

# PRODUÇÃO DE CONCRETO DE FLUIDEZ CONTROLADA (CFC) COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADOS NATURAIS POR RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Pedro Martins Ferreira Sampaio<sup>1</sup>; Heloísa Cristina Fernandes Cordon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup>Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

## Resumo.

*Uma nova categoria de concreto chamada de “Control Flow Concrete” ou Concreto de Fluides Controlada (CFC) surgiu recentemente para preencher a lacuna entre o concreto convencional e o concreto autoadensável, mesclando características importantes de cada tipo de concreto. A resistência do CFC pode ser equivalente à do concreto convencional, no entanto o CFC oferece maior fluidez e resistência à segregação a um custo menor do que o concreto autoadensável, sendo utilizados os mesmos materiais para sua produção, porém com uso de aditivos inovadores que possuem policarboxilatos e melhoradores reológicos como base química principal. Resíduos originários da própria indústria da construção civil, como os resíduos de construção e demolição (RCD), atraem negativamente a atenção da sociedade devido ao seu difícil descarte e seu crescente volume acumulado. Sob esta ótica e abrangendo o método de empacotamento de partículas, que se utiliza das características físicas dos materiais empregados na mistura para a produção de um concreto de melhor desempenho, analisou-se a produção de um CFC referência classe C25 utilizando agregados naturais, comparando as propriedades mecânicas e reológicas com um CFC substituindo 10% e 20% em massa do agregado gráudo natural por RCD, com um consumo de cimento fixado em  $340 \text{ kg.m}^{-3}$ . O desempenho do traço foi analisado por meio de ensaios em seu estado fresco, onde todos os traços apresentaram classe de espalhamento SF1 (entre 550 e 650 mm) e estado endurecido, em que os resultados de resistência à compressão apresentaram um decréscimo de 11% no concreto com maior teor de substituição (20% de RCD) com relação ao traço de referência aos 28 dias, indicando que é possível produzir um CFC com RCD e que a redução no desempenho mecânico se torna um desafio superável mediante à possibilidade de redução do impacto ambiental causado pelo RCD, uma vez que é possível reutilizar o resíduo, minimizando, assim a exploração de jazidas naturais.*

## 1. Introdução

Apesar do concreto convencional, produzido através da mistura de cimento Portland, com areia, brita e água, ser material de construção mais utilizado no mundo, atualmente não se pode mais considerar apenas o estudo sobre ele. O concreto de fluidez controlada (Control Flow Concrete – CFC) é uma nova categoria de concreto altamente fluido, que proporciona um comportamento reológico distinto do convencional, e até mesmo do concreto autoadensável.

O CFC é possível de ser formulado devido ao uso dos aditivos de policarboxilatos modificadores de viscosidade, utilizando-se misturas do concreto convencional, com menor teor de pó do que os concretos autoadensáveis. Oferece vantagem na diminuição da demanda de mão de obra e tempo para colocação de concreto, sem risco de segregação e tem benefícios ambientais em comparação ao concreto autoadensável.

Uma vez que os recursos naturais estão cada vez mais escassos, é necessária a preservação do meio ambiente e, para o setor da construção civil, uma maneira de reduzir o impacto ambiental é formulando concretos que sejam mais ecológicos, pois a indústria cimenteira é uma das indústrias com maior porcentagem de emissões de CO<sub>2</sub> no planeta já que ele é um dos recursos mais utilizados no mundo (MEHTA, P. K.; MONTEIRO, 2008).

ÂNGULO ET AL (2002) ressaltam que, no Brasil, é necessário desenvolver outros mercados para garantir a reciclagem em grande escala dos resíduos da construção civil (RCC), também denominados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), pois no atual estágio de conhecimento, a utilização de agregados reciclados de RCC como base de pavimentação é a

única alternativa tecnologicamente consolidada.

Neste projeto, com a utilização do método de empacotamento de partículas, que possibilita calcular as proporções necessárias de materiais para a produção do concreto, visando minimizar os espaços vazios entre as partículas, buscou-se alcançar o concreto de fluidez controlada, onde o agregado graúdo natural foi substituído de 10 a 20% em massa, por agregado reciclado de RCD, mantendo as características mecânicas.

## 2. Objetivo

Estudar o impacto da substituição parcial de agregados naturais por resíduos de construção e demolição (RCD) nas propriedades de estado fresco e estado endurecido de concretos de fluidez controlada.

## 3. Material e Métodos

### 3.1. Caracterização dos Materiais

Os materiais utilizados no estudo foram cimento Portland CPV-ARI, areia rosa (AR), areia de brita (AB), brita zero natural (B0), resíduos de construção e demolição (RCD) e o aditivo Concera SA8212 redutor de água e modificador de reologia de alto desempenho a base de policarboxilato, utilizado na produção de concretos com alta fluidez. O RCD foi obtido a partir resíduos fornecidos pela Urbem e tiveram sua granulometria ajustada, entre as peneiras com malhas de 12,5mm e 1,18mm de modo a coincidir com a Brita 0.

A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica do cimento (a) e dos materiais inertes (b). Para os materiais inertes aplicou-se o peneiramento conforme a norma ABNT NBR 248 (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003). Para o cimento, a granulometria foi obtida por difração a laser. As massas específicas de cada componente sólido, determinadas por picnometria a gás, estão apresentadas na Tabela 1.

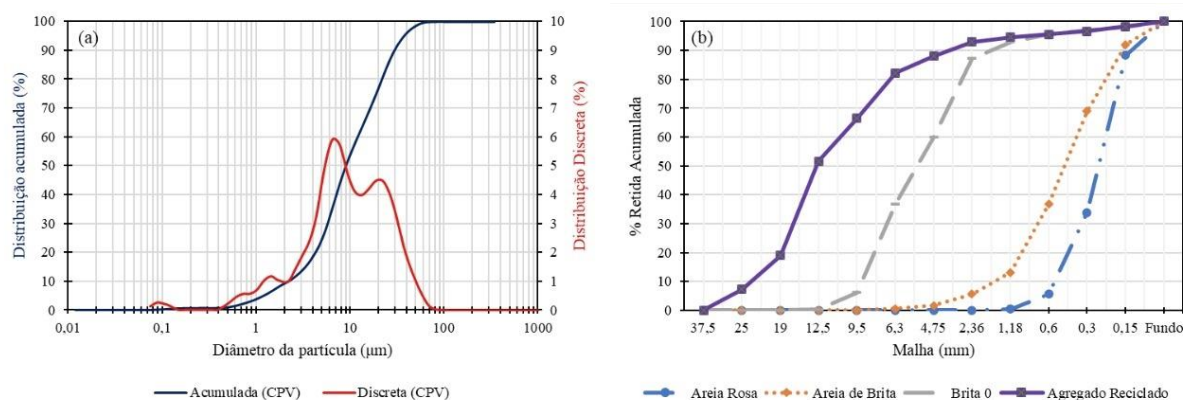


Figura 1- Distribuição granulométrica dos agregados

Tabela 1 - Massa Específica dos Materiais.

Material	CPV	Areia Rosa	Areia de Brita	Brita 0	Brita RCD
<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	3,021	2,659	2,656	2,601	2,569

### 3.2 Empacotamento de Partículas

Empacotamento de partículas consiste na seleção adequada da proporção e tamanho dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Alguns modelos de empacotamento têm sido propostos como ferramentas teóricas para calcular a densidade de empacotamento das partículas e, assim, otimizar misturas granulares de

concreto. Os estudos teóricos e experimentais resultaram em duas abordagens básicas: uma abordagem discreta proposta por Furnas (Equação 1), que considera as partículas de maneira individual, e a abordagem contínua, modelo de Andreasen (Equação 2), que considera as partículas como distribuições contínuas.

$$CPFT(\%) = 100 \left( \frac{D^{\log.r} - D_s^{\log.r}}{D_L^{\log.r} - D_s^{\log.r}} \right) \quad \text{Equação 1}$$

$$CPFT(\%) = 100 \left( \frac{D}{D_L} \right)^q \quad \text{Equação 2}$$

CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas,  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula,  $D_S$  é o diâmetro da menor partícula,  $r$  é a razão entre o volume de partícula entre duas malhas de peneiras consecutivas e  $q$  é o módulo ou coeficiente de distribuição.

No entanto Dinger e Funk desenvolveram um novo modelo que provou ser similar aos modelos citados. Este novo modelo conhecido como modelo de Alfred (Equação 3). (PILEGGI; RODRIGUES, 1996). que é um aperfeiçoamento dos dois modelos anteriores. O modelo de Alfred introduz o conceito do tamanho mínimo de partícula ( $D_s$ ) na equação de Andreasen.

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

Uma série de estudos foram conduzidos com o modelo de Alfred, especialmente em cerâmica, e verificou-se que o fator de distribuição que traz a maior densidade de empacotamento e menor porosidade, exigindo, portanto, o mínimo de água e demanda de cimento Portland é de 0,37. Fatores de distribuição mais baixos foram sugeridos para misturas de alta fluidez. Pesquisas avançadas demonstraram que o fator  $q$  na equação de Alfred pode variar de 0,21 a 0,37, com fatores próximos a 0,21, para misturas altamente fluidas (T. DE GRAZIA et al., 2019).

### 3.3 Determinação do Traço do Concreto

Escolheu-se formular um concreto de fluidez controlada (CFC) sem a incorporação de resíduos chamado referência, sendo depois, determinados mais dois traços substituindo 10% e 20% do agregado graúdo natural (Brita 0) por resíduos de construção e demolição (RCD) na mesma faixa granulométrica.

Para a determinação do Traço Referência, adotou-se o fator de distribuição  $q=0,21$  e adicionou-se os valores obtidos dos ensaios de granulometria e de massa específica dos sólidos ao software EMMA (Elkem Materials Mixture Analyser) para atingir o melhor empacotamento entre os materiais.

O software EMMA apresenta duas curvas, a curva rosa representa a curva do modelo adotado, sendo composta pelos seguintes dados: as massas específicas (Tabela 1), distribuição granulométrica (Figura 1), o valor do coeficiente de distribuição  $q$  e o modelo de dosagem utilizado, neste caso modelo de Alfred. Assim o software calcula o modelo teórico em forma de gráfico, chegando ao empacotamento ideal das partículas. O restante das curvas representa o empacotamento gerado a partir de proporções das quantidades dos materiais inseridos no software, a fim de se aproximar ao máximo do empacotamento ideal (curva rosa).

A Figura 2 apresenta os gráficos gerados pelo EMMA e os traços dos CFCs com consumo total de ligantes fixados em torno de 340 kg/m<sup>3</sup>, sendo o Traço Referência (TR) com 0% de substituição de brita 0 por agregado reciclado, Traço T10 com 10% de substituição e o Traço T20 com 20% de substituição. O teor de argamassa foi fixando em 60% e o aditivo em 0,6%. As curvas de cada traço coincidiram, como mostrado a seguir.

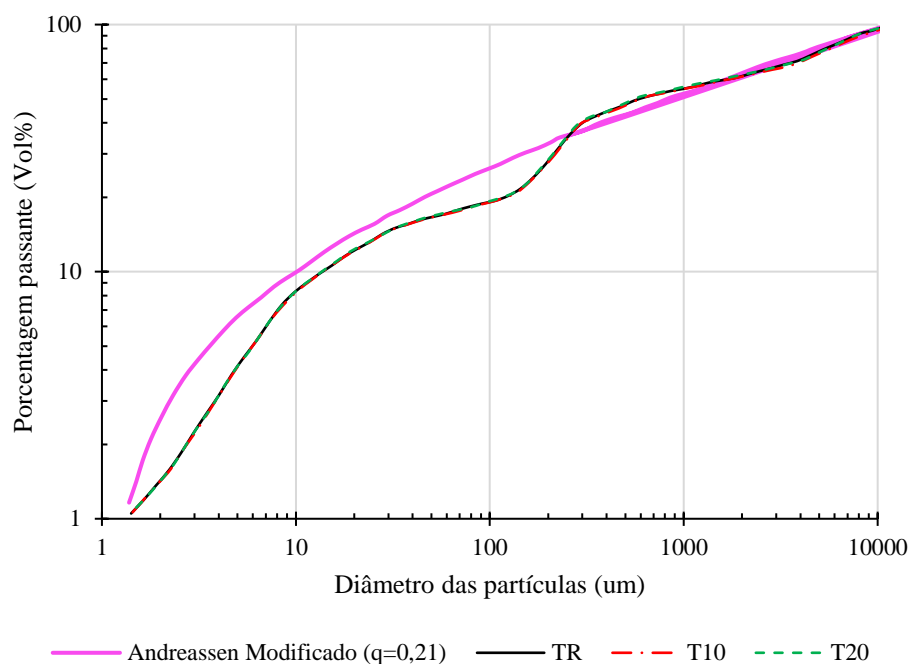


Figura 2 - Empacotamento das partículas através do software EMMA.

Tabela 2 – Formulações de concreto utilizadas.

<b>Materiais</b>	<b>TR (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>T10 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>T20 (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Cimento CPV	340,39	337,38	333,88
Areia Rosa	440,23	436,35	431,81
Areia de Brita	474,27	470,09	465,20
Brita 0	0,00	745,96	656,18
Agregado Reciclado	219,55	82,88	164,04
Água	219,55	226,05	233,71
Aditivo	2,04	2,02	2,0

### 3.4 Produção do Concreto de Fluidez Controlada

Foram produzidos ao todo 45 corpos de prova, sendo eles para ensaios de compressão, absorção e variação dimensional. Para realizar os ensaios dos traços T10 e T20, o agregado reciclado ficou submerso em água durante um período de 24 horas antes do ensaio. Foi utilizada uma betoneira, onde a ordem de mistura consiste nos seguintes passos:

- i. Umidificar a betoneira e adicionar todo o agregado graúdo + 1/3 da água por 1 minuto;
- ii. Adicionar toda a areia de brita e misturar por mais 1 minuto;
- iii. Adicionar a areia rosa e o cimento + 2/3 da água e misturar por mais 1 minuto;
- iv. Adicionar todo o aditivo e misturar por mais 6 minutos.

## 4. CFC no Estado Fresco

### 4.1 Determinação do Espalhamento – Slump Flow Test

Foi realizado o ensaio de Método do cone de Abrams (Slump Flow Test) que tem como objetivo analisar o espalhamento do concreto no estado fresco, executado conforme (“ABNT NBR15823-2 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS,2017).pdf”, [s.d.]



Figura 3 - Slump Flow Test

#### **4.2 Determinação da Massa Unitária**

Os ensaios de Determinação de Massa Unitária foram realizados de acordo com a norma (“ABNT NBR 16972 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS,2021).pdf”, [s.d.]



Figura 4 - Ensaio de massa unitária

### **5. CFC no Estado Endurecido**

#### **5.1 Ensaio de Absorção por Capilaridade**

O ensaio de Determinação da Absorção de água por Capilaridade foi realizado de acordo com a norma (“ABNT NBR 9779 (ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS,2013).pdf”, [s.d.]), para tanto, foram moldados 3 corpos de prova para cada traço, determinando a massa saturada dos corpos de prova com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, contadas a partir da colocação destes em contato com a água.



Figura 5 - Ensaio de Absorção por Capilaridade

## 5.2 Ensaio de Resistência à Compressão

Os ensaios de Resistência à Compressão foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), para tanto, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm para cada traço, verificando a resistência à compressão desses corpos de prova para 3, 7, 28 e 56 dias.



Figura 6 - Ensaio de Resistência à Compressão

## 6. CFC no Estado Endurecido

### 6.1 Propriedades no Estado Fresco

Os ensaios de Slump flow e de massa unitária, foram realizados para cada traço da pesquisa, onde os resultados encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades no estado fresco dos concretos

	Traço referência	Traço T10	Traço T20
<b>Espalhamento (mm)</b>	620	540	560
<b>Massa Unitária Concreto (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	2,329	2,186	2,260

Para o Slump flow, o objetivo era de alcançar a faixa de espalhamento SF 1 (550 a 650 mm), que é recomendada para estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos conforme a norma ABNT NBR15823-2 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) observar que com a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, o espalhamento ficou menor, ou seja, o CFC ficou menos coeso, comportamento também observado no trabalho de (BARBOZA; ALMEIDA FILHO, 2018)

O ensaio de massa unitária mostrou que o traço referência apresentou um maior valor quando comparado aos traços T10 e T20, ou seja, os traços com a substituição do agregado natural apresentam um volume de vazios maior do que o traço referência. Contudo, mesmo com o traço T20 tendo uma substituição maior de agregados naturais, a sua massa unitária foi maior quando comparada ao traço T10, sendo isso possível, devido à grande heterogeneidade que os resíduos de construção de demolição (RCD) apresentam.

## 6.2 Propriedades no Estado Endurecido

Os resultados do ensaio de resistência à compressão (Figura 7) mostram que para todos os traços a resistência aumentou em função do tempo e que o traço referência apresenta maior resistência quando comparado com os concretos com substituição de 10 e 20% do agregado natural por agregado reciclado. A substituição de brita 0 por agregado reciclado tem o maior impacto sobre esta propriedade nos primeiros 7 dias, com uma redução de 20% e 13% para os traços T10 e T20 em comparação ao traço referência. Com 28 dias, a diferença entre as resistências diminuiu, apresentando uma redução de 17% para o traço T10 e 11% para o traço T20.

É importante observar que o traço T20 nos 7 primeiros dias apresentou 9% a mais na resistência à compressão quando comparado ao traço T10, mesmo com um menor consumo de cimento e com maior quantidade em massa do agregado reciclado. Este fato pode ter ocorrido, como dito anteriormente, devido a heterogeneidade do RCD e, o traço T20 pode ter apresentado um empacotamento melhor se comparado ao traço T10.

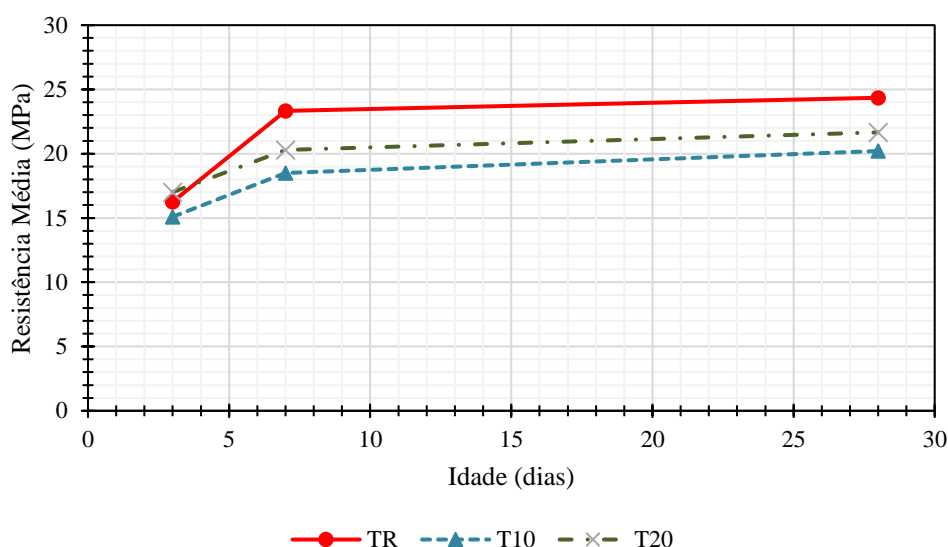


Figura 7 – Gráfico de resistência à compressão.

Os resultados do ensaio de absorção por capilaridade (Figura 8) mostram que para todos os traços a absorção aumentou em função do tempo, onde no período de 72 horas o traço referência teve um aumento na absorção de 0,69% o traço T10 de 0,94% e o traço T20 de 0,63%.

Os resultados de absorção, comparando os traços T10 e T20, concordam com o resultado de resistência e reforçam a hipótese de melhor empacotamento das partículas para o traço T20, pois sugere um menor índice de vazios, diminuindo a absorção por capilaridade e aumentando a resistência.

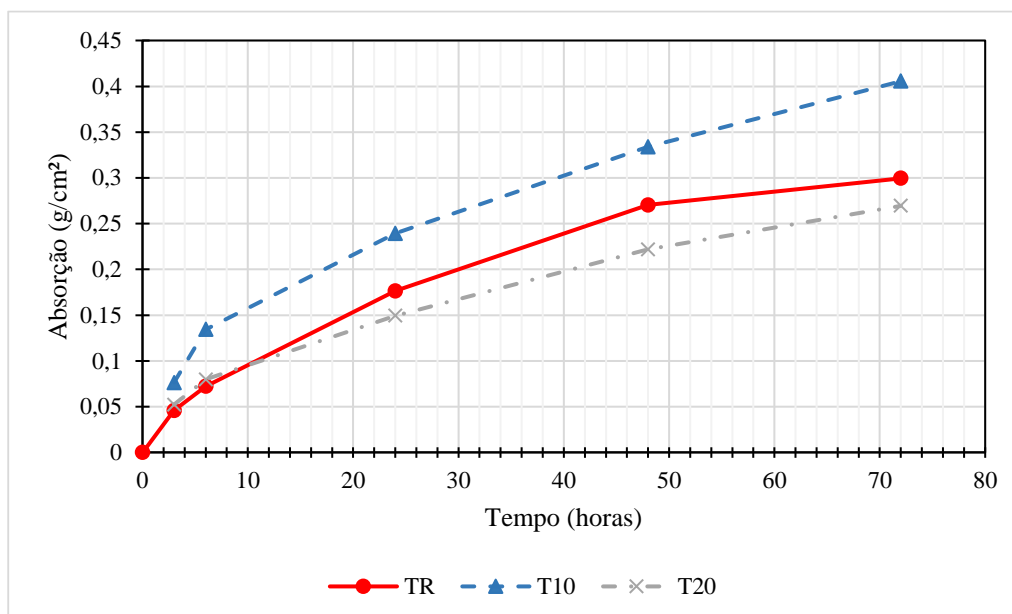


Figura 8 - Gráfico Ensaio de Absorção

## 7 Conclusão

A pesquisa aplicou o método de empacotamento de partículas do modelo Alfred através do software EMMA, em conjunto com a utilização de aditivo modificador de reologia de alto desempenho a base de policarboxilato e fixando o consumo total de ligantes em torno de  $340\text{kg/m}^3$ .

Pode-se afirmar que é possível a utilização de RCD na produção de concretos de fluidez controlada, em que o desempenho dos concretos foi analisado por meio de ensaios em seu estado fresco, onde todos os traços apresentaram classe de espalhamento SF1 (entre 550 e 650 mm) no estado endurecido, a resistência à compressão apresentou um decréscimo de 17% no traço T10 e 11% no traço T20, em relação ao traço de referência aos 28 dias, mostrando que a redução no desempenho mecânico se torna um desafio superável mediante à possibilidade de redução do impacto ambiental causado pelo RCD, uma vez que é possível reutilizar o resíduo, minimizando, assim a exploração de jazidas naturais, contudo mais estudos são necessários para melhor analisar a heterogeneidade do material deste material.

## 8 Referências bibliográficas

ABNT NBR 5739 (- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS,2018).pdf. , [s.d.].

ABNT NBR 9779 (ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS,2013).pdf. , [s.d.].

ABNT NBR 16972 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS,2021).pdf. , [s.d.].

ABNT NBR15823-2 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS,2017).pdf. , [s.d.].

ÂNGULO ET AL (2002), Â., S. C. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. [s.d.].

BARBOZA, L. DA S.; ALMEIDA FILHO, F. M. DE. Concreto autoadensável com baixo consumo de cimento: impacto da redução do consumo de cimento na resistência à compressão. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 18 out. 2018.



CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18–32, mar. 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3° ed. [s.l.] Ibracon, 2008.

PILEGGI, R. G.; RODRIGUES, J. DE A. Concreto Refratário Auto-Escoante: Metodologia de Formulação e Correlações entre Distribuição Granulométrica e Reologia. **Cerâmica Industrial**, p. 6, 1996.

T. DE GRAZIA, M. et al. Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 524–536, jan. 2019.