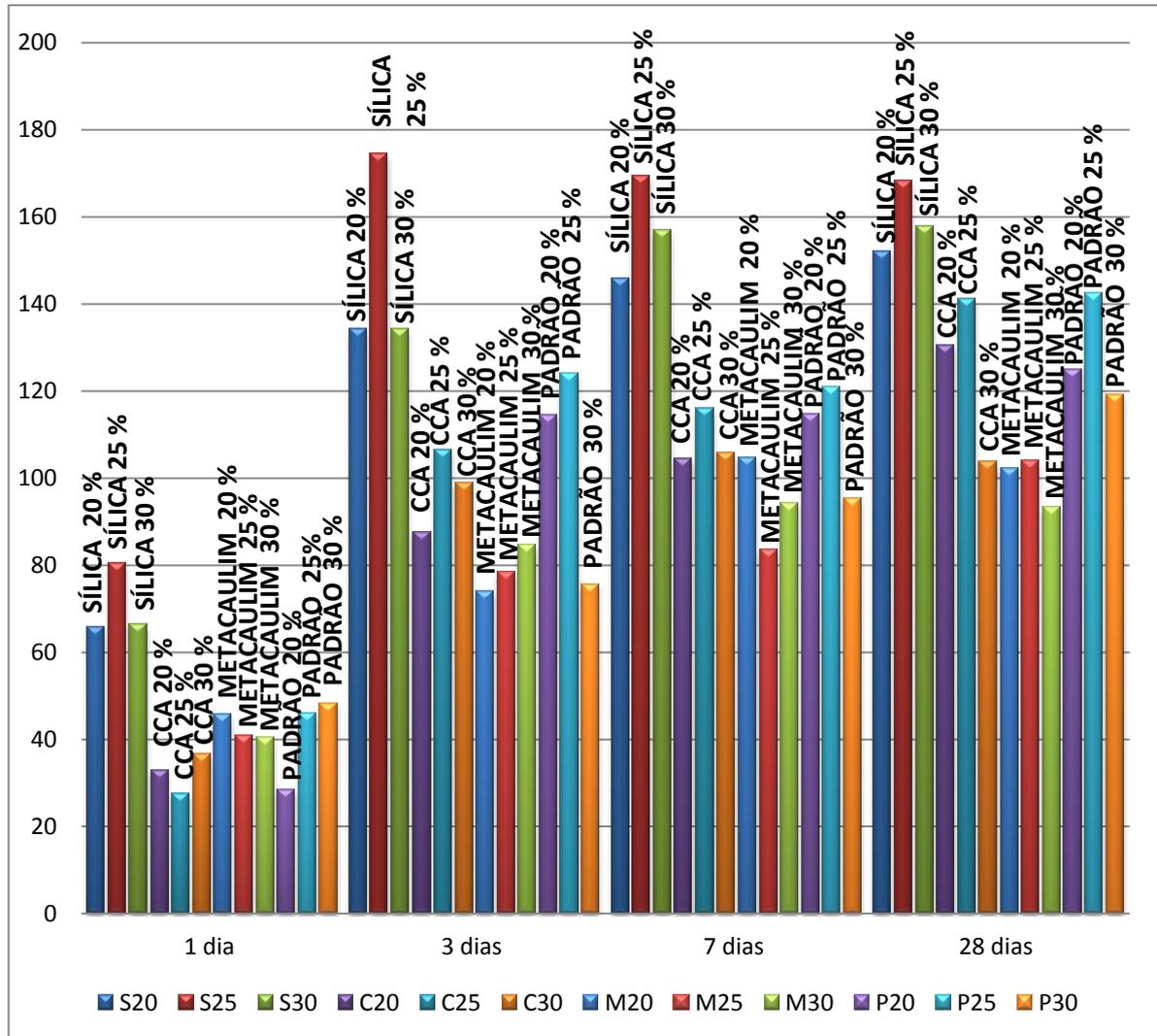


Figura 4.2 – Resistência à compressão axial do concreto sem e com adição de pós, nos teores indicados e nas idades de estudo.

Através dos resultados apresentados na Figura 4.2, constata-se, que desde os 7 dias até os 28 dias, os concretos com todos os teores da adição de sílica possuíram uma resistência maior que os demais concretos com adições e que o padrão.

Com o intuito de melhor analisar os resultados foram elaboradas comparações entre os concretos com adições e o padrão para cada idade de rompimento. Assim, Figuras 4.3, 4.4, 4.5, expressaram esses resultados.

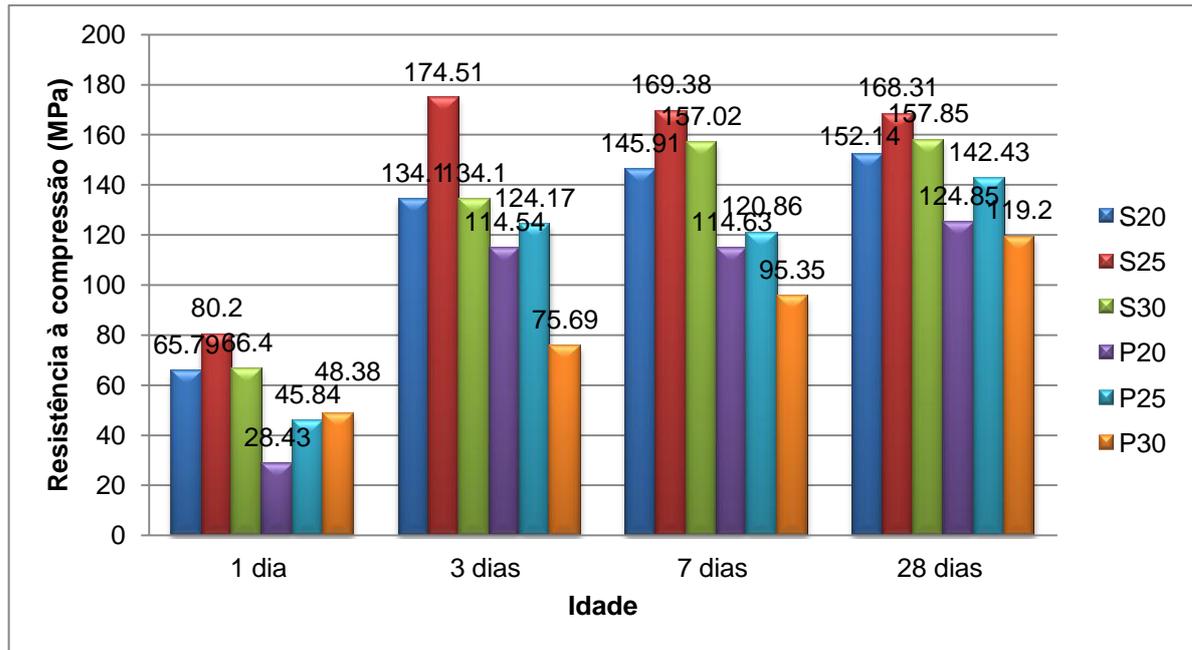


Figura 4.3 – Comparação entre as resistências do concreto com adição de sílica versus concreto padrão.

Assim, como já afirmado e confirmado na Figura 4.2 e, novamente através da análise realizada na Figura 4.3, em todas as idades há uma superioridade da resistência à compressão do concreto com a adição de sílica em seus respectivos teores, quando comparados ao concreto padrão.

No entanto, o resultado do índice de atividade pozolânica com o cimento, esta sílica, através do ensaio dado pela NBR 12653/92, não atingiu 75%, assim sendo, considerada, portanto, um material não pozolânico. Porém, quando adicionado a massa de concreto de pós reativos, este provocou no aumento da resistência em todas as proporções e idades.

No caso da adição de CCA foram encontrados resultados menos expressivos no ganho de resistência, ver Figura 4.4.

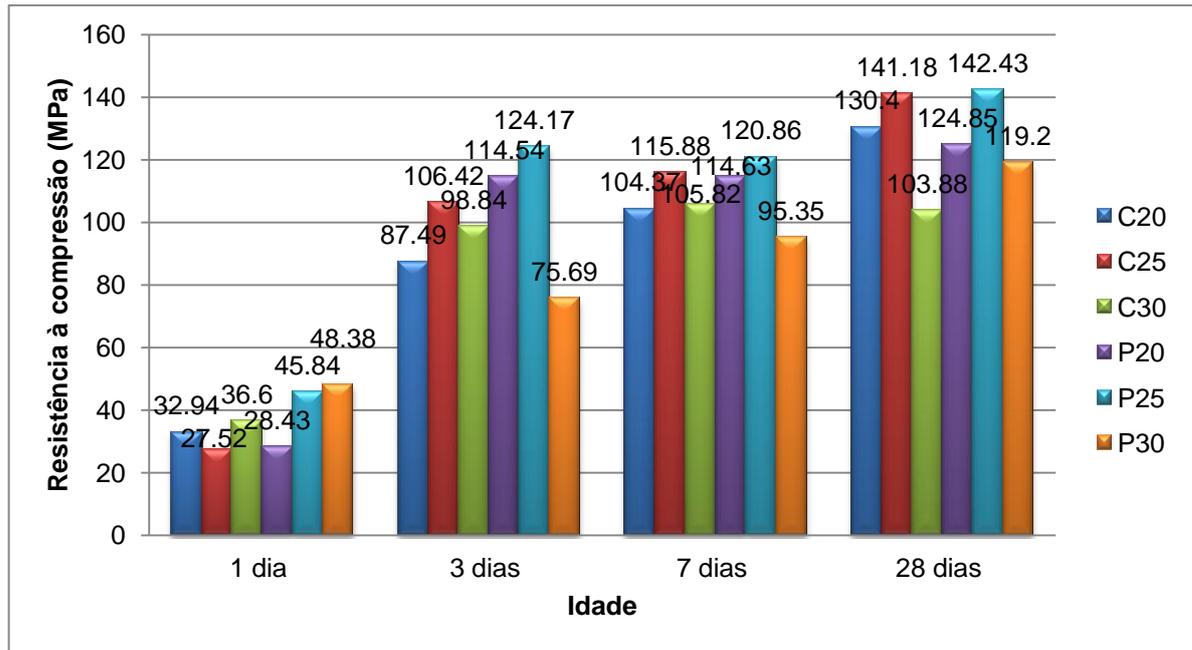


Figura 4.4 – Comparação entre as resistências do concreto com adição de CCA versus concreto padrão.

Ao analisar os dados pertencentes à Figura 4.4, que traz a comparação entre os teores do concreto padrão e do concreto com adição de CCA nota-se que o concreto padrão possui maior resistência, havendo duas exceções. Uma refere-se aos teores de 20% a 1 dia, onde a resistência da amostra referente a CCA supera em a padrão. Contudo, esta variação não é persistente, não se estendendo as idades seguintes. A outra exceção é pertinente aos teores de 30% nas idades a partir de 3 dias, onde o concreto padrão teve menor desempenho que o concreto com adição de cinza de casca de arroz.

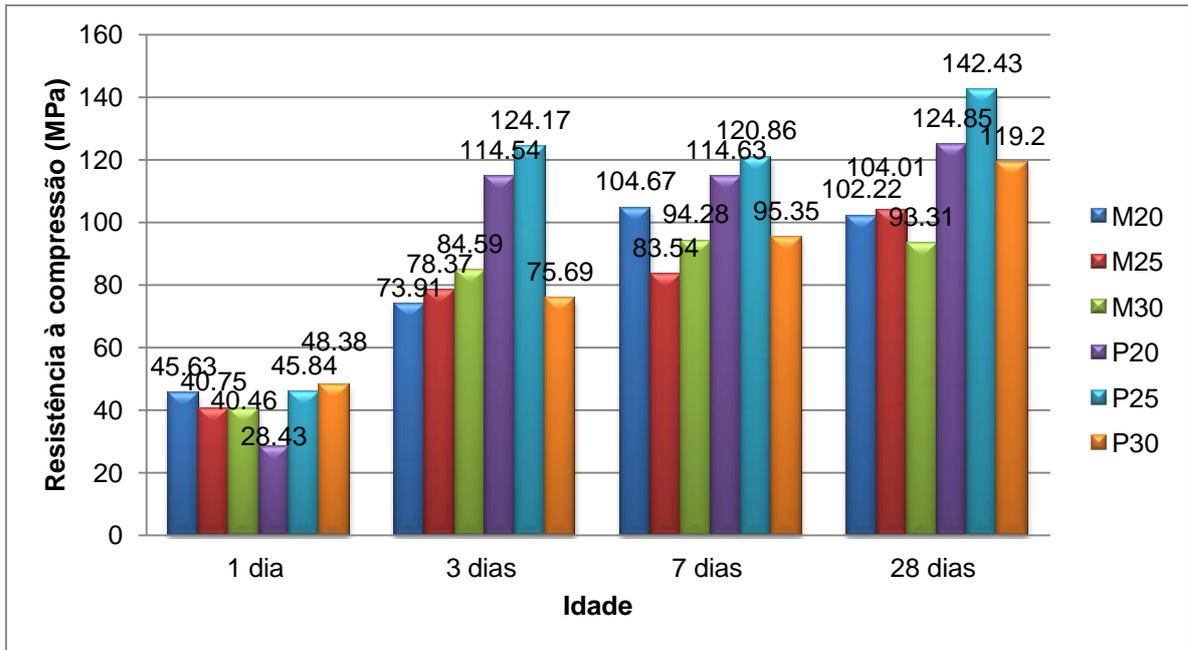


Figura 4.5 – Comparação entre as resistências do concreto com adição de metacaulim versus concreto padrão.

Através dos resultados demonstrados na Figura 4.5, constata-se que apenas dois valores fogem à continuidade dos valores. O primeiro atribui-se a menor resistência do P20 a 1 dia e o segundo a menor resistência do P30 aos 3 dias. Os demais resultados seguem a supremacia da resistência do concreto padrão. Novamente, ao analisar os resultados do índice de pozolanicidade das adições, apenas o metacaulim, conforme descrito no item 4.1, atingiu os 75%, portanto, conforme a norma NBR 12653/92, este foi considerado como um material pozolânico. No entanto, ao ser adicionado na massa dos concretos de pós reativos, esperar-se-ão o aumento da resistência em todas as proporções, bem como, em todas as idades. Porém, não ocorrendo a melhora na resistência do concreto com as adições deste.

Para melhor visualização do comportamento das adições minerais com a idade faz-se um comparativo com todas as amostras, como ilustrado na Figura 4.6. Nestes, são colocados todas as porcentagens de crescimento para cada traço, considerando-se a totalidade da resistência de 100% para a idade de 28 dias, ou seja, dessa forma, foi possível compreender ou visualizar como ocorre o ganho de resistência ao passar do tempo.

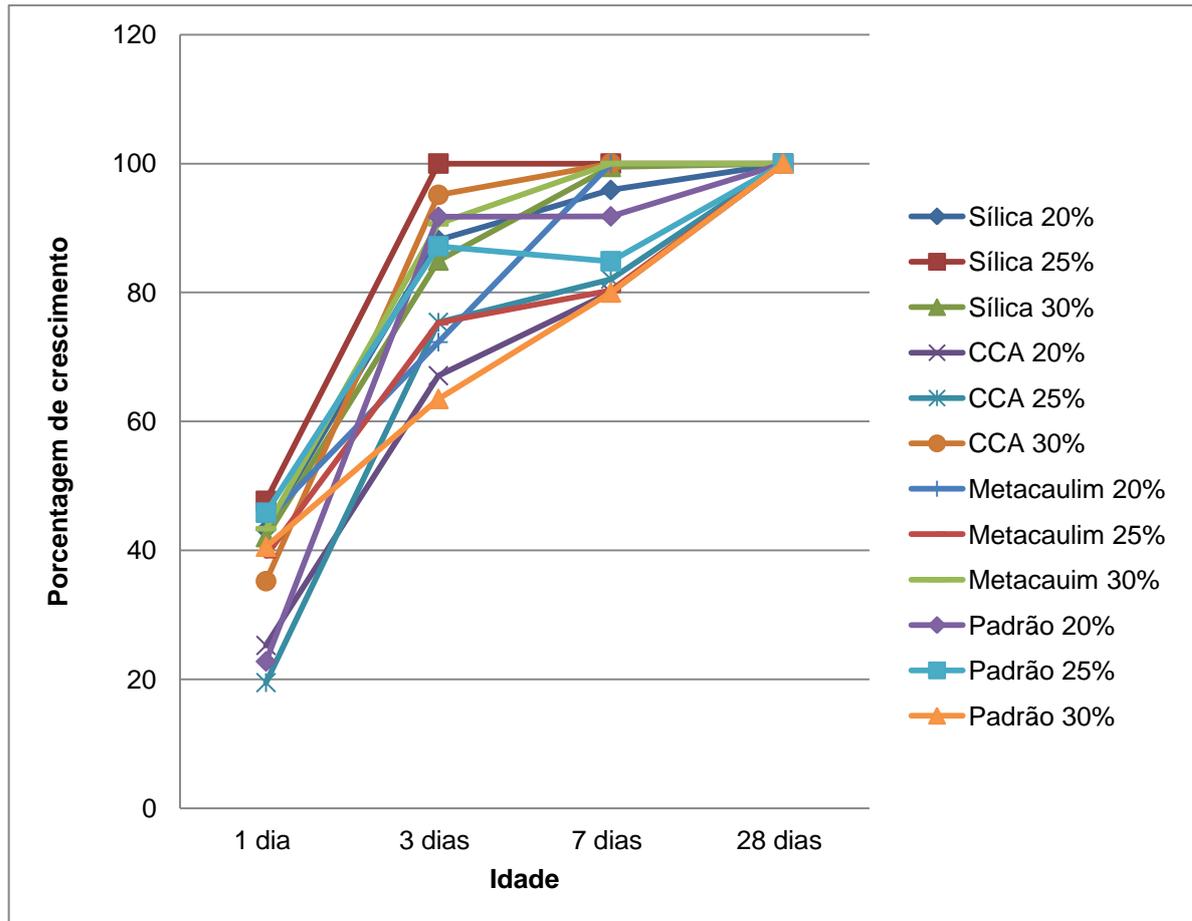


Figura 4.6 – Porcentagem de crescimento da resistência (28 dias = 100%).

Assim, é possível notar que nos traços com adições de CCA e Metacaulim obtiveram um crescimento acentuado do período de 1 dia a 3 dias, porém houve uma estabilização de crescimento entre 3 dias, 7 dias e 28 dias, isso se justifica pelo emprego da cura térmica e pelo uso de CPV ARI, que conferem maior ganho de resistência nas primeiras idades. O mesmo fenômeno, também, pode ser notado nos traços do concreto com as adições com a sílica e no padrão.

Observando o comportamento de todas as adições na massa dos concretos de pós reativos, verifica-se que o concreto com adição de sílica ativa teve melhores resultados, ou seja, teve sua resistência superior ao concreto padrão, bem como, em relação as outras adições, como a cinza da casca de arroz e do metacaulim, especialmente o traço que continha 25% dessa adição.

Muito embora, no ensaio de índice de pozolanicidade a sílica não foi considerada como um material pozolânico, o acréscimo da resistência proporcionada pela adição na massa do concreto fundamenta-se pelo princípio do

empacotamento das partículas, que alcança seu melhor ponto com essa porcentagem, ou melhor, com proporção de 25% adicionado na massa do concreto.

4.4.2 Ensaio de resistência à compressão axial da segunda dosagem

O ensaio de resistência à compressão desta segunda dosagem parte da comparação entre os resultados das amostras referentes a todos os teores de sílica da primeira dosagem e as amostras da segunda dosagem, também com todos os teores de sílica, porém com outro agregado miúdo (areia B). É possível encontrar no Anexo B todos os resultados obtidos nessa segunda dosagem, considerando-se todas as substituições e as idades de rompimento.

A comparação estabelecida tem o desígnio de analisar o desempenho das duas areias utilizadas na pesquisa. As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam a evolução do ganho de resistência para cada dosagem de sílica, primeira dosagem utilizando a areia A e segunda dosagem realizada com a areia B, respectivamente.

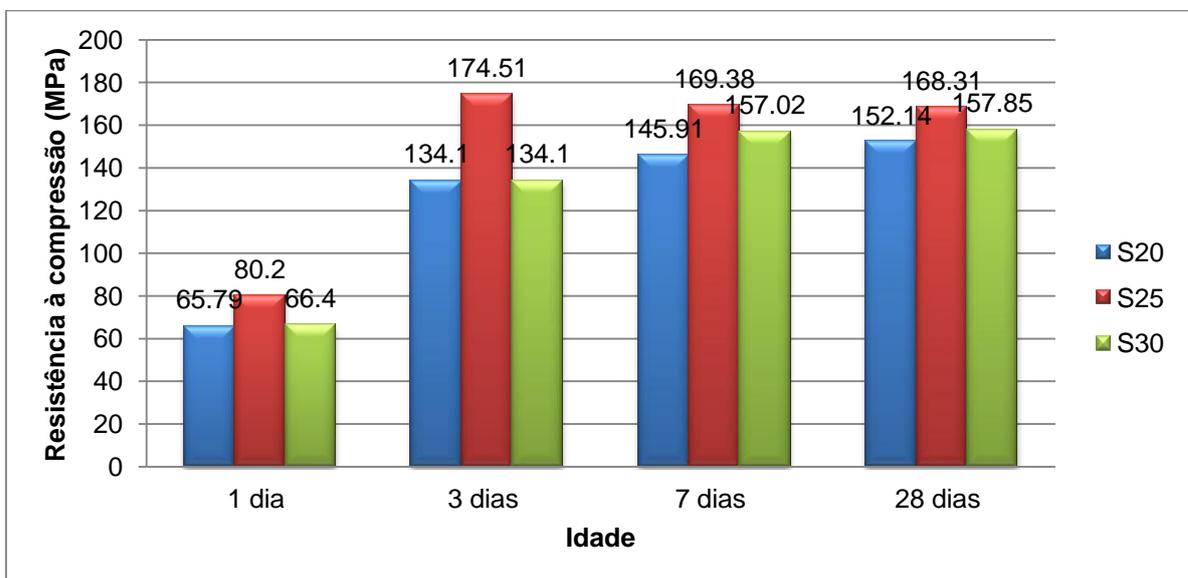


Figura 4.7 – Resistência à compressão (máximas) axial do concreto com adição de sílica (areia A), nos teores indicados e nas idades de estudo.

Nota-se, através da Figura 4.7 o crescente ganho de resistência nas primeiras idades e uma estabilização nas idades finais estudadas. As amostras, S20 e S30, têm um crescimento constante nos resultados, no entanto os melhores resultados

pertencem a amostra S25. Mesmo não mantendo uma ascendência, o ensaio S25, obteve uma constância, já que a variação teve, apenas, um pequeno decréscimo de 2,94% na resistência aos 7 dias e um decréscimo de 3,55 % em relação a resistência aos 3 dias.

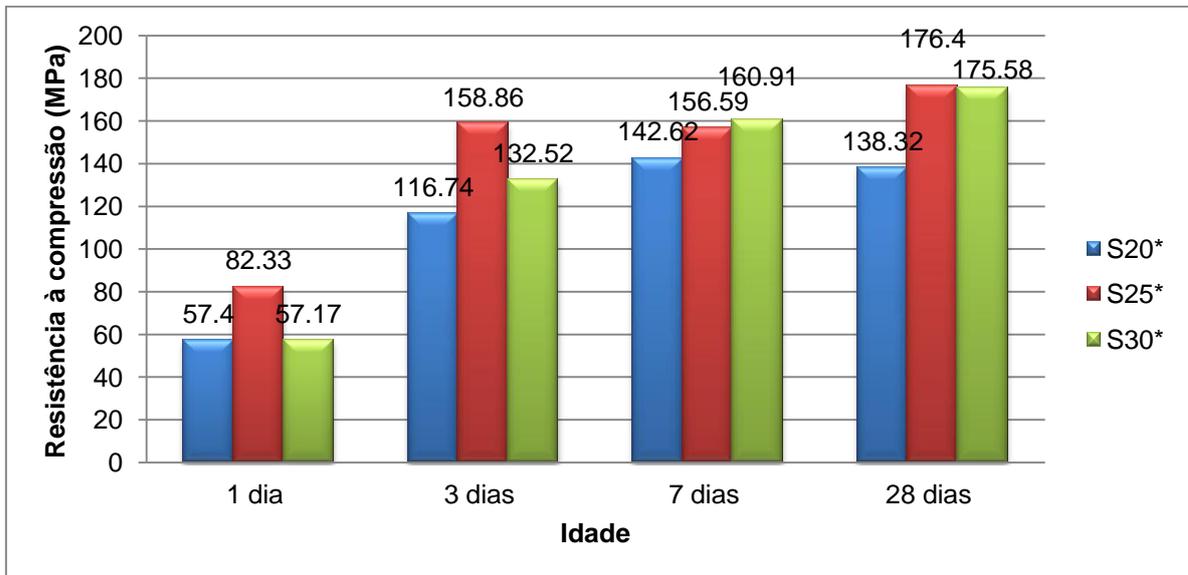


Figura 4.8 – Resistência à compressão (máximas) axial do concreto com adição de sílica (areia B), nos teores indicados e nas idades de estudo.

*Areia B.

A partir dos resultados expressos na Figura 4.8, é possível perceber que o mesmo fenômeno de crescimento acontece com as amostras S20* e S30*. Referindo-se a composição S25* é exequível vislumbrar sua superioridade em relação à resistência nas primeiras idades. Porém, nas idades finais não existem mais essa preponderância.

Para facilitar a comparação dos resultados entre a primeira e a segunda dosagem, reuniu-se todas as resistências em todas as idades e foram colocadas na Figura 4.9. Dessa forma, é possível fazer um comparativo entre a primeira dosagem com a adição de sílica e a areia A e a segunda dosagem de mesma composição e com a areia B.

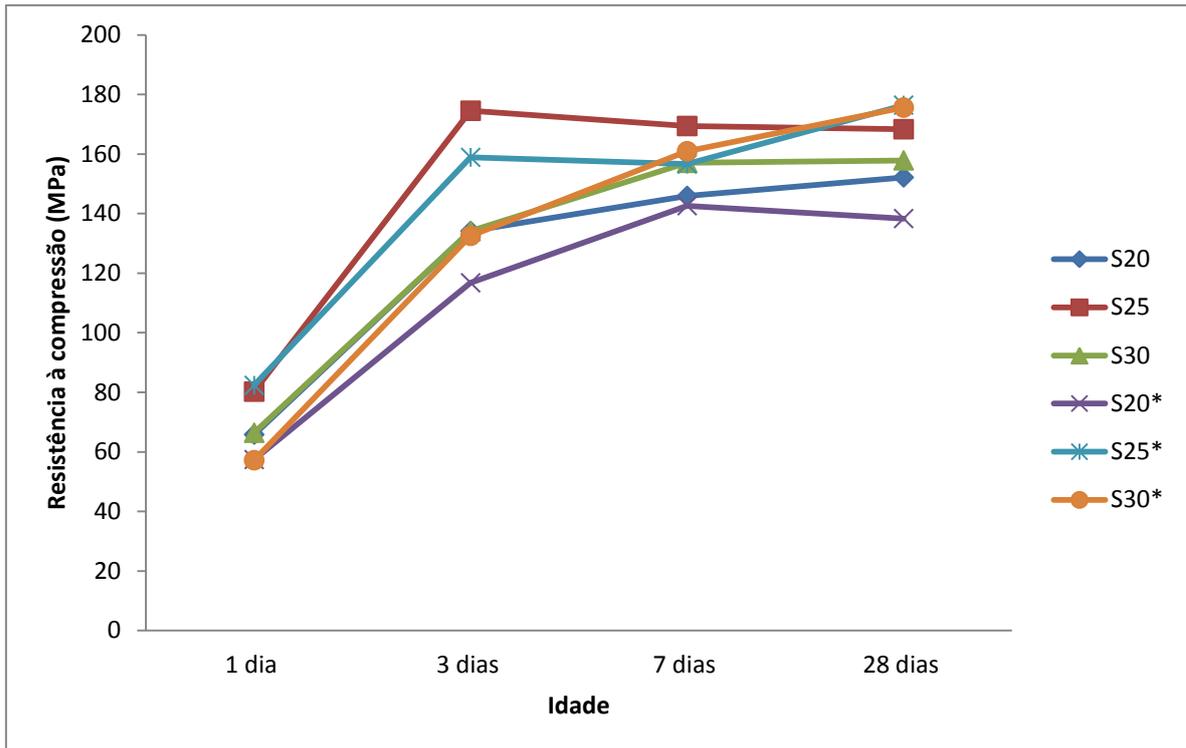


Figura 4.9 – Comparação das resistências à compressão (areia A e areia B), nos teores indicados e nas idades de estudo.

*Areia B.

Com os resultados apresentados na Figura 4.9, constata-se que, as amostras que possuíam o teor de 20% de sílica tiveram um comportamento similar para as duas areias utilizadas. Em relação ao teor de 25%, ocorreram algumas variações, ambas as amostras mantiveram-se em igual evolução até os 3 dias com queda na resistência aos 7 dias. Porém ao completarem 28 dias, a mistura com a areia A teve uma pequena queda na resistência, permanecendo praticamente estável em relação aos 7 dias. Já a com areia B obteve um ganho de resistência aos 28 dias. As amostras com 30% de adição proporcionaram um progresso equivalente até os 28 dias, onde a amostra com a areia B surpreendeu com um ganho de resistência que se equiparou com a adição de 25 %, o melhor teor da pesquisa.

As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6, fazem um comparativo do ganho de resistência aos 28 dias em relação a 1 dia, em porcentagem, das duas dosagens.

Tabela 4.8 – Ganho de resistência, na compressão axial, das amostras com adição de 20% de sílica aos 28 dias de idade em relação a 1 dia

Amostras	Ganho de resistência aos 28 dias de idade (%)
S20	131.25
S20*	140.97

*Areia B

Tabela 4.9 – Ganho de resistência, na compressão axial, das amostras com adição de 25% de sílica aos 28 dias de idade em relação a 1 dia

Amostras	Ganho de resistência aos 28 dias de idade (%)
S25	109.86
S25*	114.26

*Areia B.

Tabela 4.10 – Ganho de resistência, na compressão axial, das amostras com adição de 30% de sílica aos 28 dias de idade em relação a 1 dia

Amostras	Ganho de resistência aos 28 dias de idade (%)
S30	137.72
S30*	207.12

*Areia B.

Assim, é possível constatar, pelas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6, que as amostras com a areia B obtiveram maior salto de crescimento de 1 dia para 28 dias em todos os teores da adição de sílica. O ganho de resistência com uso dessa areia já era esperado, devido às características próprias da mesma, pois tende a proporcionar uma organização mais compacta dos componentes da mistura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões sobre o desempenho das adições minerais no Concreto de Pós Reativos, obtidas a partir dos ensaios realizados nessa pesquisa.

Além do mais, serão sugeridas outras abordagens a respeito do tema discutido neste trabalho.

5.1 Conclusões

Com o surgimento, cada vez maior, de novos materiais e de novas técnicas que aprimoram a construção civil, surge a necessidade de buscar e desenvolver materiais que atendam as novas demandas do mercado. Assim, torna-se necessário criar e aperfeiçoar os materiais utilizados no campo da engenharia civil visando conferir maior desempenho e durabilidade a estes materiais.

Neste trabalho, buscou-se realizar um estudo do desempenho do Concreto de Pós Reativos, visando acrescentar ao concreto algumas adições minerais como: sílica ativa, cinza de casca de arroz e metacaulim, a fim de melhorar o comportamento mecânico em relação ao concreto sem adições.

Ao incorporar as adições no concreto observaram-se algumas mudanças no comportamento do concreto, em relação a algumas adições e teores. Essas mudanças são devidas ao fator de empacotamento e diminuição da zona de transição entre a pasta e o agregado.

Um dos pontos observado na pesquisa foi à atividade pozolânica das adições. Mesmo levando em conta que apenas o metacaulim alcançou o nível para se considerado um material pozolânico, foi possível notar que devido às características da granulometria da sílica ativa, o seu comportamento junto a massa de concreto foi satisfatório, agregando resistência ao concreto em todos os teores. Os outros pós, como a CCA e o metacaulim, mesmo este último sendo material pozolânico, não obtiveram o mesmo desempenho. Porém possam, em outros teores, talvez, proporcionar ganhos de resistência ou atribuir ao concreto outras características que melhorem seu desempenho.

Com a realização do ensaio de compressão axial, pode-se constatar a existência de uma adição em um teor considerado ótimo que foi capaz de superar em todas as idades o concreto de referência. A adição que proporcionou esse fenômeno foi à sílica ativa em seu teor de 25%. Os outros teores dessa mesma adição também proporcionaram resultados satisfatórios quando comparados ao concreto de referência e resultados superiores quando comparados as outras adições.

Outro aspecto analisado na pesquisa foi a influência da areia utilizada nos concretos com adição de sílica. Cabe destacar, que a areia B proporcionou um melhor desempenho quanto ao ganho de resistência aos 28 dias nos teores de 20, 25 e 30%, em relação a 1 dia. Porém esse desempenho somente se destacou, em grandes proporções, após a idade de 7 dias, o que talvez tenha sido ocasionado pela escolha dos corpos de prova e pelo complexo processo de moldagem, que tem influência direta do operador. Sendo assim, o uso da areia A também é plausível, já que a mesma é produzida na região onde foi realizada a pesquisa e possui características semelhantes, sendo ainda passível de ajustes granulométricos.

Mesmo não atingindo os 200 MPa esperados para que a mistura fosse consideradas de Pós Retivos, a pesquisa conseguiu desenvolver os comparativos entre as adições minerais. Alguns aspectos podem ter influenciados na resistência axial, entre eles estão, o processo de moldagem dos corpos de prova, a regularização da superfície, a cura adotada e a não utilização de fibras. Levando em consideração o trabalho desenvolvido por Vanderlei (2004), no qual ele faz o uso de fibras de aço em um traço semelhante ao adotado na pesquisa e atinge resistências superiores a 200 MPa, talvez o complemento da mistura com fibras seja o fator determinante para o ganho resistência.

Por fim, o trabalho proporcionou um aprendizado em relação ao comportamento do concreto com adições minerais, adquirindo-se um apanhado de conhecimentos sobre o comportamento das adições minerais e do o ganho de resistência nas respectivas idades.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

Sugerem-se para o prosseguimento do estudo do Concreto de Pós Reativos alguns tópicos:

- Estudo do fator de empacotamento no CPR;
- Verificar a influencia da granulometria dos materiais constituinte;
- Propor outros tipos de cura;
- Implementar novas adições minerais e novas proporções;
- Realizar estudos em idades avançadas;
- Adicionar Fibras metálicas com dimensões e diâmetros reduzidos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, Pierre-Claude. CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO. Editora Pini, São Paulo/2000.

_____. Binders for durable and sustainable concrete. Abingdon: Taylor & Francis, 2008 (Modern Concrete Technology).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 5739: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. NBR 5752: Materiais pozolânico – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____. NBR 6474: Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

_____. NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BIZ, Carlos Eduardo. Concreto de Pós Reativos. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Departamento de Engenharia Civil. São Paulo/2001.

CIMENTOS ITAMBÉ. Referência obtida na Internet. < <http://www.cimentoitambe.com.br/cimentos/cp-v-ari-cimento-portland-alta-resistencia/>> Acesso em dez/2011.

IBGE. Referência obtida na Internet. < <http://www.ibge.com.br> > Acesso em dez/2011.

ISAIA, G.C. – organizador. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Vol 1 e 2. Editora Ibracon. São Paulo/2007.

ISAIA, G.C. – organizador. CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Vol 1 e 2. Editora Ibracon. São Paulo/2010.

FONSECA, Gustavo Celso da. ADIÇÕES MINERAIS E AS DISPOSIÇÕES NORMATIVAS RELATIVAS À PRODUÇÃO DE CONCRETO NO BRASIL: UMA ABORDAGEM EPISTÊMICA. Dissertação de Pós-graduação. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia de Materiais e Construção. Minas Gerais/2010.

FURQUIM, Paulo Ricardo de Vargas. ESTUDO ESTATÍSTICO DE PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Área de Concentração em Materiais de Construção Civil. Santa Maria/2006.

HELENE, Paulo, TERZIAN, Paulo. Manual de dosagem e controle do concreto. Editora Pini. São Paulo. Brasília, DF: SENAI/1992.

METACAULIM BZ™. DADOS TÉCNICOS. Referência obtida na Internet. < <http://www.unimin.com.br/cdn/Metacaulim%20BZ.pdf> > Acesso em Jan/2012.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: PINI, 2004.

REGÔ, João Henrique da Silva. AS CINZAS DE CASCA DE ARROZ (CCAS) AMORFAS E CRISTALINA COMO ADIÇÃO MINERAL AO CIMENTO – ASPECTOS DA MICROESTRUTURA DAS PASTAS. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Faculdade de tecnologia. Brasília/2004.

SALVADOR FILHO, José Américo Alves. Cura Térmica dos Concretos de Alto Desempenho: Análise das Propriedades Mecânicas Utilizando o Método da Maturidade. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira/2001.

VANDERLEI, Romeu Dias. ANÁLISE EXPERIMENTAL DE CONCRETO DE PÓS REATIVOS: Dosagens e Propriedades Mecânicas. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos/2004.

ANEXO A

Tabela A1 - Resistência à compressão axial do concreto com adição de sílica (areia A), nos teores indicados e nas idades de estudo.

S20			S25			S30		
Ruptura	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Ruptura	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Ruptura	Resistência (MPa)	Média (MPa)
1 dia	CP1	65.79	1 dia	CP1	138	1 dia	CP1	66.4
	CP2	61.48		CP2	95.04		CP2	63.8
3 dias	CP3	134.1	3 dias	CP3	167.7	3 dias	CP3	134.1
	CP4	119.96		CP4	174.51		CP4	119.96
7 dias	CP5	169.59	7 dias	CP5	169.38	7 dias	CP5	157.02
	CP6	145.91		CP6	123.93		CP6	149.08
28 dias	CP7	152.14	28 dias	CP7	168.31	28 dias	CP7	121.45
	CP8	114.98		CP8	165.48		CP8	157.85
		63.64			116.52			65.10
		127.03			171.11			127.03
		157.75			146.66			153.05
		133.56			166.90			139.65

Tabela A2 - Resistência à compressão axial do concreto com adição de CCA, nos teores indicados e nas idades de estudo

		C20				C25				C30			
Ruptura	Resistência (MPa)	Média (MPa)											
1 dia	CP1	31.81	1 dia	CP1	27.52	1 dia	CP1	27.36	1 dia	CP1	36.6		
	CP2	32.94		CP2	27.19		CP2	34.76					
3 dias	CP3	86.5	3 dias	CP3	106.42	3 dias	CP3	102.05	3 dias	CP3	98.84		
	CP4	87.49		CP4	97.67		CP4	86.6					
7 dias	CP5	104.37	7 dias	CP5	110.46	7 dias	CP5	113.17	7 dias	CP5	105.82		
	CP6	-		CP6	115.88		CP6	96.03					
28 dias	CP7	80.34	28 dias	CP7	141.18	28 dias	CP7	111.65	28 dias	CP7	95.66		
	CP8	130.4		CP8	82.11		CP8	103.88					

Tabela A3 - Resistência à compressão axial do concreto com adição de metacaulim, nos teores indicados e nas idades de estudo

		M20			M25			M30		
Ruptura	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Ruptura	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Ruptura	Resistência (MPa)	Média (MPa)		
1 dia	CP1	45.63	1 dia	CP1	40.75	1 dia	CP1	40.46		
	CP2	40.67		CP2	40.46		CP2	-		
3 dias	CP3	-	3 dias	CP3	52.49	3 dias	CP3	84.59		
	CP4	73.91		CP4	78.37		CP4	80.49		
7 dias	CP5	104.67	7 dias	CP5	83.54	7 dias	CP5	77.03		
	CP6	97.44		CP6	67.28		CP6	94.28		
28 dias	CP7	102.22	28 dias	CP7	99.08	28 dias	CP7	89.55		
	CP8	97.24		CP8	104.01		CP8	93.31		
		43.15		40.61	40.61		40.46	40.46		
		73.91		65.43	65.43		84.59	82.54		
		101.06		75.41	75.41		77.03	85.66		
		99.73		101.55	101.55		89.55	91.43		

ANEXO B

Tabela B1 - Resistência à compressão axial do concreto com adição de sílica (areia B), nos teores indicados e nas idades de estudo

Ruptura	S20*			S25*			S30*		
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Ruptura	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Ruptura	Resistência (MPa)	Média (MPa)	
1 dia	CP1	52.03	1 dia	CP1	70.27	1 dia	CP1	46.15	
	CP2	48.12		CP2	78.37		CP2	56.55	
	CP3	57.4		CP3	82.33		CP3	57.17	
3 dias	CP4	111.9	3 dias	CP4	158.86	3 dias	CP4	132.52	
	CP5	65.86		CP5	134.31		CP5	104.97	
	CP6	116.74		CP6	134.73		CP6	119.2	
7 dias	CP7	142.62	7 dias	CP7	156.59	7 dias	CP7	82.6	
	CP8	95.8		CP8	146.62		CP8	141.42	
	CP9	89.49		CP9	130.54		CP9	160.91	
28 dias	CP10	104.02	28 dias	CP10	130.27	28 dias	CP10	139.05	
	CP11	138.32		CP11	174.39		CP11	175.58	
	CP12	112.1		CP12	176.4		CP12	137.85	
		52.52		76.99			53.29		
		98.17		142.63			118.90		
		109.30		144.58			128.31		
		118.15		160.35			150.83		