

Concreto reodinâmico de elevada resistência mecânica e baixo consumo de cimento

**Thiago Catoia¹, Tobias A. da Costa Pereira², Bruna Catoia³, José E. R. S. Junior⁴,
Evandro Catai⁵, Jefferson B. L. Liborio⁶**

RESUMO

Nos últimos anos o concreto auto-adensável vem sendo cada vez mais conhecido e utilizado pela facilidade de concretagem sem a necessidade de adensamento, este concreto é principalmente empregado em estruturas com elevadas taxas de armadura ou com reduzida espessura. O concreto auto-adensável deve apresentar além de fluidez, resistência à segregação, ausência de exsudação e capacidade de passar por obstáculos (armaduras). O presente trabalho pretende desmistificar que o concreto auto-adensável necessita de um elevado teor de argamassa e requer um elevado consumo de cimento, apresentando a dosagem de um concreto auto-adensável com baixo consumo de cimento, utilizando técnicas de empacotamento das partículas de agregados e aglomerantes. O empacotamento de partículas e a conseqüente minimização dos vazios existentes entre as partículas dos diferentes materiais que compõem o concreto, permitem um refinamento da porosidade desse material, refletindo em sua resistência mecânica, durabilidade e reologia. A utilização de adições minerais e aditivos de última geração contribuiu para o desempenho do concreto, que foi verificado ainda fresco através de ensaios reológicos como o ensaio do anel “J”; da caixa em “L”, do Funil “V” e o Slump-flow. O desempenho mecânico do concreto elaborado foi avaliado através dos ensaios de compressão axial simples, tração por compressão simples diametral e pela determinação do módulo de elasticidade, nas idades de 3, 7 e 28 dias. A união do alto desempenho reológico e mecânico com o baixo consumo de cimento obtido, vem contribuir muito com o meio técnico e científico, pois foi possível produzir um concreto auto-adensável com resistências elevadas ($f_{c28} = 60$ MPa) e baixo consumo de cimento ($C \approx 290$ kg/m³), representando na prática facilidades de moldagem, inexistência de falhas ou nichos de concretagem, aumento da produção, bom acabamento superficial, baixo nível de ruído na produção, elaboração de peças mais esbeltas e ainda apresentar economia de cimento.

PALAVRAS-CHAVE

Concreto reodinâmico; Concreto auto-adensável; Concreto de alto desempenho; Dosagem; Empacotamento de partículas.

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. tobias@sc.usp.br

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

⁴ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, Brasil. sanches@sc.usp.br

⁵ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, Brasil. cataieng@netsite.com.br

⁶ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, Brasil. liborioj@sc.usp.br

1. INTRODUÇÃO

O concreto auto adensável foi inicialmente desenvolvido no Japão, devido à necessidade da obtenção de estruturas duráveis levando em consideração a escassez de mão-de-obra especializada, que desempenhasse um adequado serviço de compactação. Assim, em 1988, foi desenvolvido, no Japão, um concreto de alto desempenho com uma excelente deformabilidade no estado fresco e alta resistência à segregação. Este concreto que possui a capacidade de se moldar nas fôrmas sem vibração ou compactação, passando coeso através das armaduras, foi denominado de concreto auto-adensável.

O presente trabalho, tem como objetivo, apresentar a dosagem de um concreto auto-adensável com baixo consumo de cimento, utilizando técnicas de empacotamento de partículas. O desempenho do concreto fresco foi verificado através de ensaios reológicos como o do anel “J”; da caixa em “L”, do Funil “V” e do Slump-flow. Além disso, seu desempenho mecânico foi avaliado pelo ensaio de compressão axial simples, tração por compressão simples diametral e determinação do módulo de elasticidade, nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias.

O desenvolvimento de um concreto auto adensável com baixo consumo de cimento possibilitará ao construtor produzir concretos que garantam: facilidade de montagem, produção de misturas mais trabalháveis, menor custo de lançamento, menor tempo e esforço, baixo nível de ruído na execução, bom acabamento superficial, além de contribuir para a redução do impacto ambiental causado pela produção dos materiais constituintes.

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 composições granulométricas 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 auto-adensável, foi utilizado como adição a sílica ativa de ferro-silício com o intuito de aumentar a quantidade de finos na mistura, possibilitando um aumento da coesão, o que impede a segregação de agregados em misturas mais fluidas. Essa adição pode também auxiliar o ganho de resistência mecânica do concreto através do efeito filer e da reação pozolânica.

Empregaram-se areias mais finas, com o intuito de proporcionar uma melhora na coesão da mistura sem o aumento do consumo de aglomerantes, além de evitar a necessidade do emprego de aditivos modificadores de viscosidade. Isso pode reduzir significativamente o custo do concreto já que ocorrerá economia dos materiais mais significantes no custo do concreto.

Optou-se pelo emprego de um aditivo superplastificante devido à necessidade da alta fluidez para o auto-adensamento, sem um aumento efetivo de água de amassamento, com isso refina-se a porosidade da mistura, o que permite melhorar a resistência e a durabilidade dos concretos. Além disso, o uso do aditivo superplastificante também é justificado pela utilização de agregados e aglomerantes mais finos, pois esses requerem mais água de amassamento do que os materiais utilizados em concretos convencionais.

O cimento escolhido (CP III 40 RS), que além de apresentar elevada compatibilidade com o aditivo empregado, possibilita um baixo calor de hidratação devido à presença de escória na sua composição para a resistência ao sulfato (RS).

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 dois tipos de agregados graúdos, denominados B1 e B2, 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	Classificação
B1	2,86	1,49	1,66	12,5	6,93	brita nº 1
B2	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	Classificação
A1	2,64	1,62	1,67	4,8	3,70	areia média
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 auto-adensável estudado, o cimento CP III 40 RS, que corresponde a um cimento Portland comum com adição de escória de alto forno, com classe de resistência de 40 MPa, e resistente a sulfatos devido a alta pozolanicidade.

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 %.

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.

No presente trabalho foi utilizado o método prático indicado por [7]. 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

Analisando os valores de massa unitária no estado compactado seco, para as diferentes composições entre os agregados B1/B2, 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 70 % de B1 e 30 % de B2, utilizada como composição dos agregados graúdos.

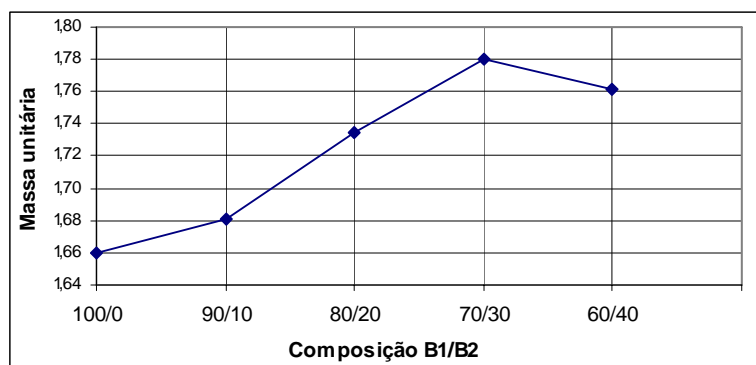


Figura 1. Empacotamento dos agregados graúdos.

2.3.2 Agregados miúdos

Inicialmente foi determinada a melhor composição entre os agregados A1 e A2, definindo uma composição C1 e em seguida foi determinada a melhor composição entre C1 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. 2.

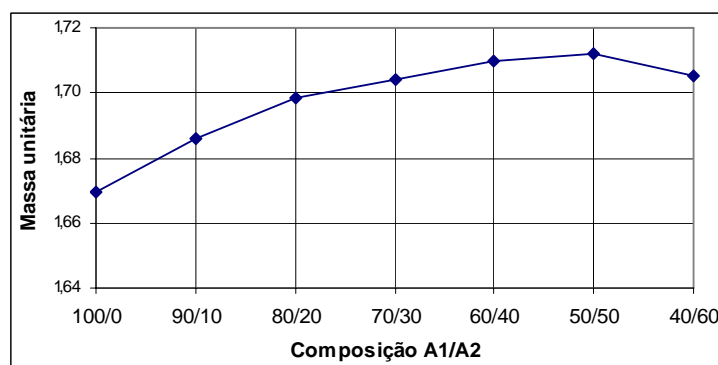


Figura 2. Empacotamento dos agregados miúdos A1 e A2.

Pode-se observar na Fig. 2 que a melhor composição entre A1 e A2 corresponde a 70 % de A1 e 30 % de A2, pois apesar de haver um acréscimo na massa unitária nos dois pontos seguintes, o incremento é

muito tênue, portanto a referida proporção é mais indicada uma vez que tem menor área superficial, e foi adotada definindo C1.

Os valores de massa unitária no estado compactado seco, para as diferentes composições entre C1 e A3 são apresentados na Fig. 3.

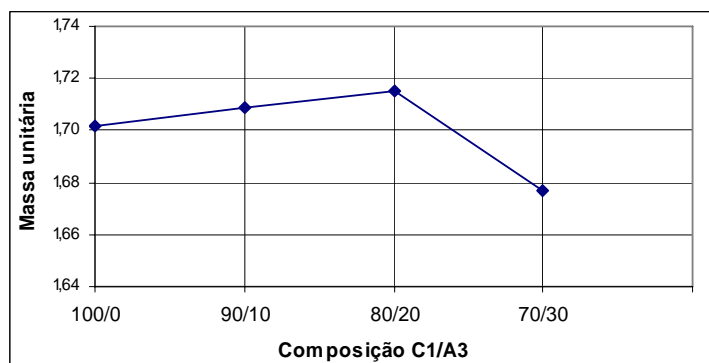


Figura 3. Empacotamento dos agregados miúdos C1 e A3.

Através da Fig. 3, definiu-se a melhor composição em 80 % de C1 e 20 % de A3. Portanto utilizando o estudo de empacotamento apresentado foi definida a melhor composição entre os agregados miúdos selecionados em 20 % de A3, 56 % de A2 e 24 % de A1

2.4 Dosagem do concreto reodinâmico

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.

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, e avaliar teores de aditivo que possibilite a fluidez compatível. A Fig. 4 exemplifica a análise da fluidez da pasta através da medida de espalhamento.



Figura 4. Medida de espalhamento da pasta 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.

2.4.2 Estudo da Argamassa

Realizou-se um estudo da argamassa, com o intuito de torná-la capaz de fornecer ao concreto características auto-adensáveis. Analisou-se a argamassa através da realização do ensaio denominado

de cone de Marshal, demonstrado na Fig. 5, que corresponde a análise de fluidez da argamassa medindo o tempo de escoamento de uma determinada quantidade de material em um cone com medidas e abertura padronizada.



Figura 5. Avaliação da argamassa em cone de Marsh.

A partir do estudo da argamassa, determinou-se um traço correspondente a 1:0,1:3,4 (cimento:sílica ativa:areia), e um teor de aditivo equivalente a 1,5 %, que forneceram à argamassa boas condições de fluidez de forma a possibilitar auto-adensabilidade ao concreto. O consumo de aditivo foi determinado ponderando a quantidade de água com o teor de aditivo, além de levar em conta o custo do produto e o teor de saturação do aditivo com os aglomerantes.

Fixou-se o teor de sílica ativa de 10 % em adição a massa de cimento para contribuir com a coesão e evitar a segregação do concreto, além desse teor representar um significativo refinamento da porosidade.

2.4.3 Determinação do traço do concreto

Para determinação do traço do concreto fixou-se o traço da argamassa definido e acrescentou-se agregado graúdo em várias etapas de forma a se obter um concreto com trabalhabilidade e fluidez, típicas de um concreto auto-adensável, com o mínimo teor de argamassa e o conseqüente reduzido consumo de cimento. O concreto com o mínimo teor de argamassa e características reodinâmicas pode ser observado na Fig. 6.



Figura 6. Concreto reodinâmico com o mínimo teor de argamassa.

Partindo do traço da argamassa e do teor mínimo de argamassa encontrado correspondente a 60 %, determinou-se o traço final do concreto correspondente a 1:0,1:3,4:3,0 (cimento:sílica ativa:areia:pedra).

2.5 Ensaios reológicos do concreto

Para avaliar o desempenho reológico do concreto foram realizados os ensaios que se seguem.

2.5.1 Ensaio de espalhamento (slump-flow)

O ensaio de espalhamento foi realizado no mesmo tronco de cone utilizado na medida de consistência (slump test), medindo o espalhamento (d) do concreto no lugar do abatimento, e determinado o tempo que o concreto leva para apresentar um espalhamento de 50 cm (t_{50}).

Este ensaio tem como objetivo avaliar a fluidez do concreto, além de proporcionar a visualização da sua capacidade de escoamento e deformabilidade, devido ao seu peso próprio. O ensaio ainda permite uma avaliação visual da mistura, para verificar a ocorrência de segregação e exsudação, como apresentado na Fig. 7.



Figura 7. Medida de espalhamento do concreto.

2.5.2 Ensaio da Caixa em L

O teste da Caixa-L é realizado para se analisar a capacidade do concreto de fluir por obstáculos que simulam as armaduras, além de sua deformabilidade, resistência ao bloqueio e resistência à segregação. O ensaio consiste em preencher a parte vertical da caixa de concreto e levantar a comporta deixando com que o concreto flua entre a armadura presente na transição vertical – horizontal, como demonstrado na Fig. 8.



Figura 8. Ensaio da caixa L.

Neste ensaio são medidos os tempos que o concreto leva para percorrer 20 (t_{20}) e 40 cm (t_{40}), após passar pelas barras de bloqueio, e as alturas de concreto no início (h_1) e no final (h_2) da caixa L para determinação da relação h_2/h_1 .

2.5.3 Ensaio do Funil V

Este ensaio possibilita medir o tempo em que um determinado volume de concreto, aproximadamente 10 litros, escoar até o afunilamento total da massa. Inicialmente enche-se o funil até a sua borda, abre-se o orifício em baixo e cronometra-se o tempo (t) que o concreto demora a passar pelo funil. A Fig. 9 demonstra o escoamento do concreto no funil V.



Figura 9. Ensaio do funil V.

2.5.4 Anel japonês

Este ensaio avalia a resistência ao bloqueio, o equipamento consiste de um anel de seção transversal circular de 300 mm de diâmetro, com barras verticais espaçadas de acordo com o desempenho requerido para o concreto e com a dimensão máxima do agregado graúdo. Na Fig. 10 é apresentada a realização do ensaio do anel japonês.



Figura 10. Ensaio do anel japonês.

Após o escoamento do concreto avalia-se a diferença de altura entre a porção da mistura que permaneceu no interior do anel, e a parcela que espalhou para seu exterior. Pode-se também fazer uma análise da ocorrência de bloqueio ou de segregação, e ainda comparar a medida de espalhamento do concreto com o anel japonês com a medida de espalhamento no ensaio slump-flow.

2.6 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 [8], e os ensaios foram realizados nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias em um atuador servo-hidráulica.

2.6.1 Compressão axial simples (f_{cj})

O ensaio de compressão axial simples foi executado de acordo com [9], com velocidade de carregamento constante e igual a 0,6 MPa/s. A resistência à compressão em cada idade foi obtida através da média aritmética dos resultados dos corpos-de-prova ensaiados.

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

Realizou-se o ensaio de compressão diametral seguindo as recomendações da [10], com velocidade de carregamento constante e igual a 0,06 MPa/s, utilizando um aparato para solicitar o corpo-de-prova na direção diametral.

2.6.3 Determinação do módulo de elasticidade (E)

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada de acordo com [11], 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

Os resultados dos ensaios reológicos do concreto são apresentados no Quadro 3 juntamente com os limites para caracterização de um concreto auto-adensável.

Quadro 3. Valores dos ensaios de avaliação reológica do concreto.

<i>Ensaio</i>	<i>Slump-Flow</i>		<i>Funil V</i>	<i>Caixa L</i>		
	<i>d [cm]</i>	<i>t₅₀ [s]</i>	<i>t [s]</i>	<i>h₂/h₁</i>	<i>t₂₀ [s]</i>	<i>t₄₀ [s]</i>
Concreto estudado	66,5	7	5	0,81	1,0	2,0
Limites [12]	60 a 70	4 a 10	<10	≥ 0,8	≤ 1,0	≤ 2,0

Pôde-se observar durante os diferentes ensaios que o concreto não apresentou em nenhum momento exsudação ou segregação visível e de acordo com a tabela 3, os parâmetros avaliados se apresentaram entre os limites estabelecidos, com isso o concreto pode ser classificado como auto-adensável.

Quanto ao ensaio do anel japonês notou-se visualmente que não houve bloqueio ou segregação durante o escoamento do concreto entre as barras, não apresentando diferença de altura de concreto entre a área interna e externa do anel, entretanto comparando a medida de espalhamento com e sem a presença do anel japonês pode-se observar uma diferença representativa que pode ser facilmente corrigida, mesmo porque este ensaio não é considerado determinante por muitos autores especialistas em concreto auto-adensável.

No Quadro 4 são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos assim como a composição do concreto analisado.

Quadro 4. Valores dos ensaios mecânicos e características do traço.

<i>Concreto estudado</i>		
Traço em massa	1:m	1:6,5
Teor de argamassa (%)		60
Adição de sílica ativa (%)		10
Teor de aditivo superplastificante (%)		1,5
Relação água/cimento		0,58
Composição dos agregados graúdos B1/B2 (% / %)		70 / 30
Composição dos agregados graúdos A1/A2/A3 (% / % / %)		24 / 56 / 20
Consumo de cimento por m ³ (kg)		288,5
F _{cj} (MPa)	3 dias	32,0
	7 dias	40,6
	14 dias	59,7
	28 dias	59,9
F _{ctj} (MPa)	3 dias	3,1
	7 dias	3,3
	14 dias	4,2
	28 dias	4,2
E (GPa)	3 dias	30,3
	7 dias	32,2
	14 dias	35,9
	28 dias	39,3

Avaliando o Quadro 4 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.

4. CONCLUSÕES

Através das análises do concreto no estado fresco e endurecido, conclui-se que os objetivos do trabalho foram alcançados, demonstrando a possibilidade de produção de um concreto auto-adensável com baixo consumo de cimento, baixo teor de argamassa comparado com os teores indicados pela literatura, além de apresentar um elevado desempenho mecânico. Sendo utilizada a técnica de empacotamento de partículas, além da seleção criteriosa de materiais disponíveis comercialmente.

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] HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P.. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo: Pini, 1992.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 1994.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- [10] 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.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. São Paulo, 1984.
- [12] GOMES, P.C.C.. Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete. Tese Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.