

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Patrícia Fiegenbaum Mallmann

**CONCRETO DE PÓS REATIVOS:
ADIÇÃO DE NANOSÍLICA**

Porto Alegre
julho 2013

PATRÍCIA FIEGENBAUM MALLMANN

**CONCRETO DE PÓS REATIVOS:
ADIÇÃO DE NANOSÍLICA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ana Paula Kirchheim
Coorientador: Abrahão Bernardo Rohden

Porto Alegre
julho 2013

PATRÍCIA FIEGENBAUM MALLMANN

CONCRETO DE PÓS REATIVOS: ADIÇÃO DE NANOSÍLICA

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 3 de julho de 2013

Profa Ana Paula Kirchheim
Dra. pela UFRGS
Orientadora

Abrahão Bernardo Rohden
Mestre pela UFRGS
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)
Dra. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Guilherme Höehr Trindade (UFRGS)
MSc. pela Universidade Federal de Santa Maria

Abrahão Bernardo Rohden (UFRGS)
MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Ana Paula Kirchheim (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Aloísio e Silvane, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Aloísio e Silvane, que sempre me incentivaram e apoiaram para que eu chegasse ao final deste curso.

Agradeço ao meu namorado, Robinson, pelo apoio e pela compreensão pelo tempo que não estive em sua companhia. E que, apesar da distância, sempre me apoiou desde o início.

Agradeço à professora Ana Paula Kirchheim pela disponibilidade de me orientar e por estar sempre disposta a dar sugestões para tornar este trabalho melhor.

Também agradeço ao Abrahão Bernardo Rohden pela dedicação e disponibilidade para que este trabalho se tornasse possível, auxiliando nos ensaios e sempre me indicando um rumo pelo qual seguir.

Agradeço à professora Carin Maria Schmitt pela dedicação e pela disponibilidade em guiar este e os demais trabalhos de conclusão de curso.

Agradeço ao Guilherme Höehr Trindade, doutorando do NORIE, pelas dicas e apoio no final deste curso.

Agradeço aos laboratoristas do NORIE Airton, Nei e Gilmar pelo apoio na realização dos ensaios.

Agradeço à Tecnosil e à Mineração Jundu pela doação do material que foi utilizado nesta pesquisa.

Eu acredito demais na sorte.
E tenho constatado que,
quanto mais duro eu trabalho,
mais sorte eu tenho.

Thomas Jefferson

RESUMO

O concreto de pós reativos é um concreto de ultra alta resistência que utiliza várias estratégias para aumentar essa sua propriedade. Entre elas está tornar o concreto mais homogêneo, com restrição na dimensão máxima dos agregados e módulos semelhantes entre pasta e agregado, aumentar a sua densidade com empacotamento físico dos materiais e aplicação de pressão durante seu endurecimento, reduzir a quantidade de água e acelerar as reações químicas dos produtos de hidratação para melhorar a microestrutura através de cura térmica. Nos últimos anos a aplicação da nanotecnologia em materiais de construção tem aumentado exponencialmente, tendo destaque na utilização da nanosílica, para aumentar as características de resistência e durabilidade dos materiais cimentícios, pois a mesma tende a densificar a microestrutura. A nanosílica pode ser utilizada como adição no concreto, e se pressupõe ser mais eficiente do que adições minerais como, por exemplo, a sílica ativa e cinza volante, pois, por possuir partículas menores e maior área específica, ela reage mais rápido, podendo ser utilizada em menor quantidade. Embora muitos trabalhos apontem os benefícios da utilização da nanosílica, ainda existem lacunas de conhecimento sobre o tema, principalmente quando da utilização em concretos de pós reativos. Considerando estes princípios, no presente trabalho foi estudado o comportamento da nanosílica aplicada em concreto de pós reativos, analisando sua resistência à compressão e à tração na flexão. Primeiramente foram realizados ensaios de verificação da compatibilidade do aditivo em que a nanosílica vem dispersa e do cimento. Sendo estes compatíveis, foram então moldados os corpos de prova para cada um dos ensaios. Como a nanosílica utilizada já vem dispersa em um aditivo, e não se sabe o teor de nanosílica na mistura, variou-se o teor de massa de nanosílica mais o seu aditivo dispersor em 0%, 1%, 2%, 3% e 4,3% em relação à massa do cimento. Pelos resultados obtidos, verificou-se que, para o concreto estudado, a adição da nanosílica não influenciou na resistência à compressão, sendo atingido um valor de resistência à compressão máxima de 246,17 MPa. Porém para a resistência à tração na flexão, houve influência da nanosílica, sendo que sua adição aumentou em 40% os valores observados, atingindo resistência de aproximadamente 30 MPa, porém esta resistência não variou com o aumento do teor da nanosílica.

Palavras-chave: Concreto de Alta Resistência. Concreto de Pós Reativos. Concreto com Nanosílica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do trabalho	18
Figura 2 – Passarela de Sherbrooke, Quebec	35
Figura 3 – Vista em 3D das abóbodas	36
Figura 4 – Colunas de sustentação	36
Figura 5 – Abóboda sendo instalada	36
Figura 6 – Abóbodas instaladas	36
Figura 7 – Representação esquemática da matriz experimental	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características do cimento	45
Quadro 2 – Características do aditivo superplastificante	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resistência à compressão média aos 7 dias	56
Gráfico 2 – Resistência à compressão média aos 28 dias	56
Gráfico 3 – Resistência à compressão potencial aos 7 dias	57
Gráfico 4 – Resistência à compressão potencial aos 28 dias	58
Gráfico 5 – Ganho de resistência à compressão com o tempo	59
Gráfico 6 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composições típicas de CPR (em massa)	20
Tabela 2 – Valores de K para os diferentes protocolos de empacotamento	25
Tabela 3 – Proporcionamento utilizado (em massa)	48
Tabela 4 - Tempos de escoamento pelo Funil de Marsh	51
Tabela 5 – Resistência à compressão aos 7 dias (todos os valores)	52
Tabela 6 – Resistência à compressão aos 28 dias (todos os valores)	53
Tabela 7 – Resistência à compressão aos 7 dias sem valores espúrios	54
Tabela 8 – Resistência à compressão aos 28 dias sem valores espúrios	55
Tabela 9 – Ganho de resistência à compressão com o tempo	58
Tabela 10 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias (todos os valores)	60
Tabela 11 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias sem valores espúrios	60

LISTA DE SIGLAS

CAD – concreto de alto desempenho

CAR – concreto de alta resistência

CP – corpos de prova

CPR – concreto de pós reativos

CPR 200 – concreto de pós reativos com classe de resistência de 200 MPa

CPR 800 – concreto de pós reativos com classe de resistência de 500 a 800 MPa

C-S-H – silicato de cálcio hidratado

DSP – *Densified System containing ultrafine Particles*

GPa – gigapascal

K – índice de empacotamento

MDF – *Macro Defect Free*

MEC – Modelo de Empacotamento Compressível

MPa – megapascal

TEOS – *tetraethoxysilane*

TMOS – *trimethylethoxysilane*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
2.2.1 Objetivo principal	16
2.2.2 Objetivo secundário	16
2.3 HIPÓTESES	16
2.4 DELIMITAÇÕES	17
2.5 LIMITAÇÕES	17
2.6 DELINEAMENTO DA PESQUISA	17
3 CONCRETO DE PÓS REATIVOS	19
3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DOS CONCRETOS DE PÓS REATIVOS	21
3.1.1 Melhoramento da homogeneidade	22
3.1.1.1 Efeito do tamanho do agregado	22
3.1.1.2 Efeito do melhoramento das propriedades mecânicas da pasta	22
3.1.1.3 Efeito do limite do teor de areia	23
3.1.2 Melhoramento da densidade	23
3.1.2.1 Otimização da distribuição granulométrica	24
3.1.2.2 Aplicação de pressão	25
3.1.3 Melhoramento da microestrutura	25
3.1.4 Melhoramento da ductilidade	27
3.2 MATERIAIS USADOS NA CONFECÇÃO DE CPR.....	28
3.2.1 Areia	28
3.2.2 Pó de quartzo	29
3.2.3 Cimento	29
3.2.4 Superplastificante	30
3.2.5 Sílica ativa	30
3.3 PROPRIEDADES DO CPR	31
3.3.1 Desempenho mecânico	31
3.3.1.1 Resistência à compressão	31
3.3.1.2 Resistência à tração	32
3.3.1.3 Resistência à flexão	32
3.3.1.4 Módulo de elasticidade	32

3.3.1.5 Coeficiente de Poisson	33
3.3.2 Durabilidade do concreto de pós reativos	33
3.4 APLICAÇÕES DO CPR	34
4 NANOSÍLICA	37
4.1 PRODUÇÃO DA NANOSÍLICA	37
4.1.1 Processo sol-gel	38
4.1.2 Vaporização da sílica	39
4.1.3 Método biológico	39
4.1.4 Método da sílica olivina	39
4.2 APLICAÇÕES DA NANOSÍLICA	40
4.2.1 Argamassa com nanosílica	40
4.2.2 Argamassa com sílica ativa e nanosílica	41
4.2.3 Concreto com cinza volante e nanosílica	41
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	43
5.1 VARIÁVEIS	43
5.1.1 Variáveis dependentes	43
5.1.2 Variáveis independentes	44
5.2 MATERIAIS	45
5.2.1 Cimento	45
5.2.2 Sílica Ativa	46
5.2.3 Pó de quartzo	46
5.2.4 Nanosílica	46
5.2.5 Aditivo Superplastificante	46
5.2.6 Água	47
5.3 MÉTODOS	47
5.3.1 Caracterização da pasta	47
5.3.2 Produção dos concretos	48
5.3.2.1 Moldagem	49
5.3.2.2 Cura	49
5.3.2.3 Ruptura	50
6 RESULTADOS	51
6.1 FUNIL DE MARSH	51
6.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	52
6.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	59
7 CONCLUSÕES	62

1 INTRODUÇÃO

Devido às demandas do mercado da construção civil, novos materiais precisam ser desenvolvidos, seja devido à necessidade de maior capacidade de carga, menor permeabilidade, maior durabilidade, ou quaisquer que sejam as características necessárias para a sua aplicação. Para suprir essas demandas, novas tecnologias vêm sendo utilizadas como alternativas para o desenvolvimento de concretos, entre elas a tecnologia de concretos de pós reativos e a nanotecnologia.

O concreto de pós reativos (CPR) se apresenta como um novo e promissor material na área de materiais de construção, sendo utilizado no âmbito internacional em alguns segmentos da construção civil, principalmente na indústria de pré-moldados. Devido às suas características, o CPR também pode ser utilizado em obras hidráulicas e de saneamento, obras de contenções de rejeitos radioativos, estruturas espaciais leves, passarelas, entre outros (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1510, tradução nossa; BLAIS; COUTURE, 1999, p. 60, tradução nossa). Segundo Vanderlei (2004, p. 1, 8), o concreto de pós reativos é definido como um concreto cujas partículas possuem diâmetro menor que 2 mm, ou seja, não contém agregado graúdo. No entanto, fazendo uma analogia ao significado de um concreto, Mehta e Monteiro (2008, p. 10-12, grifo do autor) definem que “Concreto é um material compósito que consiste, essencialmente, de um [...] aglomerante no qual estão aglutinadas partículas ou fragmentos de agregado. [...] [sendo que] o termo *agregado graúdo* se refere às partículas [...] maiores que 4,75 mm (peneira nº 4) [...]”. Para os autores, “*Argamassa* é uma mistura de areia, cimento e água. É como um concreto sem agregado graúdo.”, o que também é o caso do CPR. Desta forma, talvez o termo mais adequado nesta questão seria o de compósito, por este material ser composto apenas por pós (areia de quartzo, cimento, pó de quartzo e sílica ativa), além de água e superplastificantes, embora na literatura, se utiliza o termo concreto.

O CPR geralmente possui uma relação água/aglomerante muito baixa, próxima de 0,15, e ainda se pode acrescentar fibras de aço de pequenas dimensões para lhe dar uma maior ductilidade, sendo possível, às vezes, evitar o uso de armadura passiva (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1502, tradução nossa; PERRY; ZAKARIASEN, [2005], [p. 4], tradução nossa).

As nanopartículas são aplicadas nos concretos, pois, mesmo com baixas quantias, melhoram de uma forma geral a microestrutura desse material (GLEIZE, 2011, p. 1881). Dentre essas nanopartículas está a nanosílica. Esta possui propriedades melhores do que a sílica ativa (microsílica), pois possui uma superfície específica maior, fazendo com que a sua reação pozolânica ocorra de forma mais acelerada, melhorando também a zona de transição e a ligação entre agregado e pasta de cimento. (LI et al., 2004, p. 189, tradução nossa)

O uso de concretos de pós reativos e da nanosílica não são muito difundidos na indústria da construção civil brasileira, e seu comportamento demanda estudos mais aprofundados. Da mesma forma, o efeito da adição de nanosílica em concretos de pós reativos, por ser um material relativamente novo no mercado, ainda não foi estudado no Brasil, sendo esta a justificativa para este trabalho.

Este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo o primeiro aquele que possui esta introdução. O segundo capítulo contém as diretrizes da pesquisa, incluindo a questão de pesquisa, os objetivos, as hipóteses, as delimitações, limitações e o delineamento da pesquisa. Nos capítulos três e quatro há uma revisão bibliográfica sobre concretos de pós reativos e nanosílica, respectivamente. No quinto capítulo está o programa experimental, com a definição das variáveis, dos materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. No sexto capítulo estão apresentados os resultados e sua análise e no sétimo capítulo as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: como a variação de teores de adição de nanosílica influenciam nos valores das propriedades mecânicas estudadas de concretos de pós reativos?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho foi a análise do comportamento de concretos de pós reativos com a adição de nanosílica frente às resistências à compressão e à tração na flexão.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho foi a verificação da evolução da resistência à compressão com a idade para os concretos estudados.

2.3 HIPÓTESE

Tem-se por hipótese que a adição da nanosílica aumenta os valores das propriedades mecânicas estudadas, sendo mais significante na resistência à compressão do concreto de pós reativos, conforme maior for essa adição.

2.4 DELIMITAÇÕES

Esta pesquisa se aplica a concretos de pós reativos denominados CPR 200, onde o 200 designa uma resistência próxima de 200 MPa.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a análise da influência das seguintes variáveis,
 - cinco teores diferentes de nanosílica;
 - idade dos corpos de prova;
- b) avaliação da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão;
- c) cura térmica na temperatura de 80 °C;
- d) aquecimento da água para cura térmica muito acelerado.

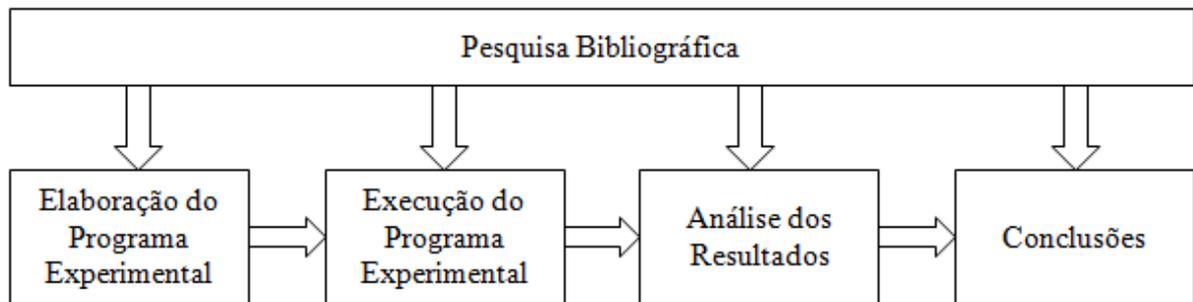
2.6 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do programa experimental;
- c) execução do programa experimental;
- d) análise dos resultados;
- e) conclusões.

Na etapa de **pesquisa bibliográfica** foi feita uma busca na literatura visando adquirir conhecimentos sobre os concretos de pós reativos, bem como o uso de adições nos concretos, especialmente a nanosílica. Esta etapa foi muito marcante no início do trabalho, porém continuou sendo executada ao longo de todo o período.

Figura 1 – Etapas do trabalho



(fonte: elaborado pela autora)

Na etapa de **elaboração do programa experimental** foram escolhidos os teores de nanosílica utilizados. Foi definida a quantidade de corpos de prova (CP) para cada combinação em relação aos ensaios realizados.

Na etapa de **execução do programa experimental**, já com o material adquirido, iniciaram os trabalhos de laboratório, com a moldagem, cura e ensaio dos CP. Na etapa de **análise dos resultados** foram avaliados os dados obtidos através dos ensaios, estabelecendo-se, por fim, as **conclusões** do trabalho.

3 CONCRETO DE PÓS REATIVOS

Os concretos estruturais são separados por classes, e a NBR 8953 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 2-3) divide os concretos estruturais em dois grupos. O grupo I, cujas resistências à compressão variam de 20 a 50 MPa, e o grupo II, cujas resistências à compressão variam de 55 a 100MPa. Normalmente os concretos são chamados de concretos convencionais, ou usuais, e concretos de alto desempenho, ou de alta resistência, porém não há um valor que separe os dois tipos, pois o conceito de concreto convencional muda com o passar dos anos, e concretos considerados de alto desempenho hoje, amanhã poderão ser convencionais, conforme a evolução do concreto (ÄITCIN, 2000, p. 4-5). Segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 14), um concreto com mais de 40 MPa pode ser considerado um concreto de alta resistência.

Há ainda diferenças entre CAD e CAR, sendo que o CAD não é necessariamente um concreto de alta resistência, pois por desempenho avalia-se o desempenho global do concreto ou da estrutura. Como exemplo, algumas características que tornam este material de alto desempenho são, trabalhabilidade, estética, acabamento, integridade ou durabilidade diferenciados de um concreto convencional (TUTIKIAN et al., 2011, p. 1285).

O concreto de pós reativos (CPR) está um passo além desses concretos de alto desempenho, pois pode alcançar resistências superiores a 200MPa, ultrapassando valores do que normalmente se pensa para um concreto de alta resistência.

O CPR é um material que possui uma maior homogeneidade em relação aos concretos convencionais e densidades elevadas, no entanto é um material frágil, possuindo ruptura brusca, o que pode ser contornado pela utilização de fibras de aço de pequenos diâmetros em sua mistura. Ele possui um excelente desempenho mecânico, pois além da alta resistência à compressão, também possui bons resultados à tração e à flexão quando contém fibras, além de um módulo de elasticidade elevado. Devido à sua baixa permeabilidade, o CPR também é um material muito durável.

Um exemplo da altíssima resistência à compressão desse concreto é o valor de 810 MPa obtido por Richard e Cheyrezy (1995, p. 1509, tradução nossa) com a aplicação de pressão

durante o endurecimento do concreto, cura térmica acima de 250 °C e incorporação de fibras e agregados de aço ao CPR. A composição deste concreto é dada na tabela 1, juntamente com outras configurações típicas de CPR.

Tabela 1 – Composições típicas de CPR (em massa)

	CPR 200				CPR 800	
	Sem Fibras		Com Fibras		Agregado Silicoso	Agregado de Aço
Cimento Portland	1	1	1	1	1	1
Sílica Ativa	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Areia 150-600 µm	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-
Pó de Quartzo d₅₀=10 µm	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39
Superplastificante (Poliacrilato)	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Fibra de Aço L=12 mm	-	-	0,175	0,175	-	-
Fibra de Aço L=3 mm	-	-	-	-	0,63	0,63
Agregados de Aço <800 µm	-	-	-	-	-	1,49
Água	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19
Pressão de Compactação	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Temperatura de cura térmica	20 °C	90 °C	20 °C	90 °C	250-400 °C	250-400 °C

(fonte: RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1502, tradução nossa)

Verifica-se a partir da tabela 1, diferentemente de concretos convencionais, os elevados teores de adição de finos, como a sílica ativa (que entra com um teor elevado, 25%, no CPR), pó de quartzo, areia fina e elevados teores de aditivo superplastificante, baixíssima relação água/cimento, além de outros materiais como fibras de aço e agregados de aço em concretos com resistência de 800 MPa.

Duas linhas de pesquisa têm sido seguidas no desenvolvimento de CPR, uma de concreto com matriz de granulometria compacta (DSP – *Densified System containing ultrafine Particles*), “[...] com o uso de altos teores de superplastificante e sílica ativa e com agregados de alta resistência (bauxita calcinada ou granito).” (BACHE¹, 1981 apud RICHARD; CHYREZY, 1995, p. 1501, tradução nossa); e a outra linha são as pastas de polímero MDF (*Macro Defect Free*), sendo que “Estas pastas possuem resistência à tração muito alta, que pode ultrapassar

¹ BACHE, H. H. Densified cement/ultra-fine particle-based materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE, 2nd, 1981, Ottawa. [Proceedings...]. [S. l.]: [s. n.], 1981.

os 150 MPa, principalmente quando misturadas com cimento aluminoso.” (BIRCHALL² et al., 1983 apud RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1501, tradução nossa).

Aspectos sobre os componentes e propriedades do CPR são apresentados nos próximos itens.

3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DOS CONCRETOS DE PÓS REATIVOS

Segundo Richard e Cheyrezy (1995, p. 1502, tradução nossa), os seguintes princípios básicos devem ser aplicados na fabricação de concretos de pós reativos (CPR):

- a) melhoramento da homogeneidade pela eliminação de agregados graúdos;
- b) melhoramento da compactação pela otimização da distribuição granulométrica e aplicação de pressão antes e durante o endurecimento;
- c) melhoramento da microestrutura por posterior tratamento térmico;
- d) melhoramento da ductilidade pela incorporação de fibras de aço de pequenas dimensões;
- e) manter os procedimentos de mistura e moldagem o mais próximo possível das práticas existentes.

Os autores ainda afirmam que os três primeiros princípios levam a uma alta resistência à compressão da matriz, porém com uma baixa ductilidade, sendo sugerida a aplicação do quarto princípio (melhoramento da ductilidade), visando aumentar a resistência à tração do concreto. As medidas relacionadas à homogeneidade e densidade sempre devem ser empregadas para este tipo de concreto, já que são as bases do conceito de CPR, enquanto que a pressão e o tratamento térmico são realizados com o objetivo de aumentar o seu desempenho, mas não sendo obrigatórios, e sua aplicação deve ser avaliada para cada caso, “[...] de acordo com a dificuldade das tecnologias envolvidas (aplicação de pressão) e/ou do seu custo (tratamento térmico).” (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1502, tradução nossa).

A seguir são abordados estes tópicos com maiores detalhes.

² BIRCHALL, J. D.; [MAJID, K. I.; STAYNES, B. W.; RAHMAN, A. A.; DAVE, N. J.; TAYLOR, H. F. W.; TAMAS, F.; MAJUMDAR, A. J.; CHAMPION, A.; ROY, D. M.; BENSTED, J]. [Cement in the context of new materials for an energy-expensive future and discussion]. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, London, v. 310, [n. 1511], p. 31-42, [Sept.] 1983.

3.1.1 Melhoramento da homogeneidade

A heterogeneidade nos concretos é gerada devido à introdução de agregados graúdos na sua mistura, o que pode causar uma série de problemas, que são comuns em concretos convencionais. Normalmente os agregados e a pasta de cimento apresentam módulo de elasticidade diferentes, surgindo deformações diferenciais entre eles, causando fissuras nessa interface e reduzindo sua resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 89).

No CPR, com a substituição do agregado graúdo por areia fina, e o uso de uma relação água/aglomerante muito baixa, esses problemas são substancialmente reduzidos, já que (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1503, tradução nossa; VANDERLEI, 2004, p. 9-10):

- a) a pasta possui melhores propriedades mecânicas, com aumento do seu módulo de elasticidade, diminuindo a diferença entre os módulos do agregado e da pasta;
- b) há a redução da relação agregado/matriz;
- c) ocorre a supressão da zona de transição entre o agregado e a pasta.

3.1.1.1 Efeito do tamanho do agregado

Em concretos convencionais, os agregados formam um esqueleto rígido dentro da pasta de cimento, e quando uma força de compressão é aplicada, surgem tensões de cisalhamento e tração na interface pasta/agregado, que fissuram a pasta. Sendo que quanto maior for o diâmetro do agregado, maior será o tamanho da fissura (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1503, tradução nossa).

Como no CPR o maior tamanho de agregado é bastante reduzido, também serão significativamente menores as microfissuras de origens mecânicas (provindas de cargas externas), químicas (devido à retração autógena) e termomecânicas (causadas por expansões diferentes entre a pasta e o agregado quando submetidos à cura térmica) (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1503, tradução nossa).

3.1.1.2 Efeito do melhoramento das propriedades mecânicas da pasta

Geralmente, em concretos convencionais, o módulo de elasticidade da pasta é menor do que o do agregado, possuindo valores entre 18 e 22 GPa para a pasta e de 70 GPa para o agregado

silicoso, causando os problemas da heterogeneidade. Já o CPR possui valores de módulo de elasticidade maiores de 50 GPa, podendo ultrapassar 75 GPa quando se tem densidades muito elevadas. Com isso, é possível observar “[...] que o módulo global para a pasta e agregado é ligeiramente superior do que do agregado silicoso.”, podendo ser removido o efeito da heterogeneidade, e até mesmo revertê-lo (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1503, tradução nossa).

Comparando a pasta do CPR com pastas cimentícias convencionais, o aumento do módulo de elasticidade “[...] tende a atenuar os efeitos associados à perturbação do campo de tensões mecânicas.” (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1503, tradução nossa).

3.1.1.3 Efeito do limite do teor de areia

O grande volume de agregados no concreto convencional forma um esqueleto rígido nesse material, bloqueando a maior parte da retração da pasta, deixando mais vazio dentro do concreto. No CPR, o agregado não forma um esqueleto rígido, pois “[...] o volume de pasta presente é pelo menos 20% maior do que o índice de vazios da areia não compactada.”. Assim, não ocorre um bloqueio global da retração, apenas um bloqueio local da retração da pasta em torno do agregado, diminuindo suas consequências (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1503, tradução nossa).

3.1.2 Melhoramento da densidade

Uma otimização da distribuição granulométrica é desejável, pois quanto melhor for o empacotamento das partículas, maior será a densidade, e conseqüentemente, maior será a resistência à compressão (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1508, tradução nossa). Além dessa otimização da distribuição dos grãos, também pode ser usada pressão durante o endurecimento do concreto. Já nos anos 1930, Eugène Freyssinet demonstrou a vantagem dessa aplicação no aumento da resistência do concreto (FREYSSINET³, 1936 apud RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1501, tradução nossa).

³ Trabalho realizado por Eugène Freyssinet publicado em *Cement and Concrete Manufacture*, v. 9, em 1936, p. 71. A obra lida não apresenta o restante dos dados.

3.1.2.1 Otimização da distribuição granulométrica

Dentre tantos modelos de empacotamento de partículas, neste trabalho foi utilizado o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), desenvolvido por Larrard e sua equipe. Este método é utilizado para definir a distribuição granulométrica de misturas secas, englobando todos os materiais que são utilizados no concreto (LARRARD⁴, 1999 apud FORMAGINI, 2005, p. 14).

As vantagens do MEC para ser utilizado na dosagem de concretos de pós reativos, ou outros de alto ou altíssimo desempenho, são citadas por Silva (2004, p. 17):

- a) o desenvolvimento deste método segue os princípios científicos, ou seja, é fundamentado em uma observação dos fenômenos, levantamento de hipóteses, estabelecimento de modelos matemáticos que representam os fenômenos e nas comprovações experimentais dos modelos estabelecidos;
- b) ele inclui em seus modelos matemáticos a contribuição dos novos materiais que estão sendo utilizados na confecção dos concretos atualmente, tais como, sílica ativa, fíler calcário, superplastificantes, entre outros;
- c) para comprovar a veracidade dos modelos o MEC utiliza um grande conjunto de dados experimentais para diversos concretos;
- d) ele é um método capaz de ser implementado computacionalmente.

O método consiste na relação entre as propriedades virtuais (geométricas) e as reais após um empacotamento dos materiais, considerando-se a interação entre os grãos, o que tende a diminuir a compacidade da mistura devido aos efeitos de parede e de afastamento (FORMAGINI, 2005, p. 14-16). Cada tipo de empacotamento possui um índice de empacotamento (K) diferente, sendo que alguns foram determinados por Larrard⁵ (1999 apud FORMAGINI, 2005, p. 25) e são apresentados na tabela 2.

⁴ LARRARD, F. de. **Concrete Mixture Proportioning**: a scientific approach. London: E & FN SPON, 1999. Modern Concrete Technology Series, v. 9.

⁵ op. cit.

Tabela 2 – Valores de K para os diferentes protocolos de empacotamento

Protocolo de Empacotamento	Índice K
Lançamento simples	4,1
Pilonamento	4,5
Vibração	4,75
Demanda de água	6,7
Vibração + compactação de 10 kPa	9
Empacotamento virtual	∞

(fonte: FORMAGINI, 2005, p. 25)

3.1.2.2 Aplicação de pressão

A aplicação de pressão durante o endurecimento do concreto, dependendo do método utilizado e da duração da aplicação, forçará uma diminuição do ar aprisionado em poucos segundos. Se a fôrma permitir a saída de água, mas sem permitir a saída das partículas mais finas do concreto (a saída da água acontece se a pressão for aplicada durante vários minutos), a água da mistura diminuirá, causando um aumento na densidade relativa. Além disso, se a pressão for mantida durante o endurecimento do concreto, ocorre a redução da porosidade causada pela retração química. Essa pressão prolongada induz microfissuras no concreto, o que é identificado medindo-se o módulo de elasticidade dinâmico na desmoldagem, causadas pela “[...] ruptura de ligações rígidas criadas durante o endurecimento e pela expansão do agregado quando a pressão é liberada.”. O concreto cura automaticamente essas microfissuras conforme endurece (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1508, tradução nossa).

Quando todos os efeitos da pressão ocorrem, é possível obter aumentos superiores a 6% na densidade relativa, sendo a resistência à compressão altamente dependente dessa densidade. Já a resistência à tração não possui um aumento muito significativo com a aplicação de pressão (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1508, tradução nossa).

3.1.3 Melhoramento da microestrutura

Segundo Äitcin (2000, p. 405), “[...] o concreto de alto desempenho contém mais cimento do que o concreto usual, [...] [sendo necessário] ter algumas preocupações sobre uma elevação [...] de temperatura ou gradientes térmicos [...] no interior de elementos estruturais.”. Esse aumento da temperatura no interior do concreto leva a diferentes condições de hidratação do

elemento estrutural e dos corpos de prova usados para controlar suas propriedades. A temperatura também não é uniforme dentro do concreto, e uma temperatura muito elevada no início do endurecimento pode causar microfissuras, se forem atingidas tensões maiores que as resistentes pelo concreto na sua idade, causadas pelo posterior resfriamento dessa massa.

Para o concreto convencional, sabe-se que as propriedades mecânicas do concreto pioram quando este é submetido à cura térmica (60 a 95 °C). Ela aumenta a resistência inicial deste concreto, mas acaba reduzindo sua resistência final, quando comparado com uma cura normal, à temperatura ambiente. A cura térmica modifica a microestrutura do concreto, aumentando a porosidade (BIZ, 2002, p. 27).

Já para o CPR, a cura térmica geralmente é benéfica, pois melhora suas propriedades mecânicas através de uma melhor cristalização dos produtos hidratados e acelera a reação pozolânica das adições minerais. Não se sabe ainda exatamente o porquê dessa melhora, mas sabe-se que há a formação de outros compostos cristalinos quando a cura térmica é aplicada. Com temperaturas menores do que 200 °C, a reação do hidróxido de cálcio com a sílica ativa, por exemplo, forma tobermorita. Com temperaturas maiores ocorre a formação de *truscottite*, *gyrolite*, *xonotlite* e *hillebrandite*, dependendo da relação cálcio/sílica ativa (RICHARD; CHEYREZY⁶, 1995 apud VANDERLEI, 2004, p. 14). Nos anos 1960, Roy e Gouda⁷, ([1973] apud RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1501, tradução nossa) obtiveram resistências à compressão de 650 MPa em corpos de prova curados com cura térmica sob elevadas pressões.

Richard e Cheyrezy⁸ (1995 apud VANDERLEI, 2004, p. 15) procuraram as condições ótimas de cura, partindo dos seguintes princípios:

- a) obtenção da porcentagem ótima de hidratos cristalinos;
- b) definição de condições estequiométricas e termodinâmicas privilegiando a formação de produtos hidratados cristalinos, obtendo as melhores propriedades mecânicas;
- c) extração da quantidade máxima de água do concreto endurecido.

⁶ RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Les bétons de poudres réactives. **Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics**, [Paris], n. 532, p. 85-102, [Avril/Mai] 1995.

⁷ ROY, D. M.; GOUDA, G. R. [High strength generation in cement pastes.] **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 3, n. 6, p. 807-820, [Nov. 1973].

⁸ RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Les bétons de poudres réactives. **Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics**, [Paris], n. 532, p. 85-102, [Avril/Mai] 1995.

Com os ensaios realizados pelos autores, eles concluíram “[...] que não é proveitoso aplicar temperaturas além de 90 °C em modelos que não são comprimidos antes da pega do cimento; e que não se alcança boas melhoras nas propriedades mecânicas em modelos comprimidos e tratados à temperatura de 90 °C ou inferiores.” (RICHARD; CHEYREZY⁹, 1995 apud VANDERLEI, 2004, p. 15).

A variação da temperatura da cura térmica, bem como da pressão aplicada ao concreto durante a sua moldagem, foram estudadas por Cheyrezy¹⁰ et al. (1995 apud VANDERLEI, 2004, p. 15). Eles avaliaram a microestrutura e fizeram análise termogravimétrica e difração de raio-X do CPR, mostrando “[...] que as propriedades do concreto de pós reativos são altamente dependentes do tratamento térmico.”. Biz (2002, p. 50) recomenda que a taxa de aquecimento ou resfriamento do concreto se situe em torno de 15 a 20 °C/h, “[...] para evitar o acúmulo de tensões que possam acarretar no aparecimento de fissuras no interior do material.”.

3.1.4 Melhoramento da ductilidade

O CPR é um material frágil, possuindo uma energia de fratura de no máximo 30 J.m⁻², com um comportamento linear e elástico. Para diminuir a sua fragilidade, tornando-o mais dúctil, é possível adicionar fibras à sua mistura, devendo estas ser de pequenas dimensões devido ao tamanho do agregado (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1508, tradução nossa). Como exemplo, os autores utilizaram fibras de aço retas de 13 mm de comprimento e diâmetro de 0,15 mm, numa proporção entre 1,5 e 3% em volume. Para o CPR 800, foram utilizadas fibras de aço de 3 mm de comprimento e de forma irregular, que proporciona uma melhora no desempenho mecânico. Os autores também indicam que o teor ideal de fibras, do ponto de vista econômico, é de 2%, ou cerca de 155 kg/m³, e que a mistura dos dois tipo de fibras geram resultados intermediários.

⁹ RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Les bétons de poudres réactives. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, [Paris], n. 532, p. 85-102, [Avril/Mai] 1995.

¹⁰ CHEYREZY, M.; MARET, V.; FROUIN, L. Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). *Cement and Concrete Research*, [S. l.], v. 25, n. 7, p. 1491-1500, Oct. 1995.

3.2 MATERIAIS USADOS NA CONFECÇÃO DE CPR

Nos itens a seguir são descritos os materiais componentes do CPR, sendo eles areia fina, cimento, superplastificante, sílica ativa e pó de quartzo

3.2.1 Areia

Para se definir a areia a ser utilizada, deve-se levar em consideração a sua **composição mineral**. É preferível uma areia silicosa, já que o quartzo é um material muito duro, com resistência elevada, que possui excelente interface pasta/agregado e é largamente disponível a um custo não muito alto (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1505-1506, tradução nossa).

O **diâmetro médio da partícula** e a **distribuição granulométrica** também devem ser analisados, levando-se em conta o critério da homogeneidade. Richard e Cheyrezy (1995, p. 1506, tradução nossa) recomendam o uso de areia com diâmetro máximo de 600 μm e diâmetro mínimo de 150 μm , para que não haja interferência das partículas mais finas de areia com as maiores partículas de cimento (80-100 μm). O autor selecionou uma areia com diâmetro médio de 250 μm .

Quanto à **forma das partículas**, pode ser usada areia artificial (provinda da britagem de rocha), que possui uma forma mais angular, ou areia natural, com os grãos mais esféricos, sendo preferível a areia natural, que irá proporcionar uma demanda de água menor (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1505-1506, tradução nossa).

Colleparidi et al. (1997, [p. 5-6] tradução nossa) estudaram a incorporação de uma distribuição de agregados maiores, com diâmetro de até 8 mm, na composição do chamado CPR modificado, eles notaram que houve diminuição do módulo de elasticidade global do concreto (40 GPa) e também uma diminuição da resistência à flexão. Porém, em termos de resistências à compressão e à tração, quando há a substituição apenas dos agregados, sem interferir na quantidade de cimento e sílica ativa, as resistências não tiveram valores muito diferentes do CPR convencional, colocando em contraposição o efeito da homogeneidade do CPR.

3.2.2 Pó de quartzo

Esse pó está na mesma classe granular do cimento, e funciona como um complemento à sílica ativa, pois ele reage quando submetido à cura térmica (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1507, tradução nossa). Segundo Menzel¹¹ (1934 apud RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1507, tradução nossa), “A máxima reatividade [do pó de quartzo] durante o tratamento térmico é obtida para um tamanho médio de partículas entre 5 e 25 μm .”.

3.2.3 Cimento

Richard e Cheyrey (1995, p. 1506, tradução nossa) recomendam o uso de cimento com baixo teor de aluminato tricalcico (C_3A) e que não possuam uma finura Blaine muito elevada, devido à sua maior demanda de água. O cimento com alto teor de adições minerais, que é o mais indicado, nem sempre poderá ser usado, já que possui uma velocidade de pega muito lenta e, além disso, não se tem o controle das adições que já estão dentro do cimento. Neste caso, o melhor é utilizar um cimento mais fino, mesmo que possua uma maior demanda de água, mas com desempenho mecânico similar, sendo o caso do cimento de alta resistência inicial.

Biz (2002, p. 69-71) observou uma expansão dos corpos de prova quando submetidos à cura térmica de 90 °C, o que achou que poderia ter sido causado pelo elevado teor de C_3A do cimento. Porém, uma análise realizada mostrou que o concreto não continha nenhum cristal ou componente em quantidade suficiente para gerar essa expansão (como a formação de etringita secundária), relacionando, então, essa expansão com o momento inicial, quando as amostras eram submetidas ao tratamento térmico no início da pega do cimento. O autor levanta que “[...] a diferença dos materiais utilizados pelos pesquisadores internacionais parece ser um fator relevante para a produção dos concretos de pós reativos.”. Ele reverteu essa situação com a aplicação de cura térmica a 82 °C após seis dias de cura em água à temperatura ambiente.

¹¹ Trabalho realizado por C. A. Menzel publicado em Journal of ACI Proceedings, v. 31, em 1934, p. 221-244. A obra lida não apresenta o restante dos dados.

3.2.4 Superplastificante

Para dar trabalhabilidade ao CPR, devido a sua baixa relação água/aglomerante, é imprescindível o uso de superplastificantes. Os mais indicados são os que possuem dispersantes à base de poliacrilato ou policarboxilato, e normalmente são utilizados em uma taxa de 1,5 a 2,5% em massa do consumo de cimento (VANDERLEI, 2004, p. 19). Porém a sua compatibilidade com o cimento deve ser testada, bem como o teor ótimo a ser utilizado, o que é possível através dos ensaios de Minislump e funil de Marsh (BIZ, 2002, p. 18).

3.2.5 Sílica ativa

Segundo Dal Molin et al. ([1996], [p. 2]),

A sílica ativa, ou microssílica, é um resíduo oriundo das indústrias de ferro-ligas e silício metálico. Pelas suas propriedades químicas (teor de $\text{SiO}_2 > 85\%$) e físicas (superfície específica média de $20 \text{ m}^2/\text{g}$) este material é considerado uma excelente pozolana que, quando usado no concreto, além de atuar quimicamente também atua de forma física, através do efeito microfíler.

Segundo Richard e Cheyrezy (1995, p. 1507, tradução nossa), a sílica ativa possui três principais funções no CPR:

- a) preencher os vazios da classe de partículas imediatamente acima (cimento);
- b) melhorar as características reológicas pela lubrificação, efeito resultante da perfeita esfericidade das suas partículas básicas;
- c) produção de hidratos secundários devido às reações pozolânicas com a cal resultante das hidratações primárias.

A relação sílica/cimento no CPR normalmente utilizada é de 25%, pois é a que corresponde ao empacotamento ótimo e consome praticamente toda a portlandita (Ca(OH)_2) resultante da hidratação total do cimento (SEKI¹² et al., 1985 apud RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1507, tradução nossa). Porém, como não há água suficiente para hidratar todo o cimento, nem toda a sílica ativa será consumida, exercendo um efeito microfíler (VANDERLEI, 2004, p. 19).

¹² SEKI, S.; MORIMOTO, M.; YAMANE, N. Recherche expérimentale sur l'amélioration du béton par l'incorporation de sous-produits industriels. *Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics*. [Paris], n. 436, p. 16-26, July/Aug. 1985.

Além do uso da sílica ativa, neste trabalho também foi utilizada a nanosílica. A principal diferença entre as duas é o seu tamanho, pois a nanosílica é cerca de 1000 vezes menor do que a sílica ativa. Além disso, a quantidade de nanosílica usada no concreto, de uma forma geral, pode ser bem menor (usualmente varia entre 0,5 e 3%) que a sílica ativa para atingir melhores propriedades (DINTEN, 2000, p. 73).

3.3 PROPRIEDADES DO CPR

Vanderlei (2004, p. 20) cita que “O CPR tem propriedades mecânicas elevadas, como a resistência à compressão em torno de três a vinte vezes maior que o concreto de alto desempenho (CAD), e a resistência à tração dez vezes maior.”. O autor também comenta que com a adição de fibras de aço, o CPR tem maior ductilidade, e que a absorção de energia pode ser até 250 vezes maior que as do CAD. A seguir serão abordadas algumas características dos CPR.

3.3.1 Desempenho mecânico

As propriedades relacionadas ao desempenho mecânico dos concretos são descritas a seguir.

3.3.1.1 Resistência à compressão

Esta é normalmente a propriedade de controle de concretos, sendo a referência para avaliar outras propriedades, como a qualidade deste concreto. A modificação de certas variáveis reflete na sua resistência (VANDERLEI, 2004, p. 21).

A resistência à compressão é afetada pela densidade do concreto, quanto maior a densidade, melhor será sua resistência à compressão (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1508, tradução nossa). O CPR possui duas classes de material, os CPR 200, cuja resistência à compressão varia entre 170 a 230 MPa; e o CPR 800, cuja resistência varia de 500 a 800 MPa (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1509-1510, tradução nossa).

Para Dallaire¹³ et al. (1996 apud VANDERLEI, 2004, p. 24) quando o CPR é confinado por tubos de aço, sua resistência à compressão é ainda maior do que o CPR sem confinamento, sendo ainda mais eficiente para aumentar a ductilidade da estrutura do que as fibras de aço.

3.3.1.2 Resistência à tração

Behloul¹⁴ et al. (1996 apud VANDERLEI, 2004, p. 25) realizaram ensaios de resistência à tração direta do CPR e observaram no material um comportamento frágil, visto que as fissuras do corpo de prova (CP) se formaram bruscamente e perpendicularmente ao eixo principal do CP. Quando se adicionavam fibras ao CPR, os CP tiveram comportamento dúctil, e os autores levantaram a hipótese “[...] que existe um volume de fibras entre 0,5% e 1% além do qual a resistência à tração aumenta linearmente, e abaixo desses valores a adição de fibras na matriz não tem efeito na resistência à tração.”. Além disso, foi verificado que com qualquer quantidade de fibras, percebem-se três fases no CPR: “[...] uma elástica linear até 70% ou 90% da força máxima; uma fase de encruamento até a força máxima; e uma fase de amolecimento onde a tensão decresce com abertura da fissura principal.”.

3.3.1.3 Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão é comumente realizado com prismas, que são carregados no centro do vão ou em dois pontos nos terços do vão, e apoiado em dois pontos, sendo denominado ensaio à flexão em 3 ou 4 pontos, respectivamente (VANDERLEI, 2004, p. 29). O CPR 200 possui resistência à flexão que varia de 30 a 60 MPa, e a resistência à flexão do CPR 800 varia de 45 a 141 MPa, dependendo do teor de fibras (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1509-1510, tradução nossa).

3.3.1.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é medido através de ensaios de compressão axial, nos quais se mede as deformações longitudinais do CP até a força de ruptura (VANDERLEI, 2004, p. 32). O

¹³ DALLAIRE, E.; BONNEAU, O.; LACHEMI, M.; ÄITCIN, P. C. Mechanical behavior of confined reactive powder concretes. In: [CHONG, K. P. (Ed)]. **Materials for the new millennium**. New York: ASCE, 1996. p. 555-563. v. 1.

¹⁴ BEHLOUL, M. BERNIER, G. CHEYREZY, M. Tensile behavior of reactive powder concrete (RPC). In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE**, 4th, 1996, Paris. **Proceedings...** Paris: [s. n.], 1996. p. 1375-1381.

valor do módulo de elasticidade para CPR pode variar de 50 a 60 GPa para CPR 200, e de 65 a 75 GPa para CPR 800 (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1509-1510, tradução nossa).

3.3.1.5 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson é conseguido durante o ensaio de compressão axial, medindo-se e fazendo a relação entre a deformação transversal e a deformação longitudinal do material (VANDERLEI, 2004, p. 33). Em ensaios realizados por Dugat¹⁵ et al. (1995 apud VANDERLEI, 2004, p. 33), mediu-se um coeficiente de Poisson de 0,23 para o CPR 200, e o coeficiente de Poisson para o CPR 800, que possui um comportamento elástico enrijecedor, passou de 0,19 para 0,28 na fase elástica.

3.3.2 Durabilidade do concreto de pós reativos

Segundo Äitcin (2000, p. 539) “A expressão ‘durabilidade do concreto’ é usualmente empregada para caracterizar, em termos gerais, a resistência do concreto ao ataque de agentes agressivos físicos e químicos.”, porém não há um modo geral de fazer essa avaliação de durabilidade, sendo preferível especificar à que tipo de agente agressivo se deseja que o concreto seja durável.

Yu et al. (2004, p. 336-337, tradução nossa) avaliaram o CPR frente a sua durabilidade com objetivo de utilizá-lo no planalto Qinghai-Tibet, área oeste da China, onde a altitude é muito elevada, as temperaturas muito baixas e a água presente no solo é rica em cloretos. Os ensaios realizados foram de resistência à penetração de cloretos e resistência ao gelo-degelo. Os resultados comprovaram que o CPR possui uma excelente resistência a ambos, não havendo fuga de água das amostras submetidas a pressões de 0,1 a 1,6 MPa e nem variação do seu módulo de elasticidade relativo ou perda de massa após 800 ciclos de congelamento e descongelamento.

Para a ocorrência da reação álcali-agregado no concreto, três fatores são necessários: alto teor de álcalis, agregados reativos e presença de água. A sílica ativa se liga com os álcalis, não os

¹⁵ DUGAT, J.; ROUX, N.; BERNIER, G. Étude expérimentale de la déformation sous contrainte et du comportement à la rupture du béton de poudres réactives. In: **Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics**, [Paris], n. 532, p. 112-121, [Avril/Mai] 1995.

deixando livres para reagir, e, devido à sua baixa permeabilidade, haverá menos água disponível, dificultando essa reação. Ainda, com a menor difusão de água dentro do concreto, também será menor a difusão de cloretos e dióxido de carbono no seu interior (DUNSTER, 2009, p. 5-6, tradução nossa).

3.4 APLICAÇÕES DO CPR

Devido às propriedades mecânicas e de durabilidade do CPR, ele pode ter vários usos. Um exemplo de sua utilização é em depósitos de rejeitos industriais e nucleares devido a sua baixa permeabilidade. O CPR 800, mais especificamente, pode ser empregado em estruturas ou equipamentos militares pesados, pois possui excelente resistência ao impacto de projéteis (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1510, tradução nossa).

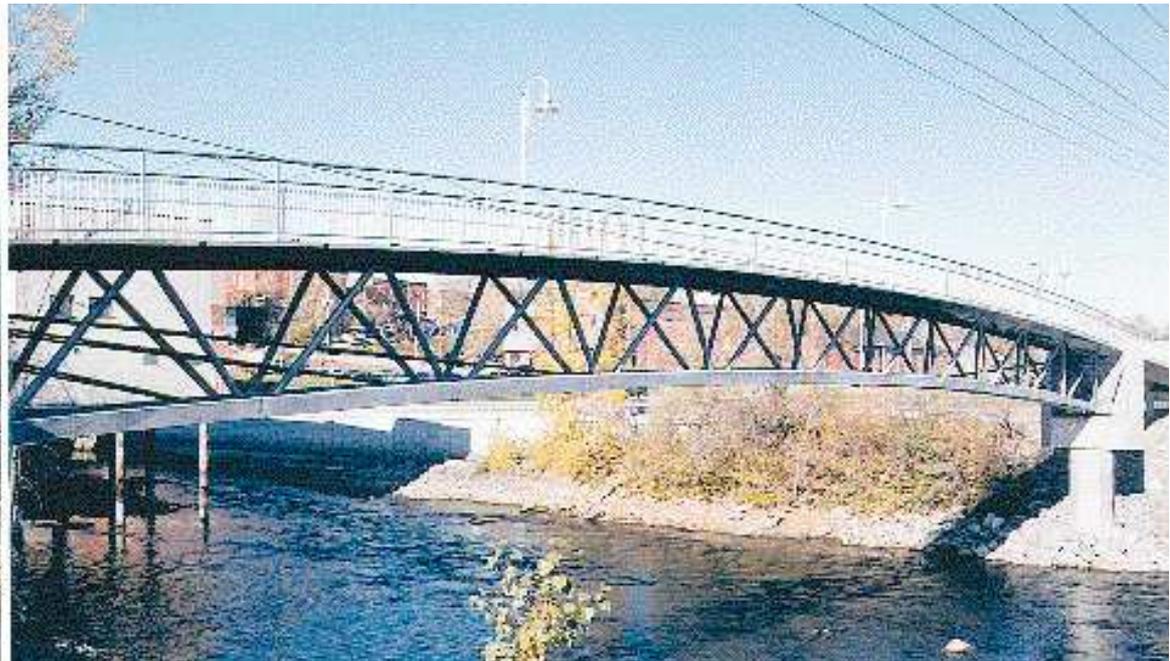
Ele também pode ser usado em elementos submetidos à tração ou flexão (vigas e lajes), mas recomenda-se o uso de técnicas de protensão para compensar a diferença do comportamento entre sua tração e compressão. Devido à sua maior resistência e ao uso de protensão, estruturas até três vezes mais leves (comparadas com estruturas de concreto convencional) podem ser projetadas, reduzindo as cargas permanentes e a quantidade de concreto a ser utilizada. Isto pode compensar o maior valor do concreto, reduzindo o custo global da obra (RICHARD; CHEYREZY, 1995, p. 1510, tradução nossa).

Outra aplicação do CPR é em passarelas e pontes. Inclusive, a primeira estrutura de grande porte construída com CPR foi uma passarela na cidade de Sherbrooke, no Canadá, em 1997. Além do uso do CPR, ela também englobou outras inovações, como o “[...] confinamento do concreto, não usou reforço de barras de aço e foi pioneira na prática de elaboração e detalhamento de concreto pré-fabricado/protendido.” (BLAIS; COUTURE, 1999, p. 60, tradução nossa). Uma imagem da passarela de Sherbrooke pode ser vista na figura 2.

O CPR também já é produzido comercialmente, através da linha Ductal®. Com ele foi construída a cobertura de uma estação de trem em Calgary, Canadá, a Shawnessy LRT Station. São vinte e quatro abóbodas com uma casca fina pré-fabricados, medindo 5 m x 6 m e com uma espessura de apenas 2 cm, suportados por simples colunas, é a primeira estrutura de abóbodas com casca fina construída com o CPR. A estrutura foi projetada para suportar cargas combinadas de vento e neve, sendo que o concreto possui resistência à compressão de

150 MPa e resistência à flexão de 18 MPa, possuindo fibras na sua composição e não sendo necessária armadura passiva, proporcionando uma construção mais simplificada (PERRY; ZAKARIASEN, [2005], [p. 2-4], tradução nossa).

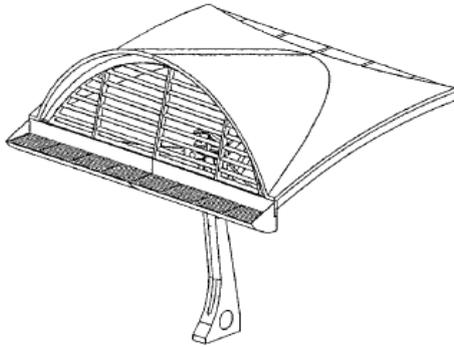
Figura 2 – Passarela de Sherbrooke, Quebec



(fonte: BLAIS; COUTURE, 1999, p. 61)

Na figura 3 está uma representação em 3D dessas abóbodas, na figura 4 estão apresentadas as colunas de sustentação da cobertura, na figura 5 as abóbodas sendo instaladas, e na figura 6 as abóbodas já instaladas.

Figura 3 – Vista em 3D das abóbodas



(fonte: PERRY; ZAKARIASEN, [2005], [p. 9])

Figura 4 – Colunas de sustentação



(fonte: PERRY; ZAKARIASEN, [2005], [p. 13])

Figura 5 – Abóboda sendo instalada



(fonte: PERRY; ZAKARIASEN, [2005], [p. 13])

Figura 6 – Abóbodas instaladas



(fonte: PERRY; ZAKARIASEN, [2005], [p. 14])

4 NANOSÍLICA

A nanotecnologia faz parte da ciência que estuda materiais e estruturas que possuem tamanho entre 1 e 100 nm, atingindo o nível de moléculas e átomos. Esses materiais apresentam “[...] um comportamento especial devido aos efeitos quânticos que prevalecem até 10 nm [...], e [...] predominam os efeitos das altíssimas superfícies e interfaces [...]” (GLEIZE, 2007, p. 1659).

Potencialmente, a nanotecnologia pode ser usada em quase todas as áreas: eletrônica, automotiva, cosmética, remédios, têxteis e construção. Na construção civil, Gleize (2007, p. 1661) dá alguns exemplos de modificações que a nanotecnologia poderia trazer: “[...] estruturas mais resistentes, leves e seguras; os sistemas de fechamento e vedação mais isolantes, [...] com várias funcionalidades adicionais, como captação e armazenamento de energia, auto-reparo, autolimpeza, proteção contra o fogo, aquecimento/resfriamento.”.

Quanto aos materiais cimentícios, os nanomateriais possuem um papel crítico nessa aplicação, pois permitem um melhor controle da microestrutura desses, produzindo materiais mais resistentes e duráveis, podendo melhorar a coesão e dominar a fluência, evitar fissuração nas primeiras idades, aumentar a ductilidade e a resistência ao mesmo tempo (GLEIZE, 2007, p. 1674-1676).

Dentre os nanomateriais existentes (nanotubos de carbono, nanosílica, nanopartículas de dióxido de titânio), neste trabalho foi utilizada a nanosílica. Abaixo são discutidas suas propriedades e os meios de sua produção.

4.1 PRODUÇÃO DA NANOSÍLICA

A nanosílica pode ser obtida por diversos processos e, dependendo desse processo, das temperaturas utilizadas e da sua eficiência, podem ser obtidas nanosílica com diversos tamanhos, e conseqüentemente, com diferentes eficiências.

Nos itens seguintes há uma breve descrição dos principais processos de obtenção da nanosílica.

4.1.1 Processo sol-gel

O processo sol-gel é um dos processos de produção de nanomateriais do tipo *bottom-up*¹⁶ mais utilizados. Para a produção de nanosílica, ele envolve “[...] a formação de uma suspensão coloidal (sol) e congelamento da mesma para formar uma rede em uma fase líquida contínua (gel).” (ATTARD¹⁷ et al., 1995 apud SOBOLEV et al., c2008, p. 95, tradução nossa). Neste processo, se altera o pH da mistura entre materiais que dão origem à sílica (como o Na_2SiO_2 e organometálicos como *trimethylethoxysilane* – TMOS – ou *tetraethoxysilane* – TEOS) com um solvente (ácido ou básico), precipitando o gel de sílica, gel esse que é envelhecido e filtrado, virando um xerogel, que é tratado para produzir uma dispersão concentrada (QUERCIA; BROUWERS, 2010, p. 2, tradução nossa).

Sobolev¹⁸ et al. (2006 apud SOBOLEV et al., c2008, p. 102, 106, 114, tradução nossa) demonstraram que este método é eficiente para a síntese de nanosílica, porém o desempenho dessas nanopartículas vai depender das condições da síntese, ou seja, da relação molar dos reagentes, o tipo de meio de reação (ácido ou básico) e a temperatura do tratamento térmico. Estes autores ainda verificaram que o aumento da temperatura do tratamento térmico aumenta a resistência à compressão nas primeiras idades (1 e 3 dias), porém é prejudicial para a resistência de argamassas com idades acima de 28 dias, o que foi atribuído à grande presença de aglomerados estáveis de nanopartículas. Eles verificam também, que a aplicação de um tratamento ultrassônico em banho de água nas partículas de nanosílica tratadas com altas temperaturas é efetiva para restaurar sua atividade.

¹⁶ Existem dois modos de se produzir nanomateriais. Um deles é ir dividindo o material até chegar à menor dimensão possível, partindo de cima para baixo (*top-down*). Como exemplo tem-se a indústria eletrônica, com a linha dos computadores modernos. E o outro modo é juntar átomo por átomo para formar algo maior, partindo de baixo para cima (*bottom-up*), como é comum acontecer na natureza, na formação de organismos vivos (GLEIZE, 2007, p. 1660).

¹⁷ ATTARD, G. S.; GLYDE, J. C.; GÖLTNER, C. G. [Liquid-crystalline phases as templates for the synthesis of mesoporous silica]. *Nature*, [S. l.], v. 378, p. 366-368, [Nov.] 1995.

4.1.2 Vaporização da sílica

Outro processo de obtenção é através da vaporização da sílica, onde a redução do quartzo é feita em um forno de arco elétrico, com temperaturas entre 1500 e 2000 °C, causando a vaporização da sílica, onde ela é recolhida, gerando um pó de partículas esféricas com diâmetro médio de 150 nm (QUERCIA; BROUWERS, 2010, p. 2, tradução nossa).

4.1.3 Método biológico

O método biológico foi desenvolvido por Estevez¹⁹ et al. (2009 apud QUERCIA; BROUWERS, 2010, p. 2, tradução nossa), sendo que o método procede com a alimentação de minhocas vermelhas da Califórnia com casca de arroz, e o húmus gerado é processado, gerando nanosílica de forma esférica com tamanho entre 55 e 245 nm, sendo obtida com uma eficiência de 88% do processo.

4.1.4 Método da sílica olivina

Este é um processo sustentável de produção de nanosílica, pois são combinados olivina (mineral) e resíduos de ácido (tanto sulfúrico quanto clorídrico), formando uma sílica precipitada muito fina (partículas entre 6 e 30 nm) mas aglomerada, que se torna mais barata do que a própria sílica ativa (LIEFTINK²⁰, 1997 apud QUERCIA; BROUWERS, 2010, p. 2, tradução nossa).

¹⁸ Trabalho realizado por K. Sobolev et al., intitulado “Development of nano SiO₂ based admixtures for high-performance cement based materials”, apresentado ao CONACYT – México, em 2006. A obra lida não traz os outros dados.

¹⁹ ESTEVEZ, M.; VARGAS, S.; CASTAÑO, V. M.; RODRÍGUEZ, R. Silica nano-particles produced by worms through a bio-digestion process of rice husk. **Journal of Non-Crystalline Solids**, [S. l.], v. 355, [n. 14-15], p. 844-850, [June] 2009.

²⁰ Tese de doutorado realizada por D. J. Lieftink, intitulada “The preparation and characterization of silica from acid treatment of olivine”, com 175 p. Foi apresentada na Utrecht University, The Netherlands, em 1997.

4.2 APLICAÇÕES DA NANOSÍLICA

A nanosílica “[...] vem sendo utilizada em outros países, principalmente em concreto auto-adensáveis na construção de viadutos, plataformas de extração de petróleo e túneis. Em prédios residenciais e estruturas convencionais, sua utilização ainda é restrita.” (DINTEN, 2000, p. 71).

A nanosílica já foi estudada por alguns autores, e a seguir se encontram alguns resultados obtidos com a comparação da adição de nanosílica em concretos e argamassas que contenham ou não outras adições.

4.2.1 Argamassa com nanosílica

Li et al. (2004, tradução nossa) avaliaram argamassas com apenas cimento e areia, e incluíram 3 teores de nanosílica à mistura, 3, 5 e 10% sobre o peso do cimento. Nos resultados, eles obtiveram aumento da resistência à compressão de 13,8%, 17,0% e 26,0% , respectivamente com o aumento do teor de nanosílica, em relação à argamassa sem adição. Além disto, eles avaliaram a microestrutura da argamassa sem adição e a argamassa com 3% de nanosílica com o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura, e viram que a microestrutura da mistura com nanosílica era mais densa e compacta, e não havia a presença de grandes cristais de CaOH_2 .

O fato das nanopartículas melhorarem a estrutura e a resistência da pasta de cimento provavelmente acontece, pois, com as nanopartículas uniformemente dispersas, a nanopartícula irá atrair os produtos da hidratação do cimento “[...] devido à sua grande energia de superfície [...] formando conglomerações com a nanopartícula como ‘núcleo’. As nanopartículas localizadas no núcleo da pasta de cimento irão promover e acelerar a hidratação do cimento devido à sua alta atividade.” (LI et al., 2004, p. 187-188, tradução nossa).

4.2.2 Argamassa com sílica ativa e nanosílica

Jo et al (2007, p. 1353, tradução nossa) estudou a adição da nanosílica em argamassa e comparou com argamassas contendo sílica ativa. Ele realizou em seu trabalho estudos feitos em argamassas com relação água/cimento de 0,5, contendo teores de sílica ativa de 5%, 10% e 15% sobre o peso do cimento, e também contendo teores de nanosílica de 3%, 6%, 10% e 12% sobre o peso de cimento. Todas estas argamassas contendo as adições tiveram resistência à compressão maiores do que a argamassa que não continha adições. Também é possível verificar que as argamassas contendo nanosílica tiveram resistências superiores às argamassas contendo sílica ativa, sendo que a resistência da argamassa com 3% de nanosílica foi superior à que continha 15% de sílica ativa, mostrando que a nanosílica é mais eficiente quando comparada à sílica ativa. Isto é atribuído à nanosílica possuir uma reação pozolânica mais efetiva (devido à sua maior superfície específica) do que a sílica ativa.

A resistência foi maior conforme maior era o teor das adições, porém, apesar do aumento da resistência, neste estudo também é possível verificar que entre as argamassa contendo 10% e 12% de sílica ativa a resistência à compressão foi muito próxima, sendo de 68,2 MPa e 68,8 MPa, respectivamente, indicando que há uma quantidade a partir da qual o aumento do teor de adição não influencia na resistência. O autor também cita que utilizar uma quantidade tão grande de nanosílica poderia reduzir a resistência da argamassa ao invés de melhorá-la, porém isto não foi verificado no seu estudo (JO et al., 2007, p. 1353-1354, tradução nossa).

4.2.3 Concreto com cinza volante e nanosílica

Li (2004, p. 1045-1046, tradução nossa) utiliza a nanosílica em concreto com 50% de adição de cinza volante, e mesmo com pequenos teores de nanosílica (4%, substituindo o cimento), resulta num incremento da resistência à compressão aos 3 dias em 81%, e também aumenta a resistência final desse concreto. O concreto com a adição de cinza volante e nanosílica possui um comportamento parecido com o concreto produzido apenas com cimento Portland, sem adição, tanto no calor de hidratação (havendo apenas uma pequena diminuição do pico de temperatura); quanto na resistência à compressão, apenas com uma leve diminuição da resistência antes dos 56 dias, e possuindo valores de resistência à compressão maiores após esta idade.

O autor levantou um fato curioso sobre a adição da nanosílica com a cinza volante. Ao realizar o ensaio de atividade pozolânica, verificou que 100 g de cinza volante mais 4 g de nanosílica possuíam um incremento de peso maior do que a soma do incremento de peso da cinza volante e da nanosílica separadas (utilizando a mesma massa), indicando que a nanosílica pode ativar a cinza volante quando há a presença de óxido de cálcio. O que pode explicar o aumento do calor de hidratação quando é adicionada nanosílica ao concreto com cinza volante.

Enquanto a adição de cinza volante ao concreto fez com que aumentasse a quantidade e o tamanho dos poros no concreto aos 28 dias, a adição da nanosílica reduziu novamente esses poros, chegando próximo ao tamanho e quantidade obtidos com o concreto apenas de cimento Portland, porém aumentando a quantidade de poros menores ($<0,05 \mu\text{m}$). Quando analisado aos dois anos de idade, foi verificado que tanto o concreto só com cinza volante quanto com a nanosílica tiveram quantidade e tamanho de poros significativamente menores do que o concreto apenas com cimento, apenas tendo o concreto com cinza volante maior quantidade de poros menores do que $0,03 \mu\text{m}$ em relação ao concreto de cimento Portland. Os poros do concreto com cinza volante e nanosílica são menores e em menor quantidade que os do concreto só com cinza volante (LI, 2004, p. 1046-1047, tradução nossa).

Mondal et al. (2010, p. 9, tradução nossa) analisaram duas pastas contendo 6% e 18% em peso de sílica coloidal (produzida pelo processo sol-gel). Este autor tem como resultado que a nanosílica não muda os valores médios da dureza e módulo das fases do gel de C-S-H, mas que modifica as proporções relativas dessas fases, promovendo a formação de alta rigidez. Gaitero²¹ et al. (2008 apud MONDAL et al., 2010, p. 9, tradução nossa) verificaram que essa alta rigidez do C-S-H é mais resistente à lixiviação, mostrando que a nanosílica melhora a durabilidade da pasta.

²¹ GAITERO, J. J.; CAMPILLO, I.; GUERRERO, A. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 38, [n. 8-9], p. 1112-1118, [Aug.] 2008.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Buscando-se entender como a nanosílica age em concretos de pós reativos, onde já se tem um alto teor de sílica ativa na mistura, foi desenvolvido um programa experimental a partir das variáveis dependentes e independentes, e dos materiais e métodos que foram selecionados.

O programa experimental foi dividido nas seguintes etapas:

- a) caracterização dos materiais;
- b) caracterização da pasta – índice de fluidez;
- c) moldagem dos corpos de prova;
- d) cura;
- e) ruptura.

A seguir estão descritas as variáveis do trabalho e as etapas do programa experimental, separadas em materiais e métodos adotados para a pesquisa.

5.1 VARIÁVEIS

As variáveis independentes e dependentes estabelecidas para a realização do trabalho são apresentadas a seguir.

5.1.1 Variáveis dependentes

Foi definida a **resistência à compressão** e a **resistência à tração na flexão** como variáveis de resposta, pois são propriedades consideradas importantes, sendo a resistência à compressão a principal variável de controle adotada para concretos, e a responsável por avaliar a eficácia das variáveis independentes.

5.1.2 Variáveis independentes

Os fatores controláveis do presente trabalho são:

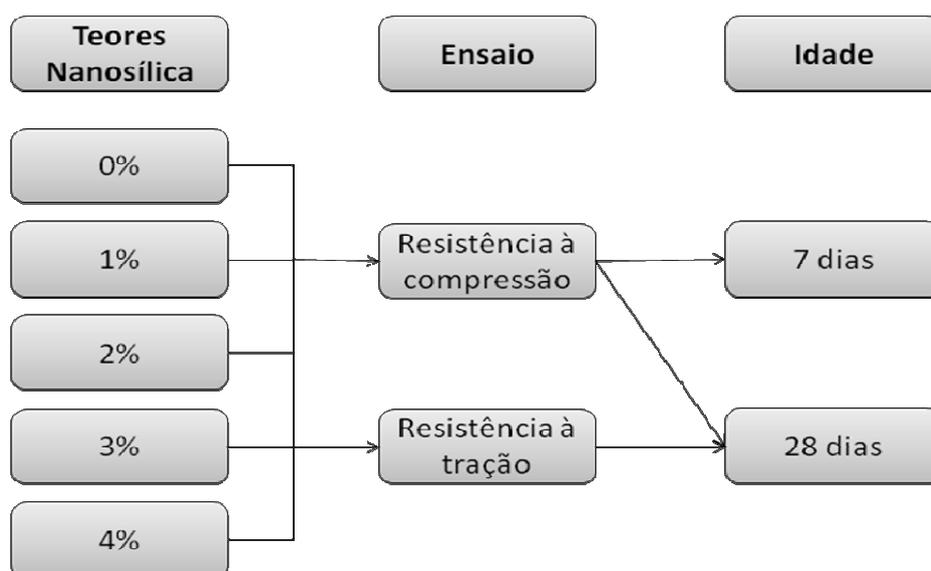
- a) teores de nanosílica: foram adotados teores de nanosílica mais aditivo dispersor de 0, 1, 2, 3 e 4,3% sobre a massa do cimento;
- b) idade de realização do ensaio de resistência à compressão (7 e 28 dias).

O teor de nanosílica foi limitado em 4,3% pois, através de estudos prévios, foi a quantidade de aditivo superplastificante que o proporcionamento de CPR pré-definido necessita para ter uma trabalhabilidade aceitável. Visto que a nanosílica empregada vem dispersa em aditivo superplastificante, limitou-se este teor para efeitos comparativos. Os outros teores foram definidos por serem valores intermediários. O valor indicado para concretos de alta resistência, pela indústria da nanosílica é de até 2% sob a massa de cimento.

As idades de realização do ensaio de resistência à compressão foram definidas para que se pudesse avaliar a influência da nanosílica na resistência inicial e final deste concreto.

Após a definição das variáveis, chegou-se à matriz experimental apresentada na figura 7.

Figura 7 – Representação esquemática da matriz experimental



(fonte: elaborado pela autora)

5.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados no presente trabalho são industrializados e estão caracterizados e descritos a seguir.

5.2.1 Cimento

No quadro 1 estão apresentadas as características do cimento, fornecidas pelo fabricante.

Quadro 1 – Características do cimento

Ensaio Químico			Exigências NBR 5733/91*
Ensaio	Resultado	Unidade	
Resíduo Insolúvel	0,53	%	$\leq 1,0$
Perda ao Fogo	2,66	%	$\leq 4,5$
Óxido de Magnésio - MgO	1,30	%	$\leq 6,5$
Trióxido de Enxofre - SO ₃	2,71	%	$\leq 4,5$
Anidrido Carbônico - CO ₂	1,83	%	$\leq 3,0$

Ensaio Físico			Exigências NBR 5733/91*
Ensaio	Resultado	Unidade	
Área Específica (Blaine)	4.565	cm ² /g	≥ 3000
Massa Específica	3,09	g/cm ³	não aplicável
Resíduo na peneira #200	0,06	%	$\leq 6,0$
Resíduo na peneira #325	0,89	%	não aplicável
Água de consistência normal	30,8	%	não aplicável
Início de pega	110	minutos	≥ 60
Fim de pega	163	minutos	≤ 600
Expansibilidade à quente	0,00	mm	$\leq 5,0$

Ensaio Mecânico				Exigências NBR 5733/91*
Ensaio	Resultado	Unidade	Desvio Padrão	
Resistência à Compressão - 1 dia	28,9	MPa	1,55	14
Resistência à Compressão - 3 dias	41,8	MPa	1,56	24
Resistência à Compressão - 7 dias	47,2	MPa	1,92	34
Resistência à Compressão - 28 dias	54,5	MPa	1,55	não aplicável

*(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991)

(fonte: adaptado de BRENNAND CIMENTOS, 2013, p. 1)

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CP-V-ARI, pois é o cimento que possui os menores teores de adição entre os cimentos do mercado, e o que proporciona as maiores resistências. Ele possui uma massa específica de $3,09 \text{ g/cm}^3$ e um diâmetro médio de $14,2 \mu\text{m}$.

5.2.2 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada no presente trabalho foi uma sílica com massa específica de $2,22 \text{ g/cm}^3$. O diâmetro médio das partículas é de $12,84 \mu\text{m}$, obtido através do ensaio de granulometria a laser realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), sendo que a sílica ativa foi dispersa em aditivo para realização do ensaio. Como o tamanho da sílica ativa é semelhante ao diâmetro do cimento, isso mostra que esta dispersão não foi eficiente para desaglomerar todas as partículas, o que pode indicar que na mistura do concreto também estas partículas não foram completamente desaglomeradas.

5.2.3 Pó de quartzo

O pó de quartzo utilizado é uma sílica moída, denominada SM 325, que já veio peneirada e ensacada. Possui massa específica de $2,63 \text{ g/cm}^3$ e um diâmetro médio de $10,81 \mu\text{m}$.

5.2.4 Nanosílica

A nanosílica utilizada já vem dispersa em um aditivo dispersor de base policarboxílica, na forma líquida. A mistura da nanosílica com o aditivo possui densidade relativa de $1,06 \text{ g/cm}^3$. O teor dessa nanosílica dispersa em aditivo recomendado pela indústria da nanosílica para concretos de alta resistência é de até 2%.

5.2.5 Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi um aditivo policarboxílico e suas características estão no quadro 2.

Quadro 2 – Características do aditivo superplastificante

Dados técnicos	
Função	Aditivo super plastificante de terceira geração
Base Química	Éter policarboxílico
Aspecto	Líquido
Cor	Branco Turvo

Teste	Especificação	Unidade
Aparência	Líquido branco turvo	Visual
pH	5 – 7	-
Densidade	1,067 - 1,107	g/cm ³
Sólidos	38,0 - 42,0	%
Viscosidade	<150	cps

(fonte: adaptado de BASF SA, c2009, [p. 3])

5.2.6 Água

A água utilizada na mistura dos concretos foi a disponibilizada pela rede pública de abastecimento de água, administrada pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto da cidade de Porto Alegre, RS.

5.3 MÉTODOS

A seguir são detalhados os métodos utilizados.

5.3.1 Caracterização da pasta

Para caracterizar a pasta utilizada e avaliar se o aditivo superplastificante e o aditivo dispersante da nanosílica eram compatíveis com os materiais aglomerantes, foi realizado o ensaio de funil de Marsh.

O ensaio de funil de Marsh consiste em determinar o índice de fluidez de uma pasta de cimento através do tempo que leva para certa quantidade de pasta passar pelo funil. Os procedimentos para realização do ensaio e das dimensões do funil estão descritos na NBR 7681-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 1-4).

Foram ensaiados todos os teores de nanosílica, misturando-se o cimento, a sílica ativa, a água, a nanosílica e o aditivo. Os teores de cimento, sílica ativa e água se mantiveram os mesmos, no mesmo proporcionamento utilizado para os concretos, variando-se os teores de aditivo e nanosílica conforme descrito na tabela 3.

Tabela 3 – Proporcionamento utilizado (em massa)

	T0	T1	T2	T3	T4
Cimento Portland - CP V	1	1	1	1	1
Sílica Ativa	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Pó de Quartzo	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
Superplastificante	0,043	0,033	0,023	0,013	-
Nanosílica + Aditivo Dispensor	-	0,010	0,020	0,030	0,043
Água (a/a = 0,23)	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29

(fonte: elaborado pela autora)

Sendo que T0 é a referência, e contém 0% de nanosílica e 4,3% de aditivo. T1 contém 1% de nanosílica e 3,3% de aditivo. T2 contém 2% de nanosílica e 2,3% de aditivo. T3 contém 3% de nanosílica e 1,3% de aditivo. T4 contém 4,3% de nanosílica e 0% de aditivo.

5.3.2 Produção dos concretos

O concreto de pós reativos foi produzido a partir da mistura de todos os materiais descritos no item 5.2.

O proporcionamento utilizado neste trabalho foi desenvolvido a partir de Richard e Cheyrezy (1995, p. 1502, tradução nossa) em um estudo piloto²² feito por alguns alunos do Núcleo Orientado para a Inovação na Edificação (NORIE) e do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) para competições estudantis realizadas no Congresso Brasileiro do Concreto em 2010 e 2011. O proporcionamento deste estudo piloto é uma evolução do anterior, pois se conseguiu atingir resistências próximas de 300 MPa, com o proporcionamento que está definido na tabela 3 anteriormente citada.

²² Estudo desenvolvido pela equipe da UFRGS, porém ainda não foi publicado.

5.3.2.1 Moldagem

Os materiais foram misturados nos proporcionamentos da tabela 3. O tempo de mistura para cada um dos traços foi de aproximadamente 20 minutos, devido à particularidade do concreto conter muitos finos e para se obter uma mistura homogênea.

Após a mistura, foram moldados os corpos de prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para o ensaio de resistência à compressão. Colocou-se o concreto nas fôrmas e vibrou-se simultaneamente em uma mesa vibratória de 60Hz. Foram moldados 4 CPs para cada idade, resultando em 8 CPs para cada teor de nanosílica, totalizando 40 CPs.

Os corpos de prova para o ensaio de resistência à tração na flexão, após a mistura, foram moldados de acordo com a NBR 13279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 2), resultando em 3 CPs de 4 cm de largura, 4 cm de altura e 16 cm de comprimento para cada teor, totalizando 15 CPs.

A temperatura no local da moldagem foi de $18 \pm 2^\circ\text{C}$ e a umidade relativa do ar foi de $60 \pm 5\%$.

5.3.2.2 Cura

Logo após a moldagem dos concretos, os corpos de prova eram cobertos com sacos plásticos para manterem a umidade e deixados assim por 24h, até que fossem desmoldados. Após a desmoldagem, os primeiros CP foram colocados em um banho térmico com a água ainda fria. Após, ligou-se o banho, e a temperatura foi mantida em 80°C . Os CP que foram moldados na sequência foram colocados em água fria e foi misturado água quente gradualmente, para evitar o choque térmico, e, somente após esse procedimento, os CP foram depositados no banho com água à temperatura de 80°C .

Os CP que foram rompidos aos 7 dias ficaram em cura térmica durante 5 dias, e os que foram rompidos aos 28 dias ficaram na cura térmica à 80°C durante 26 dias. Para retirá-los do banho térmico, colocou-se os CP em um balde com água à 80°C até o resfriamento gradual da mesma.

5.3.2.3 Ruptura

No dia anterior à ruptura, os CP foram tirados do banho e preparados para a ruptura. Para concretos com resistências muito altas, o capeamento com enxofre não é considerado adequado (CHIES, 2011, p. 76-77), sendo então retificados, em ambas as faces, por uma retífica vertical pneumática. Procurou-se retirar o mínimo possível do CP para obter um acabamento retilíneo e plano.

Para o ensaio de resistência à compressão foi utilizada uma prensa hidráulica computadorizada, com capacidade de 2000 kN. O ensaio foi realizado conforme preconiza a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 4), a uma velocidade de 0,45 MPa/s. Para o ensaio de resistência à tração na flexão foi utilizada também uma prensa hidráulica computadorizada, mas com capacidade de 200 kN, e o ensaio foi realizado conforme a NBR 13279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 3). Ambas as prensas se encontram no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE).

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir estão dispostos os resultados obtidos no estado fresco e no estado endurecido, com a ruptura dos corpos de prova.

6.1 FUNIL DE MARSH

Os resultados obtidos com o funil de Marsh estão dispostos na tabela 4, sendo que foram medidos o escoamento de cada um dos teores de nanosílica dispersa em aditivo aos 25 minutos após o início da mistura. O aditivo dispersor da nanosílica se mostrou compatível com o cimento, pois as pastas apresentaram consistência homogênea, sem separação dos materiais.

Tabela 4 - Tempos de escoamento pelo Funil de Marsh

	tempo (seg)
T0	43,70
T1	57,74
T2	71,30
T3	75,35
T4	93,85

(fonte: elaborado pela autora)

É possível verificar que, com a adição da nanosílica e do seu aditivo dispersor, o tempo, e, conseqüentemente, a viscosidade da pasta aumentaram com o aumento da sua adição, mostrando que o aditivo superplastificante foi mais eficiente. Apesar disso, em testes de moldagem, foi possível verificar que a consistência do CPR não variou muito, sendo possível moldar os corpos de prova igualmente, sem interferência da consistência.

Adotou-se, então, a substituição do aditivo superplastificante por igual massa da nanosílica dispersa em aditivo.

Não se adicionou mais aditivo para deixar a viscosidade igual para todos os proporcionamentos, pois havia o risco do concreto não endurecer caso a quantidade de

superplastificante fosse maior que os 4,3%, e como não se sabe a influência do aditivo dispersor da nanosílica na hidratação do concreto, optou-se pela simples substituição, limitando a soma desses dois materiais em 4,3%, que foi o teor utilizado no estudo piloto²³ citado no item 5.3.2.

6.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos aos 7 e 28 dias se encontram nas tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 – Resistência à compressão aos 7 dias (todos os valores)

CP	Carga (kN)	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação	Limite Superior (MPa)	Limite Inferior (MPa)
T0-7	a	346,8	171,76	24,18	14,08%	208,42	135,10
	b	336,0					
	c	275,5					
	d	390,7					
T1-7	a	324,7	147,11	32,82	22,31%	183,77	110,45
	b	359,6					
	c	251,1					
	d	220,0					
T2-7	a	291,3	174,19	19,15	10,99%	210,85	137,53
	b	349,2					
	c	381,0					
	d	346,0					
T3-7	a	320,1	189,40	29,11	15,37%	226,06	152,73
	b	380,9					
	c	448,9*					
	d	338,0					
T4-7	a	388,9	184,40	16,95	9,19%	221,06	147,73
	b	312,7					
	c	368,5					
	d	378,5					

* valores espúrios

(fonte: elaborado pela autora)

²³ Estudo desenvolvido pela equipe da UFRGS, porém ainda não foi publicado.

Tabela 6 – Resistência à compressão aos 28 dias (todos os valores)

CP	Carga (kN)	Resistência à compressão 28 dias (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação	Limite Superior (Mpa)	Limite Inferior (MPa)	
T0-28	a	476,3	241,27	241,42	5,25	2,17%	284,77	198,07
	b	461,5	234,15					
	c	485,1	246,17					
	d	478,3	244,08					
T1-28	a	396,3	202,72	182,70	36,40	19,92%	226,05	139,35
	b	436,8	223,67					
	c	287,9	147,90					
	d	305,5	156,53					
T2-28	a	355,8	180,52	207,64	25,41	12,24%	250,99	164,29
	b	454,8	231,03					
	c	376	191,50					
	d	446,7	227,50					
T3-28	a	470,8	239,78	218,86	23,08	10,55%	262,21	175,51
	b	376,7	191,85					
	c	463,9	236,26					
	d	407,5	207,54					
T4-28	a	372	189,46	198,03	54,36	27,45%	241,38	154,68
	b	465,6	237,13					
	c	473,3	241,05					
	d	244,4*	124,47*					

* valores espúrios

(fonte: elaborado pela autora)

Após a obtenção dos resultados, primeiro verificou-se o desvio padrão e o coeficiente de variação das amostras. Na sequência, analisou-se a necessidade de exclusão de algum valor.

O critério utilizado para análise de valores espúrios foi através do desvio padrão global de todas as amostras da idade estudada (sendo este a média dos demais desvios padrão), utilizando então o desvio padrão do processo em si. O desvio padrão global com todos os resultados para a idade de 7 dias é de 24,44 MPa e para a idade de 28 dias é de 28,90 MPa. As amostras que ficaram fora do intervalo de $[-1,5 \cdot \text{desvio padrão}; +1,5 \cdot \text{desvio padrão}]$ foram consideradas espúrias, sendo que se encontram 86,6% dos valores dentro deste intervalo da curva de distribuição Normal. Com este critério, foram excluídas as amostras T3-7c e T4-28d. Além disso, a amostra T4-28d possui uma resistência muito inferior aos corpos de prova rompidos aos 7 dias, tornando mais evidente que houve algum problema com esta amostra.

Nas tabelas 7 e 8 estão os novos resultados sem estes valores, para 7 e 28 dias, respectivamente.

Tabela 7 – Resistência à compressão aos 7 dias sem valores espúrios

CP	Carga (kN)	Resistência à compressão 7 dias (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação
T0-7	a	346,8	171,76	24,18	14,08%
	b	336,0			
	c	275,5			
	d	390,7			
T1-7	a	324,7	147,11	32,82	22,31%
	b	359,6			
	c	251,1			
	d	220,0			
T2-7	a	291,3	174,19	19,15	10,99%
	b	349,2			
	c	381,0			
	d	346,0			
T3-7	a	320,1	176,24	15,28	8,67%
	b	380,9			
	d	338,0			
T4-7	a	388,9	184,40	16,95	9,19%
	b	312,7			
	c	368,5			
	d	378,5			

(fonte: elaborado pela autora)

O desvio padrão global sem os valores espúrios para a idade de 7 dias é de 21,68 MPa e para os 28 dias é de 23,77 MPa.

Mesmo após a exclusão dos valores espúrios, é possível verificar que os coeficientes de variação continuam elevados. A NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 9) avalia a eficiência dos ensaios através deste coeficiente, indicando que um coeficiente de variação de até 6% é aceitável. Porém, como concretos de alta resistência e o CPR são mais sensíveis a erros, desta forma, acredita-se que, devido à maior resistência, seria aceitável um coeficiente de variação mais alto. Cabe ressaltar que o CPR possui resistências à compressão cerca de 5 vezes maiores do que concretos convencionais, e

o coeficiente de variação mais alto (14,08%) é apenas 2,3 vezes maior que o máximo recomendado para concretos convencionais. Para concretos de resistências mais altas não há a definição de um valor aceitável de coeficiente de variação.

Tabela 8 – Resistência à compressão aos 28 dias sem valores espúrios

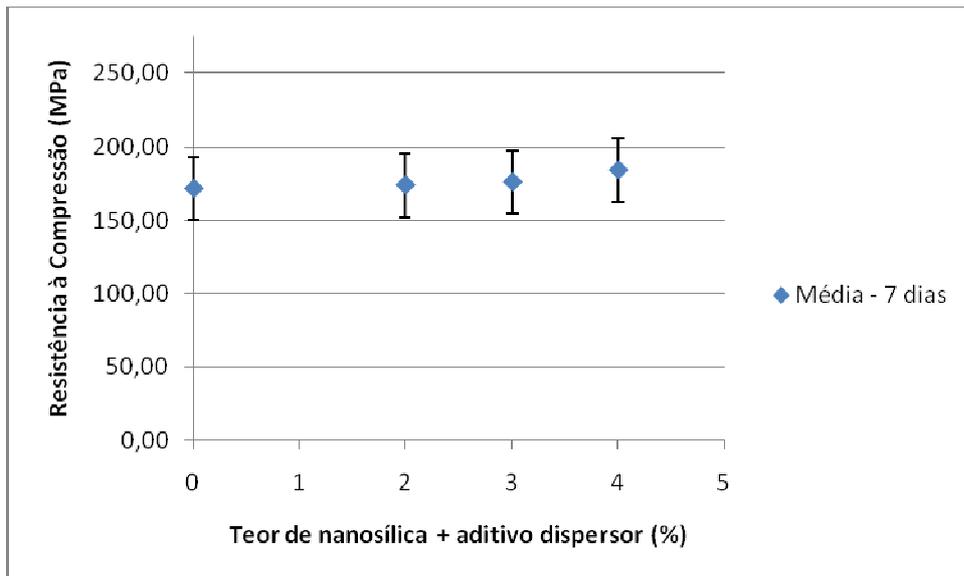
CP	Carga (kN)	Resistência à compressão 28 dias (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação	
T0-28	a	476,3	241,27	241,42	5,25	2,17%
	b	461,5	234,15			
	c	485,1	246,17			
	d	478,3	244,08			
T1-28	a	396,3	202,72	182,70	36,40	19,92%
	b	436,8	223,67			
	c	287,9	147,90			
	d	305,5	156,53			
T2-28	a	355,8	180,52	207,64	25,41	12,24%
	b	454,8	231,03			
	c	376	191,50			
	d	446,7	227,50			
T3-28	a	470,8	239,78	218,86	23,08	10,55%
	b	376,7	191,85			
	c	463,9	236,26			
	d	407,5	207,54			
T4-28	a	372	189,46	222,55	28,72	12,91%
	b	465,6	237,13			
	c	473,3	241,05			

(fonte: elaborado pela autora)

Após esta análise, o proporcionamento T1, apesar de não ter tido nenhum valor espúrio em uma primeira análise, também foi excluído da amostra, pois apresentou um coeficiente de variação muito elevado, tanto aos 7 quanto aos 28 dias, tirando a credibilidade da amostra, mesmo para uma resistência tão alta. Além disso, é possível ver um comportamento diferenciado para as amostras c e d deste traço, em relação às amostras a e b, indicando que houve algum problema na moldagem destes CP.

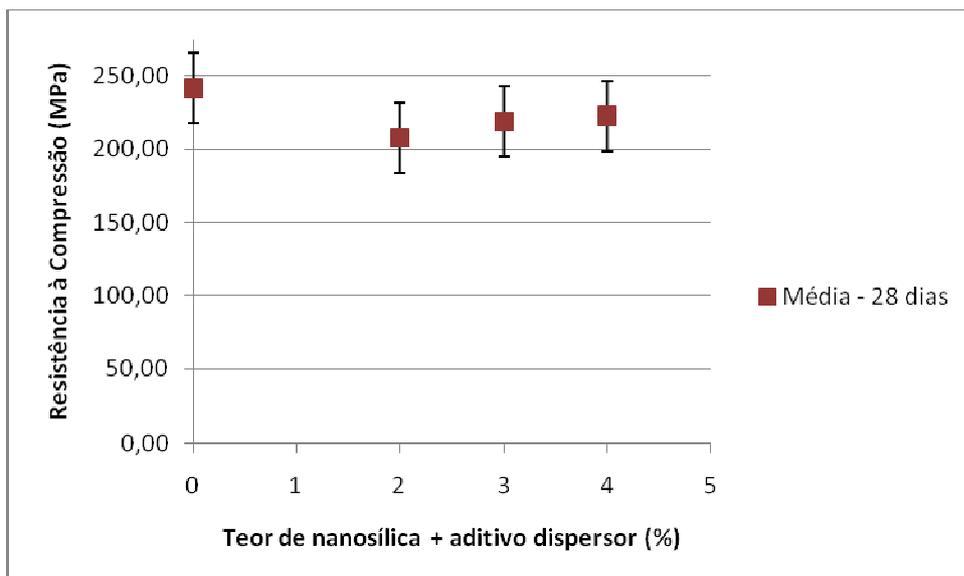
As resistências à compressão, sem os valores espúrios e sem a amostra T1, estão representadas nos gráficos a seguir, onde estão os resultados da média aos 7 dias (gráfico 1) e da média aos 28 dias (gráfico 2).

Gráfico 1 – Resistência à compressão média aos 7 dias



(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 2 – Resistência à compressão média aos 28 dias



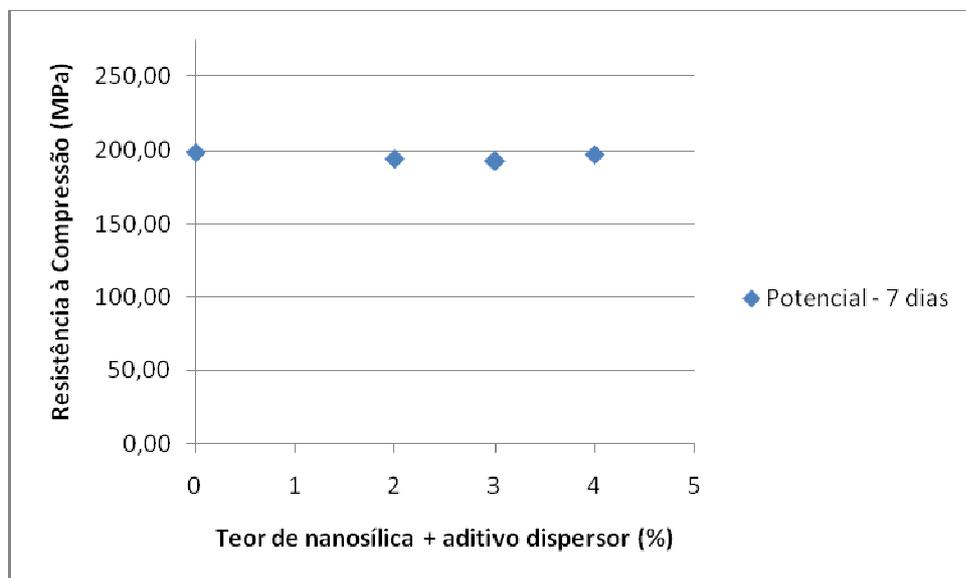
(fonte: elaborado pela autora)

Com base nos gráficos 1 e 2, é possível ver que o intervalo de 1 desvio padrão global já é suficiente para mostrar que há valores que estão dentro de um intervalo comum para todos os grupos, tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias. Isso mostra que não houve alteração na comparação de média entre os valores das diferentes amostras, ou seja, para este caso específico de CPR estudado, com esta relação de sílica ativa sobre o cimento, a adição da nanosílica não influenciou a resistência à compressão.

Além do valor médio das amostras, analisou-se também o seu valor potencial. No gráfico 3 estão os valores potenciais aos 7 dias e no gráfico 4 estão os valores potenciais aos 28 dias.

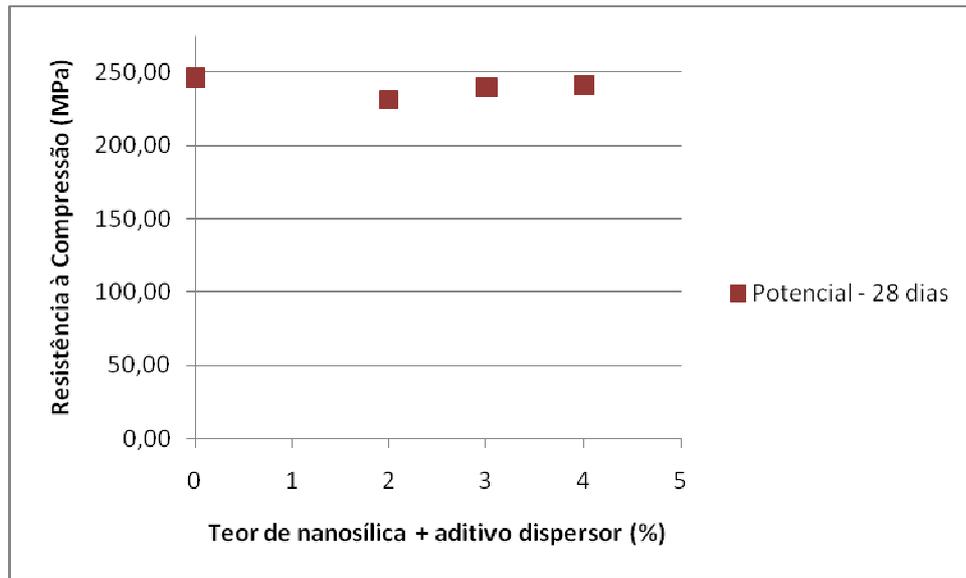
Para os valores potenciais também se observou que não há variação da resistência entre as amostras e, logo, ajuda a concluir o que foi observado para os valores médios, mostrando que a adição de nanosílica, para esta condição específica de estudo, não influenciou na resistência à compressão.

Gráfico 3 – Resistência à compressão potencial aos 7 dias



(fonte: elaborado pela autora)

Gráfico 4 – Resistência à compressão potencial aos 28 dias



(fonte: elaborado pela autora)

Além das análises já efetuadas, é possível comparar também quanto foi o ganho de resistência dos 7 aos 28 dias. Este ganho de resistência está representado na tabela 9 e no gráfico 5.

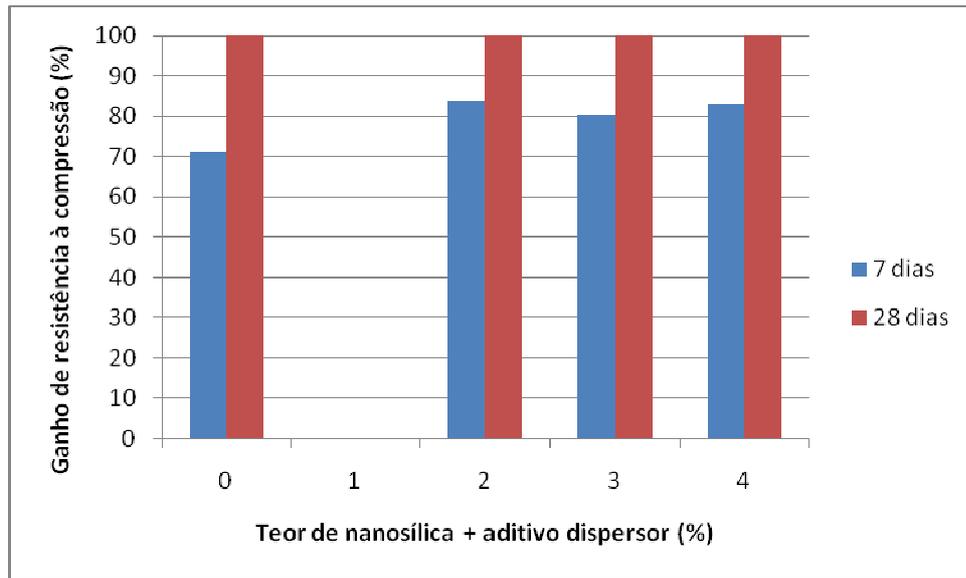
Tabela 9 – Ganho de resistência à compressão com o tempo

CP	7 dias		28 dias	
	Média (MPa)	resistência em relação aos 28 dias	Média (MPa)	resistência aos 28 dias
T0	171,76	71,15%	241,42	100%
T2	174,19	83,89%	207,64	100%
T3	176,24	80,53%	218,86	100%
T4	184,40	82,86%	222,55	100%

(fonte: elaborado pela autora)

A resistência à compressão aos 7 dias chegou a cerca de 80% da resistência final do concreto, aos 28 dias, o que é esperado para um cimento CP V.

Gráfico 5 – Ganho de resistência à compressão com o tempo



(fonte: elaborado pela autora)

6.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados da resistência à tração na flexão, realizados aos 28 dias, estão apresentados na tabela 10.

O desvio padrão global da amostra é de 3,20 MPa, e foi considerado o intervalo de $[-1,5 \cdot \text{desvio padrão}; +1,5 \cdot \text{desvio padrão}]$, dentro do qual se encontram 86,6% dos valores da população em uma distribuição Normal. Os valores fora deste intervalo foram considerados espúrios.

A amostra T2 possui 2 valores espúrios, porém a amostra precisa ter pelo menos 2 valores para que se possa calcular o desvio padrão, para o intervalo de erro e significância, portanto, o valor da amostra T2-2 foi mantido, por ser o valor mais alto, e pode ter havido algum problema com o CP que apresentou o desempenho mais baixo.

Na tabela 11 estão os resultados sem os valores espúrios.

Tabela 10 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias (todos os valores)

CP	Carga (N)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação	Limite Superior (Mpa)	Limite Inferior (MPa)
T0	1	6930*	16,24*	19,45	2,78	14,31%	22,65
	2	8900	20,86				
	3	9064	21,24				
T1	1	12513	29,33	27,15	3,03	11,15%	30,35
	2	10109*	23,69*				
	3	12132	28,43				
T2	1	10345*	24,25*	27,75	3,51	12,65%	30,95
	2	13340*	31,27*				
	3	11830	27,73				
T3	1	13472	31,58	28,78	4,56	15,84%	31,98
	2	13334	31,25				
	3	10036*	23,52*				
T4	1	12020	28,17	30,49	2,13	6,98%	33,69
	2	13807	32,36				
	3	13196	30,93				

*valores espúrios

(fonte: elaborado pela autora)

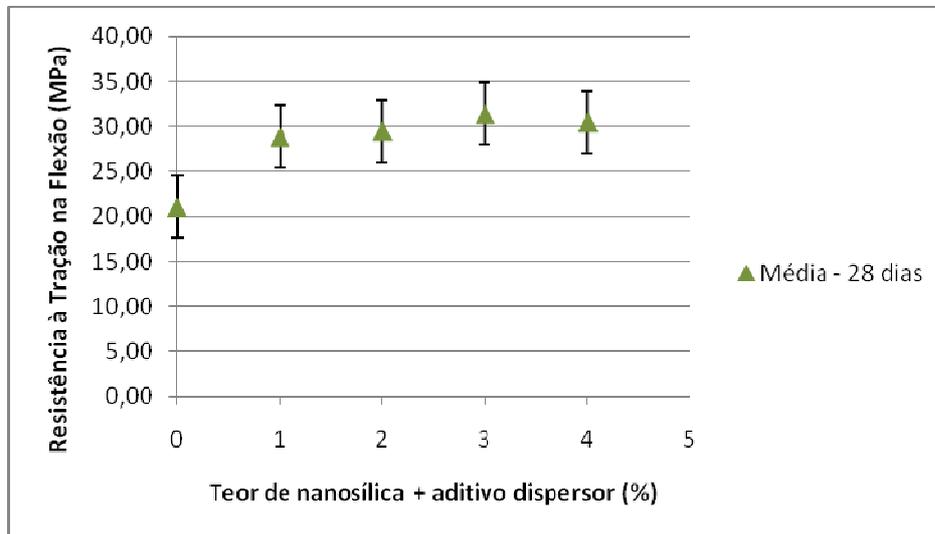
Tabela 11 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias sem valores espúrios

CP	Carga (N)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação
T0	2	8900	20,86	21,05	0,27
	3	9064	21,24		
T1	1	12513	29,33	28,88	0,63
	3	12132	28,43		
T2	2	13340	31,27	29,50	2,50
	3	11830	27,73		
T3	1	13472	31,58	31,41	0,23
	2	13334	31,25		
T4	1	12020	28,17	30,49	2,13
	2	13807	32,36		
	3	13196	30,93		

(fonte: elaborado pela autora)

As resistências à tração na flexão, sem os valores espúrios, estão representadas no gráfico 6.

Gráfico 6 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias



(fonte: elaborado pela autora)

Utilizando-se um intervalo de 3 desvios padrão acima e 3 desvios padrão abaixo da média, onde 99,7% dos valores da população se encontram dentro deste intervalo em uma distribuição Normal, é possível verificar que entre as amostras contendo nanosílica não houve alteração da média. Já entre o traço de referência (sem adição de nanosílica) e os demais traços, os intervalos da curva de distribuição Normal não se sobrepõem, indicando que houve influência da nanosílica para esta resistência. Logo, é possível dizer que a nanosílica aumentou a resistência à tração na flexão do CPR, porém a resistência não variou com o aumento do teor de nanosílica, para as condições estudadas deste concreto.

7 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o comportamento da adição da nanosílica nas resistências à compressão e à tração na flexão de concretos de pós reativos com classe de resistência de 200 MPa (CPR 200). Para tal análise, foram feitos ensaios de resistência à compressão e à tração deste concreto, com 5 teores diferentes de adição de nanosílica dispersa em aditivo (0%, 1%, 2%, 3% e 4,3%), sendo possível concluir que, para a resistência à compressão do CPR, a adição da nanosílica não influenciou no resultado, visto que não apresentou valores diferenciados de resistência à compressão quando os mesmos foram comparados ao concreto referência (0% de nanosílica). A maior resistência à compressão atingida neste trabalho foi de 246,17 MPa.

Para a resistência à tração na flexão, foi possível verificar que a adição da nanosílica apresentou um aumento de 40% quando comparado ao CPR sem esta adição, passando de uma resistência de 21,05 MPa para uma média da resistência dos demais teores de 30,07 MPa. Houve aumento da resistência com a adição da nanosílica, porém a resistência não variou com o aumento do teor de nanosílica.

A hipótese do trabalho não foi confirmada, visto que a adição da nanosílica não proporcionou melhorias nas propriedades mecânicas estudadas. Além disso, pensou-se que a nanosílica teria uma influência maior para a resistência à compressão, porém foi demonstrado que a adição da nanosílica apenas influenciou na resistência à tração na flexão, aumentando o seu desempenho para esta resistência. Também não se verificou que quanto maior o teor de nanosílica maior esta resistência, pois os resultados dos diversos teores de nanosílica não tiveram influência entre si.

Quanto ao objetivo secundário, verificação da evolução da resistência à compressão com a idade para os concretos estudados, verificou-se que o CPR adquiriu praticamente 80% da sua resistência à compressão aos 7 dias, sendo esta a característica do cimento CP V, que é a alta resistência inicial.

Salienta-se que as conclusões aqui dispostas referem-se às condições específicas deste programa experimental, sendo válidas apenas para concretos com as características estudadas. Não devem, portanto, ser consideradas de forma absoluta, sendo necessária a realização de

novas pesquisas para confirmar sua representatividade, bem como complementar o conhecimento do desempenho da nanosílica em concretos ou argamassas que estejam no limite do efeito pozolânico das suas adições (sílica ativa), ou seja, onde todo o Ca(OH)_2 já seria teoricamente consumido pelas adições que ele contém.

Para trabalhos futuros, sugere-se que a nanosílica seja testada em CPR contendo diferentes tipos e proporções de adições, visto que talvez com teores menores de sílica ativa se obtenha um resultado satisfatório para a adição de nanosílica, compensando a diminuição da sílica ativa. Outros proporcionamentos, com diferentes granulometrias do pó de quartzo, também poderiam ser testados para verificar se a nanosílica influenciaria ou não nas suas propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

ÄITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 5739**: concreto – ensaios 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, 2009.

_____. **NBR 7681-2**: calda de cimento para injeção parte 2 – determinação do índice de fluidez e da vida útil – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

BASF SA. **Ficha técnica de produto**. c2009. Disponível em: <<http://www.basf-cc.com.br/PT/produtos/aditivos/GLENIUM54/Documents/GLENIUM%C2%AE%2054.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2013.

BIZ, C. E. **Concreto de pós reativos**. 2001. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000259078&fd=y>>²⁴. Acesso em: 29 mar. 2012.

BLAIS, P. Y.; COUTURE, M. Precast, prestressed pedestrian bridge: world's first reactive powder concrete structure. **Precast/Prestressed Concrete Institute Journal**, Chicago, [v. 44], [n. 5], p. 60-71, Sept./Oct. 1999. Disponível em: <http://samironweb.persianguig.com/document/pedestrian_bridge.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2012.

BRENNAND CIMENTOS. **Certificado de ensaios em cimento**: CP V-ARI MAX. Sete Lagoas, MG, [s. n.], mar. 2013. Boletim técnico.

CHIES, J. A. **Corpos-de-prova submetidos à compressão**: influência do tipo de preparação das faces para diferentes níveis de resistência do concreto. 2011. 87 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/39140>>²⁵. Acesso em: 17 maio 2013.

²⁴ Para realizar o download é necessário um cadastro gratuito no site.

²⁵ Para realizar o download, vá até a parte de baixo do site e clique em “Visualizar/abrir”

COLLEPARDI, S.; COPPOLA, L.; TROLI, R.; COLLEPARDI, M. Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, 5th, 1997, Rome. **Proceedings...** Farmington Hills: American Concrete Institute, 1997. Não paginado. Disponível em: <<http://www.encosrl.it/enco%20sr1%20ITA/servizi/pdf/high/12.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2012.

DAL MOLIN, D. C. C.; OLIVEIRA, A. P. M.; KULAKOWSKI, M. P. Estudo de concretos com adição de sílica ativa (microsílica) frente ao ataque de agentes agressivos para emprego em pisos especiais. [In: International congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures, 2nd], [1996], [Florianópolis]. **Proceedings...** [S. l.], [s. n.], [1996]. Não paginado. Disponível em: <http://allquimica.com.br/arquivos/websites/artigos/Estudo_de_Concretos_com_Adicao_de_S%C3%ADlica_Ativa_2006122610819.pdf>. Acesso em: 24 jun 2013.

DINTEN, C. A. M. **Contribuição da adição de sílicas nas propriedades do concreto**. 2000. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2000. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000257369&opt=4>>²⁶. Acesso em: 29 mar. 2012.

DUNSTER, A. **Silica fume in concrete**. Bracknell: IHS BRE Press, Aug. 2009. Information Paper n. IP 5/09. Disponível em: <<http://www.concrete.elkem.com/dav/2c7d946881.pdf>>. Acesso em: 8 jun. 2012.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. 2005. 259 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

GLEIZE, P. J. P. Nanotecnologia e materiais de construção. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 1.ed. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 1659-1685. v. 2.

_____. Nanociência e Nanotecnologia dos Materiais Cimentícios. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 1871-1881. v. 2.

JO, B.-W.; KIM, C.-H.; TAE, G.-H.; PARK, J.-B. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. **Construction and Building Materials**. [S. l.], v. 21, [n. 6], p. 1351-1355, [June] 2007.

LI, G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 34, [n. 6], p. 1043-1049, June 2004.

LI, H.; XIAO, H.; YUAN, J.; OU, J. Microstructure of cement mortar with nano-particles. **Composites Part B: engineering**, [S. l.], v. 35, [n. 2], p. 185-189, [Mar.] 2004.

²⁶ Para realizar o download é necessário um cadastro gratuito no site.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008.

MONDAL, P.; SHAH, S. P.; MARKS, L. D.; GAITERO, J. J. Comparative study of the effects of microsilica and nanosilica in concrete. **Journal of the Transportation Research Board**, Washington D.C., n. 2141, p. 6-9, 2010. Disponível em: <http://www.numis.northwestern.edu/Research/Articles/2010/Mondal_nanosilica.pdf>. Acesso em: 22 maio 2012.

PERRY, V; ZAKARIASEN, D. The First Use of UHPC technology for an innovative LRT station canopy Shawnessy, Calgary, Alberta. [**International Concrete Research & Information Portal**], [S. l.], [v. 228], [], não paginado, [June 2005]. Disponível em: http://www.ductal-lafarge.com/41-ACI_Paper_-_Final._Jan_2005-2.pdf. Acesso em: 25 jun. 2013.

QUERCIA, G.; BROUWERS, H. J. H. Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures. In: FIB INTERNATIONAL PHD SYMPOSIUM IN CIVIL ENGINEERING, 8th, 2010, Kongens Lyngby. **Proceedings...** Lausanne: The International Federation for Structural Concrete, 2010. Não paginado. Disponível em: <<http://josbrouwers.bwk.tue.nl/publications/Conference61x.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2012.

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

SILVA, A. S. M. da. **Dosagem de concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aïtcin-Faury modificado**. 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SOBOLEV, K.; FLORES, I.; HERMOSILLO, R.; TORRES-MARTÍNEZ, L. M. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites. In: ACI SESSION ON NANOTECHNOLOGY OF CONCRETE: RECENT DEVELOPMENTS AND FUTURE PERSPECTIVES, 2006, Denver, CO. **Proceedings...** Farmington Hills: American Concrete Institute, [c2008]. p. 91-118. Disponível em: <<https://pantherfile.uwm.edu/sobolev/www/ACI/7-Sobolev-ACI-F.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2012.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 1283-1325. v. 2.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-23082006-095043>>. Acesso em: 3 abr. 2012.

YU, J. W.; ZHE, A. M.; PING, Y. G.; MIN, W. J. Study on reactive powder concrete used in the sidewalk system of the Qinghai-Tibet railway bridge. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND CONCRETE TECHNOLOGY, 2004, Beijing. **Proceedings...** Ames: Iowa State University, 2004. p. 333-338. Disponível em: <<http://www.ctre.iastate.edu/pubs/sustainable/jireactive.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2012.