



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE TECNOLOGIA EM CONCRETO**

**MALCON JOSÉ CIESLAK
TIAGO AUGUSTO GRZYBOWSKI**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA ENTRE CONCRETOS DE PÓS
REATIVOS DOSADOS PELOS MODELOS DE ALFRED E ANDREASEN**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA - PR
2012**

**MALCON JOSÉ CIESLAK
TIAGO AUGUSTO GRZYBOWSKI**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA ENTRE CONCRETOS DE PÓS
REATIVOS DOSADOS PELOS MODELOS DE ALFRED E ANDREASEN**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Concreto do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Curitiba-Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

**CURITIBA - PR
SETEMBRO - 2012**

Cieslak, Malcon José Cieslak
Grzybowski, Tiago Augusto Grzybowski

ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA ENTRE CONCRETOS DE PÓS
REATIVOS DOSADOS PELOS MODELOS DE ALFRED E ANDREASEN.

Curitiba, UTFPR, 2012, 37p.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Curso de Graduação: Tecnologia em Concreto. Curitiba, 2012.

1- Conceito

2- Análise experimental

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA ENTRE CONCRETOS DE PÓS REATIVOS DOSADOS PELOS MODELOS DE ALFRED E ANDREASEN

Por
Malcon José Cieslak
e
Tiago Augusto Grzybowski

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Concreto, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 14 de Setembro de 2012, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Prof. Helena Akemi Umezawa, MTec.
UTFPR

Prof. Roberto Levi Sprenger, M.Sc
UTFPR

DEDICATÓRIA

A Deus, e a todos
que estiveram
presentes no decorrer
deste trabalho

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus, por estar sempre presente em nossas vidas, nos orientando e dando força e fé para lutarmos em cada etapa de nossas vidas.

A nossa família, em especial nossas mães Alzira e Débora, que sempre estiveram ao nosso lado, dando suporte nos bons e maus momentos desta caminhada.

Ao orientador Prof. Dr. Wellington Mazer, pelo apoio, compreensão e paciência durante nossa formação acadêmica.

Às namoradas, pelo companheirismo e compreensão.

À UTFPR, por proporcionar subsídios necessários para nossa formação profissional.

Ao DACOC – Departamento Acadêmico de Construção Civil, por possuir grandes mestres que compartilharam seus conhecimentos conosco.

E a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização do presente trabalho.

EPÍGRAFE

"Se a liberdade significa alguma coisa, será sobretudo o direito de dizer às outras pessoas o que elas não querem ouvir."
(George Orwell)

RESUMO

O concreto é um dos materiais mais usados na construção civil em todo o mundo. Com o passar dos anos, estudos e pesquisas buscam melhorar as suas propriedades físicas e mecânicas. O concreto de pós reativos (CPR) é o último material ultra-resistente utilizando em cimento Portland, podendo atingir resistência à compressão de até 800 MPa. Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver CPR e utilizar alguns modelos de dosagem baseados no método de empacotamento de partículas e comparar estes com a finalidade de medir sua resistência à compressão. Para isso, foram utilizados os modelos de Alfred e de Andreasen, com três traços para cada modelo e com rompimento de corpos de prova em 1,3 e 28 dias. Os ensaios realizados resultaram em resistências à compressão semelhantes entre os dois modelos de dosagem.

Palavras-Chave: Concreto de pós reativos; concreto; sílica ativa.

ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used materials in the construction industry worldwide. Over the years, studies and research are conducted in order to improve their physical and mechanical properties. The concrete reactive powders (CRP) is the last ultra-resistant material based on Portland cement developed, reaching compressive strength up to 800 MPa. This research aimed to develop concrete reactive powders (CRP) and use some dosage models based on the method of particle packing and compare these with the purpose of measuring its resistance to compression. For this, we used the models of Alfred and Andreasen, with three lines for each model and disruption of the samples in 1,3 and 28 days. The tests resulted in compressive strengths similar between models of dosage.

Keywords: concrete reactive powders; concrete; silica fume.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento (OLIVEIRA ET AL, 2000).	20
Figura 2.2 - Distribuições granulométricas contínuas, segundo o modelo de Andreasen para diferentes valores de q (OLIVEIRA et al, 2000).	21
Figura 2.3 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Alfred (OLIVEIRA et al, 2000).	22
Figura 2.4 - Passarela de Sherbrooke, no Canadá.	23
Figura 2.5 - Ponte Sakata Mirai Bridge, no Japão.	23
Figura 3.1 - Processo de mistura do material seco.	27
Figura 3.2 - Mistura do material na argamassadeira.	27
Figura 3.3 - Final do processo de mistura	27
Figura 3.4 - Corpos de prova moldados	28
Figura 3.5 - Cura térmica dos corpos de prova.	29
Figura 3.6 - Cura úmida dos corpos de prova.	29
Figura 3.7 - Ensaio de compressão axial.	30
Figura 4.1 - Crescimento da resistência à compressão com o tempo.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dosagem do concreto de Pós Reativos.....	26
Tabela 3.2 – Programa experimental dos ensaios de compressão axial	30
Tabela 4.1 – Resistência à compressão em CPR.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a/c	Fator água / cimento
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CAD	Concreto de alto-desempenho
CP	Corpo de prova
CPR	Concreto de pós reativos
CUAD	Concreto de ultra-alto-desempenho
Kgf	Kilograma-força
MPa	Megapascal

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	12
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Generalidades	14
1.2. Justificativa do tema	14
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo geral.....	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Princípios do CPR	16
2.2. Materiais componentes do CPR	17
2.3. Propriedades do CPR.....	18
2.4. Dosagem do concreto de pós reativos	19
2.4.1. Modelo de Andreasen	20
2.4.2. Modelo de Alfred.....	21
2.5. Aplicações do CPR.....	22
3. METODOLOGIA.....	25
3.1 Materiais utilizados na pesquisa	25
3.2 Determinação dos traços.....	25
3.3 Procedimento de mistura	26
3.4 Moldagem dos Corpos de prova.....	28
3.5 Cura dos Corpos de prova	28
3.6 Ensaios de compressão axial	29
4. ANÁLISES DOS ENSAIOS LABORATORIAIS.....	31
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
5.1. Conclusões.....	34
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

O concreto é um material que apresenta vantagens na sua utilização, como por exemplo, versatilidade e menor custo, se comparado a outros materiais de construção sendo por isso largamente utilizado em todo mundo (METHA E MONTEIRO, 1994).

A busca constante pela obtenção de concretos mais resistentes resultou no desenvolvimento do Concreto de Alto-Desempenho (CAD), e posteriormente do Concreto de Ultra-Alto-Desempenho (CUAD). Para termos uma idéia do que representa esta revolução tecnológica, basta dizer que o concreto convencional atinge até 60 MPa (600 kgf/cm²); o CAD atinge resistências entre 60 e 120 MPa (600 a 1.200 kgf/cm²), e o CPR está numa faixa de resistência à compressão entre 200 MPa e 800 MPa (entre 2.000 kgf/cm² e 8.000 kgf/cm²).

O concreto de pós reativos desenvolvido por Richard *et al*, 1995, é o último material ultra-resistente baseado em cimento Portland desenvolvido. Pode atingir resistência à compressão de até 800 MPa com aplicação de cura térmica e cura com pressão. É composto, basicamente, por areia de quartzo, cimento, pó de quartzo, sílica ativa, fibras de aço de pequenas dimensões e superplastificantes de alta eficiência e uma relação água/aglomerante muito reduzida, entre 0,15 e 0,20. Essa mistura visa obter uma massa mais homogênea, aumento da compacidade otimizada pela granulometria dos materiais finos, melhoria nas propriedades mecânicas da interface pasta-agregado e avanço na propriedade de ductilidade em função da adição das fibras de aço (DUGAT *et al*, 1996). Toda essa preocupação está baseada em uma questão relacionada a microestrutura do concreto: melhoria na zona de transição (diminuição da espessura e menor porosidade na interface).

1.2. Justificativa do tema

Devido ao concreto ser o material mais utilizado na construção civil é de grande importância a realização de pesquisas que visem obter concretos mais duráveis e mais resistentes. As características do concreto de pós reativos permite colocar este material comparativamente ao aço, dando aos projetistas uma nova opção de material para ser utilizado nas futuras obras (BINA, 1999).

Por se tratar de um material relativamente novo e ainda pouco estudado no Brasil faz-se necessário o domínio da técnica de produção e aplicação desse material, explorando todo seu potencial de maneira clara e segura.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Comparar dois métodos de empacotamento de partículas para concretos de pós-reativos, visando obter a melhor resistência à compressão possível com os parâmetros utilizados.

1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência do coeficiente q (coeficiente de distribuição) no empacotamento das partículas;
- Avaliar os modelos de Alfred e de Andreasen para empacotamento de partículas, observando qual apresenta a melhor resistência à compressão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Princípios do CPR

As pesquisas sobre o CPR iniciaram-se na França e no Canadá - centros de referência do Concreto de Pós Reativos - por Richard e Cheyrezy, 1995. Foi desenvolvido, inicialmente, para suprimir algumas exigências específicas de estruturas de concreto pré-fabricado submetidos a ambientes agressivos. Posteriormente, em virtude de seu desempenho, o CPR foi estudado e projetado para atender exigências militares também.

O Concreto de Pós Reativos, segundo seus idealizadores, é baseado no princípio da formação de produto com mínimo defeito, como microfissuras e poros capilares, obtidos pelo aumento da compacidade e resistência dos materiais constituintes da matriz do concreto. Os programas de pesquisa foram conduzidos seguindo alguns princípios (CHEYREZY, 1999):

- aumento da homogeneidade pela eliminação do agregado graúdo;
- aumento da compacidade pela otimização granulométrica da mistura e aplicação de pressão antes e depois da pega;
- progresso da microestrutura pelo tratamento térmico após o endurecimento;
- melhoramento da ductilidade pela incorporação de fibras de aço e,
- manter os procedimentos de mistura e moldagem tão próximos quanto possível dos padrões existentes.

O tratamento térmico tem grande influência na resistência à compressão, provocando uma microestrutura mais densa, melhorando, assim, a resistência à compressão. Richard e Cheyrezy (1995) observaram a formação de hidratos cristalinos nos concretos de pós reativos quando submetidos a tratamento térmico e perceberam que essa técnica constitui uma maneira de melhorar as propriedades mecânicas desse material. O tratamento é realizado após o fim da pega do cimento sob pressão atmosférica e em ambiente úmido (vapor d'água) ou seco (ar quente).

A adição de fibras metálicas não apresenta grandes influências na resistência à compressão, porém melhora a ductilidade do material. De acordo com Richard e Cheyrezy (1995), a dosagem de fibras é definida de modo experimental e geralmente são introduzidas na mistura em taxas entre 1,5% e 3% do volume de concreto. A taxa ótima econômica é de 2% ou aproximadamente 155kg/m³.

2.2. Materiais componentes do CPR

Composto basicamente de pós (areia de quartzo, cimento comum, pó de quartzo e sílica ativa), fibras de aço de pequenas dimensões, superplastificante e água, sendo os sólidos com tamanhos inferiores a 2 mm, os CPR são fabricados em condições semelhantes aos concretos convencionais, porém com baixíssima relação água/cimento - cerca de 0,15. Essa mistura visa obter uma massa mais homogênea, juntamente com aumento da compactidade otimizada pela granulometria dos materiais finos, melhoria nas propriedades mecânicas entre pasta e agregado e na propriedade de ductilidade do concreto em função da adição das fibras de aço ou de fibra de prolipropileno. Toda essa preocupação está baseada em uma questão: microestrutura do concreto no que diz respeito à diminuição da espessura da zona de transição e menor porosidade na interface agregado-pasta, beneficiada justamente pela aplicação do tratamento térmico e por pressão (PAULON, 1991).

Cimento com alto módulo de sílica seria o mais indicado para a produção dos Concretos de Pós Reativos ainda, segundo Richard (1995), em virtude das características reológicas e desempenho mecânico. Entretanto, esse tipo de cimento apresenta taxa lenta de pega, comprometendo seu uso em algumas aplicações. Cimento convencional de pega rápida e alto desempenho oferece comportamento mecânico muito similar, apesar de uma demanda maior de água. Bonneau et al., (1996) e Dugat et al., (1996) indicam que o melhor material para a produção dos concretos de pós reativos é o cimento Portland comum sem adição, ASTM Tipo I (Portland cement). Demais autores utilizaram cimento tipo V da ASTM (*Portland with high sulphate resistance*) nas suas pesquisas com CPR.

O propósito do uso de aditivo superplastificante na produção de concretos de pós reativos e justificado pela combinação de três fatores (CHEYREZY, 1999):

- aumento da trabalhabilidade sem mudança na composição da mistura;
- diminuição da quantidade de água empregado na mistura de modo a reduzir a relação água/aglomerante e posteriormente aumento de resistência e durabilidade;
- reduzir ambos, cimento e água, a fim de minimizar efeitos de retração por secagem, retração hidráulica e tensões térmicas provenientes da hidratação do cimento.

Segundo Collep Ardi et al., (1998), os superplastificantes causam a dispersão das partículas aglomerantes do cimento na pasta do concreto. Essa dispersão causa um aumento da fluidificação na mistura de cimento.

O uso de adições minerais tem sido bastante difundido com o concreto de alto desempenho. No Brasil, a adição mais utilizada na produção de concretos é a sílica ativa.

Este material é um subproduto da indústria na produção de silício em fornos elétricos (VIEIRA et al., 1997). Consiste de partículas extremamente pequenas de sílica amorfa, com diâmetro médio de 0,10µm e superfície específica elevada, da ordem de 20m²/g. Um grão de sílica chega a ser 100 vezes menor que o do cimento, exercendo influência nas propriedades do concreto fresco e endurecido (MEHTA & MONTEIRO, 1994 e NEVILLE, 1997). Em virtude da necessidade maior de água para manter a trabalhabilidade de concretos e argamassas, o emprego da sílica ativa está sempre condicionado ao uso de aditivos plastificantes e ou superplastificantes.

A adição da sílica ativa ao concreto tem três principais funções segundo Richard et al., (1996) e Larrard, (1989):

- completar os vazios deixados pelas partículas de cimento, efeito filler;
- melhorar as características reológicas do concreto através do efeito de lubrificação resultado da forma esférica das partículas da sílica;
- produção de hidratos secundários através da atividade pozolânica com Ca(OH)₂, intensificada no caso dos Concretos de pós reativos, pela aplicação de cura térmica.

2.3. Propriedades do CPR

Os estudos feitos com CPR indicam que o concreto de pós reativos apresenta altas resistências à compressão e à tração na flexão, onde a microestrutura do material apresenta-se com baixíssima porosidade e interface pasta-agregado praticamente suprimida. A tecnologia desenvolvida em pesquisas diversas sobre CPR pode ser considerada um grande avanço na tecnologia de materiais a base de cimento Portland. Com maiores aperfeiçoamentos e estudos, espera-se a aplicação desse material em situações que tirem proveito da sua alta performance, principalmente em relação as propriedades mecânicas e a durabilidade.

A microestrutura e a chave do desempenho do CPR, conferindo-lhe diminuta porosidade e permeabilidade (CHEYREZY et al, 1995). Comparado ao concreto clássico, observa-se uma completa mudança estrutural dos hidratos, que se traduz por uma estrutura contínua da fase aglomerante na escala microscópica.

No nível macroscópico, a matriz do CPR constitui um meio quase impermeável à água, tanto quanto à penetração de agentes agressivos, tais como os íons cloretos. Outra consequência direta é a ausência de poros capilares, garantindo a elevada resistência ao

gelo/degelo e a quase inexistência de retração, tanto pela baixa relação água/cimento quanto pela porosidade diminuta, não havendo espaços para a ocorrência das variações volumétricas.

2.4. Dosagem do concreto de pós reativos

A dosagem do concreto de pós reativos visa criar um material com o mínimo de defeitos, utilizando partículas sólidas de pequenos diâmetros, variando entre 2mm e 0,5 μ m, proporcionando mistura de alta densidade e o mínimo de vazios. Essa dosagem é feita pelo método de empacotamento de partículas.

Campitelli et al (2007) citam que os modelos de empacotamento têm origem no modelo matemático proposto por Füller e Thompsom. Para Füller e Thompsom, a distribuição granulométrica influencia na compacidade da mistura, ou seja, quanto maior a compacidade maior é a resistência mecânica do concreto.

Mehta e Monteiro (2008) definem a densidade de empacotamento de materiais granulares, como o volume sólido em uma unidade de volume total, onde uma maior densidade de empacotamento requer menor quantidade de pasta de cimento.

Outro conceito para definição de vazios entre grãos é o de massa unitária, que Mehta e Monteiro (2008) conceituam como a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume. O autor explica que o fenômeno surge porque não é possível empacotar as partículas do agregado juntas de forma a não deixar espaços vazios entre elas.

A distribuição granulométrica de um agregado pode ser contínua ou descontínua. Oliveira et al (2000) definem distribuição granulométrica descontínua como a faixa de distribuição de tamanhos onde apresenta intervalos com ausência de determinados tamanhos de partículas e, distribuição granulométrica contínua aquela em que a distribuição de tamanhos é contínua em toda a sua extensão. Conclui-se que agregados com distribuição granulométrica contínua favorecem maior densidade de empacotamento das partículas.

A Figura 2.1 ilustra a eficiência do empacotamento de partículas, que é influenciada pela distribuição granulométrica do sistema, onde: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento teórica; (c) deficiência de partículas dispersas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas

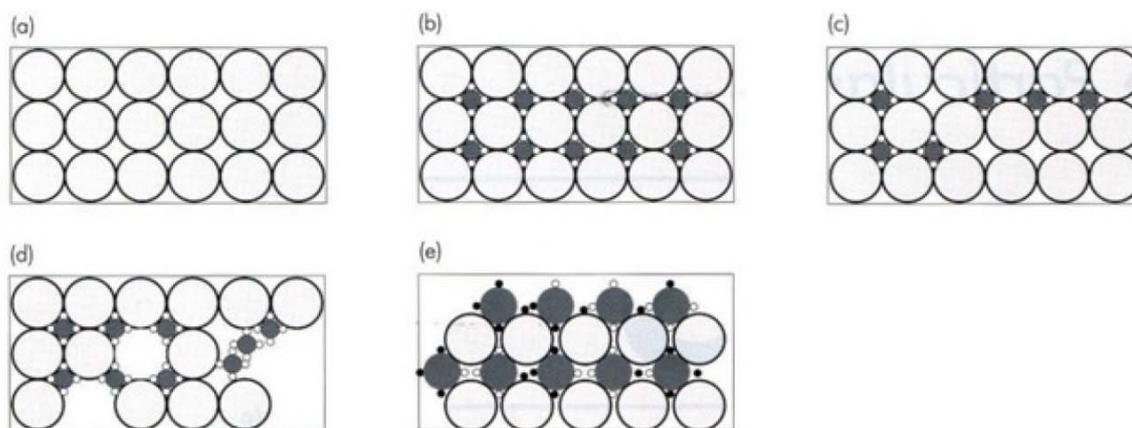


Figura 2.1 - Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento (OLIVEIRA ET AL, 2000).

Os estudos teóricos e experimentais, relacionados ao empacotamento de partículas geraram duas abordagens básicas, uma discreta, que considera as partículas individualmente, tendo Furnas e Westman e Hugill como expoente e outra contínua, proposta por Andreasen, que trata as partículas como distribuições contínuas (OLIVEIRA *et al*, 2000), além de uma equação modificada de Andreasen, ou equação de Alfred (SILVA *et al*, 2003).

2.4.1. Modelo de Andreasen

O modelo de Andreasen pressupõe a existência de uma distribuição contínua até partículas infinitamente pequenas (SILVA *et al*, 2003).

Descrevendo sobre o modelo, Oliveira *et al* (2000) expuseram que o empacotamento ideal é aquele em que, em torno de duas partículas específicas com tamanhos muito diferentes, há condições de similaridade, isto é a imagem da granulação de ambos os ambientes deve ser a mesma. Essa similaridade define a distribuição de tamanho de partículas em termos de uma lei de potências:

$$CPFT = \left(\frac{D_p}{D_L}\right)^q \times 100$$

em que:

CPFT = é a porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;

D_p = é o diâmetro da partícula;

D_L = é o diâmetro da maior partícula;

q = é o módulo ou coeficiente da distribuição.

Andreasen determinou que, para maximizar o empacotamento, o expoente q de sua equação deveria estar entre 0,37, propiciando a máxima densidade.

A Figura 2.2 ilustra graficamente a equação de empacotamento ideal por meio do modelo de Andreasen.

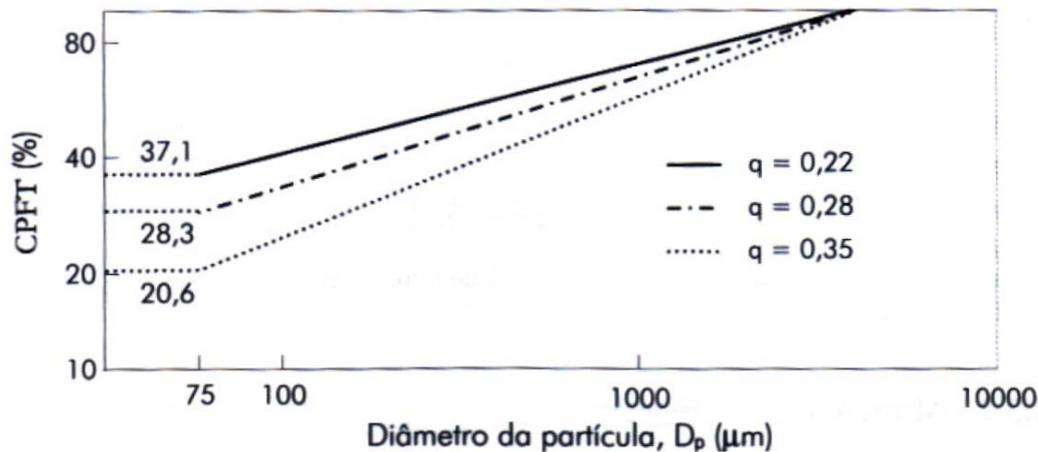


Figura 2.2 - Distribuições granulométricas contínuas, segundo o modelo de Andreasen para diferentes valores de q (OLIVEIRA et al, 2000).

2.4.2. Modelo de Alfred

Considerando que existe um limite mínimo para a partícula de menor tamanho, surge a equação proposta por Dinger e Funk, também conhecida por equação modificada de Andreasen ou equação de Alfred (SILVA et al, 2003).

É um aperfeiçoamento dos modelos de Furnas e Andreasen, que mostra que na realidade esses modelos podem ser visualizados como duas formas distintas de se expressar uma mesma coisa (OLIVEIRA et al, 2000):

$$CPFT = \left(\frac{D_p^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \times 100$$

em que:

CPFT = é a porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;

D_p = é o diâmetro da partícula;

D_s = é o diâmetro da menor partícula;

D_L = é o diâmetro da maior partícula;

q = é o módulo ou coeficiente da distribuição.

A Figura 2.3 ilustra graficamente a equação proposta por Alfred para o empacotamento ideal de partículas.

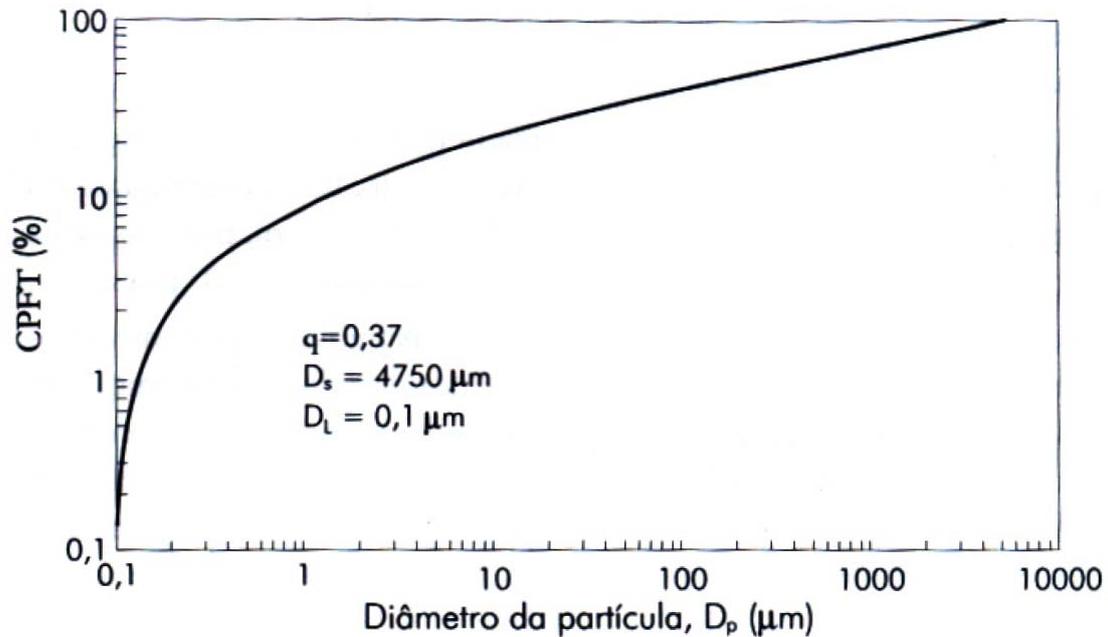


Figura 2.3 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Alfred (OLIVEIRA et al, 2000).

2.5. Aplicações do CPR

A fabricação de peças pré-fabricadas é a sua grande aplicação. Por exemplo, em estruturas espaciais leves, tabuleiros de pontes, vigas, colunas, passarelas, placas de revestimentos de túneis, cilindros para laminação, projéteis, engrenagens, etc. Como exemplo dessa tecnologia temos a passarela de sherbrooke no Canadá com 56m de vão. Também no Canadá, foi revitalizada uma ponte rodoviária, em que o tabuleiro e a pavimentação original foram substituídos por laje de apenas 5 cm de espessura, reduzindo a carga permanente em até 5 kN/m² (BINA, 1999). Outro exemplo é a ponte Sakata Mirai Bridge no Japão, feita com peças pré-fabricadas em CPR.

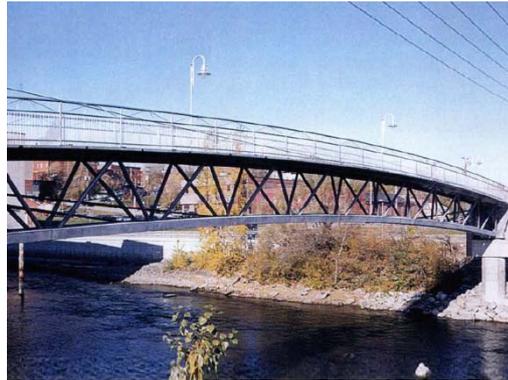


Figura 2.4 - Passarela de Sherbrooke, no Canadá.



Figura 2.5 - Ponte Sakata Mirai Bridge, no Japão.

O CPR pode também ser facilmente utilizado em estruturas protendidas sem qualquer armadura passiva. Adeline, 1996 e Richard et al., 1995, testaram a performance de estruturas protendidas em "T" de 10 m de comprimento e estruturas em forma de "X" também protendidas. Concluíram que as tensões primárias de tração são resistidas pela protensão, enquanto que as tensões secundárias, tensões de cisalhamento e todas as tensões de compressão são suportadas diretamente pelo concreto.

Gilliland, 1996, analisou a viabilidade da utilização de CPR em tabuleiros de pontes protendidas de longos vãos. Outra possível aplicação do CPR é na fabricação de tubos de concreto. Pesquisadores como O'Neil e Dowd, 1996, produziram em escala industrial, tubos pré-fabricados de concreto de pós reativos, sob diferentes métodos de fabricação: concreto plástico; concreto seco; moldagem sob rotação e pelo método empacotador. Concluíram ser vantajoso o emprego desses tubos em túneis e pequenos shafts, dutos, containers para estoque de resíduos de média reatividade nuclear e tanques de tratamento de água por apresentarem vantagens como produção de peças mais leves, reduzindo o custo do transporte; melhor impermeabilidade a agentes agressivos; melhor precisão e detalhamento das juntas; redução de danos durante manutenção e transporte; agilidade durante a produção entre outros.

No âmbito estético, o CPR também pode ser utilizado como revestimento de fachadas. Painéis planos ou curvos de vários metros de comprimento, com a utilização de armadura protendida, que permite obter estruturas muito delgadas graças ao pequeno cobrimento dos cabos as estruturas assemelham-se, arquitetonicamente, às estruturas de aço.

3. METODOLOGIA

3.1 Materiais utilizados na pesquisa

Para a pesquisa foram adotados os seguintes materiais, encontrados na região de Curitiba/PR.

- Cimento Portland CII Z
- Areia fina
- Sílica ativa
- Fibra de Polipropileno
- Aditivo Superplastificante à base de policarboxilatos
- Água

Para o desenvolvimento do traço a areia passou por um processo de peneiramento que a separou em 5 classes granulométricas. As peneiras usadas nesse processo foram a 1200, 600, 300, 150 e 75. Foi usado o material retido em 600, 300, 150, 75 e fundo.

A água usada no ensaio é potável assim como nos concretos convencionais, porém necessita estar com temperatura abaixo de 8°C durante a mistura.

3.2 Determinação dos traços

Para o empacotamento das partículas foram aplicados os modelos de Andreasen e Alfred, descritos no capítulo 2. Foram escolhidos estes modelos porque os dois usam a mesma teoria sobre o coeficiente de empacotamento. Foram utilizados 3 coeficientes de empacotamento diferentes em cada método: 0,37, considerado o melhor segundo a bibliografia, 0,22 e 0,52.

No total foram desenvolvidos 6 traços diferentes para a pesquisa, apresentados na tabela 3.1

Tabela 3.1 – Dosagem do concreto de Pós Reativos.

MATERIAL (g)			Alfred			Andreasen		
			q=0,37	q=0,22	q=0,52	q=0,37	q=0,22	q=0,52
			1A	1B	1C	2A	2A	2C
CIMENTO			1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
AREIA	RETIDA EM:	# 0,6	200,2	170,5	233,2	133,1	81,4	182,6
		# 0,3	330,0	302,5	354,2	218,9	144,1	277,2
		# 0,15	256,3	259,6	247,5	169,4	123,2	193,6
		# 0,075	198,0	223,3	172,7	207,9	174,9	207,9
		Fundo	115,5	144,1	92,4	370,7	576,4	238,7
SILICA ATIVA			150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0
SUPERPLASTIFICANTE			40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
ÁGUA			220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0
FIBRA DE POLIPROPILENO			1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

3.3 Procedimento de mistura

Devido às dificuldades geradas pela baixa porcentagem de água utilizada nos concretos de pós reativos, o procedimento de mistura dos seus materiais constituintes tem grande influência na homogeneização, na trabalhabilidade e conseqüentemente nas suas propriedades físicas e mecânicas.

Foi adotado o seguinte procedimento:

- a- Misturar todo o material seco (cimento, areia, sílica ativa e fibra de polipropileno) até que os componentes fiquem bem dispersos, aparentando homogeneidade. Esse processo de mistura pode durar em torno de 5 minutos;
- b- Colocar 30% da água na bacia da argamassadeira;
- c- Ligar a argamassadeira na velocidade 1;
- d- Adicionar lentamente de 30 % do material seco;
- e- Adicionar lentamente 20% da água;
- f- Adicionar lentamente 30% do material seco;
- g- Adicionar lentamente 20% da água;

- h- Adicionar lentamente 20% do material seco;
- i- Adicionar 15% da água junto com todo o aditivo;
- j- Adicionar lentamente o restante do material seco;
- k- Adicionar lentamente o restante da água;
- l- Passar a argamassadeira para a velocidade 2 durante 2 minutos;
- m- moldar os corpos de prova.

Obs: O tempo de mistura entre o início do passo b e o início do passo l deve ser de 9 minutos.

A figura 3.1 mostra 3 fases da mistura manual dos materiais secos. A primeira imagem mostra os materiais não misturados, apenas despejados na bacia



Figura 3.1 - Processo de mistura do material seco.

A segunda mostra o material com pouco tempo de mistura, visivelmente aparentando pouca homogeneidade. A terceira imagem mostra o material bem homogêneo, após todo o processo de mistura. Na figura 3.2 e 3.3 é possível ver o resultado da mistura dos materiais secos com a água e o aditivo (procedimento feito com o auxílio de uma argamassadeira). A mistura apresentou um material homogêneo e com boa trabalhabilidade para a moldagem dos CPs.



Figura 3.2 - Mistura do material na argamassadeira.



Figura 3.3 - Final do processo de mistura

3.4 Moldagem dos Corpos de prova

Antes do procedimento de mistura descrito acima, os moldes foram devidamente limpos e posteriormente receberam aplicação de cera em pasta, que teve a função de agir como desmoldante.

A moldagem dos CPs foi feita manualmente, com o auxílio de uma concha, e o adensamento foi feito com um soquete de aço para argamassa. O preenchimento do molde foi feito em 3 camadas iguais. Em cada camada foram aplicados 20 golpes suaves.

Para finalizar foram inseridas placas de acrílico no topo molde, com o objetivo de deixar a superfície do corpo de prova o mais plano possível, evitando futuros problemas na fase de rompimento, conforme ilustrado na figura 3.4.



Figura 3.4 - Corpos de prova moldados

A desmoldagem de todos os corpos de prova foi feita 24 horas após o fim da moldagem. Não houve grandes problemas durante essa etapa.

3.5 Cura dos Corpos de prova

Outro fator da maior relevância na resistência final do concreto a esforços mecânicos é a cura (procedimento utilizado para favorecer a hidratação do cimento que consiste no controle da temperatura e no movimento da água de dentro para fora e de fora para dentro do concreto), visto que as condições de umidade e temperatura, principalmente nas primeiras idades, têm importância muito grande para as propriedades do concreto endurecido.

O processo de cura dos corpos de prova foi iniciado imediatamente após a desmoldagem, e foi dividido em duas etapas: cura térmica e cura úmida. A cura térmica teve duração de 6 dias, do segundo ao sétimo dia de idade, e a cura úmida foi feita durante os 21 dias restantes. Com o objetivo de não comprometer a microestrutura dos modelos, houve um

tempo de repouso para os CPs de aproximadamente 1 hora entre o fim da cura térmica e o início da cura úmida. Os CPs de 1 e 3 dias de idade passaram apenas pela cura térmica.

A cura térmica foi feita em um equipamento que mantém água aquecida. O termostato deste aparelho foi direcionado para a marca de 90°C e permaneceu assim durante todo esse processo, ilustrado na figura 3.5



Figura 3.5 - Cura térmica dos corpos de prova.

Para a cura úmida os corpos de prova foram submersos em um tanque água, onde permaneceram até o dia do rompimento, mostrado na figura 3.6



Figura 3.6 - Cura úmida dos corpos de prova.

3.6 Ensaios de compressão axial

Foi realizado o ensaio de compressão axial para determinar a resistência à compressão nas idades de 1, 3 e 28 dias.

Os rompimentos foram divididos em séries de acordo com o traço e idade dos CPs. Assim foram geradas 18 séries de rompimento. A sequência dos ensaios para cada série está exposta na tabela 3.1. Na figura 3.7 está ilustrado o ensaio de ruptura dos corpos de prova.



Figura 3.7 - Ensaio de compressão axial.

Tabela 3.2 – Programa experimental dos ensaios de compressão axial

Modelo de dosagem	Traço	Coefficiente q	Série de rompimento	Idade (dias)	Quantidade de CPs
Alfred	1A	0,37	1	1	3
			2	3	3
			3	28	6
	1B	0,22	4	1	3
			5	3	3
			6	28	6
	1C	0,52	7	1	3
			8	3	3
			9	28	6
Andreasen	2A	0,37	10	1	3
			11	3	3
			12	28	6
	2B	0,22	13	1	3
			14	3	3
			15	28	6
	2C	0,52	16	1	3
			17	3	3
			18	28	6

4. ANÁLISES DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

Neste capítulo são apresentadas as análises dos resultados dos ensaios realizados nos modelos feitos com concreto de pós reativos. Para a análise foi analisado exclusivamente o comportamento da resistência à compressão ao longo do tempo.

Assim como nos concretos convencionais, a resistência à compressão do concreto de pós reativos aumenta com o passar do tempo, devido à hidratação das partículas de cimento.

O estudo experimental do concreto de pós reativos, baseado no material desenvolvido de acordo com o capítulo 3, e experimentado de acordo com o capítulo 4 tem o objetivo de comparar os diferentes modelos de dosagem aplicados e estabelecer uma relação dosagem x resistência à compressão axial do CPR.

Para o ensaio foram usados corpos de prova cilíndricos de 50mm x 100mm. Foi analisada a variação da resistência à compressão do concreto de pós reativos nas idades de 1, 3 e 28 dias. A análise foi feita em 6 traços diferentes, sendo 3 calculados pelo modelo de Alfred e 3 pelo modelo de Andreasen. Os resultados são mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resistência à compressão em CPR

Modelo de dosagem	Série	Coeficiente q	Resistência à compressão (MPa)		
			1 dia	3 dias	28 dias
Alfred	1A	0,37	17,5	54,2	104,5
	1B	0,22	16,1	54,6	81,4
	1C	0,52	15,5	55,8	100,2
Andreasen	2A	0,37	11,6	65,2	105,2
	2B	0,22	11,3	73,0	94,1
	2C	0,52	9,1	53,4	84,6

Todos os corpos de provas rompidos com 1 dia de idade apresentaram comportamento frágil, rompendo com poucos segundos de ensaio. O traço que apresentou melhor resistência foi o 1A, registrando 17,5 MPa. Os traços 1B e 1C tiveram resistência de 16,1 MPa e 15,5 MPa respectivamente. Os traços 2A, 2B e 2C atingiram 11,6 MPa, 11,3 MPa e 9,1 MPa respectivamente.

Os rompimentos de 3 dias apresentaram uma melhora significativa na resistência, principalmente os CPs das séries 2A, 2B e 2C, que atingiram 65,2 MPa, 73,0 MPa e 53,4 MPa respectivamente. Os traços 1A, 1B e 1C atingiram 54,2 MPa, 54,6 MPa e 55,8 MPa.

Os rompimentos de 28 dias também apresentaram aumento considerável das resistências obtidas. Os traços 2A, 2B e 2C, atingiram 104,5 MPa, 81,4 MPa e 100,2 MPa respectivamente, e os traços 1A, 1B e 1C atingiram 105,2 MPa, 94,1 MPa e 84,6 MPa

Durante toda a fase de rompimento apenas um CP apresentou problemas. Foi na série de rompimento 11, um dos modelos do traço 2A rompido com 3 dias de idade foi rompido com uma carga aplicada muito aquém das demais (35 MPa). Antes do ensaio não foi possível observar irregularidades na superfície do CP, mas este foi provavelmente o motivo da falha. O resultado obtido neste modelo foi descartado da pesquisa.

Os resultados da tabela 4.1, comprovam que a resistência à compressão do CPR aumenta com o passar do tempo. Esse comportamento é ilustrado na figura 4.1.

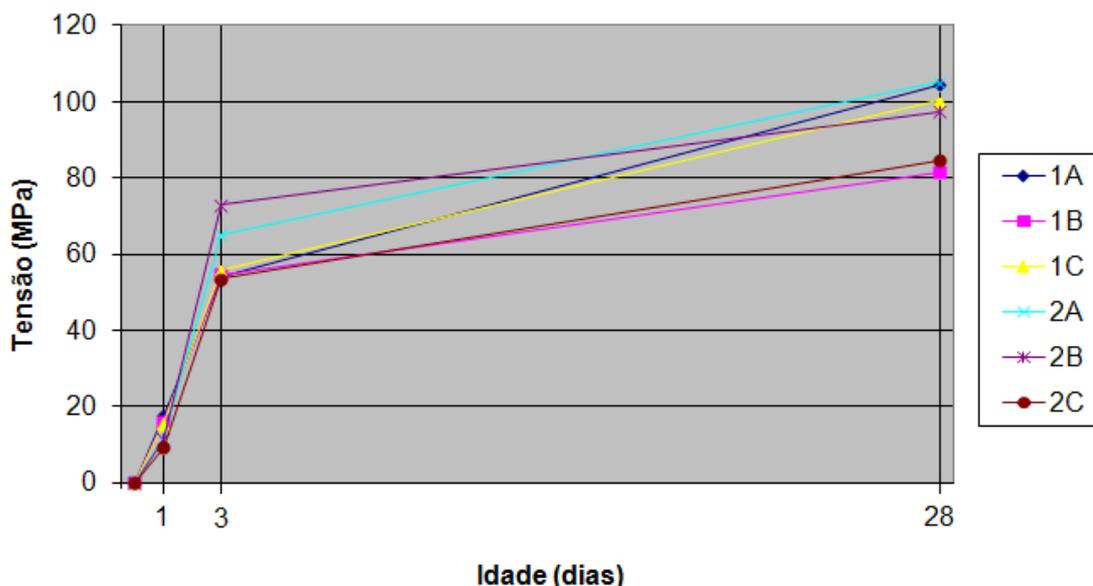


Figura 4.1 - Crescimento da resistência à compressão com o tempo.

É possível observar que em todos os casos houve um grande ganho de resistência nos primeiros dias (1 e 3 dias). Do 3º até o 28º dia o aumento da resistência dos concretos de pós reativos foi proporcionalmente menor.

Nos rompimentos de 1 dia de idade as séries do modelo de Alfred apresentaram melhor desempenho em relação às de Andreasen. Com relação ao coeficiente q, nos dois modelos os melhores resultados foram das séries onde foi aplicado $q = 0,37$.

Os rompimentos de 3 dias apresentaram uma melhora significativa. Os CPs das séries 2A, 2B e 2C, que foram dosados pelo modelo de Andreasen apresentaram aumento de resistência médio de quase 600% em relação aos resultados de 1 dia de idade. Os traços

calculados pelo modelo de Alfred, 1A, 1B e 1C apresentaram pouco mais de 300% de aumento em relação também ao 1º dia e tiveram resultados piores que os de Andreasen. É possível observar ainda que as três séries do modelo Alfred apresentaram resultados bem próximos, já as séries de Andreasen desenvolveram resistências com bastante variação.

Ao contrário dos resultados dos rompimentos de 1 e 3 dias de idade, as resistências dos CPs rompidos aos 28 dias apresentaram resultados semelhantes entre os dois modelos de dosagem. E conforme o esperado, os corpos de prova que apresentaram maior resistência nessa idade foram os das séries que aplicaram $q = 0,37$, sendo que o 2A (Andreasen) apresentou desempenho um pouco melhor que o 1A (Alfred). Porém, os piores resultados não foram de séries com o mesmo coeficiente q . No modelo de Alfred a pior resistência foi da série 1B que usou $q = 0,22$, já no modelo de Andreasen, o pior resultado foi da Série 2C, onde foi aplicado $q = 0,57$.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Com a análise dos resultados obtidos nos ensaios observa-se que não há grande variação no resultado final dos ensaios de compressão (rompimento com 28 dias de idade) entre os dois modelos de dosagem experimentados na pesquisa, considerando os melhores resultados de cada modelo. Os rompimentos nas idades de 1 e 3 dias apresentaram uma variação considerável, porém desproporcional, visto que os traços calculados pelo modelo de Alfred alcançaram maior resistência nos ensaios de 1 dia, e no rompimento de 3 dias de idade, os melhores resultados foram obtidos pelo traços calculados pelo modelo de Andreasen.

É possível concluir também que para o resultado final (28 dias), o melhor coeficiente de distribuição aplicado na pesquisa foi $q=0,37$, visto que os traços que apresentaram melhores resistências à compressão foram calculados com este valor tanto para o modelo de Alfred quanto para o modelo de Andreasen.

Quanto à trabalhabilidade, os concretos dosados pelo modelo de Alfred teve vantagem em relação aos do modelo de Andreasen, que apresentaram uma consistência mais seca, devido ao uso de maior quantidade de materiais finos em sua composição.

Ressalta-se também que a preparação deste tipo de concreto, desde a dosagem até a sua confecção, é uma etapa importante para obter um material de qualidade, que apresente as características de alta performance esperadas do CPR.

Para finalizar, podemos afirmar que é possível a aplicação do CPR em Curitiba e região, porém pode ser uma alternativa de custo elevado. Isto porque para sua produção é necessário mão de obra extremamente qualificada, e materiais relativamente caros. Além disso há o fato de não se usar brita, que é o material de mais baixo custo dos concretos convencionais.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

É de grande importância a continuação de novas pesquisas com relação à dosagem dos concretos de pós reativos. Pode-se fazer um trabalho voltado à utilização de outros modelos de dosagem, ou até mesmo pesquisas com vários tipos de materiais, como sílicas ou fibras de diferentes características.

Há também a necessidade da criação de uma Norma Técnica Brasileira que fale a respeito do concreto de pós reativos, visto que o CPR é um material relativamente novo e com grandes perspectivas para o futuro da construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADELIN, R.; BEHLOUL, M. High ductility beams without passive reinforcement. In: 4th International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, 1996, Paris: France. Proceedings ... Paris: High Strength/High Performance Concrete, 1996.

BINA, P. (1999) Concretos de pós reativos: uma revolução no conceito do concreto, Revista Técnica, São Paulo, Ed. PINI, n.38, p. 50-51.

BONNEAU, O.; POULIN, C.; DUGAT, J.; RICHARD, P.; AITCIN, P. C. (1996). Reactive powder concretes: from theory to practice. Concrete International. v. 18, n. 4, p. 47-49, Apr.

CAMPITELI, Vicente Coney; MADALOZO, Hélio Carlos; CAMPITELI, Heliana Cioccia; SCHULZ, Sérgio Luiz. Modelo matemático para módulos de finura ideais baseado em curvas de gradação geométrica. In Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 3^o, Ponta Grossa - Paraná, 2007. Anais do 3^o EETCG 2007.

CHEYREZY, M. Structural applications of Reactive Powder Concretes, Concrete, 33, jan,1999, p.20-23.

CHEYREZY, M.; MARET, V.; FROUIN, L. (1995). Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). Cement and Concrete Research. v. 25, n. 7, p. 1491- 1500, Oct.

COLLEP ARDI, S.; COPPOLA L.; TROLI, R.; et al. M. Mechanisms of actions of different superplasticizers for high-performance concrete, CANMETIACI SPI86, 1998, Gramado: Brazil. Proceedings... Gramado: High Performance Concrete, 1998, SP-186-29, p.503-523.

DUGAT, J.; FROUIN, L.; CLAVAUD, B. (1996). RPC: Microstructure analysis. In: International Symposium of High Strength/high performance, 4, Paris, France. Anais... Paris. p. 1351-1357, 1996.

GILLILAND, S. Reactive powder concrete (RPC), a new material for prestressed concrete bridge girders. In: Structures Congress, 1996. Proceedings... vol. 1, 1996, p.125-132.

LARRARD, F. (1989). Ultrafine particles for the making of very high strength concretes. Cement and Concrete Research. v. 19, p. 161-172.

MEHTA P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais, Ed. PINI, São Paulo, 1994.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura Propriedades e Materiais. 3^a ed. São Paulo: Pini, 2008. 674 p.

NEVILLE, A.M. Propriedades do concreto. 2a ed., Sao Paulo: Pini, 1997.

OLIVEIRA, Ivone Regina; STUDART, André Rocha; PILEGGI, Rafael Giuliano; PANDOLFELLI, Victor Carlos. Dispersão e empacotamento de partículas: Princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

O'NEIL, E.; DOWD, W. High-performance pipe products fabricated with reactive powder concrete. In: The Materials Engineering Conference, 1996. Proceedings ... vol. 2, 1996, p.1321-1330.

PAULON, V. A.; MONTEIRO, P. Estudos da microestrutura da zona de transição entre pasta de cimento e o agregado. São Paulo, 1991. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. Cement and Concrete Research. v. 25, n. 7, p. 1501-1511.

RICHARD, P. Reactive Powder Concrete: A New Ultra-high-strength cementitious material. In: 1st International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, 1996, Paris: France. Proceedings ... Paris: High Strength/High Performance Concrete, 1996, p.1343-1349

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEEZAS, T. C. Relações entre distribuição granulométrica, morfologia e empacotamento de partículas num sistema real: alta alumina. In Congresso Brasileiro de Cerâmica, 47º, João Pessoa-PB, 2003. Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2003.

VIEIRA, S. R.; REGATTIERI, C. E. Boletim técnico ABCP: Estudo sobre concreto de alto desempenho com cimento CPIII-40 VOTORAN. São Paulo, 1997, p.18-21 e 26-28.