

# ***Fresh and hardened properties of self-compacting concrete modified with lightweight and recycled aggregates***

## ***Propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável modificado com agregados leves e reciclados***



**A. F. ANGELIN**<sup>a</sup>  
andressa.angelin@pos.ft.unicamp.br

**R. C. CECHE LINTZ**<sup>b</sup>  
rosacclintz@ft.unicamp.br

**L. A. G. BARBOSA**<sup>a</sup>  
gachet@ft.unicamp.br

### **Abstract**

A produção de concretos auto compactáveis de baixa massa específica tornou-se um grande desafio para a engenharia civil, principalmente quanto à dosagem e manutenção das resistências mecânicas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar concretos autoadensáveis (CAA) produzidos com agregados leves e reciclados. Fixou-se as dosagens de sílica ativa, pó de pedra, pedrisco, argila expandida e superplastificante, variando-se a porcentagem do resíduo de borracha em 5% e 10%, em substituição ao agregado miúdo. As amostras foram submetidas aos ensaios de espalhamento, viscosidade, habilidade passante, resistências à compressão e à tração por compressão diametral e, massa específica. Verificou-se que os CAA produzidos apresentaram coesão e trabalhabilidade adequados, bem como atendem as condições normativas para uso em peças pré-moldadas e estruturais.

**Keywords:** self-compacting concrete, lightweight aggregate, recycled aggregate, fresh properties, mechanical strengths.

### **Resumo**

The production of self-compacting concrete (SCC) with low density has become a major challenge for civil engineering, especially regarding the dosage and maintenance of mechanical strength. In this context, the objective of this work was to analyze self-compacting concrete (SCC) using lightweight and recycled aggregates. Fixed the additions of silica fume, stone dust, gravel, expanded clay and superplasticizer, varying the percentage of rubber waste by 5% and 10%, replacing the fine aggregate. The samples were subjected to spreading assays, viscosity, passing ability, compressive strength and tensile strength by diametrical compression and density. It was found that SCC produced had adequate cohesion and workability as well as meet the regulatory conditions for use in pre-cast and structural parts.

**Palavras-chave:** concreto autoadensável, agregado leve, agregado reciclado, propriedades no estado fresco, resistências mecânicas.

<sup>a</sup> Technology Faculty, State University of Campinas, Limeira, SP, Brazil.

## 1. Introdução

A mecanização dos processos construtivos, como forma de acelerar os processos de produção e, como consequência, a produtividade de elementos pré-fabricados, tem incentivado estudos mais aprofundados do concreto leve autoadensável (CLA), sendo este, um material alternativo ao concreto convencional.

O concreto leve congrega baixa massa específica e manutenção das resistências mecânicas, podendo ser aplicado para fins estruturais, influenciando diretamente na economia com infraestrutura [1]. Destaca-se ainda que, o uso deste tipo de concreto ocasiona numa maior produtividade que o convencional, facilitando o transporte das peças durante a etapa de execução da obra.

Assim como o concreto leve, o concreto autoadensável (CAA) surgiu como uma alternativa ao convencional. De acordo com levantamentos já realizados [2, 3], a principal atratividade do seu uso é a facilidade de manuseio e aplicação, cuja habilidade de preencher os espaços existentes nas fôrmas e envolver as armaduras, se dá exclusivamente por meio da ação da gravidade, sem nenhuma interferência mecânica ou manual.

Ao se trabalhar com concretos mais fluidos, tem-se como consequência redução no tempo de manuseio e adensamento quando aplicados em elementos pré-fabricados, ocasionando na maior produtividade e menor custo final na operação de concretagem.

Os princípios mais importantes para manter as características do concreto autoadensável são o uso de superplastificantes, adições minerais, alto teor de materiais finos e argamassa, resultando em uma maior coesão e fluidez da pasta, porém, em contrapartida tem-se um concreto que absorve menos energia, ou seja, torna-se extremamente sensível à presença de trincas e micro trincas, comprometendo a integridade do material [4, 5].

Buscando minimizar este efeito, os concretos emborrachados, apresentam melhor capacidade ao amortecimento, devido ao aumento significativo da tenacidade e ductilidade [6]. Além de melhorar tal propriedade, o uso de borracha em concreto surge como uma solução alternativa para o descarte de pneus inservíveis, sendo uma opção inovadora com inúmeros benefícios.

Na composição dos CAA com agregados leves, adições minerais, geralmente oriundas de subprodutos industriais, apresentam grande atividade pozolânica, fato que garante maior coesão entre os componentes deste concreto [3]. Porém, dada à alta área superficial destas adições, faz-se necessário o uso de aditivos superplastificantes, a fim de maximizar a fluidez dos CAA sem comprometer a relação água/cimento [7].

Desta forma, fica evidente o mérito que se tem em desenvolver concretos autoadensáveis com agregados leves e reciclados, sendo uma linha de estudo moderna e, ainda, pouco explorada no campo técnico. Porém, este tipo de concreto, necessita atender requisitos específicos para sua aplicação, como alta fluidez, coesão, resistência à segregação no estado fresco, baixa massa específica e resistências mecânicas.

### 1.1 Concreto leve autoadensável (CLA)

O concreto leve autoadensável (CLA) é caracterizado pela alta trabalhabilidade sem apresentar o fenômeno de segregação e pela

alta durabilidade [8]. O sucesso para a produção deste concreto é a utilização de agregados leves, como a argila expandida, obtida por meio da expansão da argila e sua vitrificação em fornos rotativos.

O uso de argila expandida como agregado em CLA, aliado com adições minerais, principalmente sílica ativa, podem resultar em um concreto altamente viável e durável [1, 8, 9, 10]. A utilização destes agregados tem contribuído para o desenvolvimento sustentável através da conservação de energia, maximizando a eficiência estrutural e vida útil de elementos pré-moldados, reduzindo custos com transporte, devido à sua baixa massa específica [4].

Porém, como já observado em outras pesquisas [1, 4], há uma perda de capacidade de trabalho associada com a alta absorção de água pelos agregados leves, influenciando diretamente nas propriedades do CLA, principalmente no estado fresco. Portanto, deve-se ocorrer a pré-saturação desses agregados, a fim de resolver este problema, sendo, o mais usual, o método de imersão em água, realizado por um período de 24 horas antes da produção dos concretos.

O uso da argila expandida, principalmente de maior dimensão, no CAA, ocasiona maior rolamento entre as partículas durante a realização dos ensaios no estado fresco, devido à sua forma mais arredondada e superfície vítrea, em comparação com agregados convencionais [1, 8, 9, 10, 11]. Além disso, os concretos autoadensáveis que incorporaram agregados com formato arredondado, necessitam de menos cimento e água para alcançar adequada trabalhabilidade e coesão das suas misturas [11].

Outra característica importante na formulação dos CLA é a distribuição granulométrica de seus agregados. Alguns autores salientam em seus trabalhos o uso de granulometrias graúdas e miúdas de argila expandida, de maneira que a fluidez e o espalhamento sejam melhorados, por meio do melhor empacotamento dos grãos, preenchendo os vazios existentes [1, 8].

Recentes estudos [8, 11] tem adicionado sílica ativa nas misturas de concreto autoadensável e, observou-se que, devido ao seu tamanho micrométrico, fornecem um elevadíssimo aumento da coesão e fluidez neste tipo de concreto, principalmente quando utilizados agregados especiais, como a argila expandida.

Tais benefícios ressaltam a importância de desenvolver projetos com o uso de CLA, pois, além de apresentarem as principais características do concreto autoadensável, como fluidez e trabalhabilidade, possuem excelente resistência à segregação, baixa massa específica, manutenção das propriedades mecânicas e durabilidade no estado endurecido.

### 1.2 Concreto autoadensável com borracha

Uma solução alternativa para o descarte de pneus inservíveis é sua incorporação em misturas de concreto, pois é uma opção inovadora com benefícios ambientais, econômicos e de desempenho, desde que realizadas na granulometria e porcentagens adequadas [7].

Os pneus usados que possuem a carcaça em boas condições podem ser reformados e reutilizados. Segundo a resolução CONAMA 416/2009 [12], os processos de reformas podem ser caracterizados por recapagem, processo pelo qual o pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem; recauchutagem, processo

pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem e dos ombros e; remoldagem, processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem, ombros e toda a superfície de seus flancos. Na recapagem e recauchutagem, por meio da raspagem da camada a ser reformada, são gerados resíduos em forma de fibras e pó de borracha, granulometrias bastante usadas em matrizes cimentícias como agregado [13]. No processo de reciclagem, o pneu inservível é triturado e reduzido em partículas menores. A trituração pode ser feita a temperatura ambiente ou por meio do processo criogênico. Em temperatura ambiente os pneus primeiramente são transformados em lascas de 50 mm, posteriormente essas lascas vão para o triturador e são reduzidas a 10 mm, neste processo é removida parte do aço e, depois do triturador, o restante do aço é removido magneticamente [14]. Embora haja uma demanda para a borracha triturada de 10 mm, a

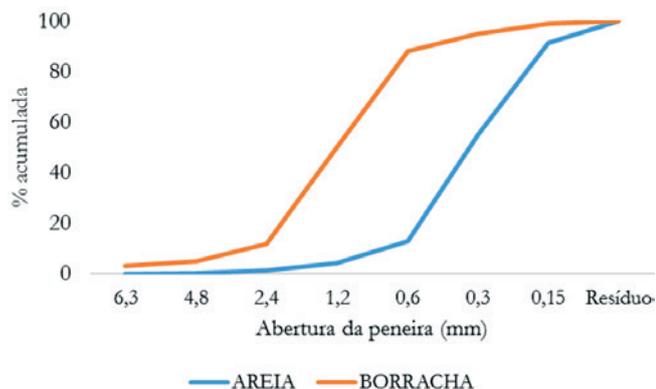
maioria das aplicações na construção civil pedem granulometrias mais finas, no intervalo de 2 a 0,84 mm. Por esta razão as empresas de moagem realizam consecutivas triturações [14].

A presença da borracha como agregado reduz algumas propriedades mecânicas do concreto, por isso porcentagens acima 30% de substituições, não são recomendadas [15]. Esta queda de resistência ocorre devido à fraca ligação entre a partícula de borracha e a matriz de cimento e, também, pela granulometria grosseira da borracha, deixando o concreto mais frágil [2, 3].

Além dos limites de substituições dos agregados convencionais pelo resíduo de borracha, outro aspecto importante na formulação do concreto autoadensável emborrachado é a distribuição granulométrica de seus agregados [3, 16]. Assim como observado nos CLA com argila expandida, a partir do uso de granulometrias graúdas e miúdas, há um melhor empacotamento dos grãos,

**Tabela 1**  
Caracterização dos materiais

Componente	Cimento	Areia	Borracha	Pó de pedra	Pedrisco	Argila expandida
Elemento químico (%)						
C	-	-	91,50	-	-	-
Zn	-	-	3,50	-	-	-
O	-	-	3,30	-	-	-
S	-	-	1,20	-	-	-
Na	-	-	0,20	-	-	-
Ca	-	-	0,10	-	-	-
Composição química (%)						
CaO	63,33	-	-	-	-	-
SiO <sub>2</sub>	19,19	-	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,15	-	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,80	-	-	-	-	-
MgO	0,92	-	-	-	-	-
L.O.I.	3,97	-	-	-	-	-
I.R.	0,48	-	-	-	-	-
Propriedades físicas						
Massa específica (g x cm <sup>-3</sup> )	3,11	2,63	1,14	2,76	2,96	1,15
Massa unitária (g x cm <sup>-3</sup> )	-	1,57	0,35	1,56	1,50	0,62
Dimensão máxima (mm)	-	2,40	4,80	4,80	9,50	9,50
Módulo de finura	-	1,60	3,49	3,07	5,36	5,50
<b>Nota:</b> L.O.I. = Lost on ignition; I.R. = Insoluble residue.						



**Figura 1**  
Curva granulométrica da areia e borracha

preenchendo os vazios existentes, aumentando a durabilidade do concreto.

Após a adição de partículas de borracha, estudos realizados indicaram uma diminuição notável nas propriedades de rigidez e de resistência dos concretos. Apesar da redução dessas propriedades, os compósitos atenderam aos requisitos normativos, além de apresentarem aumento significativo da tenacidade e ductilidade, bem como uma melhor capacidade de amortecimento. Em contrapartida, a utilização deste agregado agrava significativamente a penetração de íons cloreto através de concreto, porém, a partir de adições minerais, esse efeito pode ser diminuído, pois os vazios existentes são preenchidos [6].

Concretos autoadensáveis com borracha exigem uma maior quantidade de superplastificante em suas misturas quando comparado ao concreto autoadensável convencional, pois as partículas de borracha apresentam superfície rugosa, o que acarreta no aumento da coesão, mas diminui drasticamente a trabalhabilidade [2]. Valores de coeficiente de amortecimento de vibrações e frequência, dados pelo módulo dinâmico, são de grande importância em aplicações estruturais. Aperfeiçoá-lo significa melhorar a confiabilidade em termos de riscos naturais, carga acidental ou hidrostática e fragmentações. Concretos produzidos com resíduos de pneus inservíveis apresentam retardamento quanto ao surgimento de microfissu-

**Tabela 2**  
Absorção de água da argila expandida

Tempo	Absorção de água (%)
	CINEXPAN 1506
1 min	0,67
5	1,50
10	2,00
30	3,10
1 hora	3,83
2	4,33
6	5,50
1 dia	7,50

ras na matriz, reduzindo taxas de encolhimento, sendo capazes de absorver mais energia que os CAA convencionais [5, 13, 14].

Estudos recentes, a fim de compensar os baixos valores em algumas propriedades mecânicas do CAA, realizaram um pré-tratamento das partículas de borracha por meio de soluções de polímeros sintéticos hidrossolúveis, o qual se mostrou eficiente, pois os resultados mecânicos foram aprimorados [2, 3].

De acordo com os resultados encontrados na literatura [12], foi determinado que a adição do agregado de borracha em CAA aumenta a resistência ao impacto, sendo esse aumento proporcional à quantidade adicionada de borracha. Concreto autoadensável com borracha, como reportado por diversos autores, absorve mais energia, isolando melhor as ondas sonoras [5, 16, 17]. Portanto, o concreto autoadensável com borracha pode ser aplicado em elementos pré-moldados que requerem alta ductilidade, aliando alta fluidez e manutenção dos esforços mecânicos, características que não são mantidas em concretos autoadensáveis convencionais.

Devido a tais aspectos, o objetivo deste trabalho foi estudar o desempenho de concretos autoadensáveis produzidos com argila expandida e resíduo de borracha de pneus inservíveis, proveniente do processo de recauchutagem. Elaboraram-se traços com dosagens fixas de sílica ativa, pó de pedra, pedrisco, argila expandida e superplastificante, variando-se a porcentagem do resíduo de borracha em 5% e 10%, em substituição a areia. As amostras produzidas foram submetidas, no estado fresco, aos ensaios de espalhamento, viscosidade e habilidade passante. No estado endurecido realizaram-se os ensaios de resistências à compressão e à tração por compressão diametral, bem como a massa específica.

## 2. Materiais e programa experimental

Para alcançar os objetivos deste trabalho, foram selecionados os materiais para preparo dos concretos, os quais foram caracterizados antes do cálculo dos traços e produção das misturas. Após sua produção, os concretos foram submetidos aos ensaios no estado fresco e, após o processo de cura, aos ensaios mecânicos e de massa específica. Tais procedimentos as seguiram recomendações normativas e foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas.

### 2.1 Materiais

Foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial, o qual garante elevadas resistências com maior velocidade e, sílica ativa que garante maior coesão às misturas. Como agregado miúdo natural utilizou-se areia quartzosa fina e, como seu substituto parcial, empregou-se o resíduo de borracha de pneus inservíveis, proveniente do processo de recauchutagem. Como material fino adotou-se o pó de pedra, que tem como finalidade o aumento da fluidez das misturas. Pedrisco e argila expandida foram utilizados como agregado graúdo. Um plastificante a base de éter policarboxílico foi usado para garantir trabalhabilidade nas misturas de concreto. A caracterização do cimento, areia, borracha, pó de pedra, pedrisco e argila são apresentadas na Tabela 1. A Figura 1 mostra a curva granulométrica da areia e da borracha.

O superplastificante utilizado exibiu densidade de 1,19 g x cm<sup>-3</sup>, pH = 6, teor de sólidos de 30% e viscosidade inferior a 150 cps,

enquanto a sílica ativa apresentou massa específica de 2,21 g x cm<sup>-3</sup>. A fim de entender o processo de absorção da argila expandida, executou-se o ensaio de absorção de água e, os resultados estão apresentados na Tabela 2.

## 2.2 Dosagem e produção dos concretos

Amostras de concreto foram preparadas incorporando 0%, 5% e 10% de resíduo de borracha, em substituição ao agregado miúdo, seguindo as recomendações propostas pelo ACI 211.2-98 [18] e por Tutikian [19]. As dosagens foram realizadas com a finalidade de garantir valores de trabalhabilidade em torno de 560 mm (+/- 10 mm), massa específica em torno de 2000 kg/m<sup>3</sup> e resistência à compressão acima de 20 MPa aos 28 dias de idade. A relação água/cimento utilizada para todas as misturas foi de 0,68. As identificações das amostras foram CR para a mistura de referência e, C5 e C10 para as misturas contendo 5% e 10% de resíduo de borracha. A proporção das misturas encontra-se na Tabela 3.

Por apresentar uma alta absorção, a argila expandida permaneceu imersa em água durante 24 horas, antes da produção dos concretos. Conforme observado na Tabela 2 e relatado por outros autores [1, 4], por se tratar de um material poroso, a argila expandida pode comprometer a quantidade de água disponível para a hidratação do cimento, sendo assim, para compensar este efeito, recomenda-se o procedimento de umedecimento prévio deste material.

Foi misturado em uma betoneira de eixo inclinado, previamente umedecida, o agregado graúdo convencional e a argila expandida (1 minuto), em seguida, a água e o cimento Portland de alta resistência inicial (3 minutos), seguido do pó de pedra, areia e sílica ativa (3 minutos). Logo após introduziu-se o aditivo superplastificante, ocorrendo uma nova mistura por 3 minutos. O processo de produção dos concretos C5 e C10 ocorreu de forma análoga ao utilizado para a confecção do concreto de referência, sendo, a borracha, introduzida após a areia.

As amostras foram colocadas em moldes e recobertas por uma película polimérica a fim de evitar perda de água para o meio. Após 24 h as amostras foram desformadas e submetidas à cura úmida (Temperatura = 25°C e Umidade relativa do ar = 80%) por um período de 7 e 28 dias, para posterior realização dos ensaios no estado endurecido.

## 2.3 Ensaios no estado fresco

Os ensaios realizados para caracterizar o concreto autoadensável diferenciam-se do convencional apenas quanto ao estado fresco,

que determinam de forma direta e indireta os parâmetros reológicos fundamentais do concreto, tais como tensão de escoamento e viscosidade. Segundo a ABNT NBR 15823:2010 [20], três parâmetros principais devem ser caracterizados nos CAA, que são:

- fluidez e escoamento (SF) – Ensaio de espalhamento: o valor de espalhamento, medido por meio do ensaio *slump flow* é especificado para todos os CAA como um ensaio primário, esboçando indicações da fluidez e habilidade de preenchimento das fôrmas em fluxo livre. A fluidez é definida como sendo a capacidade do concreto de fluir livremente sem segregar. O equipamento utilizado é o mesmo adotado no ensaio de determinação da consistência para o concreto convencional, o molde tronco-cone. O adensamento do concreto dentro do molde, devidamente posicionado sobre o centro de uma base plana, se dá exclusivamente pela força da gravidade. Após o preenchimento, o molde é levantado e o concreto flui livremente. O resultado do ensaio é a média de dois diâmetros perpendiculares do círculo formado pela massa de concreto.
- viscosidade plástica aparente (VF ou VS) – Ensaio do Funil “V”: a viscosidade é uma propriedade relacionada à sua consistência no estado fresco e influencia a resistência deste ao escoamento. Quanto maior a viscosidade do concreto, maior a sua resistência ao escoamento, fazendo com que seu deslocamento dentro da fôrma ocorra de forma mais lenta. A ABNT NBR 15823:2010 especifica uma avaliação qualitativa da viscosidade do concreto por meio do tempo de escoamento do CAA em ensaios que medem sua habilidade em fluir e, por isso, é chamada de viscosidade plástica aparente. Assim como o *slump flow test*, o ensaio do Funil “V” também serve como parâmetro de medida da fluidez do concreto, que envolve uma avaliação qualitativa da viscosidade aparente do concreto, em fluxo confinado, a partir do registro do tempo que o concreto leva para escoar neste equipamento. Esta medida consiste em cronometrar o tempo que o concreto leva para escoar totalmente através de um equipamento em forma de V.
- habilidade passante (PL ou PJ) – Ensaio da Caixa “L”: esta propriedade informa sobre a capacidade do concreto fresco fluir, sem perder a uniformidade ou causar bloqueio através de espaços confinados e aberturas estreitas, como áreas de alta densidade de armadura e embutidos. O ensaio utilizando a Caixa “L”, previsto na parte 4 da ABNT NBR 15823:2010, mede a habilidade passante, sob fluxo confinado, por meio da razão entre as alturas H2 e H1 da superfície do concreto nas extremidades posterior e anterior da câmara horizontal, respectivamente, após aberta a grade de separação entre os compartimentos. A ABNT NBR 15823:2010

**Tabela 3**

Quantidade dos materiais, em proporção

Traço	Cimento	Sílica	Areia	Pó de borracha	Pó de pedra	Pedrisco	C1506	SPA	Relação a/c	Teor de argamassa (%)
CR	1	0,1	1,81	0	1,56	1,95	0,02	0,008	0,68	0,69
C5			1,77	0,04				0,008		
C10			1,73	0,08				0,008		

classifica o CAA no estado fresco em função dos parâmetros apresentados e, recomenda a correlação dessa classificação com a aplicação do concreto em campo, como exemplifica a Tabela 4.

Segundo as prescrições normativas, os procedimentos de ensaios para a aceitação do CAA no estado fresco devem ser baseados, no mínimo, na comprovação das propriedades de fluidez e viscosidade,

**Tabela 4**

Classes de espalhamento, viscosidade plástica aparente e habilidade passante do CAA em função da sua aplicação

Propriedades - Ensaios	Classes	Aplicação	Exemplo
Espalhamento (Slump-flow) (mm)	SF 1: 550 to 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre; Concreto auto adensável bombeado; Estruturas que exigem um curto espalhamento horizontal do concreto auto adensável.	Lajes, revestimento de túneis, estacas e certas fundações profundas.
Espalhamento (Slump-flow) (mm)	SF 2: 660 to 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes.	Paredes, vigas, pilares e outras.
Espalhamento (Slump-flow) (mm)	SF 3: 760 to 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).	Pilares-parede, paredes diafragma e pilares.
Propriedades - Ensaios	Classes	Aplicação	Exemplo
Viscosidade plástica aparente (Funil "V") (s)	VF 1: < or = 8	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação; Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes, paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concretos aparentes.
Viscosidade plástica aparente (Funil "V") (s)	VF 2: 9 to 25	Adequado para a maioria das aplicações correntes; Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação; Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.	Vigas, pilares e outras.
Propriedades - Ensaios	Classes	Aplicação	Exemplo
Habilidade passante (Caixa "L") (H2/H1)	PJ 1: > ou = 0,80, com 3 barras de aço	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 a 100 mm; Adequada para a maioria das aplicações correntes.	Lajes, painéis, elementos de fundação, vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados.

**Tabela 5**

Resultados dos ensaios no estado fresco

Traço	Slump flow test (mm)	Mínimo exigido pela norma brasileira	Caixa "L" (H2/H1)	Mínimo exigido pela norma brasileira	Funil "V" (s)	Mínimo exigido pela norma brasileira
CR	570	> 550	1,00	> 0,80	4	< 8
C5	550		0,85		5	
C10	550		0,80		7	

avaliadas pelo ensaio de espalhamento para cada betonada. A referida norma ressalta, ainda, que seus procedimentos se aplicam ao concreto com massa específica normal (de 2000 a 2800 kg/m<sup>3</sup>), devendo ser avaliada, de forma individualizada, a aplicabilidade dos requisitos estabelecidos para o CAA com inclusão intencional de ar, agregados leves, agregados pesados e fibras. Diante do exposto, pode-se concluir que os parâmetros não podem ser considerados de forma isolada, pois todas as propriedades no estado fresco são interdependentes.

#### 2.4 Ensaios no estado endurecido

Os valores de massa específica foram determinados segundo as prescrições da ABNT NBR 9778:2009 [21], para concretos com 28 dias de idade, utilizando-se corpos-de-prova com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada mistura de concreto desenvolvida. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, seguindo as etapas abaixo:

- imersão das amostras em água a 20°C e, realização das medições em uma balança hidrostática ( $m_i$ );
- em seguida, secaram-se as amostras em uma estufa a 105°C e, após a remoção da estufa, as amostras foram resfriadas a temperatura ambiente para posterior determinação da massa seca em estufa ( $m_s$ ).

Após obter as massas mencionadas acima, foi possível calcular a massa específica das amostras por meio da seguinte equação:

$$\text{Density} = m_s / (m_s - m_i) \quad (1)$$

onde: ME é a massa específica,  $m_s$  é a massa seca da amostra e  $m_i$  é a massa imersa da amostra.

As resistências à compressão e à tração dos concretos foram determinadas segundo as prescrições da ABNT NBR 5739:2007 [22] e ABNT NBR 7222:2011 [23], respectivamente. Foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, nas idades de 7 e 28 dias. Para cada dosagem foram moldados 10 corpos-de-prova a fim de serem ensaiados à compressão e, 6 corpos-de-prova para serem ensaiados à tração; sendo ensaiados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP.

### 3. Resultados e discussões

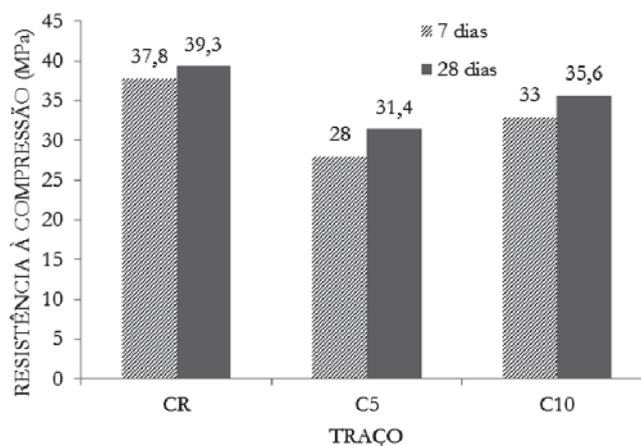
#### 3.1 Ensaios no estado fresco

Os ensaios de fluidez, viscosidade e habilidade passante foram

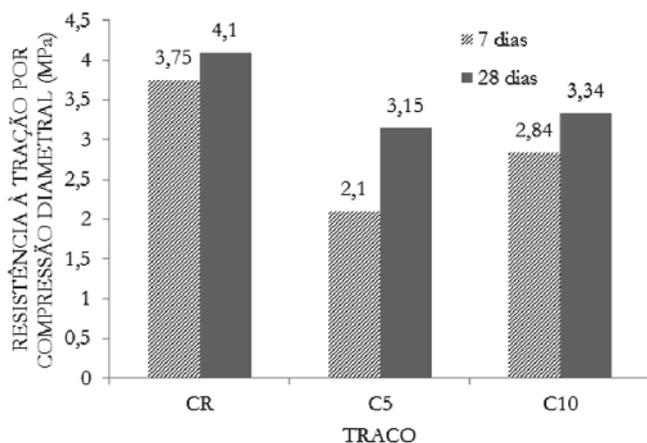
realizados para os concretos produzidos nesta pesquisa e, os resultados foram comparados com os valores especificados pela norma brasileira vigente [20]. A Tabela 5 mostra os resultados dos ensaios no estado fresco dos CAA produzidos com argila expandida e resíduo de borracha de pneus inservíveis.

Observou-se, para todos os traços, que os valores de fluidez (*slump flow test*) atingiram o nível de auto adensibilidade especificado para a classe SF1, podendo ser utilizados em lajes, revestimento de túneis, estacas e fundações. O CR apresentou maior fluidez, garantida pelo uso da argila expandida, que C5 e C10, ou seja, o resíduo de borracha aumenta a tensão de escoamento no concreto. Isto ocorre devido à superfície rugosa e antiaderente da borracha, que corrobora para uma diminuição do espalhamento das misturas [2, 3, 6]. Entretanto, devido ao proporcionamento dos materiais e distribuição granulométrica adequados houve uma manutenção da coesão de todas as misturas, as quais não apresentaram o fenômeno de segregação dos seus agregados.

As medidas encontradas na caixa "L", que simula a capacidade do concreto fresco fluir através de espaços confinados e estreitos, qualificam os concretos como sendo classe PJ1, em equipamento composto por 3 barras de aço. Esta classe de CAA é adequada para uso em elementos estruturais com espaçamentos entre as armaduras de 80 a 100 mm. Suas aplicações podem ocorrer em painéis, vigas, pilares, tirantes, entre outros elementos pré-moldados.

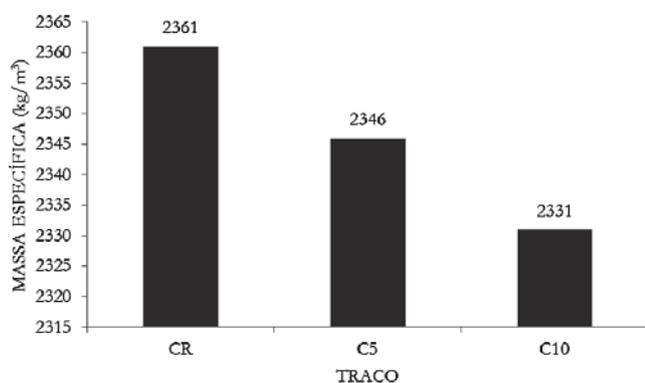
**Figura 2**

Resistência à compressão, com relação ao tempo de cura



**Figura 3**  
Resistência à tração por compressão diametral, com relação ao tempo de cura

Quanto aos resultados obtidos no ensaio utilizando o funil “V”, todos os concretos foram classificados como VF1, por apresentarem tempo de escoamento inferior a 8 segundos; ou seja, é adequado para uso em elementos estruturais com alta densidade de armadura, porém, exige-se um controle da exsudação e segregação dos seus agregados. Observou-se que o traço de referência apresentou menor viscosidade, ou seja, o tempo de escoamento no funil “V” foi menor. Em contrapartida, os traços C5 e C10 exibiram maior viscosidade devido ao incremento da borracha nas misturas. A partir dos resultados obtidos nos ensaios no estado fresco, observou-se que o uso da argila expandida como agregado graúdo provoca um maior efeito de rolamento no concreto, garantindo a fluidez desejada. Isto ocorre devido ao formato arredondado e superfície vítrea da argila expandida, em comparação com os agregados graúdos convencionais, fato também observado por outros autores [1, 8-11]. Além disso, observou-se que o uso da sílica ativa nas misturas proporcionou coesão adequada. Isto se dá ao tamanho micrométrico e a alta atividade pozzolânica da adição mineral utilizada, fatos que corroboram para a estabilidade dos agregados no CAA, garantindo que não ocorresse o fenômeno de segregação [8, 11, 24].



**Figura 4**  
Massa específica aos 28 dias

### 3.2 Ensaios no estado endurecido

Os valores da resistência à compressão encontram-se na Figura 2. Todas as misturas apresentaram, tanto aos 7 como aos 28 dias, valores de resistência à compressão maiores que 20 MPa, valor mínimo exigido pela ABNT NBR 6118:2014 [25] para concretos estruturais, fato atribuído, principalmente, ao uso da sílica ativa que apresenta alta atividade pozzolânica, contribuindo para a manutenção das resistências mecânicas em matrizes cimentícias [9, 10]. A partir dos resultados observados na Figura 2, notou-se que houve uma queda de resistência à compressão do CR para o C5 de aproximadamente 23%. Ao contrário do que foi observado nos traços CR e C5, houve um acréscimo da resistência à compressão do C5 para o C10 em torno de 15%. Este fenômeno demonstra que houve um melhor empacotamento do resíduo de borracha quando a substituição foi de 10%, ou seja, na substituição de 5% a borracha não se distribui com uniformidade no concreto, causando a queda da resistência, devido ao baixo valor de módulo de elasticidade do agregado polimérico e dos vazios causados oriundos do arraste de ar, que não são preenchidos [26, 27]. Quando a borracha é distribuída uniformemente, há, também, uma absorção uniforme de energia mecânica no concreto, aumentando, assim, a resistência à compressão; entretanto, quando há uma adição excessiva de borracha, suas partículas passam a ser o ponto menos resistente do concreto, pois apresenta uma fraca ligação com a matriz de cimento devido a sua granulometria grosseira e antiaderente [3, 26, 27].

Os valores da resistência à tração por compressão diametral, aos 7 e 28 dias de idades, são mostrados na Figura 3. Assim como observado no ensaio de resistência à compressão, os valores obtidos quanto à tração por compressão diametral, apresentou uma queda do CR para o C5 em torno de 33% e, um acréscimo de 19% do C5 para o C10. Alguns pesquisadores [3, 13], também observaram que para granulometrias menores de borracha, as resistências mecânicas tendem a aumentar em comparação às granulometrias maiores, devido à melhor distribuição dos agregados e preenchimento dos poros do concreto, melhorando significativamente a qualidade da zona de transição.

Com a finalidade de classificar os concretos produzidos como leves realizou-se o ensaio de massa específica, cujos valores encontram-se na Figura 4. A partir dos valores apresentados pode-se observar que há uma diminuição da massa específica dos concretos conforme aumento da quantidade de borracha nas misturas, isto ocorre devido à baixa densidade e à formação de uma película de ar ao redor da borracha [3, 28, 29]. Entretanto, nenhuma das misturas pode ser classificada como concreto leve, pois, segundo a ABNT NBR 8953:2015 [30], esse valor deve ser igual ou inferior a 2000 kg/m<sup>3</sup>. Apesar de apresentarem massas específicas menores que os agregados convencionais, a quantidade de argila expandida e de borracha utilizadas nesta pesquisa não contribuiu para a produção de peças leves, de acordo com as prescrições normativas.

## 4. Conclusões

- A metodologia utilizada para a dosagem dos concretos se mostrou eficiente, não apresentando os fenômenos de segregação e exsudação;

- Todas as misturas apresentaram coesão e consistência adequadas para o manuseio e moldagem, além da manutenção da trabalhabilidade;
- De acordo com os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco, todos os concretos produzidos nesta pesquisa podem ser caracterizados como autoadensáveis;
- Houve uma queda de resistência mecânica do CR para o C5, porém, houve um acréscimo do C5 para o C10;
- Para as dosagens desenvolvidas nesta pesquisa, o melhor empacotamento dos grãos de borracha ocorreu no traço C10, pois apresentaram melhores valores de resistência mecânica;
- Quanto aos valores de massa específica, todos os traços apresentaram valores acima de 2000 kg/m<sup>3</sup>, ou seja, os concretos produzidos não podem ser caracterizados como leves.

## 5. Agradecimentos

As autoras agradecem a CAPES, pela bolsa de doutorado concedida e, as empresas Cinexpan, Tecnosil e Basf, pelos materiais doados para a realização desta pesquisa.

## 6. Referências bibliográficas

- [1] BOGAS, J. A.; GOMES, A.; PEREIRA, M. F. C. Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 35, p. 1013–1022, 2012.
- [2] KARAHAN, O. et al. Fresh, Mechanical, Transport and Durability Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete. *ACI Materials Journal*, v. 109, 2013.
- [3] YUNG, W. H.; YUNG, L. C.; HUA, L. H. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 665–672, 2013.
- [4] KWASNY, J. et al. Influence of the Type of Coarse Lightweight Aggregate on Properties of Semi-Lightweight Self-Consolidating Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, December, p. 455, 2012.
- [5] RAHMAN, M. M.; USMAN, M.; AL-GHALIB, A. A. Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC). *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 630–637, 2012.
- [6] GESOLU, M.; GUNEYISI, E. Permeability properties of self-compacting rubberized concretes. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 8, p. 3319–3326, 2011.
- [7] RAJ, B.; GANESAN, N.; SHASHIKALA, A. P. Engineering properties of self-compacting rubberized concrete. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 30, n. 23, p. 1923–1930, 2011.
- [8] LOTFY, A.; HOSSAIN, K. M. A.; LACHEMI, M. Lightweight Self-consolidating Concrete with Expanded Shale Aggregates: Modelling and Optimization. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 9, n. 2, p. 185–206, 2015.
- [9] JURADIN, S.; BALOEVI, G.; HARAPIN, A. Experimental testing of the effects of fine particles on the properties of the self-compacting lightweight concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012.
- [10] GOPI, R. et al. Light expanded clay aggregate and fly ash aggregate as self-curing agents in self-compacting concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, v. 16, n. 7, p. 1025–1035, 2015.
- [11] GESOGLU, M. et al. Shear thickening intensity of self-compacting concretes containing rounded lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 79, p. 40–47, 2015.
- [12] RESOLUÇÃO CONAMA 416 de 30 de Setembro de 2009. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>, acesso em 20 de agosto de 2016.
- [13] LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S.; Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil, *Ciência e Tecnologia*, v. 18, n° 2, p. 106-118, 2008.
- [14] RESCHNER, K. Scrap Tire Recycling - A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods, Berlim - Alemanha, 2008. Disponível em: <http://www.entire-engineering.de/>, acesso em 20 de agosto de 2016.
- [15] KHALIL, E.; ABD-ELMOHSEN, M.; ANWAR, A. M. Impact Resistance of Rubberized Self-Compacting Concrete. *Water Science*, v. 29, n. 1, p. 45–53, 2015.
- [16] NAJIM, K. B.; HALL, M. R. Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, p. 521–530, 2012.
- [17] GANESAN, N.; BHARATI RAJ, J.; SHASHIKALA, A. P. Flexural fatigue behavior of self-compacting rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 7–14, 2013.
- [18] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete- ACI 211.2-98, 2004.
- [19] TUTIKIAN, B. F. Método para dosagem de concretos autoadensáveis. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823: Requisitos para classificação, controle e aceitação do CAA no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Concreto – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- [24] GUNEYISI, E.; GESOGLU, M.; BOOYA, E. Fresh properties of self-compacting cold bonded fly ash lightweight aggregate concrete with different mineral admixtures. *Materials and Structures*, v. 74, p. 17–24, 2015.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.
- [26] SILVA, F. M.; GACHET BARBOSA, L. A.; LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P.G. A. Investigation on the properties of

- concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber. *Construction & Building Materials*, v. 91, p. 71-79, 2015.
- [27] ANGELIN, A. F.; ANDRADE, M. F. F.; BONATTI, R.; CECHE LINTZ, R. C.; GACHET-BARBOSA, L. A.; OSÓRIO, W. R. Effects of spheroid and fiber-like waste-tire rubbers on interrelation of strength-to-porosity in rubberized cement and mortars. *Construction & Building Materials*, v. 95, p. 525-536, 2015.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.