

Reduzido consumo de cimento na produção de concreto de elevada resistência

**Thiago Catoia¹, Bruna Catoia², Tobias Azevedo da Costa Pereira³, Evandro Catai⁴,
Jefferson Benedicto Libardi Liborio⁵**

RESUMO

Atualmente a preocupação com o desenvolvimento sustentável tem aumentado e um fator fundamental para a sustentabilidade é o máximo aproveitamento dos recursos. Na dosagem de um concreto a maneira de aproveitar o máximo dos recursos pode ser feita obtendo o máximo de resistência com o mínimo consumo de cimento. Neste trabalho pretendeu-se atingir o máximo de resistência mecânica elaborando um concreto com baixo consumo de cimento ($C \approx 250 \text{ kg/m}^3$), onde foi utilizada técnica de empacotamento dos agregados e das adições. Na dosagem do concreto foi utilizado o cimento Portland Duracem AD 300, Sílica Ativa Fé-Si como adição, e um aditivo superplastificante para alcançar uma trabalhabilidade adequada (100 mm de abatimento de troco de cone) com fator água-cimento de 0,55. Para avaliar a resistência mecânica do concreto foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, que foram ensaiados, nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias, à compressão axial simples, à tração na compressão simples diametral, além da determinação do módulo de elasticidade. Como resultado obteve-se um concreto com uma densidade de $2,53 \text{ kg/dm}^3$, e resistência à compressão simples (f_{c28}) de 64,3 MPa, podendo classificá-lo como de alta resistência. Em relação ao custo deste material, obteve-se um valor, com referência a julho de 2007, de US\$100,00 por metro cúbico de concreto, enquanto que um concreto com resistência de 40 MPa e maior consumo de cimento, fornecido por uma central de concreto custava US\$110,00 o metro cúbico.

PALAVRAS-CHAVE

Concreto de alta resistência; Baixo consumo de cimento; Dosagem de concreto; Empacotamento de agregados; Adições.

¹ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, Brasil. tcatoia@sc.usp.br

² Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, Brasil. bcatoia@sc.usp.br

³ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, Brasil. tobias@sc.usp.br

⁴ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, Brasil. cataieng@netsite.com.br

⁵ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, Brasil. liborioj@sc.usp.br

1. INTRODUÇÃO

Atualmente muito se tem falado na busca do concreto verde ou concreto ecológico, pelo aumento da preocupação com o desenvolvimento sustentável, um fator fundamental, e talvez a medida mais imediata a ser tomada no sentido da sustentabilidade é o máximo aproveitamento dos recursos.

Na dosagem de um concreto a maneira de aproveitar o máximo dos recursos pode ser feita obtendo o máximo de resistência com o mínimo consumo de cimento, utilizando a sinergia entre os materiais empregados e o preenchimento dos vazios existente entre as partículas através de um estudo de empacotamento, além da seleção criteriosa dos materiais.

A importância deste trabalho reside na obtenção de um produto com reduzida quantidade de material nobre, no caso o cimento, representando economia de recursos financeiros, naturais e de energia para fabricá-lo, sem perder de vista a qualidade de resistência e durabilidade do produto final, o concreto.

Neste trabalho pretendeu-se atingir o máximo de resistência mecânica elaborando um concreto com baixo consumo de cimento (250 kg/m^3), de modo a comprovar que a resistência do material não está somente ligada ao consumo de cimento, incentivando o meio técnico ao estudo de dosagem e aplicação de tecnologia para evitar o gasto excessivo de cimento, e o conseqüente gasto de outros recursos como o financeiro e energético.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Seleção dos materiais

Os materiais foram escolhidos de acordo com a disponibilidade existente na região de São Carlos (SP, Brasil), além da qualidade e do custo referente a cada material. Foram empregados agregados com diversas constituições granulométricas, inclusive agregados miúdos mais finos do que os geralmente utilizados na produção de concreto, com o intuito de reduzir os vazios entre as partículas de agregados e proporcionar um adequado empacotamento das partículas constituintes do concreto.

Para a produção do concreto, foi utilizada como adição a sílica ativa de ferro-silício, essa adição auxilia o ganho de resistência mecânica do concreto através do efeito filer e da reação pozolânica.

O uso de aditivo superplastificante faz-se necessário pela utilização de agregados e aglomerantes mais finos, pois esses requerem mais água de amassamento do que os materiais utilizados em concretos convencionais. Esse controle no aumento da água de amassamento possibilita um refinamento da porosidade da mistura, o que permite melhorar a resistência e a durabilidade dos concretos.

O cimento escolhido (Duracem AD 300), além de apresentar compatibilidade com o aditivo empregado, apresenta elevada finura e ausência de adições o que pode representar o ganho de resistência logo nas primeiras idades e economia no consumo de cimento.

2.2 Características dos materiais

Para a caracterização dos agregados empregados no concreto em estudo, foram realizados diversos ensaios, seguindo recomendações de normas brasileiras vigentes, que determinaram: composição granulométrica [1], dimensão máxima característica [1], módulo de finura [1], classificação granulométrica [2], massa unitária no estado compactado seco [3], massa unitária no estado solto [4], e massa específica [5] e [6]. As características do cimento, aditivo e adição foram fornecidas pelos fabricantes dos produtos disponíveis no mercado.

2.2.1 Agregados graúdos

Foram utilizados três tipos de agregados graúdos, denominados P2, P1 e P0, cujas características são apresentadas na Quadro 1.

Quadro 1. Características dos agregados graúdos.

Agregado graúdo	Massa específica [kg/dm ³]	Massa unitária solto [kg/dm ³]	Massa unitária compactado [kg/dm ³]	Dimensão máxima característica [mm]	Módulo de finura	Cassificação
P2	2,86	1,51	1,67	25,0	7,20	brita nº 2
P1	2,86	1,49	1,66	12,5	6,93	brita nº 1
P0	2,86	1,46	1,54	6,3	4,84	pedrisco

2.2.2 Agregados miúdos

Foram utilizados três tipos de agregados miúdos, denominados A1, A2 e A3, cujas características são apresentadas na Quadro 2.

Quadro 2. Características dos agregados miúdos.

Agregado miúdo	Massa específica [kg/dm ³]	Massa unitária solto [kg/dm ³]	Massa unitária compactado [kg/dm ³]	Dimensão máxima característica [mm]	Módulo de finura	Cassificação
A1	2,64	1,62	1,68	4,8	3,70	areia grossa
A2	2,63	1,58	1,62	2,4	2,03	areia fina
A3	2,63	1,38	1,59	0,3	2,14	areia muito fina

2.2.3 Cimento

Foi empregado, para a produção do concreto com baixo consumo de cimento estudado, o cimento Duracem AD 300, que corresponde a um cimento Portland especial de elevada finura, com pega acelerada e adições minerais de alta pozolanicidade, e com classe de resistência de 60 MPa.

2.2.4 Adição

Foi utilizada como adições a sílica ativa de Fe-Si, com massa específica de 2,10 kg/dm³ e área específica de 20.000 m²/kg.

2.2.5 Aditivo

O aditivo selecionado foi o Glenium 51, que corresponde a um aditivo superplastificante de 3ª geração a base de policarboxilatos com teor de sólidos de 31 % [7].

2.3 Empacotamento das partículas

Após a caracterização dos materiais foram estudadas as melhores composições de mistura entre eles. Várias propriedades do concreto fresco e endurecido estão relacionadas ao empacotamento das partículas que os constituem. O empacotamento de partículas é um fator que, além de tornar os produtos constituídos mais econômicos, tende a produzi-los sem grandes alterações volumétricas.

[8] define o empacotamento de partículas como, o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de maneira que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente.

[9] indicam diversos modelos (Furnas, Alfred e Andreasen) que determinam a distribuição granulométrica que propicia a maior eficiência do empacotamento, ou seja, a maior densidade do material particulado.

No presente trabalho não foram utilizados modelos teóricos e sim o método prático indicado por [10]. Esse método consiste na determinação experimental da massa unitária no estado compactado seco [3] de diferentes combinações de proporções dos dois componentes em que se deseja obter o melhor empacotamento. A melhor proporção entre os componentes corresponde aquela que apresentar a maior massa unitária, representando a melhor condição de preenchimento dos vazios entre as partículas. É possível determinar a melhor proporção entre dois componentes e em seguida fixar esta proporção para compor com um terceiro componente e assim sucessivamente, desde que as composições sigam a ordem decrescente das dimensões dos componentes.

Esse método de empacotamento foi empregado para a determinação das melhores proporções entre os agregados graúdos e entre os agregados miúdos selecionados.

2.3.1 Agregados graúdos

Inicialmente foi determinada a melhor composição entre os agregados P2 e P1, definindo uma composição C1 e em seguida foi determinada a melhor composição entre C1 e P0.

Analisando os valores de massa unitária no estado compactado seco, para as diferentes composições entre os agregados P2/P1, apresentadas na Fig. 1, pode-se dizer que a composição que apresenta o melhor empacotamento, preenchendo melhor os vazios entre as partículas e tendo a maior massa unitária no estado compactado seco é a composição de 60 % de P2 e 40 % de P1, que foi denominada de C1.

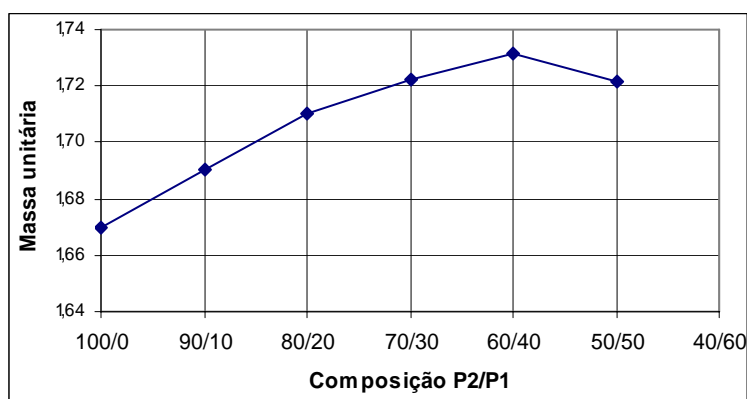


Figura 1. Empacotamento dos agregados graúdos P2 e P1.

Os valores de massa unitária no estado compactado seco, para as diferentes composições entre C1 e P0 são apresentados na Fig. 2.

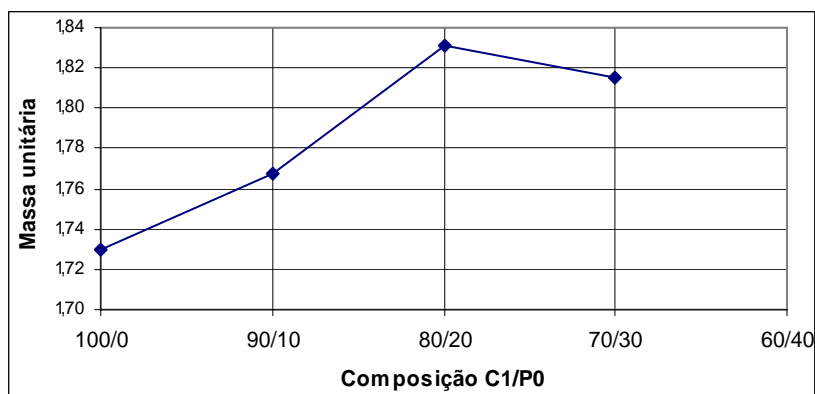


Figura 2. Empacotamento dos agregados graúdos C1 e P0.

Através da Fig. 2, definiu-se a melhor composição em 80 % de C1 e 20 % de P0. Portanto utilizando o estudo de empacotamento apresentado foi definida a melhor composição entre os agregados graúdos selecionados em 20 % de P0, 32 % de P1 e 48 % de P2.

2.3.2 Agregados miúdos

Inicialmente foi determinada a melhor composição entre os agregados A1 e A2, definindo uma composição C2 e em seguida foi determinada a melhor composição entre C2 e A3. Os valores de massa unitária no estado compactado seco, para as diferentes composições entre os agregados A1 e A2 são apresentados na Fig. 3.

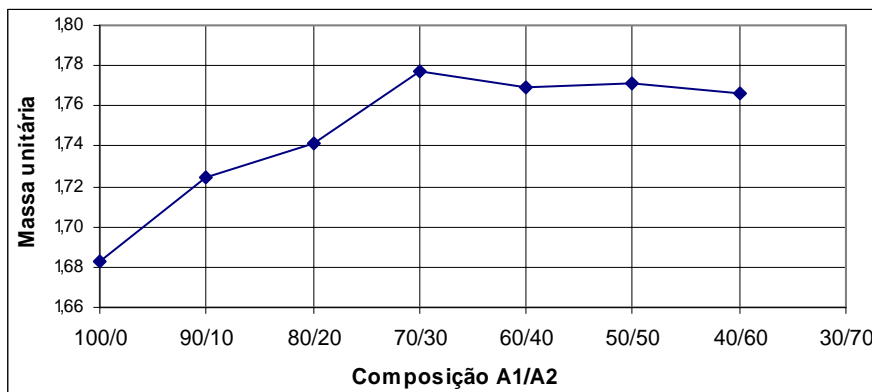


Figura 3. Empacotamento dos agregados miúdos A1 e A2.

Pode-se observar na Fig. 3 que a melhor composição entre A1 e A2 corresponde a 70 % de A1 e 30 % de A2, pois apresenta o maior valor de massa unitária, sendo definido C2.

Os valores de massa unitária no estado compactado seco, para as diferentes composições entre C2 e A3 são apresentados na Fig. 4.

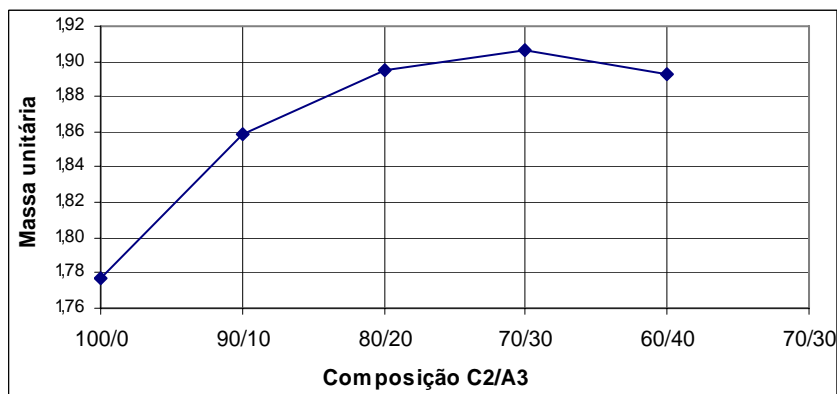


Figura 4. Empacotamento dos agregados miúdos C2 e A3.

Através da Fig. 4, definiu-se a melhor composição em 70 % de C2 e 30 % de A3. Portanto utilizando o estudo de empacotamento apresentado foi definida a melhor composição entre os agregados miúdos selecionados em 30 % de A3, 21 % de A2 e 49 % de A1.

2.4 Dosagem do concreto

2.4.1 Avaliação da pasta de cimento

A avaliação da pasta foi feita através do ensaio de Kantro ou miniabatimento, que consiste na realização de um ensaio de espalhamento com uma pequena quantidade de pasta em um minitronco de cone, com o objetivo de analisar a variação de plasticidade da mistura em função do tempo, devido à variação do teor de aditivo. A Fig. 5 exemplifica a medida de espalhamento da pasta em ensaio de Kantro.



Figura 5. Medida de espalhamento da pasta em ensaio de kantro.

Neste ensaio prepararam-se seqüências de misturas gerando diferentes composições de pastas, em que foram fixas as quantidades de cimento e a relação água/aglomerante, variando-se somente o teor de superplastificante de forma a permitir estudar a eficiência do aditivo em conjunto com o cimento. A Fig. 6 representa a evolução da fluidez da pasta com o aumento do teor de aditivo, através da medida de espalhamento e cálculo da área de espalhamento.

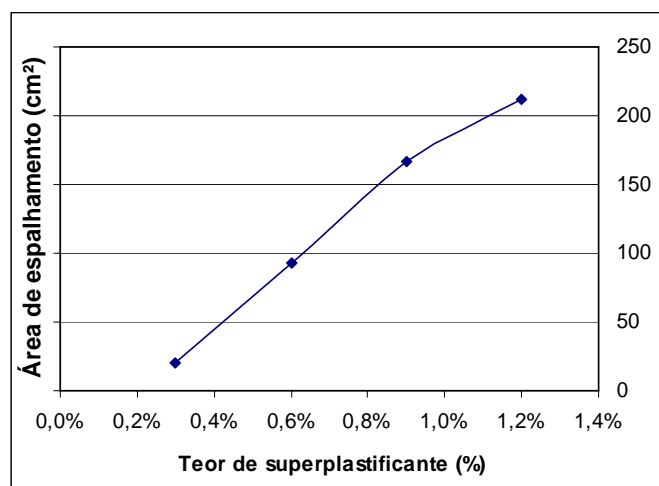


Figura 6. Comportamento da pasta de cimento em ensaio de kantro.

Outro fator importante na realização desse ensaio é a determinação do teor de saturação do aditivo que indica um teor a partir do qual não haverá acréscimo significativo no espalhamento da pasta com o aumento do teor de aditivo. Apesar de não ter atingido o ponto de saturação, o ensaio foi interrompido, e definido o teor de 1,0 % pelo bom espalhamento apresentado e pela importância de não aumentar o consumo de materiais representativos no custo final do concreto.

2.4.2 Determinação do traço do concreto

Para determinação do traço do concreto, inicialmente foi fixo o teor de sílica ativa em 10 % em adição a massa de cimento, pois é um valor que apresenta uma melhora significativa nas características do concreto como redução da exsudação externa e interna com o tratamento da zona de transição do agregado graúdo com a matriz, e refinamento da porosidade pelo efeito filer e pela reação pozolânica, que representam ganho de resistência e durabilidade, sem representar um teor elevado que inviabilize seu uso devido ao custo.

Para determinação do teor de argamassa partiu-se do traço 1:8,5 com um teor de argamassa igual a 43 % acrescentando-se argamassa em várias etapas com ajustes de água e aditivo, e controle de consistência pela medida de abatimento do troco de cone realizado de acordo com a [11] e fixa em 100 ± 20 mm de modo a possibilitar lançamento e adensamento do material.

O acréscimo de argamassa foi realizado até um teor de 47 % quando o concreto apresentou os vazios existentes entre os agregados graúdos preenchidos como apresentado na Fig. 7, além de possuir boa coesão e não apresentar desprendimento de agregados.



Figura 7. Concreto com bom teor de argamassa.

Utilizando o traço 1:8,5 e o teor de argamassa 47 % determinado, calculou-se o traço final do concreto correspondente a 1:0,1:3,4:5,0 (cimento:silica ativa:areia:pedra).

2.5 Ensaios mecânicos do concreto

Para avaliação do desempenho mecânico do concreto foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, de acordo com [12], e os ensaios foram realizados nas idades de 3, 7, 14, 28 e 63 dias em um atuador servo-hidráulica.

A massa específica do concreto no estado fresco foi obtida de acordo com [13], utilizando um recipiente de 10 dm³ e um vibrador de agulha de 25mm de diâmetro, antes da moldagem dos corpos-de-prova.

2.5.1 Compressão axial simples (f_{cj})

O ensaio de compressão axial simples foi executado de acordo com [14], com velocidade de carregamento constante e igual a 0,6 MPa/s. A resistência à compressão em cada idade foi obtida através da media aritmética dos resultados dos corpos-de-prova ensaiados.

2.5.2 Tração na compressão simples diametral (f_{ctj})

Realizou-se o ensaio de compressão diametral seguindo as recomendações da [15], com velocidade de carregamento constante e igual a 0,06 MPa/s, utilizando um aparato para solicitar o corpo-de-prova na direção diametral.

2.5.3 Determinação do módulo de elasticidade (E)

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada de acordo com [16], solicitando o corpo-de-prova à compressão axial simples com velocidade de carregamento de 0,6 MPa/s até aproximadamente 80 % da carga de ruptura, determinada em ensaio de compressão axial simples, realizando medições de deslocamento a cada 2 segundos através de transdutores elétricos de base removível, posicionados diametralmente opostos no corpo-de-prova.

3. RESULTADOS

No Quadro 3 são apresentadas os resultados dos ensaios mecânicos assim com algumas características do traço determinado.

Quadro 3. Valores dos ensaios mecânicos e características do traço.

<i>Concreto estudado</i>		
Traço em massa	1:m	1:8,5
Consumo de cimento por m ³ (kg)		252,0
Relação água/cimento		0,55
Teor de aditivo superplastificante (%)		1,0
Abatimento de tronco de cone (mm)		100 ± 20
Massa específica (kg/dm ³)		2,53
Cura		úmida
F _{cj} (MPa)	3 dias	30,2
	7 dias	39,7
	14 dias	49,3
	28 dias	64,3
	63 dias	67,2
F _{ctj} (MPa)	3 dias	2,8
	7 dias	3,8
	14 dias	4,7
	28 dias	4,9
	63 dias	5,0
E (GPa)	3 dias	30,0
	7 dias	38,9
	14 dias	40,8
	28 dias	44,7
	63 dias	48,3

Avaliando o Quadro 3 pode-se dizer que o concreto apresentou elevado desempenho mecânico, apresentando elevada resistência à compressão axial simples e elevado módulo de elasticidade, além de necessitar de um reduzido consumo de cimento.

Em relação ao custo deste material, obteve-se um valor, com referência a julho de 2007, de US\$100,00 por metro cúbico de concreto, enquanto que um concreto com resistência de 40 MPa e maior consumo de cimento, fornecido por uma central de concreto na região da cidade de São Carlos custava US\$110,00 o metro cúbico.

4. CONCLUSÕES

Através das análises do concreto, conclui-se que os objetivos do trabalho foram alcançados, demonstrando a possibilidade de produção de um concreto de elevada resistência mecânica com baixo consumo de cimento, utilizando a técnica de empacotamento de partículas, além da seleção criteriosa de materiais disponíveis comercialmente.

Também é possível afirmar que a busca de um concreto sustentável pode refletir na redução de custo, como foi o caso do concreto estudado, além de representar uma economia de recursos para toda a sociedade.

REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 1983.

- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 7810 – Agregado em estado compactado e seco – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1993.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 7251 – Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 9937 – Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 9776 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 10908 (MB-2645) – Aditivos para argamassa e concreto – Ensaio de uniformidade. Rio de Janeiro, 1990.
- [8] McGEARY, R. K.. Mechanical packing of spherical particles. Journal of the American Ceramic Society, 1961. v.44.
- [9] OLIVEIRA, I.R. et al.. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.
- [10] HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P.. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo: Pini, 1992.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 7223 – Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 1994.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 7222 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. São Paulo, 1994.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. São Paulo, 1984.