

---

---

# DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE RASPA DE BORRACHA COMO SUBSTITUTA PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO EM CONCRETO AUTOADENSÁVEL

---

---

**Mayra Tagliaferri de Grazia**

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

## Resumo

Este trabalho estuda a porcentagem ótima do agregado de borracha, proveniente de pneu, como um substituto parcial de agregado miúdo no Concreto Autoadensável (CAA). O volume do agregado miúdo foi substituído pelo volume de borracha com porcentagens que variam de 5% a 30%, no CAA sem metacaulim, e de 20% a 40%, no CAA com metacaulim. O estudo avalia as propriedades do CAA no estado fresco e no estado endurecido. Os resultados dos ensaios do concreto no estado fresco indicaram que no máximo 20% do agregado miúdo devem ser substituídos por raspa de borracha para atender os valores determinados na *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*. Com o aumento do agregado de borracha, as propriedades mecânicas do concreto autoadensável foram reduzidas. Entretanto, com 20% de raspa de borracha, o CAA obteve resistência mecânica igual a 32,81 MPa, suficiente para aplicações estruturais, evidenciando a possibilidade da diminuição do consumo de agregado miúdo e também a produção de concreto autoadensável ecológico com o uso de borracha proveniente de descartes de pneus.

**Palavras-chave:** Concreto autoadensável. Concreto autoadensável com raspa de borracha. Agregado miúdo de borracha.

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço da indústria automobilística trouxe consigo o aumento significativo do descarte de pneus, o que gerou um grande problema devido aos descartes ilegais ou inadequados. Quando descartados nesses lugares, os pneus servem como área de procriação de roedores e de mosquitos, geram um alto risco de incêndio resultando em uma quantidade significativa de fumaça que pode causar doenças respiratórias às populações vizinhas (BERTOLLO; FERNANDES JÚNIOR; SCHALCH, 2002).

O aumento expressivo da quantidade de pneus resultou numa crescente conscientização em relação à reciclagem. A reciclagem do pneu é primordial, pois entre os materiais recicláveis, com 600 anos, ele é o material que tem o terceiro maior tempo médio de decomposição, atrás somente do alumínio e do vidro. No Brasil, somente 10% da sucata de borracha são reciclados (SÃO PAULO, 2006). O número de automóveis no Brasil cresceu aproximadamente 91,1% entre 2006 e 2014, segundo o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2015). O crescimento ocorreu em um passo quase onze vezes maior do que o crescimento populacional, que foi de 7,8% no mesmo período, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015).

O uso de borracha reciclada proveniente de pneus é vasto em engenharia civil, varia desde aplicações em pavimentos rodoviários até em misturas de concreto convencionais. No segundo caso citado, a borracha pode ser utilizada como substituta do agregado miúdo (granulado de borracha) ou como substituto do agregado graúdo (lasca de borracha). A produção de concreto com borracha resulta em um método ecológico de eliminação de borracha de pneu descartado, e ao mesmo tempo protege as matérias-primas areia e brita. Nos últimos 25 anos, pesquisas científicas sobre o uso de materiais recicláveis, como exemplo a borracha, como um componente do concreto convencional, foram realizadas para investigar a resistência e a durabilidade desse concreto (KHATIB; BAYOMY, 1999). Entretanto, a análise do uso de resíduo de borracha proveniente de pneus em Concreto Autoadensável (CAA) é limitada, o que leva a seguinte questão de pesquisa: *qual é a porcentagem ótima de substituição do agregado miúdo por raspa de borracha no concreto-auto-adensável?*

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar a porcentagem ótima da substituição parcial do agregado miúdo pela borracha granulada, proveniente de pneu, em CAA sem e com metacaulim (MC), de maneira a se obter concretos ecológicos e duráveis.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Avaliar as propriedades do CAA com borracha granulada do pneu sem e com adição de MC no estado fresco, referentes à habilidade de fluidez, viscosidade, habilidade passante e resistência à segregação.

Investigar as propriedades do CAA com borracha granulada do pneu sem e com adição de MC no estado endurecido, referentes à resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

Analisar pesquisas anteriores sobre CAA com agregado de borracha.

---

## 2 JUSTIFICATIVA

A construção civil também é um dos setores que mais causam impactos ambientais em razão do alto consumo de energia e de recursos naturais, e também pela alta geração de resíduos sólidos tanto na construção quanto na demolição (STACHERA JUNIOR, 2008). Segundo Pinto (1999), aproximadamente 150 quilos de resíduos sólidos são gerados na construção de cada metro quadrado. O concreto é o material usado na construção civil que tem o maior índice de utilização de recursos naturais, especialmente areia e brita. Analisando a produção interna e importação, o consumo do cimento Portland no Brasil, cresceu aproximadamente 81% entre 2004 e 2013. Esse valor é equivalente a 195 e 353 kg/hab em 2004 e 2013, respectivamente, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2013).

Considerando as questões apresentadas, estudos que possam contribuir para o avanço do uso do agregado de borracha no CAA tornam-se importantes em busca da produção de concretos ecológicos e mais duráveis.

---

## 3 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido a partir de revisão bibliográfica e ensaios laboratoriais. O Estudo Experimental da pesquisa foi desenvolvido no Canadá com o professor Dr. Assem A. A. Hassan, e o aluno de Ph.D Me Mohamed K. Ismail, na Memorial University, por meio de bolsa de estudos concedida pelo programa Ciência sem Fronteiras. A sessão experimental foi realizada de acordo com os ensaios especificados em normas para caracterização e comparação com valores disponíveis na literatura.

---

## 4 REVISÃO DA LITERATURA

Estudos anteriores concordam que o uso de resíduo de borracha como agregado diminui as propriedades mecânicas do concreto devido a dois principais fatores. Primeiramente, essa redução é justificada pelo fato de que o módulo de elasticidade da borracha não é parecido com o módulo de elasticidade da pasta de cimento endurecido. O outro fator está relacionado com o desenvolvimento de uma fraca Zona de Transição na Interface (ZTI), também conhecida como zona de interface, entre o cimento e os agregados (NAJIM; HALL, 2010). Emiroglu, Kelestemur e Yildiz (2007) analisaram a ZTI do concreto armado com uso de resíduo de borracha como agregado com o microscópio eletrônico de varredura. O estudo concluiu que há uma forte ZTI entre o cimento e os agregados. Em contrapartida, a ZTI entre a pasta de cimento e o resíduo de borracha de pneu é fraca, resultando em vazios entre eles: quando uma força é aplicada, microfissuras surgem a partir da fraca ZTI entre a borracha e o cimento, como consequência, diminuindo as propriedades mecânicas do concreto.

### 4.1 Propriedades do concreto convencional com resíduo de borracha de pneu

Resultados de investigações do concreto normal com resíduo de borracha de pneus estão descritos a seguir conforme suas propriedades no estado endurecido. A Tabela 1 mostra um resumo destas pesquisas.

TABELA 1

Resumo das pesquisas sobre o concreto convencional com agregado de borracha.

Propriedade	Pesquisadores	Agregado miúdo de borracha	Agregado graúdo de borracha	Agregado de borracha (%)	Redução da Propriedade (%)
Resistência à compressão	Kptresh e Mesfin (2014)		X	10%	9%
			X	20%	20%
	Al-Tayeb et al. (2013)	X		10%	22%
		X		20%	27%
Resistência à flexão	Kptresh e Mesfin (2014)		X	10%	2%
			X	20%	10%
			X	30%	20%
Módulo de elasticidade	Ganjian et al. (2012)		X	5%	17%
			X	10%	25%
	Al-Tayeb et al. (2013)	X		10%	16%
		X		20%	23%

Fonte: Elaborado pela autora.

### *A. Propriedades do CAA com resíduo de borracha de pneu*

Esta seção apresenta as pesquisas recentes relacionadas ao CAA com resíduo de borracha proveniente de pneus conforme suas propriedades no estado endurecido. Um resumo dessas investigações está ilustrado na Tabela 2.

TABELA 2

Resumo das pesquisas do CAA com resíduo de borracha de pneu.

Propriedade	Pesquisadores	Agregado miúdo de borracha	Agregado de borracha (%)	Redução da Propriedade (%)	
Resistência à compressão	Uygunoglu e Topçu (2010)	X	10%	8%	
		X	20%	33%	
		X	30%	41%	
		X	40%	46%	
	Najim e Hall (2012)	X	5%	31%	
		X	10%	42%	
Resistência à flexão	Uygunoglu e Topçu (2010)	X	15%	49%	
		X	10%	9%	
		X	20%	9%	
	Najim e Hall (2012)	X	30%	14%	
		X	40%	20%	
		X	5%	12%	
		X	10%	16%	
	Módulo de elasticidade	Uygunoglu e Topçu (2010)	X	15%	35%
			X	10%	13%
			X	20%	18%
Najim e Hall (2012)		X	30%	27%	
		X	40%	36%	
		X	5%	5%	
		X	10%	7%	
X	15%	21%			

Fonte: Elaborado pela autora.

## 5 ESTUDO EXPERIMENTAL – MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo analisa o comportamento do concreto autoadensável com a substituição percentual de borracha granulada pelo volume de areia. Para determinar a porcentagem ótima de borracha foram testadas seis misturas sem MC com diferentes porcentagens de agregado de borracha (AB) e três misturas com MC e com diferentes porcentagens de AB. Além disso, essas diferentes dosagens foram comparadas com a mistura controle, isto é, mistura sem borracha. Todos os ensaios no estado fresco foram baseados na NBR 15823 (ABNT, 2010) e no *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete* (THE SELF-COMPACTING CONCRETE EUROPEAN PROJECT GROUP, 2005). O ensaio de resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade foi baseado nas ASTM C39, ASTM C78, ASTM C469, respectivamente (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2001; 2000; 1994)

### 5.1 concepção dos modelos

O agregado graúdo utilizado foi brita de origem natural com diâmetro do grão máximo de 10 mm com massa específica ( $\mu$ ) de  $2,6 \text{ kg/m}^3$ . Além disso, dois tipos de agregados miúdos foram utilizados com diferentes proporções: a areia natural, com massa específica ( $\rho$ ) de  $2,6 \text{ kg/m}^3$ ; borracha granulada com massa específica de 0,95 e com diâmetro máximo de 4,75 mm, peneira n. 4, conforme especificado na NBR 7211 (ABNT, 2009). A absorção da areia e da brita é de 1%, já no agregado de borracha a absorção é insignificante. O Glenium 7700 produzido pela Basf Construction Chemicals foi utilizado como superplastificante e contém peso específico de  $1200 \text{ kg/m}^3$  e pH de 9,5. De acordo com as exigências da ASTM C 494 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2005), esse aditivo é classificado como tipo F – aditivos redutores de água de alta gama. O cimento usado é equivalente ao tipo I – uso geral da Norma ASTM C150 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007). Já o metacaulim usado, que foi comprado da empresa Advanced Cement Technologies, localizada no leste dos Estados Unidos, é equivalente a Classe N da Norma ASTM C618 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012).

### 5.1.1 Dosagem

A relação agregado graúdo-miúdo de 0,7 foi mantida em todas as misturas. Com base no estudo de Hassan e Mayo (2014), a relação água-cimento igual a 0,4 e o valor total de aglomerantes igual a 550 kg/m<sup>3</sup> foram adotados em todas as misturas. O valor total de aglomerantes foi aumentado, pois a adição do agregado de borracha diminui as propriedades mecânicas do concreto. Além disso, o aditivo superplastificante foi adicionado até o CAA com AB atingir o *slump-flow* superior a 650±50 mm. A Tabela 3 mostra a dosagem das seis misturas de CAA que foram ensaiadas. As misturas foram classificadas de acordo com a quantidade do AB. A primeira mistura, que é a mistura controle, pois contém 0% do AB, foi chamada de CAA-00AB. Já a mistura CAA-30AB contém 30% de AB em sua composição. Conforme citado anteriormente, a relação agregado graúdo-miúdo (RAg/m) é constante. Para o cálculo dessa relação foi necessário usar a Equação 1.

$$RAg/m = \frac{\frac{\rho_{\text{agregado graúdo}}}{\mu_{\text{agregado graúdo}}}}{\frac{\rho_{\text{agregado miúdo}}}{\mu_{\text{agregado miúdo}}} + \frac{\rho_{\text{agregado borracha}}}{\mu_{\text{agregado de borracha}}}} \quad (1)$$

A porcentagem volumétrica de agregado de borracha está inversamente relacionada à porcentagem volumétrica de agregado miúdo. Portanto, para calcular a quantidade necessária de agregado de borracha por metro cúbico de concreto foi necessário converter a densidade dos agregados. A densidade foi convertida para volume a partir da massa específica de cada agregado, dessa forma a relação volumétrica foi encontrada.

Nas cinco primeiras misturas foi utilizado um passo de 5% para aumentar o percentual de AB, com o objetivo de verificar se havia uma variação brusca nos resultados dos ensaios do concreto no estado fresco. Analisando os resultados nas primeiras amostras, foi verificado que não houve uma grande variação, portanto o passo do AB foi aumentado para 10% nas demais misturas.

A Tabela 4 apresenta a dosagem destas três misturas de CAA com adição de 20% de MC. Essa porcentagem foi escolhida de acordo com o estudo de Hassan e Mayo (2014), que concluíram que quando há um aumento de até 20% de MC do valor total do aglomerante, a resistência a compressão, viscosidade e a habilidade passante aumentam. Além disso, essas misturas contêm 20%, 30% e 40% de AB. As misturas foram nomeadas da mesma forma que as misturas sem MC.

TABELA 3

Dosagem das misturas do CAA

Mistura	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado de borracha (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )
CAA-00AB	550	648,13	925,90	0	220	1,06
CAA-05AB	550	648,13	879,61	16,92	220	1,71
CAA-10AB	550	648,13	833,30	33,83	220	1,81
CAA-15AB	550	648,13	787,02	50,75	220	1,84
CAA-20AB	550	648,13	740,72	67,66	220	1,84
CAA-30AB	550	648,13	648,13	101,49	220	1,84

Fonte: Adaptado de Ismail, De Grazia e Hassan (2015, p. 58).

TABELA 4

Dosagem das misturas do CAA com metacaulim.

Mistura	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Meta-caulim (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado de borracha (kg/m <sup>3</sup> )	Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )
CAA-20AB-MC	440	110	638,4	729,60	66,7	5,26
CAA-30AB-MC	440	110	638,4	638,40	100,0	5,26
CAA-40AB-MC	440	110	638,4	547,20	133,3	6,58

Fonte: Adaptado de Ismail, De Grazia e Hassan (2015, p. 58).

### 5.1.2 Mistura, moldagem e cura

O concreto foi produzido no laboratório de Concreto e Sólidos, pertencente à Memorial University em St. John's, Canadá. Para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, foram feitos cilindros com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm. No ensaio de resistência à flexão de vigas de concreto, foram utilizados prismas de 100 x 100 x 400 mm. Logo após a moldagem dos corpos de prova, eles foram mantidos numa câmara úmida à temperatura de 26,1°C e umidade relativa de 65,5%.

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1 Ensaios no estado fresco

A Tabela 5 exhibe os resultados dos ensaios do CAA no estado fresco. A caixa-L mostra que quando o CAA contém mais de 20% de AB a relação H2/H1 é menor que 0,75, que é o valor mínimo aceito no *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete* (THE SELF-COMPACTING CONCRETE EUROPEAN PROJECT GROUP, 2005) para o concreto ser classificado como CAA. Entretanto, de acordo com a NBR 15.823 (ABNT, 2010), apenas misturas com até 5% de AB atendem o requisito de H2/H1 maior ou igual a 0,80. Os demais resultados, teste de espalhamento, T<sub>500</sub>, funil-V e segregação, estão de acordo com os valores exigidos nas Normas.

Os resultados dos ensaios T<sub>500</sub> e funil-V mostram que a adição de metacaulim contribui para um aumento da viscosidade do CAA. Essa propriedade da mistura CAA-20AB-MC aumentou aproximadamente 67% e 24%, nos ensaios T<sub>500</sub> e funil-V, respectivamente, em relação à mistura sem MC (CAA-20AB). Além disso, a habilidade passante das misturas que contém MC é melhorada, como mostram os resultados obtidos no ensaio da caixa-L. Com isso, o resultado da caixa-L para a amostra com até 30% de AB se torna satisfatório. O resultado do teste da caixa-L da mistura CAA-20AB-MC foi 15% maior do que o resultado obtido na mistura original. Em relação aos valores requeridos no ensaio da caixa-L na NBR 15823 (ABNT, 2010), misturas sem MC podem conter até 5% de agregado de borracha para estar de acordo com a Norma. Enquanto as misturas com MC com até 20% de AB são aceitáveis.

TABELA 5

Resultados dos ensaios do CAA no estado fresco

Mistura	Slump-flow		Caixa-L	Funil-V	Segregação
	Ds mm	T500 s	H2/H1	T0 s	%
CAA-00AB	670	0,99	0,91	3,03	2,1
CAA-05AB	700	1,01	0,86	4,9	2,1
CAA-10AB	700	1,11	0,77	5,11	2,5

(continua)

TABELA 5

Resultados dos ensaios do CAA no estado fresco

Mistura	Slump-flow		Caixa-L	Funil-V	Segregação
	Ds mm	T500 s	H2/H1	T0 s	%
CAA-15AB	710	1,32	0,76	5,97	3,1
CAA-20AB	700	1,54	0,75	6,65	3,0
CAA-30AB	625	2,08	0,56	10,5	4,2
CAA-20AB-MC	680	2,57	0,86	8,25	2,1
CAA-30AB-MC	620	2,86	0,75	13,5	2,9
CAA-40AB-MC	660	3,12	0,68	18,6	3,1

Fonte: Adaptado de Ismail, De Grazia e Hassan (2015, p. 60).

### B. Ensaios no estado endurecido

A Tabela 6 mostra os resultados dos ensaios do concreto no estado endurecido, isto é, resistência à compressão ( $f'_c$ ) e resistência à flexão (RF) - após 7 e 28 dias da moldagem do corpo de prova. Adicionalmente, esta tabela também exibe o módulo de elasticidade (ME) após 28 dias da moldagem do corpo de prova.

## 6.2 Resistência à compressão

A Tabela 6 mostra que o crescimento da quantidade volumétrica do AB de 0 a 30% reduziu linearmente a resistência à compressão aos 7 e 28 dias, o que é consistente com Naito et al. (2003). Aos 28 dias, a resistência à compressão da mistura controle, 0 de AB, foi reduzida em 50,6%, quando o teor de borracha aumentou para 30%.

O agregado de borracha e a pasta de cimento têm uma ligação fraca que pode ser a razão da redução da resistência à compressão (NAJIM; HALL, 2012; YUNG; YUNG; HUA, 2013). Todas as misturas de CAA têm resistência à compressão superior a 17 MPa, o que é o requisito para aplicações estruturais (NAJIM; HALL, 2012; NEVILLE, 1995). Além disso, as misturas com substituição parcial de areia por borracha até 20% excedem a resistência à compressão de 28-35 MPa, que é o valor típico utilizado em aplicações de infraestrutura, de acordo com Zheng, Huo e Yuan (2008).

TABELA 6

Resultados dos ensaios do CAA no estado endurecido

Mistura	7 dias		28 dias		
	f'c MPa	RF MPa	f'c MPa	RF MPa	ME GPa
CAA-00AB	45,44	5,14	53,50	5,92	33,59
CAA-05AB	42,34	5,04	47,07	5,60	32,36
CAA-10AB	35,50	4,85	43,39	5,52	30,86
CAA-15AB	29,90	4,57	38,45	5,19	27,23
CAA-20AB	26,53	3,88	32,81	5,00	24,10
CAA-30AB	22,92	3,65	27,05	4,25	22,03
CAA-20AB-MC	45,93	4,71	47,33	5,88	30,42
CAA-30AB-MC	36,83	4,20	39,83	4,88	26,25
CAA-40AB-MC	30,25	3,69	32,95	4,29	23,42

Fonte: Adaptado de Ismail, De Grazia e Hassan (2015, p. 61).

A Tabela 6 mostra um aumento significativo da resistência à compressão das misturas de CAA com metacaulim comparadas com as misturas sem metacaulim. Como exemplo, o aumento da mistura que contém 20% de AB (CAA-20AB-MC) foi de 44% comparado com a mistura original (CAA-20AB). Isso ocorre, pois o uso de metacaulim como substituto parcial do cimento no concreto aumenta a resistência à compressão.

### 6.3 Resistência à flexão

O teste de resistência à flexão fornece o módulo de ruptura, também conhecido como Resistência à Flexão (RF), e indica quando a ruptura da viga irá ocorrer devido à flexão. A Tabela 6 mostra que, aos 28 dias, o CAA com 5% de agregado de borracha reduz a RF da mistura controle, que contém 0 de AB, em 5,4%. O aumento da resistência à flexão da mistura CAA-20AB-MC e da mistura CAA-30AB-MC foi de 18% e 15%, comparado com as misturas originais CAA-20AB e CAA-30AB, respectivamente. Esse aumento foi menos significativo do que o aumento da resistência à compressão.

A inclusão de borracha resulta numa menor redução da resistência à flexão em comparação com a resistência mecânica. As microfissuras se formam até a aplicação da carga máxima e se propagam apesar da redução da carga aplicada (NAJIM; HALL, 2012). O aumento da porcentagem de borracha resulta num aumento da capacidade à flexão, o que é um efeito positivo para o concreto, pois esse tem uma falha não frágil, isto é, há avisos com fissuras antes da falha (AZMI; MOHAMMED; AL-MATTAR-NEH, 2008).

## 6.4 Módulo de elasticidade

A Tabela 6 mostra que o Módulo de Elasticidade (ME) também foi reduzido com o aumento da quantidade de borracha, o que é consistente com a sua relação direta com resistência à compressão. O ME, por exemplo, foi reduzido de 33,59 GPa para 22,03 GPa nos CAA com 0 e 40% de raspa de borracha, respectivamente, o que representa 34,4% do ME da mistura controle. A explicação para isso pode ser atribuída ao baixo módulo de elasticidade da borracha (NAJIM; HALL, 2012; TORGAL; SHASAVANDI; JALALI, 2011). O módulo de elasticidade da mistura CAA-20AB-MC teve um aumento de 26% comparado com a mistura sem MC (CAA-20AB), enquanto o aumento desta propriedade da mistura CAA-30AB-MC foi de 19% quando comparado com a mistura original CAA-30AB.

---

# 7 CONCLUSÃO

Comparado com o concreto convencional, o CAA requer uma maior quantidade de superplastificantes para obter os valores requeridos nas Normas para um concreto ser considerado CAA. Quando o percentual de AB é mantido em 20% e há uma adição de 20% de MC, o aumento de superplastificante passa a ser 286%. Portanto, o acréscimo de MC resulta num aumento de superplastificante 1,64 vez maior do que aquele obtido no CAA sem MC.

As propriedades frescas do CAA sem MC estão de acordo com as diretrizes europeias (THE SELF-COMPACTING CONCRETE EUROPEAN PROJECT GROUP, 2005) quando a porcentagem de borracha contida no CAA é limitada a 20% do volume de agregados finos. Entretanto, a NBR 15823 (ABNT, 2010) limita esse valor a 0,80, portanto somente amostras com até 5% de AB estão de acordo com

o valor requerido como resultado do ensaio caixa-L. Já as misturas com MC obtiveram um resultado melhor no ensaio da caixa-L. Portanto, as misturas com até 30% de AB estão de acordo com *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete* (THE SELF-COMPACTING CONCRETE EUROPEAN PROJECT GROUP, 2005) quando o concreto é usinado, e as misturas com até 20% de AB estão de acordo com a NBR 15.823 (ABNT, 2010).

A dosagem de CAA com adição de agregado de borracha foi viável, a resistência à compressão do CAA-20AB aos 28 dias foi de 32,81 MPa, o que é adequado para aplicações estruturais. Como a adição de MC contribui para o aumento da resistência à compressão, misturas com 20% de AB e 20% de MC obtiveram resistência à compressão aos 28 dias igual a 47,33 MPa, e essa mistura está de acordo com as Normas. A redução das propriedades mecânicas do CAA com agregado de borracha é atribuída à fraca ZTI entre o cimento e o agregado de borracha e ao diferente módulo de elasticidade do agregado de borracha e da pasta de cimento. A adição de MC resultou num aumento da resistência à flexão em torno de 16,5%, enquanto a adição de AB proveniente de resíduos de pneus reduziu gradualmente a resistência à flexão. Não obstante, o CAA com AB possui falhas menos frágeis devido ao baixo módulo de elasticidade da borracha que possui maior capacidade de deformação.

O CAA com AB é um concreto mais sustentável por reduzir o uso de matérias-primas e as substituir por borracha de pneus descartados. Assim, este CAA pode ser uma nova alternativa para fins estruturais no Brasil para obras que buscam economia de recursos naturais.

## **DETERMINING THE OPTIMUM PERCENTAGE OF CRUMB RUBBER AS A PARTIAL REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE ON SELF-COMPACTING CONCRETE**

### **Abstract**

This work studies the ideal percentage of rubber aggregate, proveniente from tires, as a partial replacement of fine aggregate in self-compacting concrete (SCC). The fine aggregate volume was replaced by the rubber volume according to percentages ranging from 5% to 30% in SCC without metakaolin and from 20% to 40% in SCC with metakaolin. The study evaluates the SCC properties on fresh and hardened states. The results of fresh state tests indicated that 20% is the maximum percentage of fine aggregate that can be replaced by scrap rubber to reach the values determined in *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*. When the rubber aggregate was increased, the mechanical properties of self-compacting concrete were reduced.

However, when the SCC had 20% of scrap rubber, it obtained a compressive strength of 32.81 MPa, which is enough for structural applications, highlighting the possibility of reducing the consumption of fine aggregate and also the production of an ecological self-compacting concrete with the use of rubber from tire disposal.

**Keywords:** Self-compacting concrete. Self-compacting rubberized concrete. Rubber as a fine aggregate.

---

## REFERÊNCIAS

- AL-TAYEB, M. M.; BAKAR, B. H. A.; ISMAIL, H.; AKIL, H. Md. Effect of partial replacement of sand by recycled fine crumb rubber on the performance of hybrid rubberized-normal concrete under impact load: experiment and simulation. *Journal of Cleaner Production*, v. 59, p. 284-289, nov. 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 494 / C494M*: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. West Conshohocken, PA, 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C150*: Standard Specification for Portland Cement. West Conshohocken, PA, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C39*: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C469*: Modulus of Elasticity. West Conshohocken, PA, 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C618*: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, PA, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C78*: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). West Conshohocken, PA, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7211*: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15823*: Concreto autoadensável. Rio de Janeiro, 2010.
- AZMI, N. J.; MOHAMMED, B. S.; AL-MATTARNEH, H. M. A. *Engineering properties of concrete containing recycled tyre rubber*. ICCBT 2008 - B - (34) - p. 373-382, 2008.

BERTOLLO, S. M.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SCHALCH, V. Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos. In: XXVIII CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, Cancún, México. *AIDIS*. p. 1-8, 27-31 Oct. 2002.

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

EMIROGLU, M.; KELESTEMUR, M. H.; YILDIZ, S. *An investigation on ITZ microstructure of the concrete containing waste vehicle tire. Proceedings of 8th International Fracture Conference*, 2007. Istanbul. Disponível em: <[http://www.duzce.edu.tr/~mehmetemiroglu/Belgeler/ITZ\\_Rubberized\\_Concrete.pdf](http://www.duzce.edu.tr/~mehmetemiroglu/Belgeler/ITZ_Rubberized_Concrete.pdf)> Acesso em: 6 maio 2015.

GANJIAN, E.; KHORAMI, M.; MAGHSOUDI, A. A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 5, p. 1828-1836, nov. 2012.

HASSAN, A. A. A.; MAYO, J. R. Influence of mixture composition on the properties of SCC incorporating metakaolin. *Magazine of Concrete Research*, v. 66, n. 20, p. 1036-1050, Oct. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação*. 2015. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 20 Mar. 2015.

ISMAIL, M. K.; DE GRAZIA, M. T.; HASSAN, A. A. A. Mechanical Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete with Different Supplementary Cementing Materials. *Proceedings...* International Conference Transportation and Civil Engineering, 2015, London.

KHATIB Z. K.; BAYOMY, F. M. Rubberized Portland Cement Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 11, n. 3, p. 206-213, Aug. 1999.

KPTRESH, K. M.; MESFIN G. B. Study on waste tyre rubber as concrete aggregates. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, v. 3, n. 4, p. 433-436, Apr. 2014.

NAITO, C.; STATES, J.; JACKSON, C.; BEWICK, B. Assessment of crumb rubber concrete for flexural structural members. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 26, n. 10, p. 1-23, oct. 2003.

NAJIM, K. B.; HALL, M. R. A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC). *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 11, p. 2043-2051, 2010.

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.

NEVILLE, A. M. *Properties of concrete*. 4. ed. Longman, U.K.: Harlow, 1995.

PINTO, T. de P. *Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. 1999. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana)–Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SÃO PAULO (Município). Tribunal de Contas do Município de São Paulo. *Educação ambiental – mudança de cultura*. p.1-72, 2006.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). *Relatório Anual 2013*. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

STACHERA JUNIOR, T. Avaliação de emissões de CO<sub>2</sub> na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Rio de Janeiro, Brasil. ENEGEP. p. 1-13, 13-16, out. 2008.

THE SELF-COMPACTING CONCRETE EUROPEAN PROJECT GROUP. *The European Guidelines for Self Compacting Concrete*. May, 2005.

TORGAL, F. P.; SHASAVANDI, A.; JALALI, S. Tyre rubber wastes based concrete: a review. *Proceedings... Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities*, 2011, Guimarães.

UYGUNOGLU, T.; TOPÇU, I. B. The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 7, p. 1141- 1150, jan. 2010.

YUNG, W.; YUNG, L.; HUA, L. 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.

ZHENG, L.; HUO, X. S.; YUAN, Y. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, v. 22, p. 939-947, 2008.

#### **Contato**

Mayra Tagliaferri de Grazia  
graziamayra@gmail.com

#### **Tramitação**

Recebido em setembro de 2016.  
Aprovado em abril de 2017.