

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PATRÍCIA VIEIRA PONTES CARVALHO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE UM CONCRETO
DE PÓS REATIVOS**

CURITIBA

2022

PATRÍCIA VIEIRA PONTES CARVALHO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE UM CONCRETO
DE PÓS REATIVOS**

**Analysis of the influence of particle packing models on axial compressive
strength of a reactive powder concrete**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

PATRÍCIA VIEIRA PONTES CARVALHO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE UM CONCRETO
DE PÓS REATIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 30 de novembro de 2022

Wellington Mazer
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciane Ferreira Schiavoni Wiczick
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adauto José Miranda de Lima
Pós-doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por sempre me proporcionarem ensino de qualidade e liberdade para escolher qual caminho seguir.

Agradeço a minha irmã, por ter me aceitado e escolhido como “professora” nas diferentes fases da sua educação e me ensinar sobre resiliência e sobre seguir nossos sonhos.

Agradeço ao meu marido, que me acompanha há anos como colega e melhor amigo, por ter sido e ser parte fundamental em cada passo da minha trajetória, me apoiando e suportando em todas as decisões, mostrando que sempre temos opções.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Wellington Mazer, pela paciência e disponibilidade em ensinar, e pela amizade construída após tantos anos.

Agradeço a todos os que de algum modo contribuíram para a realização deste trabalho.

Isso de querer ser
exatamente aquilo
que a gente é
ainda vai
nos levar além.
(PAULO LEMINSKI).

RESUMO

A busca constante pela otimização e melhoria dos métodos construtivos faz com que o mercado da construção civil explore novos materiais. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi analisar a influência de modelos de empacotamento de partículas na resistência à compressão axial de um concreto de pós reativos (CPR), um material ainda pouco explorado, principalmente no Brasil, cujas características marcantes são elevada resistência à compressão axial, baixíssima porosidade e permeabilidade, resultantes de uma matriz de alta densidade, que conferem ao CPR maior vida útil e menor custo de manutenção quando comparado ao concreto convencional, podendo abranger uma aplicabilidade maior em diversos tipos de construção. O empacotamento de partículas faz-se fundamental na produção e desenvolvimento de um concreto com maior compacidade, uma vez que leva ao preenchimento de vazios entre os diferentes tamanhos de partículas, de forma a alcançar as principais características do CPR. Este estudo utilizou os modelos de Alfred, Andreasen, De Larrard e Toufar para a definição do traço dos concretos, avaliando os valores de resistência à compressão axial para duas idades – 97 e 112 dias. Constatou-se que houve evolução no ganho de resistência à compressão axial de 97 dias para 112 dias em todos os modelos de empacotamento. Estatisticamente, foi possível afirmar que para o modelo de Toufar as resistências à compressão são iguais em todas as idades; para o modelo de De Larrard, existe diferença estatística entre as idades de 97 dias e de 112 dias.

Palavras-chave: empacotamento de partículas; concreto de pós reativos; resistência à compressão.

ABSTRACT

The constant search for optimization and improvement of construction methods makes the civil construction market explore new materials. Thus, the objective of this study was to analyze the influence of particle packing models on the axial compressive strength of a reactive powder concrete (RPC), a material with a lack of exploration, mainly in Brazil, whose outstanding characteristics are high resistance to axial compression, very low porosity and permeability, resulting from a high-density matrix, which gives RPC a longer useful life and lower maintenance cost when compared to conventional concrete, and may cover applicability greater in various types of construction. Particle packing is fundamental in the production and development of concrete with greater compactness, since it leads to the filling of voids between the different particle sizes, in order to achieve the main characteristics of RPC. This study has used the models of Alfred, Andreasen, De Larrard and Toufar to define the mix of concretes, evaluating the axial compression strength values for two ages – 97 and 112 days. It was identified that there was an evolution in the gain in resistance to axial compression from 97 days to 112 days in all packing models. Statistically, it was possible to state that for the Toufar model the compressive strengths are the same at all ages; for the De Larrard model, there is a statistical difference between the ages of 97 days and 112 days.

Keywords: particle packing; reactive powder concrete; compressive strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comparação de seções transversais do (a) CPR, (b) aço, (c) concreto protendido e (d) concreto convencional.....	20
Figura 2 - Passarela de Sherbrook, Canadá	21
Figura 3 - Passarela Seonyu.....	21
Figura 4 - Faixas típicas de formação de produtos de hidratação em uma pasta de cimento Portland comum.....	23
Figura 5 - Tamanho de partículas e empacotamento: (a) mínima densidade de empacotamento; (b) máxima densidade de empacotamento; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas.....	24
Figura 6 - Distribuição granulométrica do modelo de Andreasen.....	26
Figura 7 - Distribuição granulométrica do modelo de Furnas	27
Figura 8 - Distribuição granulométrica do modelo de Alfred.....	28
Figura 9 - Mistura binária sem interação. Partículas de maior dimensão dominantes	29
Figura 10 - Mistura binária sem interação. Partículas de menor dimensão dominantes.....	29
Figura 11 - Efeito de afastamento exercido por um grão classe 2 em um meio classe 1 dominante.....	30
Figura 12 - Efeito parede exercido por um grão classe 1 em mistura classe 2 dominante.....	30
Figura 13 - Curva granulométrica da Areia 1.....	36
Figura 14 - Curva granulométrica da Areia 2.....	37
Figura 15 - Curva granulométrica do pó de quartzo	38
Figura 16 - Curva ótima dada pelo modelo de Andreasen	39
Figura 17 - Curva ótima dada pelo modelo de Alfred	40
Figura 18 - Resistência à compressão axial média, em MPa	45
Quadro 1 - Nomenclatura utilizada no modelo de empacotamento compressível.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades químicas do cimento, em %	35
Tabela 2 - Propriedades físicas do cimento	35
Tabela 3 - Massa unitária e massa específica dos agregados miúdos	36
Tabela 4 - Composição granulométrica da Areia 1	36
Tabela 5 - Composição granulométrica da Areia 2	37
Tabela 6 - Propriedades e características químicas do pó de quartzo, em %	38
Tabela 7 - Procedimento de cálculo do modelo de De Larrard	41
Tabela 8 - Procedimento de cálculo do modelo de Toufar	41
Tabela 9 - Composição dos traços dos modelos de empacotamento, em gramas ...	42
Tabela 10 - Resistência à compressão axial aos 97 dias.....	44
Tabela 11 - Resistência à compressão axial aos 112 dias.....	45
Tabela 12 - Resistência à compressão axial média, em MPa	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARI	Alta Resistência Inicial
CP	Cimento Portland
CPR	Concreto de Pós Reativos
C-S-H	Silicatos de Cálcio Hidratados
CUAD	Concreto de Ultra-Alto Desempenho
MEC	Modelo de Empacotamento Compressível
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PCE	Polímeros Carboxilatos

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Óxido de Alumínio
C_3A	Aluminato Tricálcico
CaO	Óxido de Cálcio
Fe_2O_3	Óxido de Ferro (III)
MgO	Óxido de Magnésio
SiO_2	Dióxido de Silício
SO_3	Trióxido de Enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.2	Justificativa.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Composição do concreto.....	16
2.2	Concreto de pós reativos.....	16
2.3	Empacotamento de partículas.....	22
2.3.1	Modelo de Andreasen	25
2.3.2	Modelo de Alfred	26
2.3.3	Modelo de De Larrard.....	28
2.3.4	Modelo de Toufar	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	Caracterização dos materiais	35
3.1.1	Cimento	35
3.1.2	Agregado miúdo	35
3.1.3	Água de amassamento.....	37
3.1.4	Sílica ativa	38
3.1.5	Pó de quartzo	38
3.1.6	Aditivo superplastificante	38
3.2	Empacotamentos.....	39
3.2.1	Curvas dos modelos.....	39
3.3	Traços dos concretos	42
3.4	Mistura dos materiais.....	42
3.5	Moldagem dos corpos de prova.....	42
3.6	Cura dos corpos de prova	43
3.7	Ensaio de resistência à compressão axial	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Ensaio de compressão axial.....	44
4.2	Análise dos resultados	45
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
5.1	Conclusões	47

5.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	47
	REFERÊNCIAS.....	49
	APÊNDICE A - Relatórios de ensaio	52

1 INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil busca constantemente otimizar e melhorar métodos construtivos, introduzir novos materiais e utilizá-los de modo mais consciente e econômico. Aliado a isto, faz-se necessário o uso de materiais inovadores e, graças aos avanços da tecnologia e ciência dos materiais, há uma variedade de concretos, atualmente o material de construção mais utilizado no mundo, principalmente no Brasil.

Projetos arrojados e construções em ambientes agressivos demandam concretos cada vez mais resistentes do ponto de vista mecânico e de durabilidade. O estudo das propriedades da microestrutura é a chave da ciência dos materiais moderna e, em conjunto com estudos científicos, surgiu o concreto de pós reativos (CPR), que se enquadra como um concreto de ultra-alto desempenho (CUAD). As pesquisas iniciaram-se na França e no Canadá com os pesquisadores Richard e Cheyrezy, em 1995.

Os concretos de pós reativos têm resistência à compressão compreendida na faixa de 200 MPa a 800 MPa e tem como princípio ser um material com o mínimo de microfissuras e poros, conferindo resistências à tensões elevadas.

A característica principal na composição do CPR e o que dá nome a este concreto é que ele não leva em sua composição agregados graúdos: é formado por partículas com diâmetro variando entre 2mm a 0,5 μm . Os materiais utilizados são cimento Portland, sílica ativa, pó de quartzo e agregado miúdo. A baixíssima relação água cimento, entre 0,12 e 0,15, é característica marcante, graças ao uso de aditivos superplastificantes. Podem ainda ser adicionadas fibras para melhorar as características deste material.

Logo, para a obtenção do CPR faz-se conveniente seguir alguns princípios como aumento da homogeneidade, dada pela eliminação dos agregados graúdos; aumento da densidade pela otimização da distribuição granulométrica dos grãos, melhoramento da microestrutura, utilizando tratamento térmico durante a cura; aumento da ductilidade, propiciada pela incorporação de fibras e realização da mistura e moldagem de modo a gastar o menor tempo possível entre as etapas.

O estudo do empacotamento de partículas é fundamental na dosagem do concreto de pós reativos, bem como dos concretos de ultra-alto desempenho, considerando as características da sua composição, de materiais polidispersos. O

empacotamento pode ser definido como a correta seleção da proporção e do tamanho das partículas, de modo que as partículas menores preencham os vazios deixados entre as partículas maiores, visando minimizar a quantidade de vazios da mistura, homogeneizando a distribuição granulométrica e contribuindo para o aumento da densidade da mistura.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho é de grande relevância no cenário acadêmico, uma vez que pode auxiliar no desenvolvimento de um método de dosagem específico do CPR e explorar cada vez mais seu potencial, pois o desenvolvimento científico pode levar à disseminação das excelentes qualidades deste concreto e ampliar sua aplicação, principalmente no Brasil, onde ainda não há nenhuma obra que o aproveite ao máximo as propriedades mecânicas e de durabilidade que o concreto de pós reativos oferece.

1.1 Objetivos

Objetivo geral:

Analisar a influência de modelos de empacotamento de partículas na resistência à compressão de um concreto de pós reativos.

Objetivos específicos:

- Avaliar as diferenças entre as resistências mecânicas devido a diferentes métodos de empacotamento de partículas.
- Constatar se o concreto desenvolvido através dos modelos de empacotamento de partículas alcançará as resistências semelhantes às encontradas na literatura.

1.2 Justificativa

O concreto de pós reativos pode ser considerado um material relativamente novo, com as primeiras pesquisas desenvolvidas a partir dos anos 1990, na França e Canadá, e ainda demanda estudo mais aprofundado para o conhecimento de todo o seu potencial de uso. O fato de ainda não existir um método de dosagem para o CPR ratifica a necessidade do desenvolvimento de pesquisa. O CPR é autoadensável, possui elevada resistência mecânica, podendo ser utilizado em reforço estrutural, e permite a construção de estruturas mais esbeltas, o que propicia a inovação em

projetos de engenharia e arquitetura, que já podem ser 15 observados em construções na América do Norte, Europa e Ásia, mas é pouco conhecido no Brasil, tanto na área de construção civil como na área acadêmica. Considerando ainda a baixa permeabilidade e porosidade do material, a penetração de agentes agressivos e patológicos é dificultada, e como consequência, a vida útil das estruturas é prolongada e também há menor custo de manutenção quando comparado ao concreto convencional.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho é de grande relevância no cenário acadêmico, uma vez que pode auxiliar no desenvolvimento de um método de dosagem específico para concretos que não levam agregados graúdos na composição granulométrica e explorar cada vez mais seu potencial, pois o desenvolvimento científico pode levar à disseminação das excelentes qualidades deste concreto e ampliar sua aplicação, principalmente no Brasil, onde ainda não há nenhuma obra que o aproveite ao máximo as propriedades mecânicas e de durabilidade que o concreto de pós reativos oferece.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Composição do concreto

O concreto moderno:

“é um material compósito que consiste essencialmente de um meio de ligação no qual são incorporadas partículas ou fragmentos de agregado. No concreto hidráulico, o aglutinante é formado a partir de uma mistura de cimento hidráulico e água” (MEHTA e MONTEIRO, 2006, p. 10).

A base da constituição do concreto é, então, água, cimento (geralmente Portland) e agregados, como areia e brita. Graças ao desenvolvimento de tecnologias e com o objetivo de melhorar algumas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, quantidades muito pequenas de produtos químicos foram adicionadas às misturas, aponta Neville (2016).

O concreto ainda é frequentemente considerado um material homogêneo e isotrópico (Altcin, 2004), mas Richard e Cheyrezy (1995) apontam que o concreto convencional é um material heterogêneo, no qual os agregados formam um esqueleto de elementos granulares contíguos na pasta cimentícia (cimento, aditivos e água) e Mehta e Monteiro (2006) indicam que o concreto apresenta uma microestrutura complexa e altamente heterogênea.

2.2 Concreto de pós reativos

O concreto de pós reativos (CPR) caracteriza-se pela não utilização de agregados graúdos, daí a denominação “pós”. Sua composição é cimento Portland, sílica ativa, agregados com granulometria muito fina, areia com diâmetro médio de grão de 250 μm , quartzo triturado (diâmetro médio de grão de 10 μm) e são caracterizados pelo alto teor de sílica ativa e muito baixa relação água/cimento (CHEYREZY, MARET e FROUIN, 1995; DUGAT, ROUX e BERNIER, 1996). Outras adições, como fibras metálicas, por exemplo, podem ser adicionadas a fim de melhorar a resistência mecânica, e fibras de polipropileno podem auxiliar na redução da ocorrência de fissuras e de retração por secagem e/ou hidráulica. Ambas aumentam a ductilidade do CPR (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

O CPR resiste a forças de compressão que variam entre 200 e 800 MPa e grandes resistências à tração e à flexão. Outras características marcantes do material são a baixíssima porosidade e permeabilidade, que estão diretamente relacionadas a sua microestrutura.

A pesquisa para produção do CPR seguiu os seguintes princípios básicos, segundo os estudos de Richard e Cheyrezy (1995):

- Melhora da homogeneidade, ao eliminar agregados graúdos;
- Melhora da densidade compactada, otimizando a mistura granular e aplicando pressão antes e durante a cura;
- Melhora da microestrutura por tratamento térmico pós-set;
- Melhora da ductilidade, incorporando fibras de aço de pequenas dimensões;
- Manter os procedimentos de mistura e moldagem o mais próximo possível da prática existente.

O conhecimento dos componentes individuais do concreto em relação à microestrutura e propriedades e sua relação um com o outro faz-se útil para exercer controle sobre as propriedades, afirmam Mehta e Monteiro (2006).

A baixa relação água/cimento é possibilitada pelo uso de aditivos superplastificantes, que confere à mistura grande plasticidade e tem por finalidade minimizar efeitos de retração por secagem, retração hidráulica e tensões térmicas derivadas da hidratação do cimento, como aponta Biz (2001). Castro e Pandolfelli (2009) reiteram as vantagens de se utilizar aditivos químicos para a produção de concretos com alta trabalhabilidade, facilitando a manipulação, aplicação e o adensamento do material.

A escolha do cimento e do aditivo superplastificante estão fortemente interligadas. Conforme estudos, é necessária análise de compatibilidade entre cimento e aditivo, pois:

“nem todos os superplastificantes comerciais têm a mesma eficiência na dispersão das partículas de cimento na mistura, na redução da quantidade de água de mistura e no controle do comportamento reológico de misturas de relação água/aglomerante muito baixas” (AÏTCIN, 2004, p.170)

O teor de C_3A no cimento influencia o efeito do aditivo. Considerando a composição química, cimentos com baixo conteúdo de C_3A oferecem melhor resultado. Cimentos mais finos são menos satisfatórios, dada sua maior demanda de

água. Analisando as propriedades reológicas e desempenho mecânico, cimentos com alto teor de sílica podem ser considerados melhores, mas têm a desvantagem: taxa muito lenta de pega, o que pode impedir o uso para determinadas aplicações; assim, um cimento convencional de pega rápida e de alto desempenho oferece comportamento mecânico muito similar (VANDERLEI, 2004).

De acordo com Serafim e Licetti (2012), ao comparar três tipos de cimento disponíveis no mercado brasileiro, a saber, CP II-Z 32, CP IV 32 e CP V 40, os resultados demonstram haver pouca diferença nos valores de resistência a compressão no ensaio realizado nas primeiras vinte e quatro horas; a maior resistência foi do cimento CP-V 40, e dada a peculiaridade do material, o resultado é esperado. Ensaio de resistência à compressão aos vinte e oito dias mostram melhor desempenho do cimento CP-IV 32, dada a presença de materiais pozolânicos na composição, que aumentam a resistência à compressão em idades avançadas.

A resistência mecânica do CPR pode ser consideravelmente influenciada e melhorada através da cura térmica, uma vez que o tratamento térmico inicial intensifica e acelera as reações pozolânicas (BIZ, 2001). Al-Jubory (2013) constatou que há aumento da resistência à compressão em idades precoces quando da cura em água a alta temperatura a 80°C e diminuição aos 28 dias ao comparar com a cura em 20°C. Aos 3 dias, fornece uma resistência à compressão entre 80 e 90% da resistência aos 28 dias, e aos 7 dias igual a 93 e 97% da resistência aos 28 dias. Quando a cura é realizada aos 20°C, aos 3 dias é cerca de 57 a 65% da resistência à compressão de 28 dias, e em 7 dias igual a 75% da resistência à compressão de 28 dias.

A utilização da sílica ativa é importante para preencher vazios entre partículas de maiores dimensões, como o cimento, aperfeiçoamento das características reológicas pelo efeito de lubrificação, que é resultado da forma esférica perfeita das partículas, e produção de C-S-H, pela reação pozolânica com a cal resultante da hidratação primária (RICHARD et.al., 1995).

O pó de quartzo contribui também para o preenchimento dos vazios deixados pelos grãos de areia e fechamento do pacote granulométrico, reduzindo assim a porosidade, e apresenta atividade pozolânica quando feita a cura térmica de 90°C (VANDERLEI, 2004). Considerando que a cura visa evitar a perda de água de amassamento da mistura por evaporação prematura, é essencial curar apropriadamente concretos de alta performance para evitar e eliminar o aparecimento de fissuras, evitando assim a penetração de agentes agressivos (AÏTCIN, 2004).

Se o tratamento térmico for acompanhado de pressão confinante, Biz (2001) afirma que o efeito da redução da porosidade é constatado, bem como da permeabilidade, o que proporciona maior resistência à compressão e comprova ainda mais as particularidades e diferenças entre o CPR e outros tipos de concretos. A resistência à compressão aumenta com a densidade e Richard et. al. (1995) constataram que um modo eficaz de aumentar a densidade do CPR é aplicar uma força de pressão restritiva ao concreto fresco. A aplicação de pressão tem efeitos favoráveis, variando com método e duração da aplicação: reduz ou elimina consideravelmente as bolhas de ar em alguns segundos e elimina a retração química que pode causar porosidade. Rahmatabadi (2015) também observou que aplicar uma pressão pré-estabelecida é suficiente para eliminar grandes espaços com e liberar água das amostras; aplicar uma pressão de 25 MPa foi mais adequada, em termos de aplicabilidade, mas os maiores valores de resistência à compressão foram atingidos ao aplicar a pressão de 100 MPa.

Vanderlei (2004) constatou que o aumento do tempo de cura térmica provoca crescimento da resistência à compressão. Considerando concretos com pouca idade, a influência do tempo de cura foi maior, observando crescimento de 50% na resistência à compressão entre o tempo de cura térmica de 16 horas e 48 horas para os concretos com 7 dias de idade; observou-se também que aumento na resistência à compressão ficou em 15% em concretos aos 28 dias de idade, o que evidencia maior efeito do tempo de cura térmica nas primeiras idades.

A presença da areia fina proporciona maior homogeneidade a mistura, pois juntamente com a sílica ativa e o pó de quartzo, preenche os vazios entre cada componente, reflete no aumento da compacidade e da resistência de aderência entre matriz de cimento e agregado miúdo, e de acordo com Vanderlei (2004), quando utilizada areia natural, a demanda de água é ligeiramente menor, sendo preferível sua escolha. A areia é o material de maior diâmetro na mistura do CPR e seu uso é justificado por se obter menor permeabilidade do concreto, juntamente com uma melhor homogeneização dos materiais, de modo a garantir a ausência de poros capilares e vazios no compósito (BIZ, 2001).

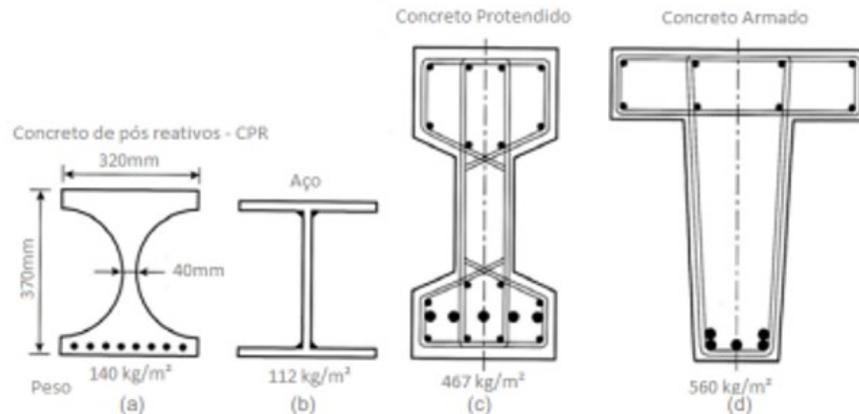
Além das características químicas de cada componente, o uso de materiais de diferentes granulometrias pode influenciar nas propriedades do concreto (SOTOMAIOR, 2017). As características mais relevantes dos agregados a serem consideradas para a produção de concreto em geral são granulometria, massa

específica, porosidade, forma e textura superficial, teor de umidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade e teor de substâncias nocivas (MEHTA e MONTEIRO, 2008) e o estudo do empacotamento de partículas pode auxiliar na produção de um concreto com maior compacidade ao considerar tais características para chegar na maior densidade da mistura ao considerar o preenchimento de vazios.

A alta resistência à compressão do CPR permite executar peças de maior esbelte, mais leves, baixíssima porosidade e permeabilidade diminuem drasticamente a ocorrência de patologias, levando ao baixo custo de manutenção e maior vida útil, se comparados ao concreto convencional. O concreto de pós reativos já foi e tem sido utilizado na construção de estruturas como vigas, colunas, tabuleiros para pontes, pré-fabricados de túneis ou placas de revestimento de fachada e passarelas (SERAFIM e LICETTI 2012).

A Figura 1 mostra comparação entre seções transversais para diferentes tipos de materiais para suportar uma mesma carga.

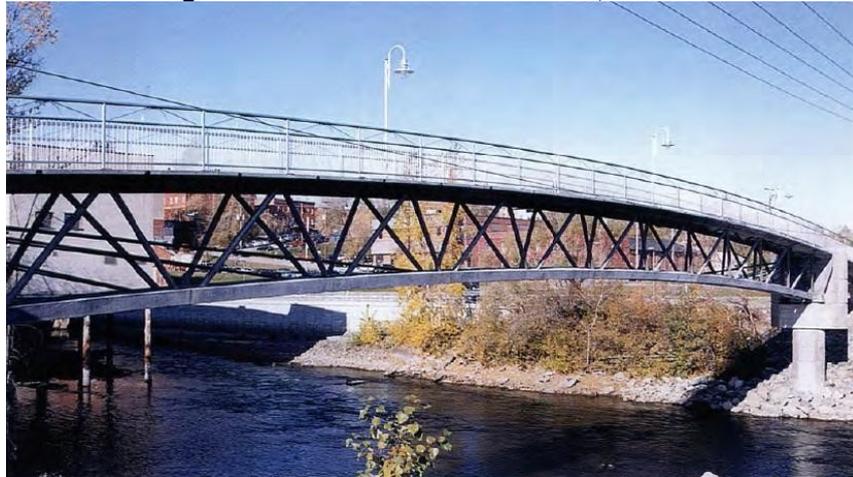
Figura 1 – Comparação de seções transversais do (a) CPR, (b) aço, (c) concreto protendido e (d) concreto convencional



Fonte: Walraven (1999)

A primeira construção a utilizar o concreto de pós reativos foi a passarela de Sherbrooke, no Canadá, em 1997, como mostra a Figura 2: vão de 60 m e uma laje de 30 mm de espessura. A passarela abrange outras inovações, como o confinamento do concreto em tubos, ausência de reforço de barras de aço e práticas precursoras no projeto e detalhamento de concreto pré-moldado e protendido (BLAIS e COUTURE, 1999).

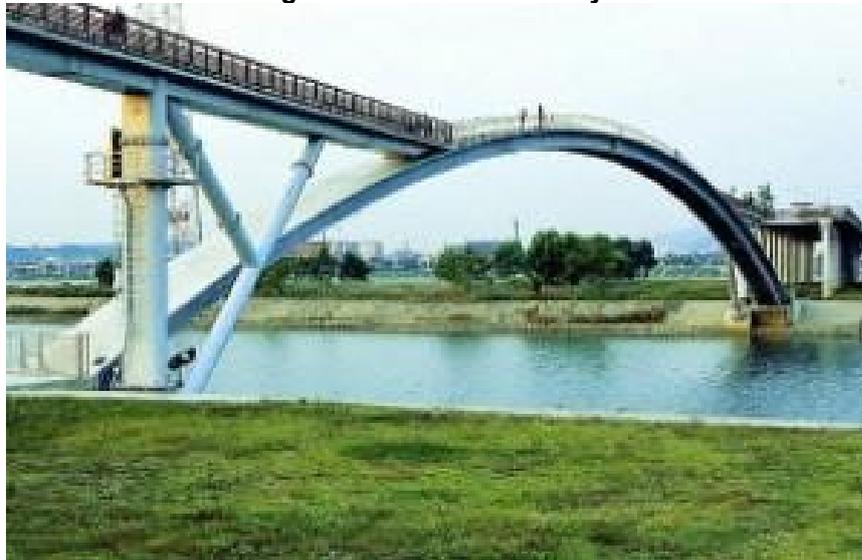
Figura 2 – Passarela de Sherbrook, Canadá



Fonte: Blais e Couture (1999)

A Figura 3 expõe outra construção icônica: a passarela Seonyu, na Coreia do Sul, inaugurada em 2002. A passarela liga a capital Seul à ilha Seonyu e possui um arco central com vão de 120 m, 4,3 m de largura e 3 cm de espessura, conforme divulgação no web site Cimento Itambé (2017).

Figura 3 – Passarela Seonyu



Fonte: Cimento Itambé (2017)

Devido à sua excelente propriedade de impermeabilidade, o concreto de pós reativos foi utilizado com sucesso, para isolamento e contenção de resíduos nucleares na Europa (MUJAMIL et al, 2015).

Bibora et. al. (2004) aponta que concretos de alto desempenho podem ser largamente estudados para entendimento mais aprofundado do material, com a

finalidade de serem utilizados para construção de paredes de proteção e bunkers, como material resistente à detonação.

Yan (2009) estudou a utilização de CPR para a construção de barreiras de proteção de estradas e constatou que o custo das barreiras em concreto armado convencional é menor, mas dada a excelente durabilidade do CPR, haveria redução do custo de manutenção; haveria também a diminuição da seção transversal, facilidade para pré-moldar, transportar e montar, e conseqüentemente o custo de construção seria reduzido, levando a uma vantagem na aplicação na engenharia de rodovias.

O CPR se encaixa na categoria de concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) e é adotada amplamente para denominar todos os concretos que não utilizam agregado graúdo e estudo granulométrico para a composição do traço a fim de alcançar as propriedades mecânicas e também durabilidade desejada, como apontam Richard e Cheyrezy (1995).

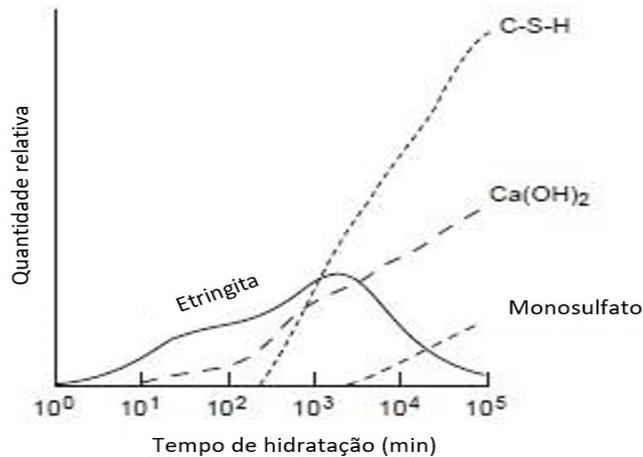
2.3 Empacotamento de partículas

O desempenho mecânico do CPR e as propriedades reológicas são influenciados pela seleção adequada dos materiais, proporção e processo de produção (AL-JUBORY, 2013).

As relações entre microestrutura e propriedades dos materiais estão no centro da ciência material moderna, mas ainda é muito difícil constituir modelos realistas de sua microestrutura, a partir da qual o comportamento do material possa ser previsto com segurança (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

O preenchimento progressivo de espaços vazios resulta na diminuição da porosidade, permeabilidade e aumento na resistência; há uma relação entre a química do processo de hidratação de uma pasta de cimento Portland e os fenômenos físicos de endurecimento, com uma diminuição correspondente de porosidade e permeabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2006). A Figura 4 demonstra as faixas típicas de formação de produtos de hidratação em uma pasta de cimento Portland comum.

Figura 4 – Faixas típicas de formação de produtos de hidratação em uma pasta de cimento Portland comum



Fonte: Mehta e Monteiro (2016)

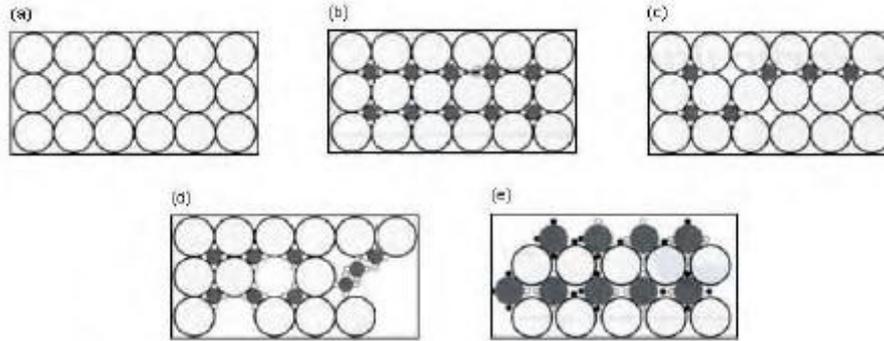
O empacotamento de partículas foi estudado pela primeira vez por Kepler, em 1611, advém de diversos campos de conhecimento (RIVA, 2010).

Para Fennis e Walraven (2012), “a densidade de empacotamento é definida como o volume sólido de partículas em um volume unitário, ou como um menos a porosidade” e a otimização do empacotamento de partículas é alcançada pela correta seleção dos tamanhos e quantidades das partículas, que devem ser selecionadas para preencher os vazios entre partículas grandes e as menores, com o objetivo de aumentar a densidade de empacotamento de partículas.

Segundo Riva (2010), existem dois casos extremos de possíveis empacotamentos: um deles, podendo-se referir a um sistema constituído de partículas de um único tamanho, o que proporciona um estado de densidade mínima, e é chamado de monodisperso, e a um sistema possuindo uma distribuição gradual do tamanho das partículas, onde as menores preenchem os espaços vazios entre as maiores em uma sucessão ideal, que proporciona um estado de densidade máxima, e é chamado de polidisperso.

Na Figura 5, é possível observar o tamanho de partículas e empacotamento, demonstrando a densidade e distribuição.

Figura 5 – Tamanho de partículas e empacotamento: (a) mínima densidade de empacotamento; (b) máxima densidade de empacotamento; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas



Fonte: Roy, Scheetz e Silsbee (1993)

Para encontrar a composição de uma mistura com a maior densidade de empacotamento, deve-se simular diversos traços, o que gasta muito tempo, e os modelos de empacotamento podem auxiliar no processo (FENNIS et. al., 2012).

Oliveira et al. (2000), baseado no trabalho de Funk e Dinger, também cita alguns conceitos considerados para o empacotamento de partículas, entre eles monodispersão, polidispersão, tamanhos discretos, distribuição granulométrica descontínua e descontínua, eficiência de empacotamento, fator de empacotamento, porosidade, volume aparente e densidade relativa de empacotamento.

Os estudos teóricos e experimentais relacionados ao empacotamento de partículas resultaram de duas abordagens básicas: discreta, que considera as partículas individualmente, e contínua, que trata as partículas como distribuições contínuas (OLIVEIRA et al., 2000).

Considerações de custo, trabalhabilidade, resistência e durabilidade podem levar à suposição de que, uma mistura de agregados mais densa, com o mínimo de vazios possível, será a mais econômica, uma vez que requer menor quantidade de pasta de cimento, o que se constata no CPR; tal suposição levou a uma série de estudos teóricos sobre a densidade de empacotamento de partículas, cujo objetivo é obter expressões matemáticas ou curvas de classificação ideais que ajudariam a determinar a combinação ideal de diferentes frações de tamanho de partículas a fim de produzir o mínimo de vazios (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Modelos analíticos de empacotamento de partículas têm como objetivo calcular a densidade teórica de empacotamento de uma mistura e os cálculos são baseados na distribuição do tamanho das partículas e na densidade de empacotamento dos diferentes grupos de partículas que compõem a mistura.

Equações matemáticas são usadas para determinar como partículas de tamanhos diferentes interagem geometricamente (FENNIS et. al., 2012).

2.3.1 Modelo de Andreasen

O modelo de Andreasen é um modelo contínuo e considera uma distribuição real, onde todos os tamanhos de partículas podem ser considerados, ou seja, uma polidispersão de distribuição contínua.

O modelo foi baseado em uma condição de similaridade entre partículas grandes e partículas menores distribuídas ao seu redor (ORTEGA et al., 1997). A equação é uma relação de uma série de potências e é dada pela equação (1):

$$\text{CPFT} = 100 * \left(\frac{D_p}{D_L} \right)^q \quad (1)$$

Sendo:

CPFT = porcentagem acumulada passante de finos;

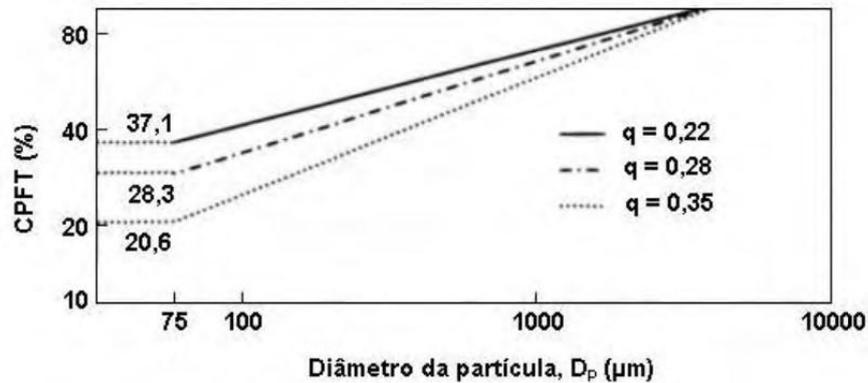
D_p = diâmetro da partícula analisada no empacotamento;

D_L = diâmetro da maior partícula do empacotamento;

q = coeficiente de distribuição.

A Figura 6 apresenta graficamente o modelo de Andreasen para o empacotamento com diferentes coeficientes de distribuição. Neste modelo, o coeficiente de distribuição e valor igual a 0,37 proporciona máximo empacotamento teoricamente possível (OLIVEIRA, 2013).

Figura 6 – Distribuição granulométrica do modelo de Andreasen



Fonte: Oliveira et.al. (2000)

2.3.2 Modelo de Alfred

O modelo de Alfred é conhecido como Modelo de Andreasen Modificado. Funk e Dinger realizaram uma série de estudos nos modelos de empacotamento, provando, assim, que os modelos de Furnas e Andreasen convergem para uma única equação, a qual o resultado é o modelo de Alfred.

Diferentemente do modelo de Andreasen, no modelo de Furnas a distribuição de partículas é discreta e o máximo empacotamento ocorre quando as partículas menores preenchem totalmente os vazios existentes entre as partículas maiores. Furnas provou que a distribuição de máxima densidade de empacotamento de vários tamanhos de partículas forma uma progressão geométrica. Assim, generalizou sua teoria para qualquer mistura com vários diâmetros discretos (OLIVEIRA, 2013). A equação de Furnas é dada pela equação (2):

$$CPFT = 100 * \left(\frac{D_p^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) \quad (2)$$

Sendo:

CPFT = Porcentagem acumulada passante de finos;

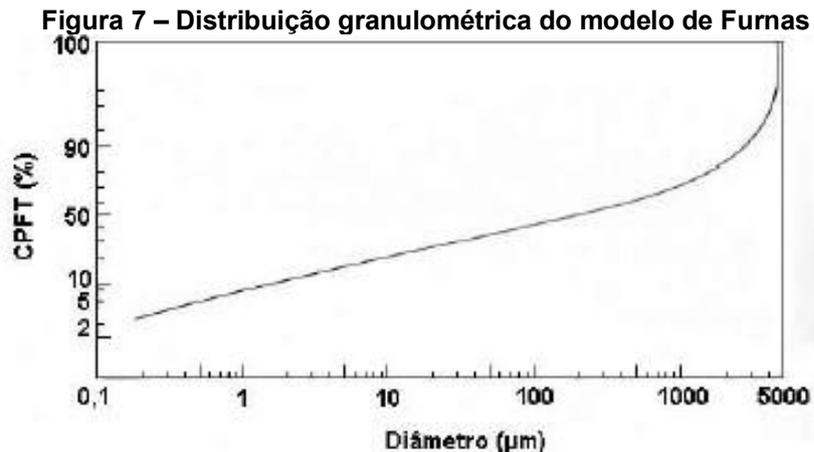
D_p = Diâmetro da partícula analisada no empacotamento;

D_s = Diâmetro da menor partícula do empacotamento

D_L = Diâmetro da maior partícula do empacotamento;

r = Razão entre os volumes de partículas retidas em uma malha de peneira e o volume da malha imediatamente inferior.

Na Figura 7 se apresenta graficamente o modelo de Furnas para o empacotamento ideal de partículas.



Fonte: Watanabe, Ishikawa e Wakamatsu, 1989, apud Oliveira et. al. (2000)

O modelo de Alfred é formulado a partir da comparação entre o modelo de Andreasen e o modelo de Furnas, provando a convergência matemática dos dois modelos. A equação do modelo é dada pela equação (3):

$$\text{CPFT} = 100 * \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (3)$$

Sendo:

CPFT = porcentagem acumulada passante de finos;

D_p = Diâmetro da partícula analisada no empacotamento;

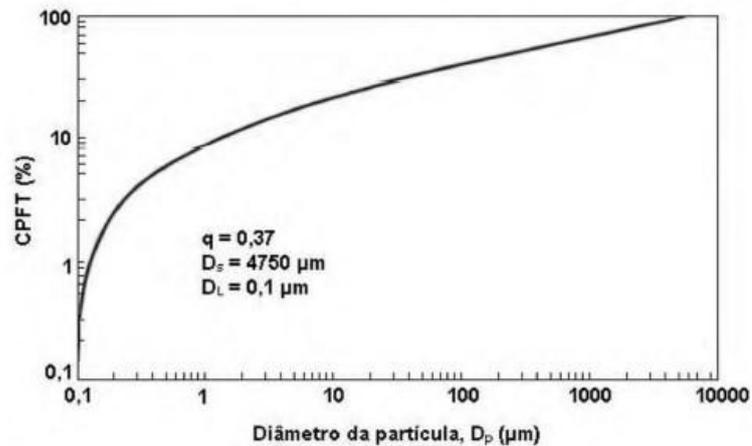
D_s = Diâmetro da menor partícula do empacotamento

D_L = Diâmetro da maior partícula do empacotamento;

q = coeficiente de distribuição.

Na Figura 8 se apresenta graficamente o modelo de Alfred para o empacotamento ideal de partículas.

Figura 8 – Distribuição granulométrica do modelo de Alfred



Fonte: Oliveira et. al. (2000)

2.3.3 Modelo de Larrard

O modelo desenvolvido por François de Larrard é chamado de Modelo de Empacotamento Compressível (MEC). O modelo abrange combinações considerado qualquer número de frações de agregados individuais, com qualquer tipo de distribuição de tamanho e é dividido em MEC virtual e MEC real (LARRARD, 1999).

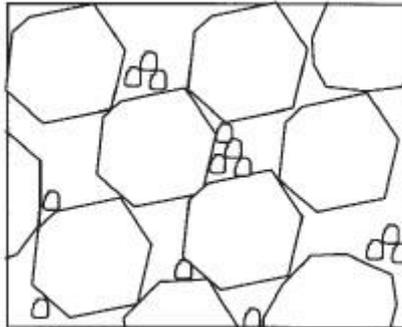
A densidade de empacotamento virtual é definida como a densidade máxima de empacotamento possível com uma dada mistura, na qual cada partícula mantém sua forma original, arranjadas idealmente, colocadas uma a uma. No caso de uma mistura de esferas de tamanho único, a densidade é igual a 0,74, a densidade de empacotamento de uma treliça cúbica centrada na face de esferas que se tocam, enquanto a densidade de empacotamento físico que pode ser medida em uma mistura aleatória se próxima de 0,60 (LARRARD, 1999).

Considerando as relações físicas dos materiais, bem como o procedimento do empacotamento, não é possível obter a compacidade máxima (virtual) no empacotamento real; assim, a compacidade real é sempre inferior à compacidade virtual. Deste modo, o método considera a relação entre o empacotamento virtual com o empacotamento real utilizando um parâmetro intrínseco ao procedimento real de empacotamento adotado, chamado fator de compactação (SOTOMAIOR, 2017).

Pode ser feita a distinção entre duas classes dominantes de grãos, onde uma delas assegura a continuidade sólida do corpo granular. Quando as partículas de maior dimensão são as dominantes, o volume será preenchido como se os grãos menores não estivessem presentes na mistura (Figura 9); quando as partículas de

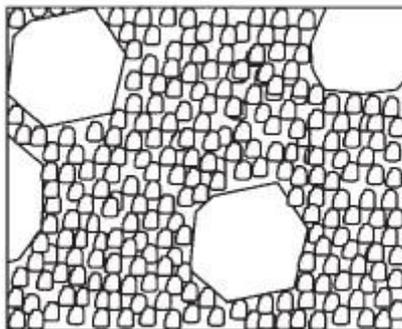
menor dimensão são as dominantes, a porosidade dos grãos de maior dimensão será empacotada pelas partículas de menor dimensão (Figura 10). Uma das duas classes sempre é dominante em misturas empacotadas, caso contrário, a mistura seria constituída por uma suspensão e não um empacotamento (LARRARD, 1999).

Figura 9 – Mistura binária sem interação. Partículas de maior dimensão dominantes



Fonte: De Larrard (1999)

Figura 10 – Mistura binária sem interação. Partículas de menor dimensão dominantes



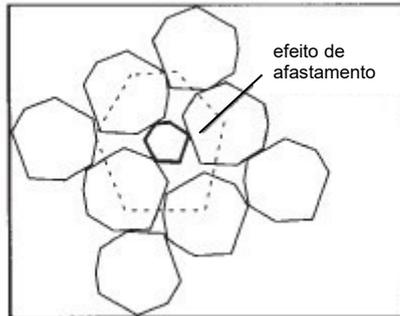
Fonte: De Larrard (1999)

Em relação à interação dos grãos, existem dois efeitos que diminuem a compacidade da mistura e ocorrem em misturas com alto grau de empacotamento: efeito parede e efeito de afastamento. Para a descrição de ambos os efeitos, faz-se a consideração de duas notações: classe 1 (partículas de maior diâmetro) e classe 2 (partículas de menor diâmetro).

O efeito de afastamento ocorre se um grão da classe 2 for inserido em um meio no qual os grãos de maior diâmetro são dominantes; se não for mais capaz de caber em um vazio, haverá diminuição do volume de grãos da classe 1, e se cada grão fino estiver suficientemente longe do próximo, esse efeito poderá ser considerado

como uma função linear do volume de grãos da classe 2 (Figura 11) (LARRARD, 1999).

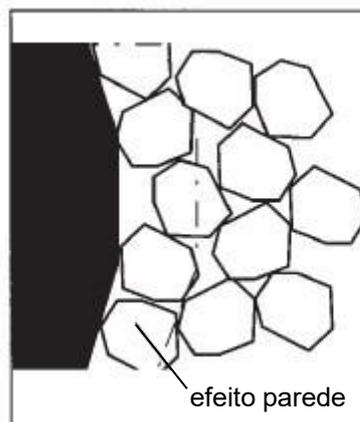
Figura 11 – Efeito de afastamento exercido por um grão classe 2 em um meio classe 1 dominante



Fonte: De Larrard (1999)

O efeito parede ocorre quando a classe 2 for dominante, e a diferença de tamanho, em relação às partículas menor e maior diâmetros, for tão discrepante de forma a tornar a superfície de contato praticamente plana, como demonstra a Figura 12 (LARRARD, 1999).

Figura 12 – Efeito parede exercido por um grão classe 1 em mistura classe 2 dominante



Fonte: De Larrard (1999)

As nomenclaturas das equações utilizadas na modelagem do empacotamento de partículas constam no Quadro 1.

Quadro 1 - Nomenclatura utilizada no modelo de empacotamento compressível

N	Número de classes granulares da mistura
d_i	Diâmetro médio da classe i
β_i	Compacidade virtual da classe i tomada individualmente
y_i	Proporção em volume da classe i na mistura
ϕ_i^*	Teor em volume máximo da classe i em presença das outras classes
ϕ_i	Teor em volume da classe i
γ^i	Compacidade virtual da mistura sendo a classe i a classe dominante
γ	Compacidade virtual da mistura
C	Compacidade experimental da mistura (real)
π	Porosidade
e	Índice de vazios
K^i	Índice de compactação parcial devido à classe i
K	Índice de compactação para a mistura

Fonte: Autoria própria (2019)

O Modelo de De Larrard abrange diversas combinações, com as subdivisões principais sendo a mistura binária de partículas e mistura polidiversa.

Uma mistura binária é composta por duas classes granulares de diâmetros respectivos d_1 e d_2 , onde d_1 é maior que d_2 , a se considerar mistura binária sem interação entre partículas, mistura binária com interação total, mistura binária com interação parcial.

Uma mistura é polidiversa quando é constituída por mais de duas classes de grãos, a se considerar mistura polidiversa sem interação, mistura polidiversa com interação composta de N classes monodispersas e mistura polidiversa composta por M materiais com N classes, combinação na qual se enquadra o concreto de pós reativos dada sua composição.

No caso do cálculo da compacidade virtual de uma mistura polidispersa composta por M materiais divididos em N classes, considera-se que a faixa de cada umas das classes é fixa e o teor de cada classe não pode variar no interior do material ao qual ela pertence; a variação da fração volumétrica de uma classe pertencente a um dado material só se dará se for variado o teor deste material como um todo (SILVA, 2004). Todos os materiais são compostos pelas mesmas classes granulares (mesmas faixas granulométricas), mesmo que algumas classes apresentem fração volumétrica zero em alguns materiais (SOTOMAIOR, 2017).

A compacidade virtual da mistura, considerando a classe i como dominante é dada pela expressão:

$$\gamma^i = \frac{1}{\sum_{k=1}^M P_k \delta_{ki}} \quad (4)$$

Sendo δ_{ki} dado pela fórmula:

$$\delta_{ki} = \sum_{j=1}^i \left[1 - b_{ij} \left(1 - \frac{1}{\beta_{kj}} \right) \right] y_{kj} + \sum_{j=i+1}^N \frac{a_{ij} * y_{kj}}{\beta_{kj}} \quad (5)$$

A compacidade real para uma mistura polidispersa contendo M materiais e N classes pode ser obtida pela equação:

$$K = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{k=1}^M \frac{P_k * y_{ki}}{\beta_{ki}}}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma^i}} \quad (6)$$

2.3.4 Modelo de Toufar

O modelo de Toufar considera duas classes de agregados, finos e grossos, constituídas por esferas perfeitas de um mesmo diâmetro. O modelo otimiza o empacotamento dos agregados, apenas, considerando que o cimento ocupará os espaços vazios deixados pelos agregados. Ao longo de diversos estudos, comparações com ensaios mostraram que o modelo prevê que a densidade de empacotamento de uma amostra de partículas mais grossas não aumenta quando uma pequena quantidade de partículas finas é adicionada, pois supõem-se que as partículas finas são posicionadas entre quatro partículas grossas; então foi criado o modelo de Toufar modificado para corrigir esta consideração irreal (FENNIS, 2012).

A formulação matemática é dada por:

$$\alpha_t = \frac{1}{\frac{r_1}{\alpha_1} + \frac{r_2}{\alpha_2} - r_2 \left(\frac{1}{\alpha_2} - 1 \right) * k_d * k_s} \quad (7)$$

Sendo:

α_t = Densidade de empacotamento;

r_i = Volume da partícula i;

α_i = Densidade da partícula i.

O coeficiente k_d é dado pela equação:

$$k_d = \frac{d_2 - d_1}{d_1 + d_2} \quad (8)$$

O coeficiente k_s é dado pela equação:

$$k_s = 1 - \left[\frac{1-4x}{(1-x)^4} \right] \text{ para } x < 0,4753 \quad (9)$$

Ou:

$$k_s = \frac{0,3881x}{0,4753} \text{ para } x \geq 0,4753 \quad (10)$$

Sendo:

d_i = Diâmetro da partícula i.

O coeficiente x é dado por:

$$x = \frac{r_1}{r_2} * \frac{\alpha_2}{\alpha_1 * (1 - \alpha_2)} \quad (11)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para composição do concreto a ser ensaiado são descritos a seguir e a caracterização de cada um foi obtida através de dados dos fabricantes e caracterização por ensaios em laboratório.

Foram realizadas simulações numéricas baseadas nos modelos de empacotamento, a fim de determinar o traço do concreto referentes a cada modelo e posterior confecção dos corpos de prova para 2 idades - 97 dias e 112 dias.

3.1 Caracterização dos materiais

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na composição do concreto foi o cimento Portland CP V – ARI, proveniente do estoque disponível de materiais da universidade, cujas especificações constam nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Propriedades químicas do cimento, em %

Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda ao Fogo	CaO L.	Res Ins.	Eq. Alc.
4,26	18,93	2,72	60,73	4,11	2,99	3,30	0,68	0,77	0,71

Fonte: Adaptado do fabricante (2019)

Tabela 2 - Propriedades físicas do cimento

Exp. Quente mm	Cons. Normal %	Blaine cm ³ /g	#200 %	#325 %	Tempo de Pega (h:min)		Resistência à Compressão (MPa)		
					Início	Fim	3 dias	7 dias	28 dias
0,23	30,0	4.342	0,04	0,43	03:30	04:11	38,7	44,5	53,0

Fonte: Adaptado do fabricante (2019)

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia de origem quartzosa, proveniente de cava de rio de duas localizações distintas e disponível no estoque da universidade. Os materiais foram caracterizados conforme os ensaios descritos nas seguintes normas:

- Determinação da massa específica e massa específica aparente NBR NM 52 (ABNT,2009);

- Determinação da composição granulométrica NBR NM 248 (ABNT,2003), e;
- Determinação da massa unitária e do volume de vazios NBR NM 45 (ABNT,2006).

Os agregados miúdos foram identificados como Areia 1 e Areia 2. As tabelas 3, 4 e 5 apresentam os resultados dos ensaios realizados.

Tabela 3 - Massa unitária e massa específica dos agregados miúdos

Agregado	Massa unitária (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)
Areia 1	1,70	2,59
Areia 2	1,28	2,56

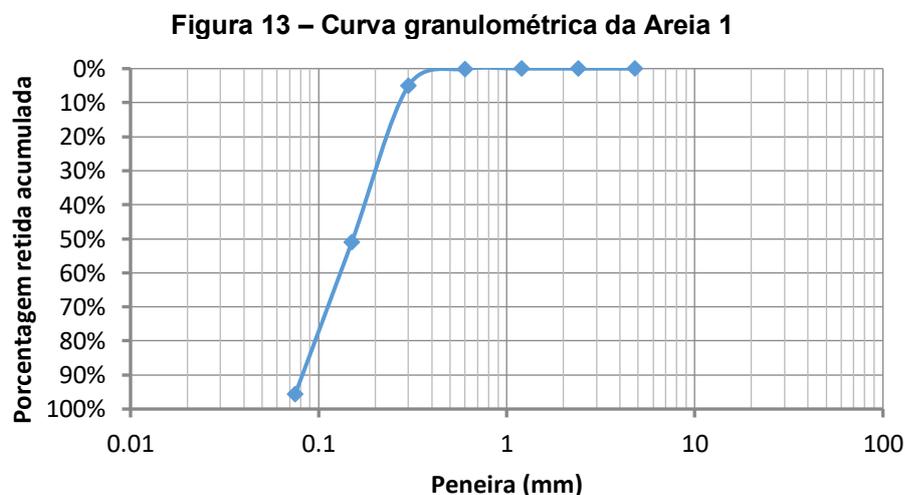
Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 4 - Composição granulométrica da Areia 1

Peneira	Massa retida (g)	% retido	% retido acumulado
4,8	0	0,0	0,0
2,4	0	0,0	0,0
1,2	0	0,0	0,0
0,6	0,4	0,1	0,1
0,3	14,7	5,0	5,1
0,15	136,1	45,9	51,0
0,075	132,8	44,8	95,7
Fundo	12,7	4,3	100,0
Total	296,7	Módulo de Finura	
		2,50	

Fonte: Autoria própria (2020)

A partir dos dados da Tabela 4 gerou-se o gráfico da curva granulométrica da Areia 1, mostrado na Figura 13:



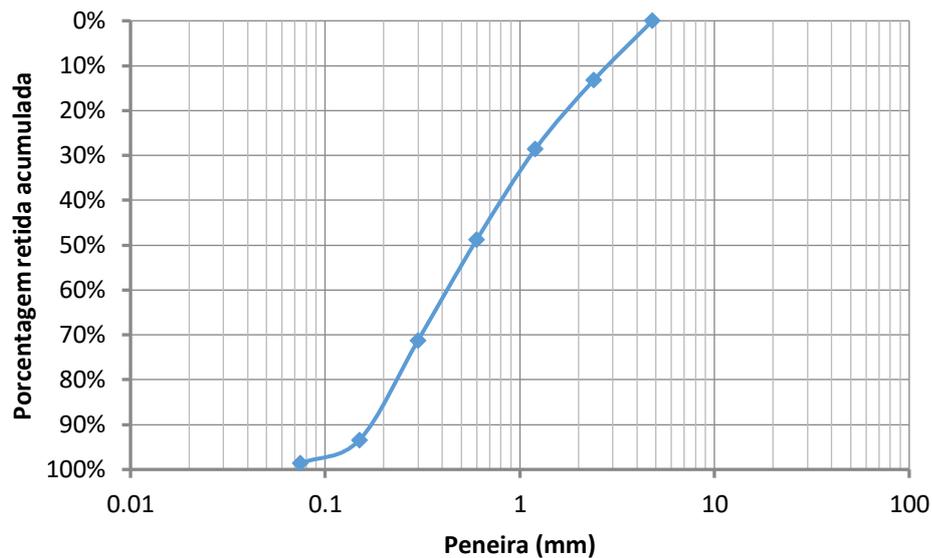
Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 5 - Composição granulométrica da Areia 2

Peneira	Massa retida (g)	% retido	% retido acumulado
4,8	0	0,0	0,0
2,4	57,5	13,2	13,2
1,2	66,8	15,4	28,6
0,6	87,8	20,2	48,8
0,3	97,7	22,5	71,2
0,15	96,7	22,2	93,4
0,075	22,4	5,1	98,6
Fundo	6,1	1,4	100,0
Total	435	Módulo de Finura	
		4,50	

Fonte: Autoria própria (2020)

A partir dos dados da Tabela 5 gerou-se o gráfico da curva granulométrica da Areia 2, mostrado na Figura 14:

Figura 14 – Curva granulométrica da Areia 2

Fonte: Autoria própria (2020)

3.1.3 Água de amassamento

A água utilizada é proveniente da rede pública de Curitiba, que está dentro dos parâmetros estabelecidos pela NBR 15900-1 (ABNT,2009), considerando-se, assim, desnecessários os ensaios em relação a estes parâmetros.

3.1.4 Sílica ativa

A adição de sílica ativa utilizada tem teor de SiO₂ superior a 85% e massa específica de 2,2 g/cm³, proveniente do estoque disponível de materiais da universidade, de acordo com dados do fabricante.

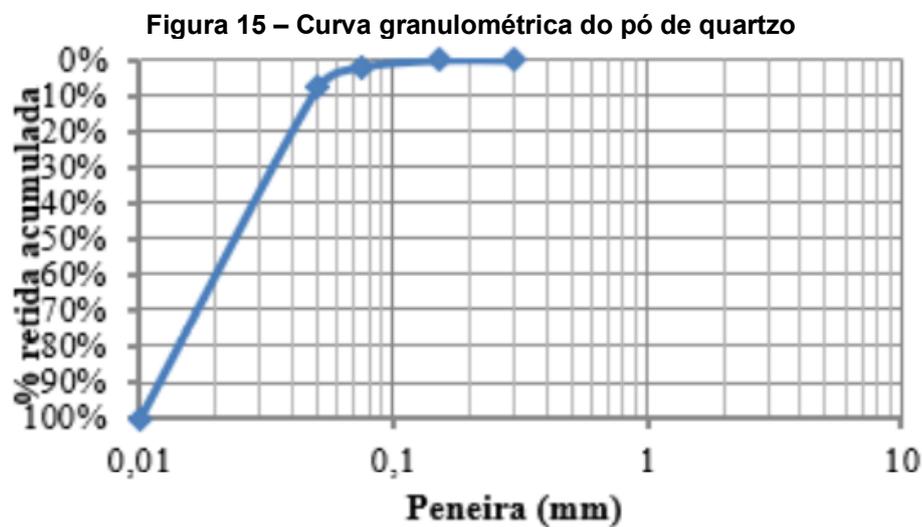
3.1.5 Pó de quartzo

O pó de quartzo, proveniente do estoque disponível de materiais da universidade, possui propriedades apresentadas na Tabela 6 e Figura 15.

Tabela 6 - Propriedades e características químicas do pó de quartzo, em %

Umidade	0,020
Perda ao fogo	0,130
Teor de SiO ₂	>99,00
Teor de Fe ₂ O ₃	<0,050
Teor de Al ₂ O ₃	<0,300
Teor de TiO ₂	<0,035

Fonte: Autoria própria (2020)



Fonte: Fabricante (2020)

3.1.6 Aditivo superplastificante

Considerando a baixa relação água/cimento, proveniente do estoque disponível de materiais da universidade, foi utilizado um aditivo redutor de água tipo 2 – superplastificante sintético líquido à base de polímeros policarboxilatos (PCE). De

acordo com dados do fabricante, o aditivo tem densidade 1,12 kg/L e dosagem recomendada $\geq 0,2\%$ $\leq 5,0\%$ sobre o peso do cimento.

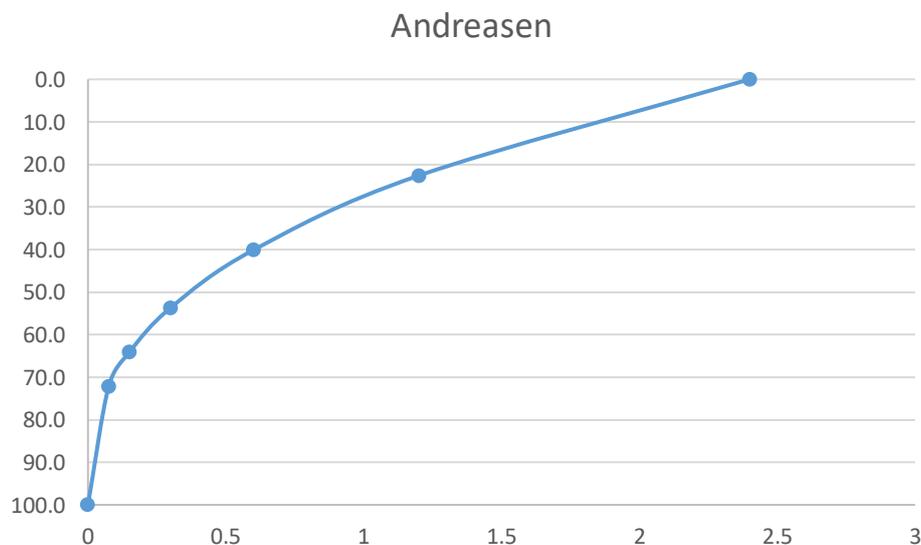
3.2 Empacotamentos

Para efetuar o empacotamento dos agregados, inicialmente, foram calculados os modelos teóricos de Andreasen, Alfred, Toufar e De Larrard para a determinação das curvas granulométricas ótimas. Em seguida, foi calculada a mistura das areias disponíveis, determinando o percentual de cada uma, para se obter uma curva granulométrica mais próxima possível das curvas granulométricas ótimas.

3.2.1 Curvas dos modelos

Para a determinação da curva ótima pelo modelo de Andreasen foram utilizados como diâmetro máximo do agregado a peneira 2,4mm e o mínimo a peneira 0,075mm, conforme dados das curvas granulométricas dos agregados existentes. Para o coeficiente de empacotamento foi adotado o valor de 0,37, conforme verificado por Maia (2021) como sendo o coeficiente que fornece o melhor empacotamento dos agregados. Com base nesses parâmetros e utilizando a equação (1) foi obtida a curva granulométrica ótima indicada na Figura 16.

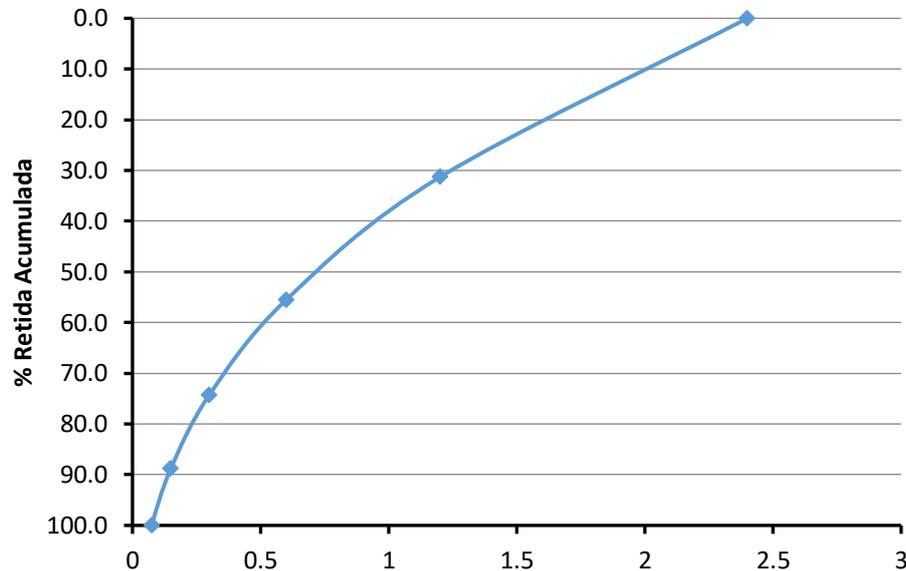
Figura 16 - Curva ótima dada pelo modelo de Andreasen.



Fonte: Autoria própria (2021)

Para o modelo de Alfred foram utilizados os mesmos parâmetros e curva ótima obtida pela aplicação da equação (3) é apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Curva ótima dada pelo modelo de Alfred.



Fonte: Autoria própria (2021)

Ao se calcular o Módulo de Finura das duas curvas foram obtidos os valores de 3,52 para a curva dada pelo modelo de Andreasen e de 3,50 para a curva dada pelo modelo de Alfred. Como o módulo de finura dos dois modelos foram muito próximos optou-se por utilizar apenas um deles para se efetuar a mistura das areias.

Para se obter a mistura das areias a serem utilizadas foi desenvolvido um sistema de equações onde se buscou por uma mistura que produzisse o mesmo módulo de finura dos modelos (3,50), sendo considerado o valor X para o percentual da areia fina a ser utilizado e o valor Y para o percentual da areia média a ser utilizado, sabendo-se que a soma dos dois percentuais equivale a 100% das areias utilizadas. Desse modo tem-se o sistema dados pela equação (12).

$$\begin{aligned} 2,50X + 4,50Y &= 3,50 \\ X + Y &= 1,0 \end{aligned} \quad (12)$$

A resolução desse sistema de equações indica que o percentual a ser utilizado de cada areia é de 50%.

Como a aplicação do modelo de De Larrard consiste no cálculo do coeficiente de empacotamento dado pela mistura de dois agregados, conforme equação (4), foram efetuadas diversas simulações de misturas das areias até se obter o maior valor

de empacotamento. Na Tabela 7 é apresentado a parte do procedimento em que aparece o maior valor de empacotamento obtido.

Tabela 7 - Procedimento de cálculo do modelo de De Larrard

y1	0,68	0,69	0,7	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	0,78
y2	0,32	0,31	0,3	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,22
Σ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
a1	0,178	0,178	0,178	0,178	0,178	0,178	0,178	0,178	0,178	0,178	0,178
2	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
b1	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046
2	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
g1	0,869	0,860	0,852	0,843	0,835	0,827	0,819	0,811	0,804	0,796	0,789
	38	65	10	71	49	42	51	75	14	67	33
g2	0,748	0,753	0,759	0,764	0,770	0,776	0,782	0,788	0,794	0,800	0,807
	19	69	28	94	69	53	46	48	59	80	11
f =	0,618	0,620	0,621	0,622	0,623	0,623	0,622	0,621	0,620	0,618	0,616
	5	0	5	5	0	0	5	5	5	5	5
K =	4,504	4,498	4,504	4,507	4,508	4,506	4,503	4,497	4,505	4,494	4,495

Fonte: Autoria própria (2020)

Na Tabela 7 é possível observar que o maior valor de empacotamento é de 0,623 para a mistura de 72% da areia fina e 28% da areia média, sendo esse o percentual de mistura adotado para a moldagem do CPR para esse modelo.

O modelo de Toufar, conforme equação (7), segue o mesmo princípio do modelo anterior, onde é necessário efetuar diversas misturas e observar o valor do empacotamento dado pela mistura. Na Tabela 8 é apresentado o procedimento de cálculo deste método.

Tabela 8 - Procedimento de cálculo do modelo de Toufar.

Mist.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r1	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59
r2	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41
x	1,5235	1,5857	1,6505	1,7180	1,7885	1,8621	1,9390	2,0196	2,1039	2,1924
ks	0,8251	0,8357	0,8460	0,8558	0,8651	0,8741	0,8826	0,8908	0,8986	0,9059
at	0,7277	0,7287	0,7295	0,7301	0,7305	0,7308	0,7308	0,7307	0,7304	0,7299

Fonte: Autoria própria (2020)

Para este modelo é possível observar na Tabela 8 que o maior valor de empacotamento foi obtido para a mistura 55% da areia fina e 45% da areia média.

3.3 Traços dos concretos

Com a aplicação das formulações apresentadas e as curvas de cada modelo, foi possível obter os traços e a composição de cada um, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Composição dos traços dos modelos de empacotamento, em gramas

Modelo	Cimento	Areia 1	Areia 2	Pó de quartzo	Sílica ativa	Água	Aditivo superplastificante
Alfred/Andreasen	685	777	777	68	70	151	35
Toufar	685	855	699	68	70	151	35
De Larrard	685	1119	435	68	70	151	35

Fonte: Autoria própria (2020)

3.4 Mistura dos materiais

Cada um dos materiais foi pesado e armazenado separadamente. A mistura dos materiais secos se deu ao adicionar um componente por vez em um recipiente, seguindo a ordem: areia, cimento, pó de quartzo e sílica ativa, até obter boa homogeneização.

Para preparo do concreto, inicialmente adicionava-se uma pequena quantidade de água e aditivo na bacia da argamassadeira, prosseguindo com a adição de uma parcela da mistura dos materiais secos. Acompanhando a mistura, ao observar o aumento de consistência da massa, era adicionado mais água e aditivo, e assim era intercalado até se utilizar todo o material. O processo de mistura na argamassadeira durava cerca de 10 minutos.

3.5 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados 5 corpos de prova para cada uma das idades dos modelos. Os corpos de prova eram do tipo cilíndrico, 10 cm de altura de 5 cm de diâmetro, com fundo removível. Todos os moldes receberam uma camada de desmoldante. Imediatamente após o preparo da massa, os moldes foram preenchidos com o

concreto em três etapas, com adensamento por queda livre a 3 cm superfície da bancada, 10 quedas a cada camada.

3.6 Cura dos corpos de prova

Após 48 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em cura submersa até completar 97 e 112 dias.

3.7 Ensaio de resistência à compressão

Nas idades de ensaio, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e rompidos conforme a NBR 5739 (2018) utilizando o equipamento de ensaio universal Emic DL30.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinar a resistência do concreto de pós reativos produzido para cada um dos modelos de empacotamento, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão axial na prensa hidráulica do laboratório de ensaios da universidade.

Com base nos dados obtidos após o ensaio, foi realizada uma análise dos valores a fim de identificar possíveis dados espúrios para, subsequentemente, fazer uma análise estatística e verificar se os traços advindos dos cálculos dos modelos influenciam na resistência à compressão do concreto.

4.1 Ensaio de compressão axial

Na Tabela 10 são apresentados os resultados da média de 5 corpos de prova para a resistência à compressão axial do concreto aos 97 dias.

Tabela 10 - Resistência à compressão axial aos 97 dias¹

	Toufar	De Larrard	Alfred/Andreasen
Média (MPa)	55,0a	41,5a	52,7a
Desvio Padrão (MPa)	5,1	10,2	15,7
Coef. Variação	9,3	24,5	29,7

Fonte: Autoria própria (2021)

Observa-se nos resultados apresentado na Tabela 10 que os valores de resistência à compressão estão inferiores aos valores usuais de concreto de pós reativos porque não foi possível efetuar a cura térmica pela impossibilidade de acesso à universidade durante o período de pandemia, tendo prejudicado o estudo. Também é possível verificar uma grande variabilidade nos resultados e isto pode ser reflexo da moldagem ou da retífica do topo dos corpos de prova.

Apesar dos valores absolutos de resistência à compressão obtidos nos corpos de prova dosados pelo modelo de Toufar serem superiores aos demais, estatisticamente eles são considerados iguais, a um nível de confiança de 95%.

A Tabela 11 apresenta os resultados médios de 5 corpos de prova de resistência à compressão axial do concreto aos 112 dias.

¹ Letras iguais correspondem a valores estatisticamente iguais

Tabela 11 - Resistência à compressão axial aos 112 dias¹

	Toufar	De Larrard	Alfred/Andreasen
Média (MPa)	63,4a	66,4a	76,4a
Desvio Padrão (MPa)	4,8	11,8	14,3
Coef. Variação	7,6	17,8	18,7

Fonte: Autoria própria (2021)

Já para a idade de 112 dias se observa que o valor absoluto de resistência dada pelo modelo de Alfred e Andreasen se apresentou superior aos demais, porém estatisticamente, a um nível de confiança de 90%, são considerados iguais. Também é possível observar uma grande variabilidade nos resultados.

4.2 Análise dos resultados

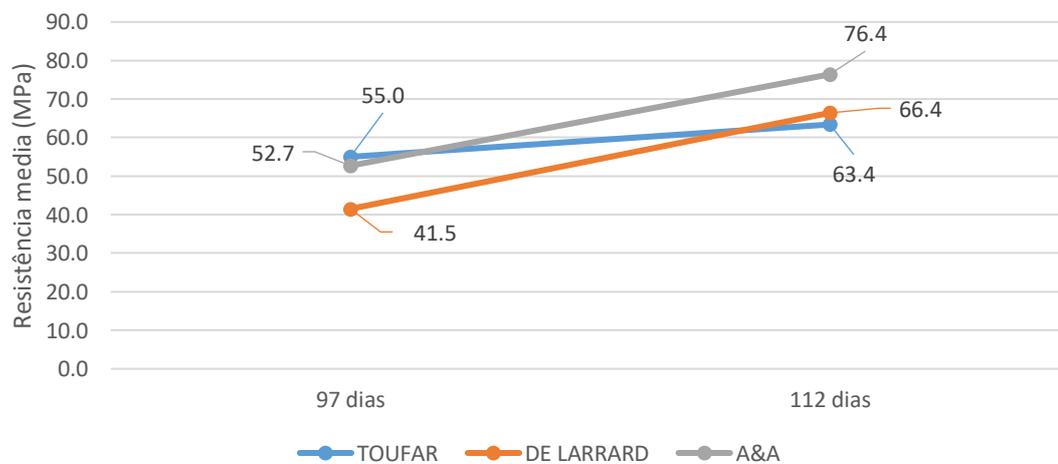
A Tabela 12 e a Figura 18 apresentam a evolução da resistência à compressão axial média do concreto aos 97 e 112 dias.

Tabela 12 - Resistência à compressão axial média, em MPa¹

	97 dias	112 dias
Toufar	55,0a	63,4a
De Larrard	41,5b	66,4c
Alfred/Andreasen	52,7de	76,4d

Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 18 – Resistência à compressão axial média, em MPa



Fonte: Autoria própria (2021)

¹ Letras iguais correspondem a valores estatisticamente iguais

Nestes resultados é possível observar a evolução da resistência à compressão de 97 dias para 112 dias, nos três modelos de empacotamento adotados.

Estatisticamente, a um nível de confiança de 95%, é possível afirmar que, para o modelo de Toufar as resistências à compressão são iguais em todas as idades. Já para o modelo de De Larrard existe diferença estatística entre as idades de 97 dias e de 112 dias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência de modelos de empacotamento de partículas na resistência à compressão de um concreto de pós reativos.

Os resultados dos ensaios realizados indicam que há diferença entre os valores das resistências na mesma idade, mas estatisticamente, entre os modelos, não há diferença significativa.

Entre as duas idades analisadas, foi observado o ganho de resistência com o passar do tempo, comportamento natural do concreto, dada a continuidade do processo de hidratação do cimento durante a vida do material.

Os concretos produzidos utilizando os modelos de empacotamento não alcançaram valores semelhantes aos encontrados em estudos anteriores. Dentre os motivos, considera-se o efeito de possível falha durante o processo de moldagem dos corpos, bem como a retífica dos topos. Considera-se também a impossibilidade da realização de processo de cura térmica, ponto fundamental para a melhoria da microestrutura da pasta, uma vez que a cura térmica proporciona uma matriz com maior quantidade de partículas de cimento hidratado, que, sob elevadas temperaturas, acelera o crescimento da resistência à compressão do concreto. O fato de não haver um modelo de dosagem e de empacotamento específico para o concreto de pós reativos pode influenciar nos resultados a serem atingidos.

Com base nos resultados obtidos, acredita-se que não é possível afirmar que um método de empacotamento se destaque em relação aos outros..

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- Repetir este estudo utilizando cura térmica;
- Avaliar o efeito da duração da cura térmica em cada modelo de empacotamento;
- Desenvolvimento de um modelo de dosagem específico para o concreto de pós reativos; e

- Acrescentar o pó de quartzo e a micro sílica nos procedimentos de empacotamento dos grãos.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 5739** – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

AÏTCIN, P. C. **Binders for durable and sustainable concrete**. 2. ed. Nova Iorque: Taylor & Francis, 2008.

AÏTCIN, P. C. **High-performance concrete**. 2. ed. Nova Iorque: E & FN Spon, 2004.

AL-JUBORY, N. H. Mechanical properties of Reactive Powder Concrete (RPC) with mineral admixture. **Al-Rafidain Engineering**. v.28, n. 5, p. 92-101 out. 2013.

BIBORA, P.; DRDLOVÁ, M.; PRACHAŘ, V.; SVITÁK, O. UHPC for Blast and Ballistic Protection, Explosion Testing and Composition Optimization. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, n. 251, p. 1-11, jan. 2004.

BIZ, C. E. **Concreto de Pós Reativos**. 2001. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.

BLAIS, P. Y.; COUTURE, M. Precast, Prestressed Pedestrian Bridge World's First Reactive Powder Concrete Structure. **PCI Journal**, p. 60-71, set. 1999.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica 55**, p.18-32, 2009.

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

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. 1. ed. Londres: E & FN Spon, 1999.

DUGAT, J.; ROUX, N.; BERNIER, G. Mechanical properties of Reactive Powder Concrete. **Material and Structures**, v. 29, p.233-240, mai. 1996.

FENNIS, S. A.A.M.; WALRAVEN, J. C. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. **Heron**, v. 57, n. 2, p. 73-102, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 3. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2006.

MUJAMIL, K.; VINAY, D.; SIKANDAR, M.A.; SHRIDHAR, B. M.; KULKARNI, K. S. Mechanical properties of Reactive Powder Concrete for different curing regimes. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**. v. 8, n. 6, p. 2698-2702, dez. 2015.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto** [recurso eletrônico]; tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. 2013, 141 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2013.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico. **Fazendo Arte Editorial**, São Paulo (SP), 2000.

ORTEGA, F. S.; PILEGGI, R. G.; SEPÚLVEDA, P.; PANDOLFELLI, V. C. Influência dos Modelos de Alfred e de Andreasen sobre a microestrutura e densidade a verde de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem. **Cerâmica** **43**, p.183-189, 1997.

QUAIS obras usam concreto de ultra-alto desempenho?. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/quais-obras-usam-concreto-de-ultra-alto-desempenho/>>. Acesso em: 24/11/2019.

RAHMATABADI, M. A. D. Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete under Pre-Setting Pressure and Different Curing Regimes. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, v. 4, n. 4, p. 354-358, nov. 2015.

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

RIVA, R. D. D. **Efeitos das propriedades físicas dos grãos da fração areia de solos arenosos e de agentes de cimentação no comportamento de sistemas empacotados**. 2010. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ROY, D. M.; SCHEETZ, B. E.; SILSBEE, M. R. Processing of optimized cements and concretes via particle packing. **MRS Bulletin**, Nova Iorque, v. 18, p. 45-49, 1993.

SERAFIM, D.; LICETTI, J. **Análise do desempenho de três tipos de cimento no concreto de pós-reativos**. 2012, 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

SOTO, N. T. A. **Avaliação das propriedades do concreto de pós reativos: um estudo de durabilidade**. 2013. 58 f. Monografia (Especialização em Patologias das Construções) - Departamento Acadêmico de Construção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013

SOTOMAIOR, M. J. **Estudo de modelos de empacotamento de agregados para concretos**. 2017. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 168 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

YAN, G. Application of reactive powder concrete in highway barriers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION ENGINEERING, 2009. p. 1232-1237.

ANEXO A - Relatórios de ensaio

