

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO UTILIZANDO EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS SEM E COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE PNEU**

FABIANO BITTENCOURT DOS SANTOS

Itajubá, Agosto de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Fabiano Bittencourt dos Santos

**ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO UTILIZANDO EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS SEM E COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE PNEU**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto e Materiais

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Mírian de Lourdes Noronha Motta Melo

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Valquiria Claret dos Santos

Itajubá, Agosto de 2018

DEDICATÓRIA

*Ao meu filho Leonardo
e à minha filha Isa*

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Mírian de Lourdes Noronha Motta Melo pela oportunidade, amizade e, principalmente, a minha co-orientadora Prof^ª. Dra. Valquiria Claret dos Santos que me auxiliou nos momentos mais difíceis com sabedoria e paciência.

Aos Professores e Pesquisadores participantes do Grupo de Estudo do Concreto que ajudaram nos ensaios e discussões.

Ao Instituto de Recursos Naturais que nos cedeu o Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil.

Aos funcionários do Laboratório de Geotecnia da UNIFEI, Fabiano e Osvaldo pela ajuda prestada.

Aos funcionários da PRPPG pela paciência e boa vontade.

Aos colegas da pós-graduação pela disponibilidade em ajudar sempre que preciso.

E a todos que direta ou indiretamente me auxiliaram neste trabalho.

RESUMO

BITTENCOURT, F. **ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO UTILIZANDO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS SEM E COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE PNEU**. 2018. 68p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2018.

A análise do comportamento do concreto utilizando resíduo de pneus tem como objetivo uma destinação adequada para resíduos industriais que é um problema global. A inserção de materiais em concretos é estudada em alguns lugares como a casca de arroz no Paquistão, clínquer de óleo de palmeiras na Malásia, resíduo de pneu no Iran e Inglaterra entre outros. Um dos maiores avanços na tecnologia do concreto na atualidade é o CAA. Este possui diversas qualidades para o uso em grande escala como o uso de menos mão de obra, menor ruído, melhor acabamento, maior resistência mecânica, utilização em formas complexas etc. Neste trabalho são analisados alguns métodos de dosagem para a produção de CAA e a execução de uma primeira tentativa de dosagem projetada com base o Método de Andreasen Modificado. Verificando as propriedades mecânicas do concreto sem o resíduo de pneu e depois substituindo uma parte da areia por pó de pneu na mistura e comparando a variação da resistência à compressão das amostras. Como resultado o traço de controle sem o pó de pneu alcançou uma resistência á compressão maior que os concretos convencionais. Com a adição do pó de pneu houve uma queda na resistência à compressão e também uma perda na trabalhabilidade da mistura, porém foi obtido um concreto com uma resistência à compressão razoável para vários serviços como calçadas, sarjetas, pisos de passagem etc.

Palavras-chave: Concreto; Dosagem; Resíduo de pneu; Resistência à compressão.

ABSTRACT

BITTENCOURT, F. MIXTURE DESIGN OF CONCRETE USING PACKAGING OF PARTICLES WITHOUT AND WITH ADDITION OF TIRE POWDER. 2018. 68p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2018.

The analysis of the mechanical behavior of concrete using waste tire aims at a suitable destination for industrial waste which is a global problem. The insertion of residue into concrete is studied in some places such as rice husk in Pakistan, clinker of palm oil in Malaysia, tire residue in Iran and England among others. One of the biggest advances in concrete technology today is the CAA. It has several qualities for large-scale use such as the use of less labor, less noise, better finishing, higher mechanical strength, use in complex shapes etc. In this work some dosing methods for CAA production and the execution of a first designed dosing attempt based on the Modified Andreasen Method are analyzed. Verifying the mechanical properties of the concrete without the tire residue and then replacing a part of the sand with the tire powder in the mixture and comparing the variation of the compressive strength of the samples. As a result the control sample without the tire powder achieved a higher compressive strength than conventional concretes. With the addition of the tire powder there was a decrease in the compressive strength and also a loss in the workability of the mixture, but a concrete with a reasonable compressive strength was obtained for several services such as sidewalks, gutters, walkways, etc

Keywords Concrete; Dosage; Tire residue; Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Comparativo da composição do CCV e CAA, Borja (2011)..... | 18 |
| Figura 2 – Exemplo das equações geradas através do Método Andreassen Modificado..... | 21 |
| Figura 3 – Exemplo de curva ideal e curva otimizada (OLIVEIRA et al., 2018). | 22 |
| Figura 4 – Curva teórica e curva real para o traço de controle de concreto | 22 |
| Figura 5 – Curva teórica e curva real para o traço de com 10% de pó de pneu. | 23 |
| Figura 6 – Principais destinações de pneus inservíveis no Brasil, 2016. | 24 |
| Figura 7 – Estrutura do pneu de automóvel..... | 25 |
| Figura 8 – Equipamento Trono-cone e base plana. <i>Slump flow test</i> | 32 |
| Figura 9 – Equipamento funil “V”. | 33 |
| Figura 10 – Equipamento Caixa “L”. | 34 |
| Figura 11 – Indústria de recauchutagem de pneus. | 37 |
| Figura 12 – Aparência visual do Pó de pneu pronto para uso. | 38 |
| Figura 13 – Frasco utilizado para o cálculo da massa específica do Pó de pneu. | 39 |
| Figura 14 – Proporção de areia natural e areia alterada no traço de controle..... | 41 |
| Figura 15 – Proporção de areia natural e areia alterada no traço com 10% de Pó de Pneu. | 42 |
| Figura 16 – Proporção de areia natural e areia alterada no traço com 20% de Pó de Pneu. | 42 |
| Figura 17 – Proporção de areia natural e areia alterada no traço com 30% de Pó de Pneu. | 43 |
| Figura 19 – Limites da granulometria dos agregados miúdos (ABNT NBR 7211/2009)..... | 45 |
| Figura 20 – Limites da granulometria dos agregados graúdos (ABNT NBR 7211/2009)..... | 48 |
| Figura 21 – Resultado do <i>Slump Flow Test</i> para a mistura de controle (55cm)..... | 53 |
| Figura 22 – Resultado do <i>Slump Flow Test</i> para a mistura com 10% de pó de pneu (48cm).. | 53 |
| Figura 23 – Corpos de prova. Fonte - Autor | 54 |
| Figura 24 – Corpos de prova em cura úmida. Fonte – Autor | 55 |
| Figura 25 – Corpo de prova sendo posicionado para o ensaio de resistência à compressão. Fonte Autor..... | 55 |
| Figura 26 – Efeito do pó de pneu (PP) na resistência à compressão do concreto aos 28 dias. | 56 |
| Figura 27 – Resultado de resistência à compressão de CAA variando o tamanho de grãos.... | 58 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Exemplo de dados para a formulação da matriz Equação 2. | 20 |
| Tabela 2 – Métodos de ensaios e suas aplicações. | 35 |
| Tabela 3 – Descrição do aditivo utilizado. Fonte: Aditibras Modificado | 40 |
| Tabela 4 – Granulometria da Areia | 45 |
| Tabela 5 – Características da Areia | 46 |
| Tabela 6 – Granulometria do pó de pneu (PP). | 46 |
| Tabela 7 – Características do pó de pneu (PP) | 46 |
| Tabela 8 – Granulometria da areia alterada (AA) igual à do pó de pneu (ABNT NBR 7211/2009)..... | 47 |
| Tabela 9 – Características da areia alterada (AA). | 47 |
| Tabela 10 – Granulometria da brita zero (ABNT NBR 7211/2009). | 48 |
| Tabela 11 – Características da brita zero. | 49 |
| Tabela 12 – Traço de concreto controle. | 49 |
| Tabela 13 – Quantidade para a produção do traço de controle. | 49 |
| Tabela 14 – Traço com 10% de pó de pneu. | 50 |
| Tabela 15 – Traço para a produção das amostras do traço com 10% de PP. | 50 |
| Tabela 16 – Traço com 20% de PP..... | 50 |
| Tabela 17 – Traço para a produção das amostras do traço com 20% de PP. | 51 |
| Tabela 18 – Traço com 30% de PP..... | 51 |
| Tabela 19 – Traço para a produção das amostras do traço com 30% de PP. | 51 |
| Tabela 20 – Resultados dos ensaios dos traços de concreto sem e com adição de pó de pneu (PP). | 52 |
| Tabela 21 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. | 56 |
| Tabela 22 – Análise financeira dos custos dos traços. | 59 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|--|----|
| Equação 1 – Andreassen & Andersen | 19 |
| Equação 2 – Andreassen Modificado | 19 |
| Equação 3 – Limites superior e inferior para cada faixa granulométrica. | 21 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO..... | 12 |
| 2.1 OBJETIVO..... | 12 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 2.1 PRINCIPAIS TIPOS DE CONCRETO | 14 |
| 2.2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL (CAA)..... | 16 |
| 2.3 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL E CONCRETO CONVENCIONAL | 17 |
| 2.4 DOSAGEM DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL | 18 |
| 2.5 RESÍDUOS INDUSTRIAIS: O CASO DOS PNEUS | 23 |
| 2.6 ANTECEDENTES | 26 |
| 2.7 MATERIAIS..... | 27 |
| 3 MÉTODOS DE ANÁLISE | 31 |
| 3.1 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO FRESCO | 31 |
| 3.1.1 – <i>Ensaio de Espalhamento – Slump flow test</i> | 31 |
| 3.1.2 – <i>Ensaio do Funil “V”</i> | 32 |
| 3.1.3 – <i>Ensaio da Caixa “L”</i> | 33 |
| 4 ESPECIFICAÇÃO FÍSICA | 36 |
| 4.1 – AREIA NATURAL..... | 36 |
| 4.2 – BRITA ZERO..... | 37 |
| 4.3 – PÓ DE PNEU | 37 |
| 4.4 – AREIA ALTERADA | 39 |
| 4.5 – ADITIVO – SUPERPLASTIFICANTE | 40 |
| 5 ESTUDO DE DOSAGEM | 41 |
| 5.1 – TRAÇO DE CONTROLE – 0% PÓ DE PNEU..... | 41 |
| 5.2 – TRAÇOS COM SUBSTITUIÇÕES | 42 |
| 6 EXPERIMENTO | 44 |
| 6.1 – AGREGADO MIÚDO..... | 44 |
| 6.1.1 <i>Areia Natural</i> | 44 |
| 6.1.2 <i>Pó de Pneu</i> | 46 |
| 6.1.3 <i>Areia Alterada</i> | 46 |
| 6.2 – AGREGADO GRAÚDO..... | 47 |
| 6.2.1 <i>Brita Zero</i> | 47 |
| 6.3 – DOSAGEM DOS TRAÇOS DO CONCRETO | 49 |
| 6.4 – RESULTADOS DOS TRAÇOS NO ESTADO FRESCO | 51 |
| 6.5 – RESULTADOS DOS TRAÇOS NO ESTADO ENDURECIDO..... | 54 |
| 6.6 – CUSTOS DOS TRAÇOS | 58 |
| 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 60 |
| 8 CONCLUSÕES | 62 |
| 9 REFERÊNCIAS | 63 |

1 INTRODUÇÃO

A sociedade nos dias de hoje vivencia uma série de ações envolvendo a proteção do meio ambiente. Existem vários tipos de resíduos que estão se empilhando em áreas industriais, rurais e até mesmo cidades. Normalmente os processos de fabricação têm como subprodutos resíduos que em muitas das vezes se tornam problemas econômico, ambiental, social e até de saúde. O foco das indústrias é sempre o produto e conseqüentemente o lucro, portanto, o custo para tratar esses resíduos prejudica o retorno financeiro. A ausência do cuidado para o tratamento apropriado desses resíduos geralmente se tornam prejuízos financeiros e até mesmo outras penalidades como multas, má publicidade, obrigação de reparação do dano e destinação adequada para o resíduo etc.

Segundo Rashad (2016), o pneu é um dos mais significantes dentre os resíduos que preocupam a população global. Dados coletados na literatura mostram que até 2005 foram descartados no mundo todo cerca de 10 bilhões de pneus e é estimado que a cada ano mais 1 bilhão de pneus chegam ao seu fim de vida útil. Na Austrália, segundo a TSA- Tyre Stewardship Australia (2017), dos 58 milhões de pneus equivalentes descartados por ano, apenas 10% são reciclados no país, 30% são exportados para serem usados, reciclados ou usados como combustível. O restante é destinado a lixões, para empilhamento ou descartes ilegais. No Brasil em 2016, foram produzidos 68 milhões de pneus como mostra o relatório da Anip - Associação Nacional Da Indústria De Pneumáticos (2018) e conseqüentemente esses pneus vão precisar de um descarte correto no fim do ciclo útil. Dessa forma o descarte de resíduo de pneu se tornou um dos grandes problemas ambientais no mundo todo.

Mas atualmente, resíduos industriais como pó de madeiras (serralherias), pó de mármore (marmorarias), cinzas de gaseificadores e pneus remoldados, estão sendo estudados como ingredientes para produtos novos ou mesmo para produtos já conhecidos como o concreto (KANADASAN e RAZAK 2014). No concreto, o resíduo pode ser um produto inerte, neste caso o concreto tem a finalidade só de armazenar, conter o resíduo. E em certos casos, o resíduo pode até mesmo melhorar suas características do concreto.

O concreto convencional utilizado amplamente no mundo, cuja composição é de produtos simples e de fácil acesso facilitando sua utilização em grande escala. Com o passar dos anos, este vem sendo desenvolvido para aperfeiçoar o concreto como, por exemplo: o Concreto Auto Adensável (CAA), o Concreto de Alto Desempenho (CAD) e o Concreto Leve (CL). Tutikian e Dal Molin (2015) esclarecem que o CAA não é um produto novo, e sim uma

técnica que aprimora sua formulação trazendo inúmeras vantagens técnicas, econômicas e ambientais (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015). Esta definição pode ser estendida aos demais concretos especiais.

1.1 Motivação

Os pneus inservíveis têm um grande impacto negativo além dos danos ambientais já conhecidos que é o problema biológico bastante atual: Pneus descartados no meio ambiente acumulam água das chuvas e proporcionam criadouros para insetos transmissores de doenças. Entretanto, o resíduo de pneu pode ser triturado até atingir a forma de pós, farelos e lascas (TOMAS e GUPTA, 2016). Assim podendo substituir elementos graúdos e/ou miúdos na composição do concreto na forma que melhor atender as necessidades.

A união de resíduo de pneu com concreto é de grande interesse no meio acadêmico, industrial e para o meio ambiente. Pesquisas visando estudar os efeitos de um resíduo industrial abundante, como pneus inservíveis, com um produto fabricado em larga escala como é o caso concreto são muito relevantes. Mas as diferenças entre as densidades e as composições químicas provocam alterações significativas nas características fundamentais do concreto obtido, tais como na resistência à compressão, na trabalhabilidade e na durabilidade.

De uma forma geral, cada material que integra o traço do concreto tem um papel importante para o resultado final da mistura. Brita e cimento favorecem a resistência, enquanto a areia e a água interferem na consistência. Imprescindível para garantir fluidez e trabalhabilidade ao concreto, a água deve ser acrescida sempre com base em estudos técnicos que considerem o teor de umidade da areia. Afinal, a falta de água dificulta os processos de lançamento e adensamento, gerando falhas de concretagem. Já o excesso de líquido compromete diretamente a resistência e a durabilidade do produto final. No entanto, as adições de resíduo sólido substituindo parte da areia ou da brita carecem de estudos mais específicos, que vão muito além das técnicas de tentativa e erro.

2.1 Objetivo

Produzir um traço de concreto controle utilizando dosagem de concreto utilizando empacotamento de partículas (modelo ANDREASSEN & ANDERSEN) e avaliar se atinge as características de concretos especiais.

Adicionar pó de pneu ao traço de concreto controle e avaliar suas características. Comparar os resultados após a adição de pó de pneu em diferentes proporções quanto à trabalhabilidade, resistência à compressão e custo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Principais Tipos de Concreto

A ABNT NBR 12655/2015 descreve o concreto de cimento Portland como material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdos e graúdos e água, com ou sem a incorporação de outros componentes. Assim, o termo “concreto” a seguir, se refere ao “concreto de cimento Portland”.

A utilização dos concretos depende muito de sua resistência à compressão. Assim, os tipos mais utilizados variam em função da resistência à compressão característica do concreto (F_{ck}), seguem alguns exemplos (USINAMIX, 2018):

F_{ck} de 10, 15 ou 18 MPa: Calçadas, guias, sarjetas, locais sem peso ou tração.

F_{ck} de 20 MPa: Lajes de pequeno porte e estruturas onde há somente circulação de pessoas requer pouco peso.

F_{ck} de 25 a 30 MPa: Obras de médio á grande porte que suporta peso médio, estruturas, baldrames, vigas, pisos, lajes, especificação solicitada e calculado por engenheiros.

F_{ck} de 35 a 50 MPa: Obras grandes e estruturas onde suportará grande peso e esforço na tração, seja por caminhões carros ou grandes máquinas.

F_{ck} de 30 a 45 MPa com FIBRA: Indicada para pisos onde há circulação de veículos ou máquinas pesadas.

Com relação ao concreto, em função de suas massas específicas, obtidas pelas diferentes dosagens da mistura – também chamadas de traços – temos três classes básicas de classificação (PEDROSO, 2009):

CONCRETO CONVENCIONAL

O concreto convencional (CCV) é o mais utilizado em obras. Este concreto é composto por uma mistura padrão de cimento, água, areia e brita. A sua resistência à compressão pode variar de 10 a 40 MPa.

CONCRETO LEVE

Este concreto é composto por agregados leves e sua massa específica está entre 400 a 2.000 Kg/m³ enquanto que para os CCVs a massa específica fica entre 2.300 e 2.500 Kg/m³.

As vantagens são a redução de custo, pouca permeabilidade e redução do peso das estruturas e elevada capacidade de isolamento térmico e acústico. Porém, a porosidade dos agregados resulta em um consumo maior de água e conseqüentemente na redução da resistência à compressão.

Os concretos leves mais utilizados são os concretos porosos, celulares, sem finos e concretos com agregados leves, como isopor, vermiculita e argila expandida. As principais aplicações desse concreto são em peças pré-moldadas, fabricação de blocos, regularização de superfícies e enchimento de lajes (USINAMIX, 2018).

CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

O concreto de alta resistência possui uma resistência à compressão muito superior ao CCV. Segundo Pereira (2016), os agregados tem suma importância para a rigidez e resistência à compressão do concreto, pois a redução da dimensão do agregado graúdo proporciona um ganho na resistência à compressão devido ao fortalecimento da zona de transição (área de contato entre a pasta e agregado). Para o agregado miúdo, um módulo de finura elevado proporciona uma maior resistência à compressão para o concreto de alta resistência. Resumindo, quanto menor a dimensão máxima do agregado graúdo e maior o módulo de finura dos miúdos, maior é a resistência à compressão desse concreto (PEREIRA, 2016).

Sua aplicação é principalmente em fundações, lajes de piso, pilares e vigas de edifícios altos, porém, tende a fissurar na presença de águas agressivas, aquecimento e resfriamento e congelamento e degelo (PEREIRA, 2016).

CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD)

A FHWA – U.S. Federal Highway Administration, define o concreto de alto desempenho (CAD) como um concreto projetado mais durável e mais resistente que o convencional (PEREIRA, 2016). Essas características são especificadas de acordo com o projeto estrutural e especificações ambientais. Segundo Pereira (2016) o CAD é aquele concreto que possui características superiores ao concreto convencional como por exemplo:

- Adensamento sem segregação;
- Permeabilidade;

- Calor de hidratação;
- Resistência nas primeiras idades.

Segundo Silva, (2000), o CAD não possui uma definição única. No Brasil, os concretos convencionais têm resistência à compressão que varia de 20 MPa até 40 MPa, assim, os concretos com valores de resistência à compressão acima de 45 MPa são considerados concretos especiais ou de alto desempenho.

O concreto convencional utiliza um fator de água/cimento normalmente entre 0,42 a 0,60 e o CAD varia de 0,40 a 0,30. Quanto menor é o fator a/c mais rico em cimento ou aglomerante a mistura se torna e conseqüentemente mais forte serão as ligações entre as partículas de cimento (AÏTCIN, 2011).

CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

O concreto auto-adensável possui alta fluidez sem riscos de exsudação ou segregação. Este é bombeado *in loco* sem o uso de vibradores, pois se adensa com a força do próprio peso (PEREIRA, 2016).

As desvantagens são o alto custo e a dosagem não ser simples. Porém, aditivos e agregados de menor custo e outras economias durante o lançamento do concreto compensam essas desvantagens (PEREIRA, 2016).

2.2 Concreto Auto-Adensável (CAA)

Segundo a EFNARC (2005) “The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems“, a definição de CAA é o concreto que é capaz de fluir e se consolidar sob seu próprio peso, preencher a forma mesmo com uma densa malha e ainda manter a homogeneidade sem precisar de compactação adicional. Assim, só é considerado CAA quando o concreto cumpre três características. A primeira é a fluidez, que é a habilidade do concreto fresco fluir e preencher todos os espaços de uma forma. A segunda propriedade é melhor descrita por Tutikian e Dal Molin (2015) como a coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre barras de aço (ou habilidade passante). Por último é a resistência à segregação, que é a capacidade de se manter homogêneo durante o estado fresco.

O CAA tem como vantagem a redução no tempo de lançamento do concreto, a dispensa do vibrador que conseqüentemente diminui a mão de obra e a diminuição do ruído que é um transtorno em grandes centros urbanos. Permite uma liberdade maior nas fôrmas e

dimensões e propicia um melhor acabamento final de superfície (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Domone (2006) observou diversas curiosidades pesquisando a utilização de CAA desde sua primeira aplicação em 2003. Entre elas 67% das obras que utilizaram o CAA por causa da vantagem técnica sobre o concreto convencional (CCV), 14% por motivos econômicos e outros 10% por ser uma inovação. Através dessa comparação, nota-se que o mais atraente dessa tecnologia são as vantagens técnicas e não necessariamente os custos. Em todos os casos foi utilizado o “*slump flow test*” para verificar a trabalhabilidade do CAA, e 90% das obras utilizaram a faixa de espalhamento de 600-750 mm como a ideal. Quase metade das obras utilizaram também o parâmetro T_{50} do “*slump flow test*”, do “*v-funnel*” e do “*Orimet test*” para verificar suas características auto adensáveis.

2.3 Concreto Auto-Adensável e Concreto Convencional

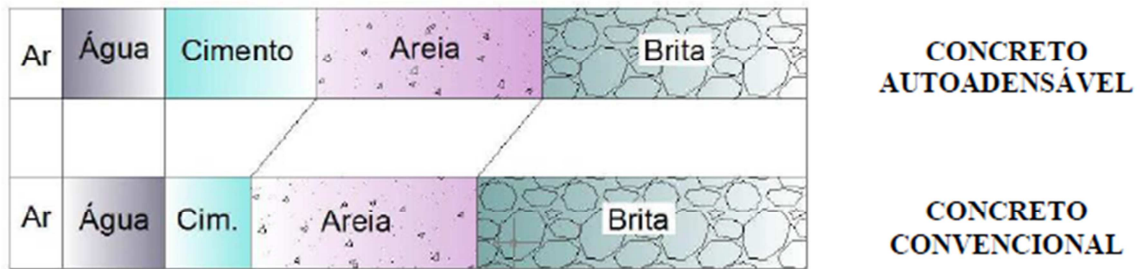
Tutikian e Dal Molin (2015) acreditam que o CAA é um dos maiores avanços da tecnologia de concretos nas últimas décadas. Se for comparado à tecnologia do CAA com o Concreto convencional (CCV) fica claro que existem grandes vantagens da tecnologia inovadora sobre a tradicional.

Como o próprio nome diz, sua principal característica e vantagem é o fato de ser auto-adensável, ou melhor, se adensa com o próprio peso. O CAA não necessita ser vibrado para se acomodar e se envolver nas armações, com isso a quantidade de operários necessária é menor se comparado ao concreto convencional (CCV). O ruído provocado pelos vibradores é eliminado já que esses equipamentos não são empregados. Outra vantagem do CAA é a velocidade de bombeamento do concreto que é bem maior no lançamento do que o CCV (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

O CAA utiliza menor número de operários, é mais rápido de ser lançado, tem um acabamento final melhor, não necessita ser vibrado e é mais durável do que o CCV. Assim, se for contabilizado essas vantagens, ele se torna também economicamente viável (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Borja (2001) apresenta (Figura 1) um comparativo da composição dos CCV e do CAA. O CAA utiliza em sua formulação, mais cimento e menos agregado graúdo em comparação ao CCV (BORJA, 2011).

Figura 1 – Comparativo da composição do CCV e CAA, Borja (2011).



2.4 Dosagem do Concreto Auto-Adensável

Um dos primeiros métodos utilizados para a formulação do CAA é o Método Okamura, Ozawa, Maekawa e Ouchi (GOMES E BARROS 2009), que é um método empírico que divide o concreto em duas fases, a argamassa e agregado graúdo. Neste método são considerados componentes decisivos, para a obtenção da autoadensabilidade e sua resistência, os componentes da pasta, relação água/materiais finos e superplastificante. São variadas as proporções de água/materiais finos da argamassa (entre 0,9 a 1,0) para satisfazer as propriedades de fluidez e viscosidade exigidas e depois adicionadas os volumes de agregados graúdos, que são 50% do volume sólido de agregados. Esse concreto formulado por esse modelo é verificado através dos ensaios do tipo “U”, espalhamento e Funil “V” quanto as suas características autoadensáveis (GOMES E BARROS 2009).

O Método de Gomes, Gettu e Agulló é também bastante usado e segue o princípio do Método Okamura, Ozawa, Maekawa e Ouchi de dividir a dosagem do concreto em duas fases, pasta e o esqueleto granular separadamente (GOMES E BARROS 2009). No método de Gomes a pasta é fundamental para que o concreto apresente características de um CAA e não influencia a proporção de agregados. O método é dividido em três etapas, obtenção da composição da pasta, proporção de mistura dos agregados e seleção do volume da pasta no concreto.

O Método Nan Su et al (Nan Su, Kung-Chung Hsub, His-Wen Chai) é constituído de uma sequência de cálculos para definir as quantidades dos materiais. Durante esses passos, são fixadas algumas faixas para esses resultados montando uma dosagem final que será comparada às características necessárias para atingir um CAA. Este método tem como sua principal característica o controle da quantidade de vazios, mantendo os menores possíveis (TUTIKIAN E PACHECO, 2012)

Um método semi-empírico é o método Tutikian-Dal Molin (TUTIKIAN E PACHECO, 2012). Neste método são combinados os componentes em pares começando por aqueles materiais de maiores granulometrias para os de menor, alterando suas proporções para conseguir o menor índice de vazios em cada dupla. A base desse método é a montagem de um esqueleto granular de tal forma que o índice de vazio seja o menor possível. A partir disso é determinado a relação de água/cimento e o teor de aditivo para uma dosagem intermediária que será ajustada experimentalmente até atender as propriedades necessárias para o CAA.

A ideia de otimização do empacotamento de partículas é a base para vários modelos matemáticos de distribuição grãos nas dosagens de concretos especiais. Alguns dos modelos matemáticos mais conhecidos são o de FURNAS (1931), ANDREASSEN & ANDERSEN (1930) e o DINGER & FUNK (1992), esse último é a combinação dos dois primeiros e é chamado de “Andressen Modificado” ou “Método de Alfred”. O modelo de FURNAS é o mais defendido pelos pesquisadores segundo Vanderlei (2004), porém, bem difícil de ser utilizado. O método de ANDREASSEN & ANDERSEN (Equação 1) já é mais simples, sua natureza é semi-empírica. A sua vantagem é de não requer nenhum fator de forma nas partículas e sua desvantagem é de admitir partículas infinitamente pequenas, o que é irreal (VANDERLEI 2004). Assim, DINGER & FUNK combinaram essas duas distribuições incorporando o tamanho da menor partícula e criando o “Andreassen Modificado” (Equação 2).

Equação 1 – Andreassen & Andersen

$$CPFT = \left(\frac{d}{D}\right)^q \cdot 100$$

Equação 2 – Andreassen Modificado

$$CPFT = \left[\frac{(d^q - d_m^q)}{(D^q - d_m^q)} \right] \cdot 100$$

Sendo:

CPFT (%) - porcentagem volumétrica das partículas menores que d, ou melhor, é a porcentagem de material passante nas peneiras granulométricas;

d – diâmetro da partícula;

D – diâmetro da maior partícula;

d_m – diâmetro da menor partícula;

q – coeficiente de distribuição

Através de simulações computacionais foi verificado que se o coeficiente “q” for igual ou menor do que o valor de 0,37, a distribuição terá um empacotamento máximo para distribuições infinitas e valores acima desse existe sempre porosidade (VANDERLEI e GIONGO, 2006). Também foi verificado por alguns pesquisadores que para se ter uma boa fluidez, o coeficiente “q” não pode ser maior que 0,30 e para uma mistura que utiliza fatores próximos de 0,30 se faz necessário vibração mecânica para melhorar o adensamento e também que para valores de “q” menores do que 0,25 a mistura se torna auto-adensável. Ainda segundo Vanderlei & Giongo (2006) a redução do valor de “q” provoca o aumento da quantidade de finos que influencia a interação entre as partículas.

Oliveira et al. (2018) diz que para a formulação de uma dosagem é preciso definir um coeficiente “q” para o tipo de concreto desejado e traçar a curva teórica ideal utilizando a Equação 2. Com essa curva teórica definida, é possível medir nela os intervalos de material passante para um determinado tamanho de peneira, chamado de graduação requerida conforme o exemplo na Tabela 1. Assim, com a combinação das porcentagens passante dos outros materiais da mistura é calculada a quantidade de cada um para que se obtenha uma porcentagem como da graduação requerida.

Tabela 1 – Exemplo de dados para a formulação da matriz Equação 2.

Fonte: (MATHEW, 2017)

| Peneiras | Graduação Requerida | <i>Filler</i> | Agregado Fino | Agregado Graúdo |
|-----------------|----------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| mm | % Passante | % Passante A | % Passante B | % Passante C |
| 12,5 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 9,5 | 90-100 | 100 | 100 | 94 |
| 4,75 | 60-75 | 100 | 100 | 54 |
| 1,2 | 40-55 | 100 | 66 | 31 |
| 0,6 | 20-35 | 100 | 26 | 23 |
| 0,3 | 12-22 | 74 | 18 | 9 |
| 0,15 | 5-10 | 40 | 5 | 3 |

A matriz para o cálculo é obtida conforme a Equação 3 que mostra que existem dois limites, inferior e superior ao qual a combinação dos componentes dos materiais tem que estar dentro deles. Ou melhor, esse sistema (Figura 2), calcula as quantidades de cada componente afim de que a somatória de cada faixa granulométrica produza uma curva mais próxima possível da curva ótima teórica. Caso o sistema de equações não produza uma resposta, será

necessária a substituição ou alteração dos componentes para que se produzam resultados esperados (MATHEW, 2017).

Equação 3 – Limites superior e inferior para cada faixa granulométrica.

$$Lim_i \leq ax_1 + bx_2 + cx_3 \leq Lim_s$$

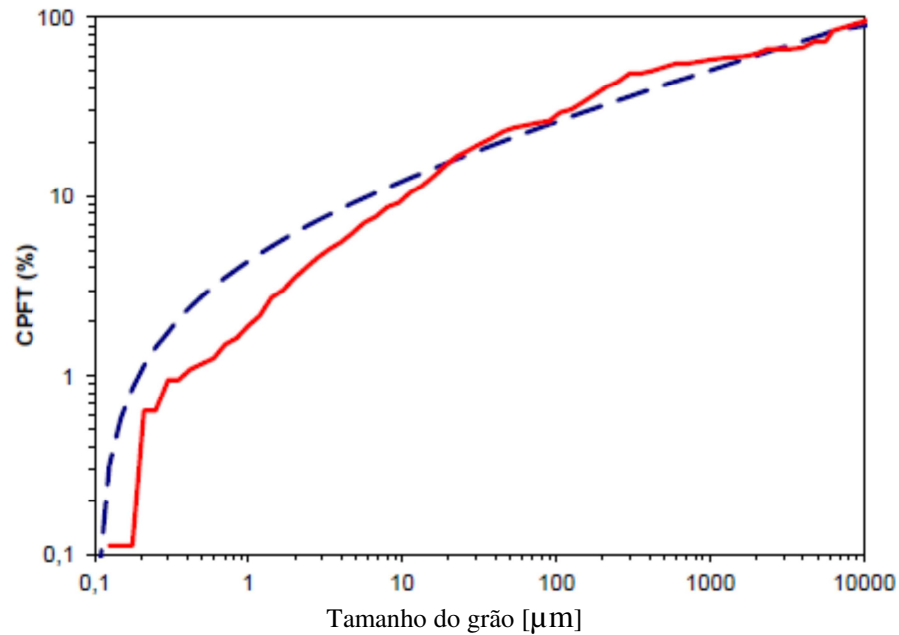
Figura 2 – Exemplo das equações geradas através do Método Andreassen Modificado.

Fonte: (MATHEW, 2017)

$$\begin{array}{rclcl}
 x_1+ & x_2+ & x_3 & = & 1 \\
 x_1+ & x_2+ & 0.94x_3 & \geq & 0.90 \\
 x_1+ & x_2+ & 0.94x_3 & \leq & 1.0 \\
 x_1+ & x_2+ & 0.54x_3 & \geq & 0.6 \\
 x_1+ & x_2+ & 0.54x_3 & \leq & 0.75 \\
 x_1+ & 0.664x_2+ & 0.313x_3 & \geq & 0.4 \\
 x_1+ & 0.664x_2+ & 0.313x_3 & \leq & 0.55 \\
 x_1+ & 0.260x_2+ & 0.228x_3 & \geq & 0.2 \\
 x_1+ & 0.260x_2+ & 0.228x_3 & \leq & 0.35 \\
 0.736x_1+ & 0.176x_2+ & 0.09x_3 & \geq & 0.12 \\
 0.736x_1+ & 0.176x_2+ & 0.09x_3 & \leq & 0.22 \\
 0.401x_1+ & 0.050x_2+ & 0.031x_3 & \geq & 0.05 \\
 0.401x_1+ & 0.050x_2+ & 0.031x_3 & \leq & 0.10
 \end{array}$$

Na Figura 3 tem-se um exemplo de curva teórica ideal em azul para um coeficiente “q” de 0,25 e em vermelho, um exemplo de uma curva de uma mistura de concreto tendendo à curva ideal (OLIVEIRA et al., 2018). Nesta mesma figura, o eixo vertical com os valores de CPFT (%) se refere à porcentagem de material passante nas peneiras e no eixo horizontal, estão os tamanhos dos grãos em micrometro (μm).

Figura 3 – Exemplo de curva ideal e curva otimizada (OLIVEIRA et al., 2018).



Na Figura 4, têm-se as curvas com os valores teóricos e reais obtidos com os componentes da mistura desse trabalho. As curvas da Figura 4 e Figura 5 foram obtidas com o auxílio do software da Elkem, o EMMA (*Elkem Material Mix Analyzer*) e são idênticas, pois, suas granulometrias globais são iguais tanto para o traço controle quanto para o traço com 10% de pó de pneu.

Figura 4 – Curva teórica e curva real para o traço de controle de concreto

Fonte: EMMA.

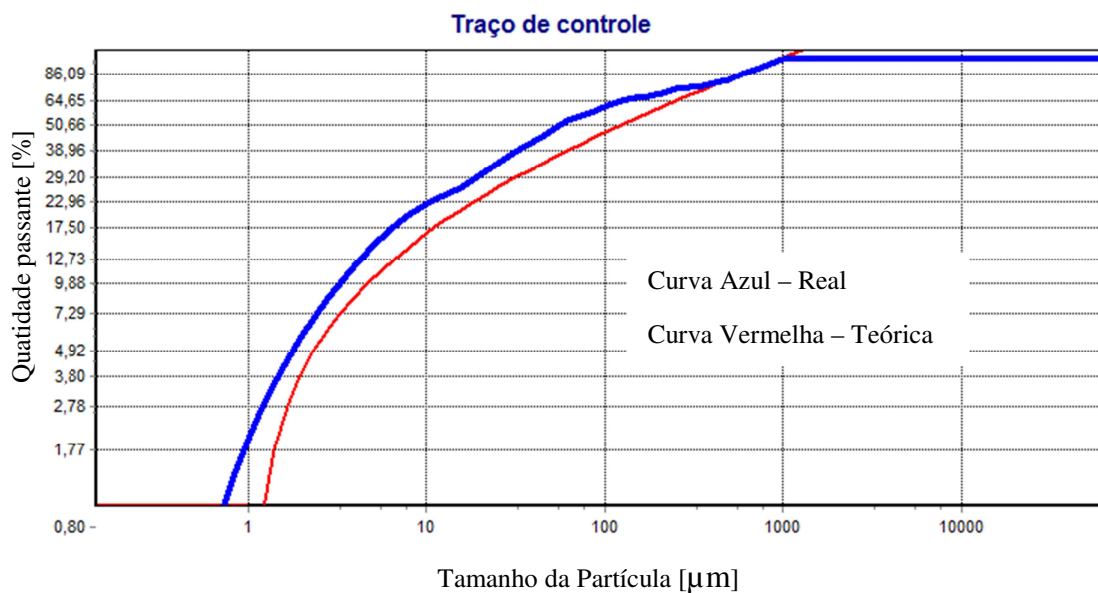
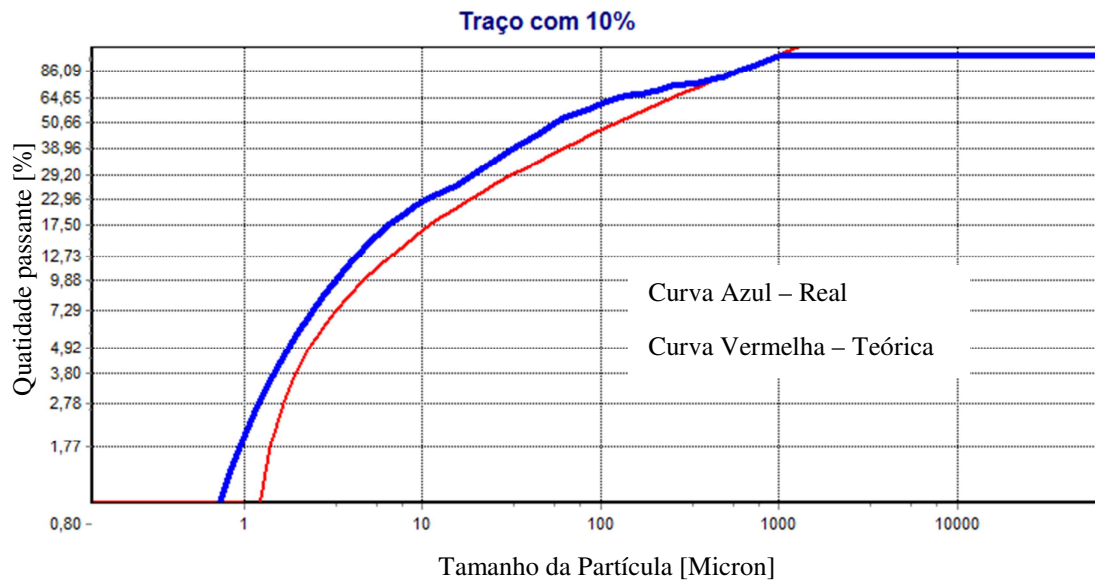


Figura 5 – Curva teórica e curva real para o traço de com 10% de pó de pneu.

Fonte: EMMA.



2.5 Resíduos Industriais: O caso dos PNEUS

Os produtos industriais geralmente deixam para trás subprodutos de seus próprios processos. O material que é derivado da produção e não é comercializado diretamente e nem pode ser descartado sem controle é considerado resíduo industrial. Estes resíduos são encontrados de diversas formas como lodos sólidos, óleos, cinzas, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros, cerâmicas, etc. (Silva, 2018).

Segundo Kanadasan e Razak (2014) e Gesoglu et al. (2011), vários resíduos agrícolas estão sendo incorporados na formulação de concretos convencionais e também no CAA. Entre eles estão: cinzas de casca de arroz, cinzas de serragem, cinzas de palmeiras combustível, cinzas de bagaço, borracha, vidro reciclado, pó de mármore, pó de entulho, etc.

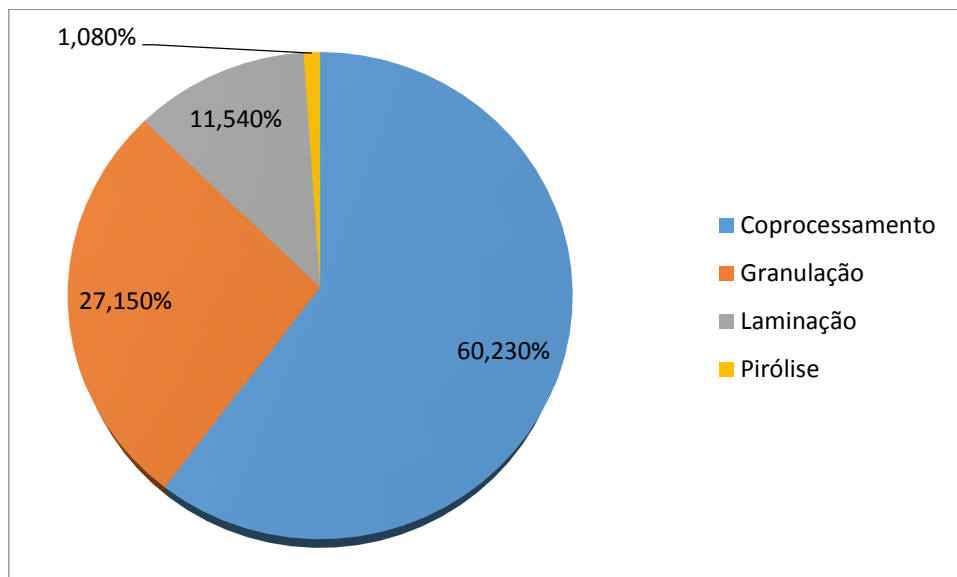
Somente no Brasil foram produzidos em 2016, cerca de 68 milhões de pneus para diversos tipos de veículos segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – Anip. (ANIP, 2018). O Grupo de pesquisa de mercado Freedonia, projeta um crescimento da necessidade de pneus anual mundial de 4,1% chegando a 3,0 bilhões de unidades em 2019. (FREEDONIA, 2018).

No Brasil, a resolução 416 de 2009 do CONAMA, define que os pneus inservíveis são aqueles que foram usados e possuem danos irreparáveis impedindo seu uso normal e até

mesmo reparos. Pela resolução 416/2009, ficam as empresas produtoras de pneus obrigadas a dar um destino apropriado aos pneus inservíveis na mesma quantidade de pneus que produzem. Ou melhor, para cada pneu produzido, um pneu inservível será coletado e deverá ter um descarte apropriado. O descarte apropriado é o procedimento técnico de descaracterização de sua forma inicial e seus constituintes reaproveitados, reciclados ou processados por técnicas admitidas por órgãos ambientais competentes, a Figura 6 mostra os destinos mais utilizados nos pneus inservíveis. Essa regulamentação é bastante importante sendo que no Brasil são produzidos estatisticamente 300.000 toneladas de pneus usados e somente 10% tem como destino a reciclagem, Nacif et al. (2013).

Figura 6 – Principais destinações de pneus inservíveis no Brasil, 2016.

Fonte IBAMA – Relatório 2017.



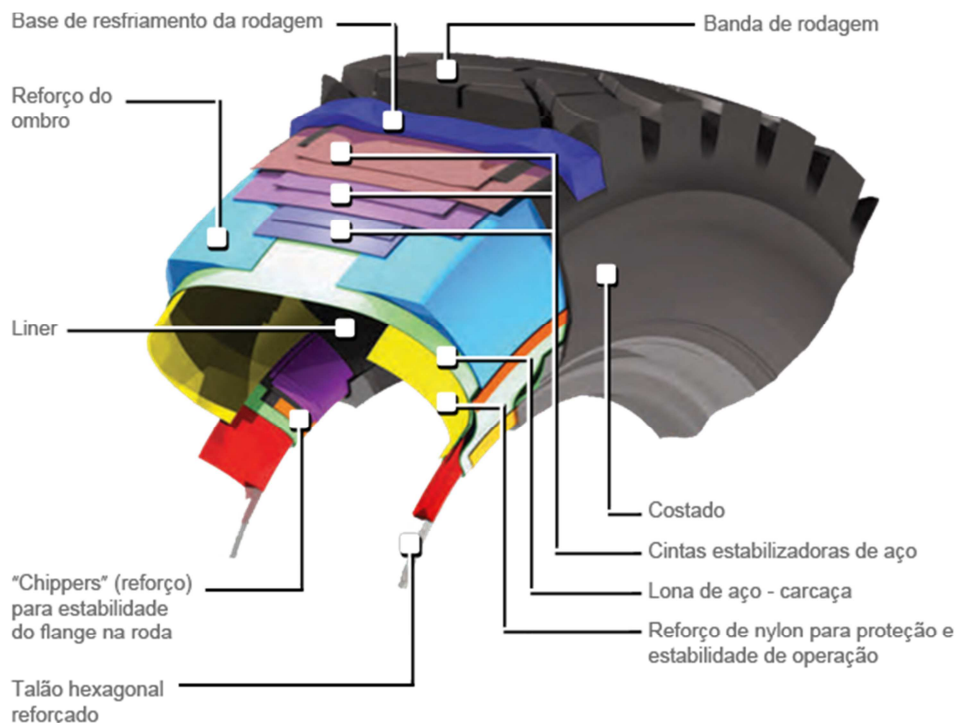
Segundo Thomas et al. (2016), o armazenamento de pneus inservíveis é um problema global devido à grande produção e a sua grande resistência à decomposição. Todo ano, milhões de pneus são descartados, jogados fora ou enterrados representando uma séria ameaça ao meio ambiente. Os pneus são descartados de várias formas como empilhamento em lixões, queima, uso como combustível, pirolises etc. O empilhamento de pneus em lixões representa atualmente um grande problema de saúde, ambiental e econômico por poluir as águas, o ar e o solo. O formato característico do pneu facilita o acúmulo de água que por sua vez serve de criadouros para os mosquitos que são vetores de várias doenças dentre elas as que se destacam são; dengue, chikungunya, zika, febre amarela, malária. Portanto, o descarte correto desse resíduo seria de grande ajuda para o controle dos mosquitos transmissores (SOFI 2016) . O

empilhamento de pneus em algumas cidades é proibido o que gera lixões ilegais que aumenta ainda mais os problemas ambientais (MEYER, 2009).

A reciclagem dos pneus não é simples devido a sua composição e estrutura complexas. Ele possui de 70-80% de massa de borracha vulcanizada. Contem também oito tipos de borracha natural, 30 tipos de borracha sintética e vários outros compostos químicos (SIENKIEWICZ et al., 2017). A Figura 7 mostra as diversas camadas de compostos da estrutura do pneu.

Figura 7 – Estrutura do pneu de automóvel.

Fonte <http://www.goodyear.com.br> Acesso: 10/06/2018



A queima dos pneus também não é a solução, existem relatos de queima de pneus que duram meses ou até mesmo anos. Segundo Meyer (2009), o método de reciclagem de melhor resultado ambiental seria o condicionamento de pneus, chamado de recauchutagem ou recapagem, porém ainda não é bem visto pelo público como produto seguro.

Segundo Thomas e Gupta (2016) o método preferível para reciclagem da borracha do pneu é triturar em grãos e assim converter em várias aplicações. O resultado desse processo pode ser dividido em três tamanhos de grãos. O maior seria de pedaços de 13-76mm e seria usado para substituir agregados graúdos. O tamanho intermediário seria de 0,4-4,75mm e substituiria agregados finos. Este último é produzido também nas indústrias de recauchutagem

de pneus e é o pó de pneu utilizado nesse trabalho. O de tamanho menor, de 0,075-0,475mm, substituiu parcialmente o cimento e exige um processo de moagem especial.

Menom, (2011) apud Kanadasan e Razak (2014), concluiu que adicionando 10% de cinzas de casca de arroz melhora a resistência do CAA, a adição das cinzas de bagaço até 30% aumenta também a resistência à compressão do concreto. No concreto, o resíduo adicionado pode ser inerte ou ativo, esse último proporcionando alguma interação química ou física no resultado final. No caso do uso de resíduo de pneu como agregado, este geralmente produz um CAA com menor resistência à compressão, porém, melhora a ductilidade assim, o concreto tem menor probabilidade de haver fissuras (HILAL, 2017).

Em concretos convencionais, Ganjian et al (2009), Youssf et al (2014) e outros observaram um decréscimo na resistência à compressão do concreto, porém em quantidades até 3,5% de substituição de pó de pneu não alterou significativamente a resistência à compressão.

2.6 Antecedentes

A adição de pó de pneu em concretos convencionais foi estudado por Ganjian et al. (2009) e foi observado um decréscimo na resistência à compressão do concreto na faixa de 10-23% quando substituído por agregados e ainda maior decréscimo quando substituído por cimento. Youssf et al. (2014) menciona que a substituição de pó de pneu até 3,5% por agregados minerais, não alterou significativamente a resistência à compressão do concreto.

Ganjian et al. (2009) mencionam que as razões para o decréscimo de resistência à compressão em concretos com pó de pneu na sua composição podem ser devido a pasta de cimento que envolve os agregados conter partículas de borracha. Assim, essa pasta fica com uma resistência mecânica menor do que uma sem a borracha. Outra razão, segundo Ganjian et al. (2009), é a menor força de ligação das partículas de borracha e a pasta de cimento comparado aos agregados naturais. Também a resistência à compressão de um material depende diretamente das propriedades mecânicas dos componentes que o integram, assim, com a adição de pó de pneu, todo material sofrerá a redução da sua resistência mecânica.

Em Concretos Convencionais (CCV), Skripkiūnas et al. (2007), Holmes et al. (2014), Pelisser et al. (2011), Chunlin et al. (2011), Albano et al. (2005), Lijuan et al. (2014) e Azevedo et al. (2012) reportaram que com o acréscimo de pó de pneu na mistura, houve grandes reduções na resistência à compressão dos concretos.

Mohammadi et al. (2014), Albano et al. (2015), Youssf et al. (2014) e Holmes et al. (2014) relataram em seus trabalhos que a adição do pó de pneu no concreto convencional prejudicou bastante a trabalhabilidade da mistura. Foi concluído por Youssf et al. (2014) e Guo et al. (2014) que uma pequena quantidade de pó de pneu abaixo de 5 e 4% por volume de areia não afeta significativamente a trabalhabilidade se comparado à mistura de controle.

Utilizando o CAA, Hilal (2017) analisou duas granulometrias do pó de pneu e uma terceira que é a junção de ambas e concluiu que a adição de borracha de pneu prejudicou a dureza de todas as amostras de CAA, porém, a ductilidade foi melhorada. Vale ressaltar que foi alcançado facilmente os 30 MPa com a injeção do resíduo de pneu que foi variado de 5-25% em volume de agregado fino e grosso (HILAL, 2017)

A NBR NM 6118/2014 (ABNT, 2014) diz que a resistência mínima para um concreto estrutural deve ser de 20 MPa, portanto, a resistência do concreto com pó de pneu não pode ser menor que esse valor para aplicações estruturais, porém, para outras aplicações menos nobre, pode se aceitar um valor menor, variando em torno de 10 a 15 MPa.

Raj et al. (2011), Güneyisi (2010) e Rahman et al. (2012) substituíram parcialmente a areia por pó de pneu no CAA e também notaram redução na trabalhabilidade proporcional ao acréscimo da pó de pneu na mistura.

A queda da trabalhabilidade nas misturas tanto na CCV e na CAA é devido a alta absorção de água das partículas de borracha, provocando uma redução no “*slump test*” independentemente do tamanho da partícula (SU et al.,2014).

Pelo exposto, apesar de várias pesquisas sobre a adição de pó de pneu em concretos os resultados ainda não estão claros sobre a influência na resistência à compressão.

2.7 Materiais

CIMENTO

Os cimentos são classificados quanto ao tipo, resistência e tipo de adição. A sigla contém CP, Cimento Portland, seguido de algarismos romanos de I a V, conforme o tipo de cimento, depois uma letra para classificar o tipo de adição que pode ser F, Z ou E (Filer, Pozolana e Escória respectivamente). Os números finais representam os valores mínimos de resistência à compressão após 28 dias de cura (ABCP, 2002).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), são essas as diferenças dos tipos de cimentos produzidos no Brasil.

1. Cimento Portland Comum CP I – Sem qualquer adição de gesso, indicado para uso em concreto geral, sem exposição a sulfatos do solo e águas subterrâneas ou agressivas.
2. Cimento Portland Composto CP II – Indicado para lançamentos de grande volume de concreto com superfície pequena, concreto simples, armado e protendido, pré-moldados e artefatos; possui melhor resistência ao ataque de sulfatos. Subdivide-se em:
 - a. CP IIZ – Pozolânico – para concretos subterrâneos, marítimos, industriais. É mais impermeável e mais durável.
 - b. CP IIE – Escória – Possui baixo calor de hidratação
 - c. CP IIF – Carbonático Filler – indicado para aplicações gerais, argamassas de assentamento e revestimento, concreto simples e armado, pré-moldados.
3. Cimento Portland de Alto Forno CP III – É mais impermeável e durável, possui baixo calor de hidratação. Aplicações gerais, mais indicados para barragens, obras de grandes dimensões, ambientes agressivos, pavimentação, aeroportos e concretos asfálticos.
4. Cimento Portland IV – Especialmente para obras expostas à ação da água corrente e ambientes agressivos.
5. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial CP V ARI – Recomendado para artefatos de cimento, tijolos, alvenaria, blocos, pavimentação ou aplicações que necessitam de alta resistência inicial e desforma rápida.
6. Cimento Portland Resistente aos Sulfatos CP RS – Para meios agressivos, rede de coleta e estações de tratamento de esgotos, água do mar e solos.
7. Cimento Portland Baixo Calor de Hidratação CP BC – Peças de grande massa de concreto.
8. Cimento Portland Branco CP B - Rejuntes

Cada tipo de cimento ainda é classificado conforme sua resistência a compressão:

CP I, CP II e CP III - As classes de resistência a compressão aos 28 dias são 25, 32 e 40 MPa;

CP IV – As classes de resistência são de 25 e 32 MPa;

CP V – Resistência a compressão aos 7 dias de 34 MPa;

CP RS e CP BC – As classes de resistência a compressão aos 28 dias de 25 e 32 MPa (ABCP, 2002)

O cimento ideal em geral é aquele com menores variações de resistência à compressão, isso tanto para o CAA quanto para o concreto convencional. Para GJORV (1992), o cimento a ser trabalhado no CAA tem que ter índices de Aluminato de Tricalcio

(C₃A) menores que 10% e cimentos com superfície específica maiores são mais apropriados. Isso por que o C₃A tem grande influência na reologia do cimento e em concentrações maiores do que 10% dificultam o controle reológico e retardam o enrijecimento do concreto (GJORV 1992).

Em relação à superfície específica, quanto maior a área de contato dos grãos de cimento com a água, menor é a distancia entre as partículas, maior é a frequência de colisão entre elas, reduzindo a tensão de escoamento e aumentando a viscosidade da mistura (GJORV 1992).

Neste trabalho foi utilizado o cimento CP V.

AGREGADOS MIÚDOS

Os agregados miúdos são as areias naturais ou areias obtidas através de processos industriais. As areias naturais são melhores para o CAA, pois são mais arredondadas e lisas, dessa forma os grãos tem menos atrito entre si promovendo uma mobilidade maior gerando maior fluidez no concreto para uma mesma quantidade de água (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

As partículas miúdas tem maior influência nas propriedades do concreto fresco do que as partículas graúdas. Gomes e Maestro (2005) recomendam o uso de agregados finos com tamanhos de partículas menores de 0,125 mm na pasta, pois melhoram o comportamento reológico e devem ser levados em conta no cálculo da razão água pó.

Segundo Gomes e Maestro (2005), o volume comum de agregado miúdo varia entre 40-50% do volume de argamassa, com proporções aproximadas de 710 a 900 kg/m³.

Segundo o EFNARC (2005), o alto volume de pasta no CAA ajuda a diminuir a fricção entre as partículas de areia, mas uma boa distribuição de tamanhos de grão é ainda muito importante. Vários métodos de dosagens de CAA utilizam areia misturada de modo a se obter uma curva granulométrica otimizada de agregados miúdos.

AGREGADOS GRAÚDOS

Os materiais graúdos têm limites de tamanhos superiores, já que terão que ter livre acesso aos vãos das armações e barras. Gomes e Maestro (2005) recomendam que o agregado graúdo seja inferior a 19 mm, contudo, os valores usuais estão entre 12,5 e 19 mm. Este estudo utilizou agregados graúdos com limite superior de 12,5mm, que é chamada de brita

zero. Em relação ao formato, o mesmo vale para os agregados graúdos, quanto para os agregados miúdos, quanto mais esféricos, maior será a fluidez do concreto (EFNARC, 2005).

Gomes e Maestro (2005) recomendam que o CAA deve possuir um volume de agregado graúdo de 28-35% do volume do concreto e a relação de peso agregado graúdo/concreto de 32-40%, com proporções aproximadas de 750 kg/m³ a 920 kg/m³.

ADITIVOS – PLASTIFICANTES E SUPERPLASTIFICANTES

Para Gomes e Maestro (2005), o uso de aditivos, Plastificantes e Superplastificantes (SP), são imprescindíveis para o CAA. Esses aditivos promovem uma melhor fluidez ao concreto fresco que é uma de suas principais características. O SP reduz a quantidade de água necessária mantendo a fluidez da mistura e também mantem a dispersão das partículas durante o tempo de transporte e aplicação. O tempo de retenção pode variar dependendo se terá que ser transportado ou se a mistura está sendo feita na obra (EFNARC, 2005).

HARTMANN, 2002 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015, agrupam os SPs em 4 categorias:

- a) **lignossulfonatos ou lignossulfonatos modificados (LS)**. Os lignossulfonatos geralmente incorporam ar e retardam, com diversas intensidades, a pega do cimento;
- b) **sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído**, usualmente denominados de naftaleno sulfonato ou apenas de naftaleno (NS). Estes compostos não incorporam ar e praticamente não interferem no tempo de pega do cimento;
- c) **sais sulfonatos de policondensado de melamina e formaldeído**, usualmente denominados de melamina sulfonato ou apenas de melamina (MS). A melamina pode apresentar uma tendência a retardar a pega do cimento e, eventualmente, incorporar pequena quantidade de ar;
- d) **policarboxilatos (PC)**;

Tutikian (2004) apud Gomes e Maestro (2005), citam outras características promovidas pelos aditivos superplastificantes como redução da tensão superficial da água, repulsão eletrostática entre partículas, filme lubrificante entre as partículas de cimento, dispersão dos grãos de cimento, inibição da hidratação superficial do cimento etc, tudo isso promove uma maior fluidez na mistura.

3 MÉTODOS DE ANÁLISE

3.1 Análise das Propriedades do CAA no Estado Fresco

A NBR NM 15823/2017 classifica o concreto como CAA através dos três parâmetros principais para esses concretos, que são primeiro a fluidez e escoamento (SF), viscosidade plástica aparente (VF) e habilidade passante (PL). Existem vários testes e procedimentos para averiguar a autoadensabilidade do concreto, porém, conforme Domone (2006) observou que os dois testes mais usados para a caracterização do CAA quanto à trabalhabilidade são o *slump flow test* e o Funil “V”. Para verificar quanto à sua habilidade passante e não segregação foi utilizado a Caixa “L”.

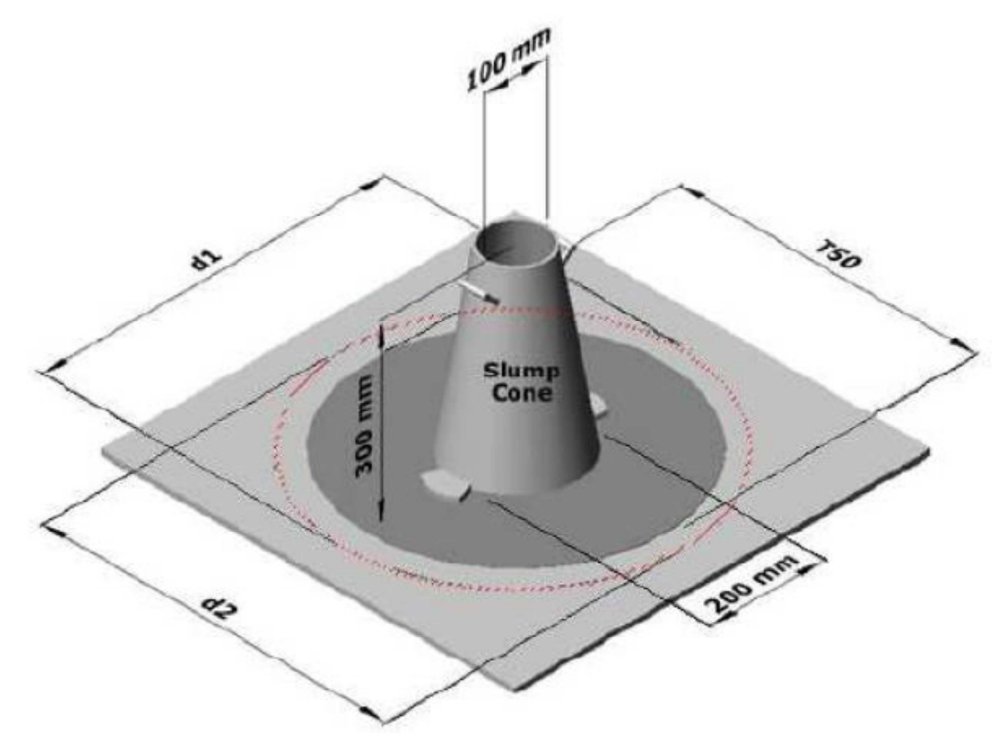
3.1.1 – Ensaio de Espalhamento – *Slump flow test*

Uma das principais características do CAA é sua fluidez, que é definida como a capacidade do concreto fluir livremente sem segregar. A sua medição é feita por um equipamento chamado molde tronco-cone e consiste em verificar se o concreto é capaz de se espalhar sofrendo apenas a pressão do próprio peso (GOMES E BARROS, 2009). O material a ser testado é posicionado dentro do molde até estar completamente cheio, em cima de uma superfície plana e adensado somente por seu próprio peso (Figura 8). O tronco-cone é suspenso deixando o volume de concreto fluir livremente através da base. A partir do levantamento, é medido o tempo até o concreto fresco atingir a marca circular de diâmetro 50cm, chamado fluxo T_{50} e também os dois diâmetros perpendiculares do círculo formado pelo concreto já espalhado, para obtenção da média final, D_{final} , (GOMES E BARROS, 2009).

Os valores de D_{final} , para o CAA deve estar dentro de 60 e 80 cm e T_{50} entre 2 e 7 segundos (GOMES E BARROS, 2009).

Figura 8 – Equipamento Trono-cone e base plana. *Slump flow test*.

Fonte Cavalcanti (2006).

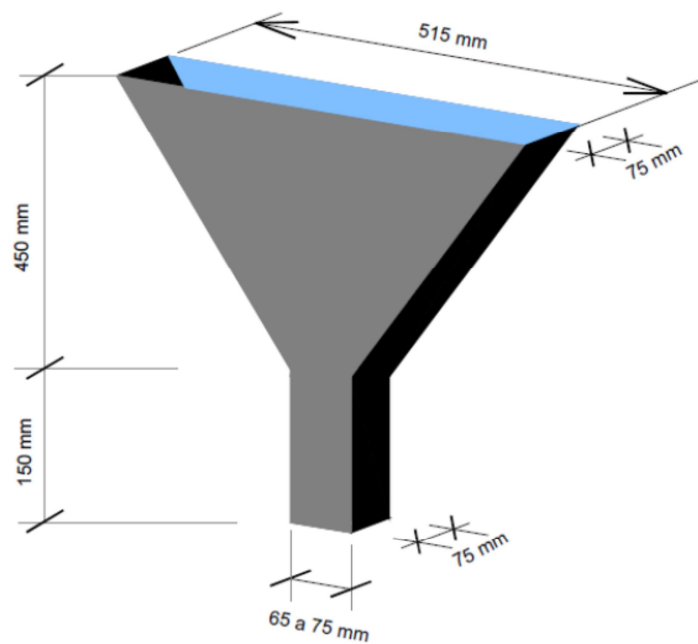


3.1.2 – Ensaio do Funil “V”

O ensaio do Funil “V” foi criado para se verificar a capacidade do CAA de passar através de um estreitamento de seção sob a pressão do próprio peso. O teste consiste em medir o tempo que uma quantidade da amostra leva para escoar por um funil de tamanho normalizado (Figura 9). Segundo Gomes e Barros (2009), o tempo, denominado fluxo do ensaio do Funil-“V” (T_v) tem que ser entre 6 a 15 segundos.

Figura 9 – Equipamento funil “V”.

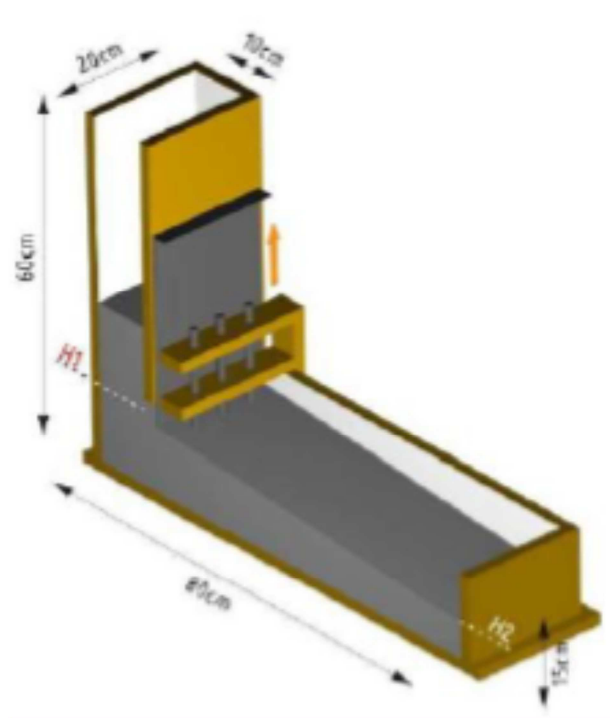
Fonte Alencar (2008).



3.1.3 – Ensaio da Caixa “L”

O objetivo desse ensaio é avaliar a capacidade do CAA de passar por obstáculos, sob a força do seu próprio peso, como armaduras sem que ocorram bloqueios (GOMES E BARROS, 2009). O equipamento é uma caixa no formato de “L”, sendo a parte vertical o recipiente com material a ser ensaiado e a parte horizontal parte de medição do escoamento do concreto. Os pontos a serem medidos são a altura de concreto no início do trecho horizontal, H_1 , e o outro é a altura na parte final, mais longe desse mesmo trecho horizontal, H_2 (Figura 10).

Figura 10 – Equipamento Caixa “L”.
Fonte Alencar (2008).



A NBR 15823/2017 (ABNT, 2017) classifica o CAA pelos resultados desses três ensaios. A Tabela 2 relaciona cada resultado a sua aplicação.

Tabela 2 – Métodos de ensaios e suas aplicações.

Fonte: ABNT NBR 15823/2017.

| ENSAIOS | CLASSES | APLICAÇÃO | EXEMPLO |
|---|--|---|---|
| Espalhamento (<i>Slump-flow</i>) (mm) | SF 1: 550 a 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 autoadensável bombeado; Estruturas que exigem um curto espalhamento horizontal do concreto autoadensável | Lajes, revestimento de túneis, estacas e certas fundações profundas. |
| | SF 2: 660 a 750. | Adequada para a maioria das aplicações correntes. | Paredes, vigas, pilares e outras. |
| | SF 3: 760 a 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. |
| Viscosidade plástica aparente (Funil “V”) (s) | VF 1: < ou = 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 |
| | VF 2: 9 a 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 |
| 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. |

4 ESPECIFICAÇÃO FÍSICA

O experimento consiste em adicionar ou substituir um elemento no traço de concreto auto-adensável e averiguar quais as mudanças provocadas por esse componente. O elemento em questão é o pó de pneu (PP). Para que o comparativo seja representativo, é necessário alterar poucas variáveis a fim de se ter certeza de que as mudanças ocorrem em consequência da mudança alvo e não de algum efeito colateral do processo.

Ao adicionar um elemento ou substituí-lo, ocorre grandes mudanças na densidade, granulometria, absorção de água, coesão entre os elementos, trabalhabilidade do traço etc. Dessa forma, foi utilizado um artifício para que não haja mudanças significativas na distribuição granulométrica do traço que possa afetar a sua trabalhabilidade. Este artifício consiste em adicionar um novo elemento que faz parte da areia total do traço. Esse componente é a areia alterada. Ela tem granulometria igual à do pó de pneu e será substituída gradativamente por pó de pneu nas proporções de 0%, 10%, 20% e finalmente 30% em volume de areia total. A quantidade de areia alterada a ser inserida no traço de controle é a quantidade máxima de pó de pneu que se tem interesse de substituir nesse estudo, no caso 30%. O processo de fabricação dessa areia alterada será descrito posteriormente neste trabalho.

4.1 – Areia Natural

A areia utilizada neste experimento foi adquirida no comércio local, foi extraída do Rio Sapucaí no Município de Itajubá-MG. Devido ao período de chuvas do mês de Março, a areia estava úmida, pois, foi obtida diretamente no porto de areia a céu aberto, sendo a quantificação dessa umidade é fundamental para o estudo.

A granulometria da areia foi realizada com uma sequência de peneiras conforme a NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003) para agregados no laboratório de Geotecnia da UNIFEI.

A granulometria dos agregados finos devem atender os limites inferiores e superiores obtidos pela NBR 7211/2009 (ABNT, 2009).

O módulo de Finura foi obtido através da somatória das porcentagens acumuladas nas peneiras dividindo tudo por 100, conforme a NBR 7211/2009 (ABNT, 2009).

A massa específica foi obtida seguindo NBR NM 52/2009 (ABNT, 2009).

A absorção de água foi obtida de acordo com a NBR NM 30/2001 (ABNT, 2001).

4.2 – Brita Zero

A brita zero foi fornecida por uma mineradora da região. A granulometria desse agregado foi obtida utilizando a NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003), a mesma norma utilizada para a areia.

A massa específica calculada pela NBR NM 53/2009 (ABNT, 2009) e o Módulo de Finura conforme descrito anteriormente (ABNT NBR 7211/2009).

4.3 – Pó de Pneu

Como resíduo alvo, o pó de pneu foi obtido em uma fábrica de recauchutagem de pneus automotivos da região. Este resíduo foi fornecido pela empresa por se tratar de um subproduto do processo de recauchutagem de pneus que requer uma destinação segura. A Figura 11 mostra a máquina que produz o resíduo e a Figura 12 mostra o pó pronto para ser utilizado. Dessa forma, a utilização do pó de pneu em concretos CAA seria uma forma mais econômica e mais vantajosa para o meio ambiente e para indústria.

Figura 11 – Indústria de recauchutagem de pneus.

Fonte: Autor.



Figura 12 – Aparência visual do Pó de pneu pronto para uso.

Fonte: Autor.



Utilizando a mesma forma para conseguir a granulometria da areia, NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003), foi obtida a granulometria do pó de pneu. O Módulo de Finura foi calculado seguindo a NBR 7211/2009 (ABNT, 2009).

O Pó de Pneu tem um valor de massa específica bem próxima à massa específica da água, por isso foi necessário a utilização de um meio menos denso do que a água para que o cálculo da massa específica do PP seja feito. O líquido escolhido foi o querosene e a massa específica foi calculada utilizando a NBR 52/2009 (ABNT, 2009). O frasco com querosene e o pó de pneu é mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Frasco utilizado para o cálculo da massa específica do Pó de pneu.

Fonte: Autor.



4.4 – Areia Alterada

Visando atingir o objetivo desse trabalho, que é comparar o traço controle (CAA) sem e com a adição de pó de pneu, foi necessário que os traços tivessem suas granulometrias mais próximas possível. Isto para que só o efeito do pó de pneu fosse o diferencial. Assim foi preparada uma areia com a granulometria idêntica à do pó de pneu e ela seria a areia substituída. Dessa forma, a granulometria da mistura se manteria constante durante o traço de controle e os traços subsequentes.

A produção da areia alterada foi feita através da coleta de componentes de areia natural por peneiras de granulometria específica de modo a adquirir os componentes necessários e então montar a areia alterada. Ao final desse processo é obtido um material com o visual de areia natural, porém com granulometria idêntica à do pó de pneu.

Como as granulometrias do PP e da AA são iguais, os módulos de finuras serão iguais. A massa específica da AA aumentou em relação à areia natural devido ao aumento da quantidade de grãos maiores. A umidade da AA também é a mesma da areia natural já que esta é utilizada para a sua produção.

4.5 – Aditivo – Superplastificante

O aditivo utilizado foi o ADI-SUPER LM 300 - Superplastificante do Tipo II. Segundo o fabricante Aditibras, este é um aditivo de alta tecnologia, formado por polímeros que fazem a dispersão das partículas de cimento promovendo uma maior fluidez, trabalhabilidade e aumento da resistência mecânica inicial e final no concreto.

É compatível com todos os tipos de cimento Portland e é especialmente indicado para a fabricação de concretos auto-adensáveis, pré-moldados, protendidos, CAD – concreto de alto desempenho, micro-concreto, fabricação de artefatos de cimento, concretagem de peças esbeltas e de difícil acesso ou com alta densidade de ferragens.

É um produto líquido, pronto para uso, isento de cloretos e atende aos requisitos na NBR 11768/2011 (2011).

Ainda, conforme o fabricante são características do aditivo a redução da água de amassamento, o aumento a fluidez facilitando o bombeamento, o aumento do módulo de elasticidade do concreto, a redução de permeabilidade e também o aumento da vida útil das estruturas. Os dados fornecidos pelo fabricante como quantidade recomendada e massa específica estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Descrição do aditivo utilizado. Fonte: Aditibras Modificado

| ADI-SUPER LM 300 | | |
|--|----------------------------|--|
| Descrição Técnica | Dosagem Recomendada | Massa Específica g/cm³ |
| Efeito superplastificante com longa manutenção da trabalhabilidade. Possibilita a obtenção de altas resistências iniciais e finais. | 300 a 1200 ml | 1,06 ±0,02 |
| Dosagem recomendada para cada 100kg de cimento. | | |

Foi utilizada no experimento a dosagem máxima recomendada pelo fabricante, 1,25% do peso do cimento.

5 ESTUDO DE DOSAGEM

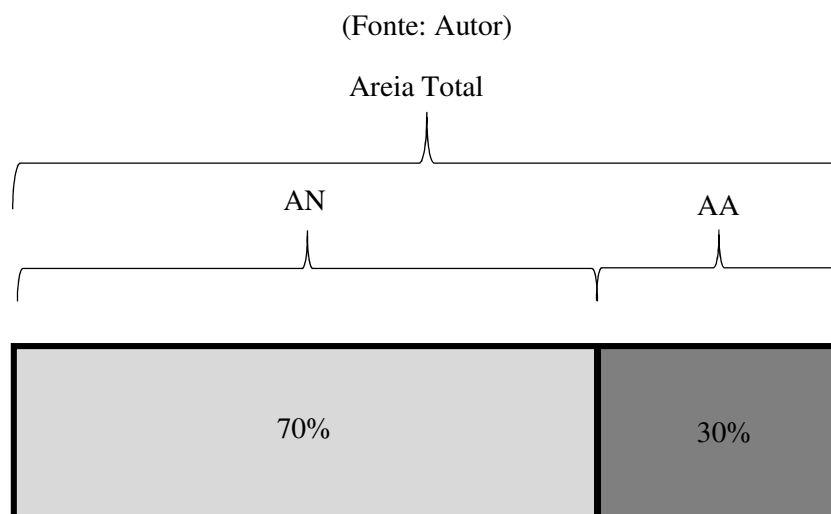
5.1 – Traço de Controle – 0% Pó de Pneu

O traço de controle foi realizado para comparação entre os resultados obtidos com as adições das proporções de borracha no CAA. O traço de controle foi definido utilizando as granulometrias e densidades reais dos elementos, associado a uma modelagem de cálculos matemáticos com base no modelo de “Andreassen Modificado” que é derivado do modelo de ANDREASSEN & ANDERSEN (1930). Esse cálculo leva em consideração as granulometrias e densidades para a obtenção da melhor distribuição de tamanhos de partículas possível.

A relação água/cimento foi selecionada e mantida constante no valor de 0,54 em todos os traços do experimento.

Como mencionado anteriormente, foi utilizado um elemento adicional para que quando houver as substituições com o pó de pneu, haja a menor variação na distribuição granulométrica do traço, esse elemento é a areia alterada, que é uma areia natural com granulometria modificada para se igualar a granulometria do pó de pneu. No traço de controle não é adicionado o pó de pneu, e a areia utilizada é composta por 70% de areia natural e 30% areia alterada em volume, conforme Figura 14.

Figura 14 – Proporção de areia natural e areia alterada no traço de controle.



5.2 – Traços com Substituições

A primeira substituição acontece com a retirada de um terço da areia alterada o que equivale a 10% em volume da areia total e adicionado à mesma quantidade em volume do pó de pneu, (Figura 15). Como a densidade do pó de pneu é menor que a areia substituída, ocorre uma pequena diminuição da densidade total do traço.

Nos traços seguintes, o mesmo processo foi feito para 20% e com 30% de pó de pneu, como mostram as Figuras 16 e 17 respectivamente.

Figura 15 – Proporção de areia natural e areia alterada no traço com 10% de Pó de Pneu.

(Fonte: Autor)

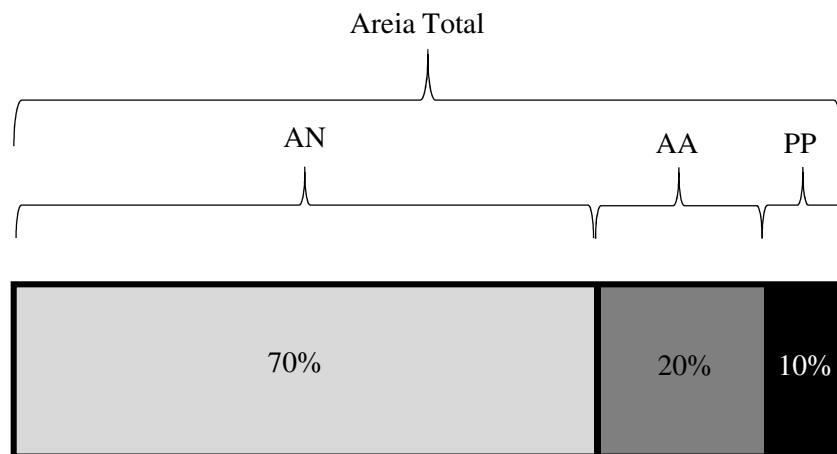


Figura 16 – Proporção de areia natural e areia alterada no traço com 20% de Pó de Pneu.

(Fonte: Autor)

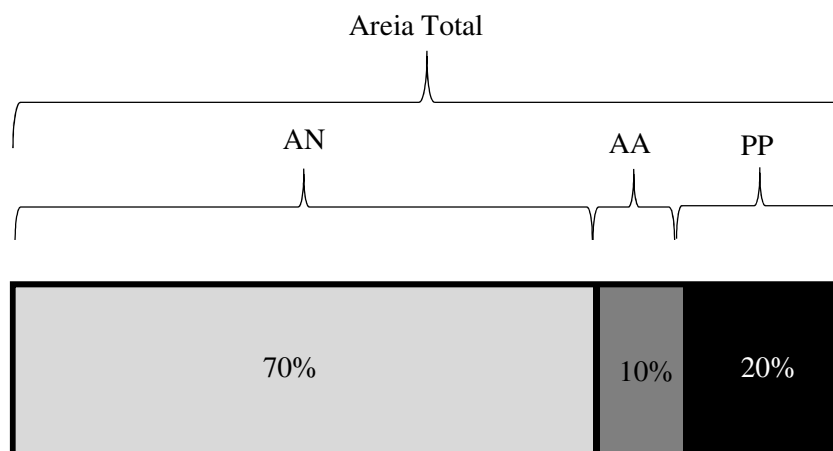
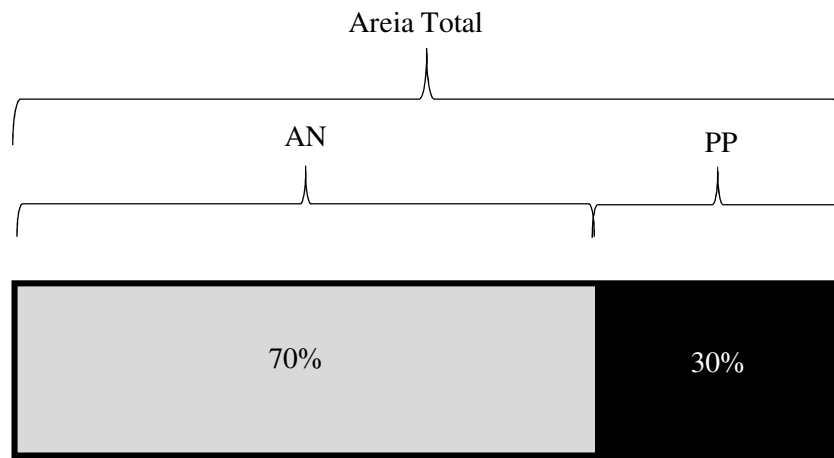


Figura 17 – Proporção de areia natural e areia alterada no traço com 30% de Pó de Pneu.

(Fonte: Autor)

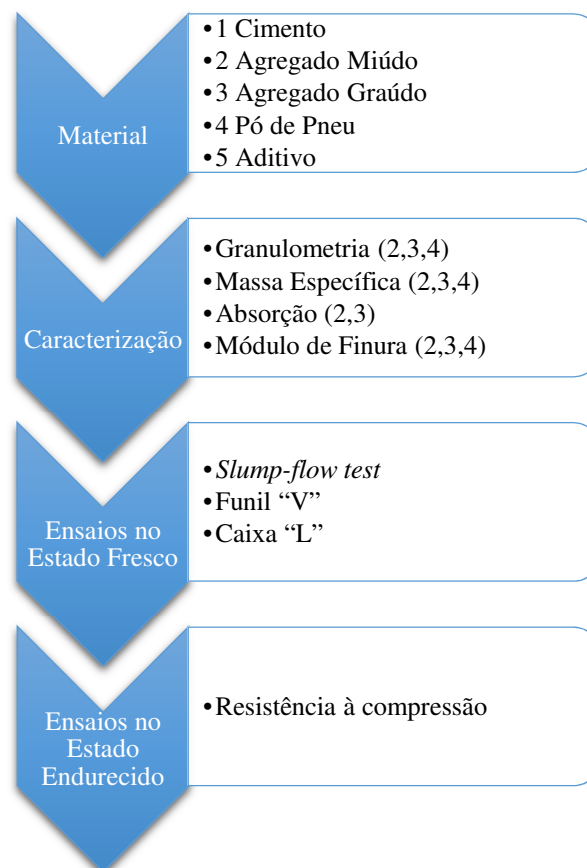


6 EXPERIMENTO

O procedimento experimental seguiu o fluxograma da figura 18.

Figura 18 – Fluxograma do processo experimental.

Fonte: Autor.



6.1 – Agregado Miúdo

6.1.1 Areia Natural

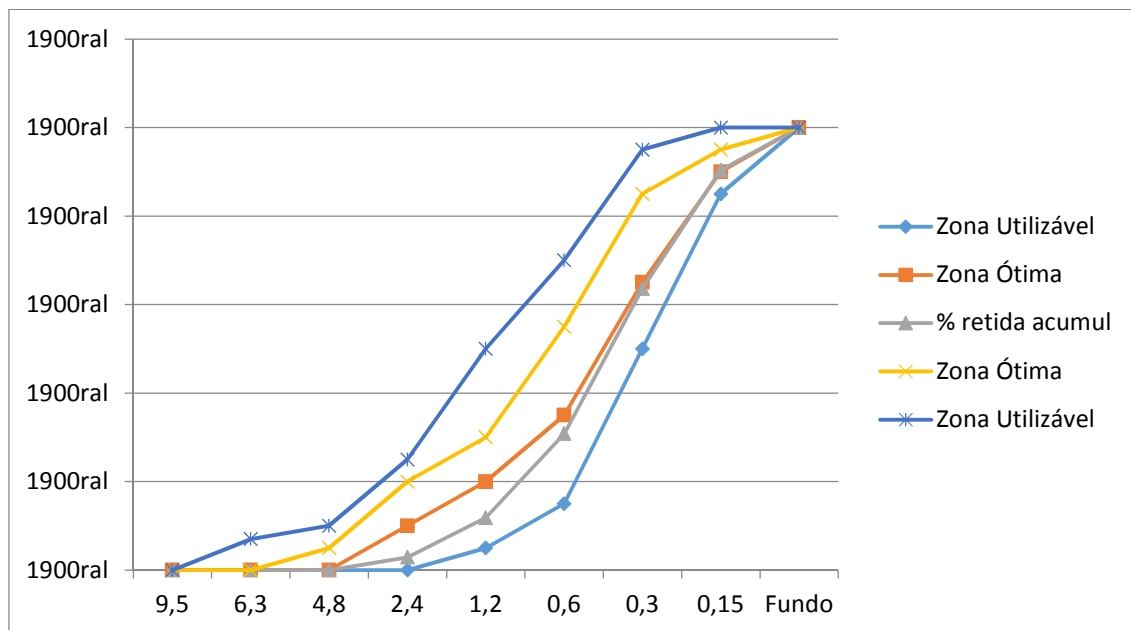
O resultado do processo de sequência de peneiras nos fornece um quantitativo de cada faixa de tamanho de grãos, conforme Tabela 4 (ABNT NBR 7211/2009).

Tabela 4 – Granulometria da Areia

| Granulometria Areia | | | |
|---------------------|------------------|------------|----------------------|
| Peneiras | Massa Retida (g) | Retida (%) | Retida acumulada (%) |
| 2,4 | 14,49 | 2,9 | 3 |
| 1,2 | 44,63 | 8,9 | 12 |
| 0,6 | 94,94 | 19,0 | 31 |
| 0,3 | 163,69 | 32,7 | 64 |
| 0,15 | 134,15 | 26,8 | 90 |
| Fundo | 48,08 | 9,6 | 100 |
| | 499,98 | 100,0 | |

Os limites da granulometria dos agregados miúdos estão mostrados na Figura 19, demonstrando que a granulometria da areia está dentro dos limites utilizáveis da NBR 7211/2009.

Figura 19 – Limites da granulometria dos agregados miúdos (ABNT NBR 7211/2009).



A absorção de água foi calculada seguindo a NBR NM 30/2001 (ABNT, 2001) e os resultados do cálculo do módulo de finura (ABNT NBR 7211/2009) e da massa específica (ABNT NBR 52/2009) estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Características da Areia

| | | | |
|-------------------------|------|-------------------|--------------------|
| D_{max} | 2,4 | mm | ABNT NBR 7211/2009 |
| Mód Finura | 1,99 | [1] | ABNT NBR 7211/2009 |
| Massa Específica | 2,57 | g/cm ³ | ABNT NBR 52/2009 |
| Absorção de Água | 2,5 | % | ABNT NBR 30/2001 |

6.1.2 Pó de Pneu

O resultado da granulometria do pó de pneu está na Tabela 6.

Tabela 6 – Granulometria do pó de pneu (PP).

| Granulometria Pó Pneu (PP) | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Peneiras | Massa Retida (g) | Retida (%) | Retida acumulada (%) |
| 6,3 | 7,4 | 1,2 | 1 |
| 4,75 | 6,67 | 1,0 | 2 |
| 2,4 | 41,27 | 6,5 | 9 |
| 1,2 | 183,26 | 28,7 | 37 |
| 0,6 | 200,84 | 31,4 | 69 |
| 0,3 | 107,43 | 16,8 | 86 |
| 0,15 | 53,86 | 8,4 | 94 |
| Fundo | 38,86 | 6,1 | 100 |
| | 639,59 | 100,0 | |

O Módulo de Finura e a massa específica foram calculados e os resultados estão na Tabela 7.

Tabela 7 – Características do pó de pneu (PP)

| | | | |
|-------------------------|------|-------------------|--------------------|
| D_{max} | 4,75 | mm | ABNT NBR 7211/2009 |
| Mód Finura | 2,96 | [1] | ABNT NBR 7211/2009 |
| Massa Específica | 1,19 | g/cm ³ | ABNT NBR 52/2009 |

6.1.3 Areia Alterada

A granulometria da areia alterada é idêntica a do pó de pneu conforme Tabela 8 (ABNT NBR 7211/2009).

Tabela 8 – Granulometria da areia alterada (AA) igual à do pó de pneu (ABNT NBR 7211/2009).

| Granulometria Areia Alterada (AA) | | |
|--|-------------------|-----------------------------|
| Peneiras | Retida (%) | Retida acumulada (%) |
| 6,3 | 1,2 | 1 |
| 4,75 | 1,0 | 2 |
| 2,4 | 6,5 | 9 |
| 1,2 | 28,7 | 37 |
| 0,6 | 31,4 | 69 |
| 0,3 | 16,8 | 86 |
| 0,15 | 8,4 | 94 |
| Fundo | 6,1 | 100 |
| | 100,0 | |

A Tabela 9 apresenta os resultados da massa específica da AA aumentou em relação à areia natural devido ao aumento da quantidade de grãos maiores. A absorção de água da AA também é a mesma da areia natural já que esta é utilizada para a sua produção.

Tabela 9 – Características da areia alterada (AA).

| | | | |
|-------------------------|------|-------------------|--------------------|
| D_{max} | 4,75 | mm | ABNT NBR 7211/2009 |
| Mód Finura | 2,96 | [1] | ABNT NBR 7211/2009 |
| Massa Específica | 2,61 | g/cm ³ | ABNT NBR 52/2009 |
| Absorção de Água | 2,5 | % | ABNT NBR 30/2001 |

6.2 – Agregado Graúdo

6.2.1 Brita Zero

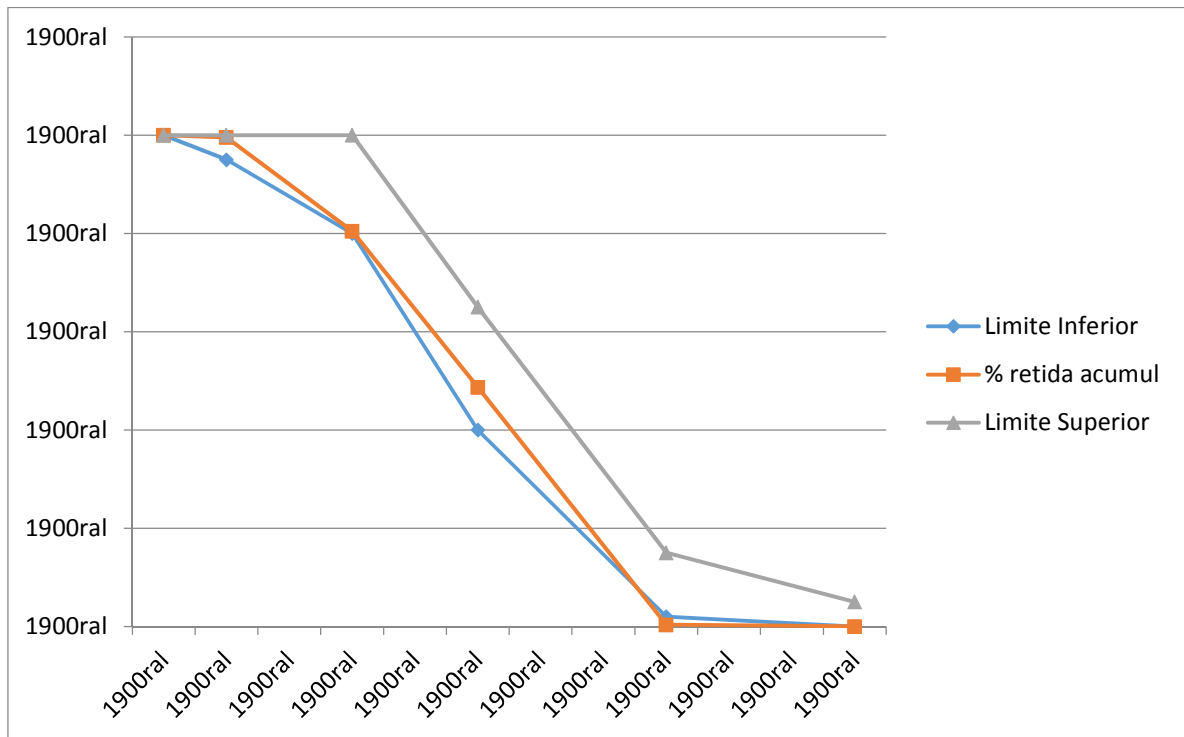
Os resultados de granulometria da brita zero seguem a mesma forma e normas das utilizadas para a areia e os resultados estão na Tabela 10 (ABNT NBR 7211/2009).

Tabela 10 – Granulometria da brita zero (ABNT NBR 7211/2009).

| Granulometria Brita Zero | | | |
|--------------------------|------------------|------------|----------------------|
| Peneiras | Massa Retida (g) | Retida (%) | Retida acumulada (%) |
| 12,5 | 0,27 | 0,0 | 0 |
| 9,5 | 7,06 | 0,3 | 0 |
| 6,3 | 1014,97 | 48,3 | 49 |
| 4,75 | 666,63 | 31,8 | 80 |
| 2,4 | 400,83 | 19,1 | 100 |
| 1,2 | 0,00 | 0,0 | 100 |
| 0,6 | 0,00 | 0,0 | 100 |
| 0,3 | 0,00 | 0,0 | 100 |
| 0,15 | 0,00 | 0,0 | 100 |
| Fundo | 9,73 | 0,5 | 100 |
| | 2099,49 | 100,0 | |

Os limites inferiores e superiores da brita zero estão descritos na Figura 20 que foram obtidos pela NBR 7211/2009 (ABNT, 2009) e mostra que a granulometria da brita zero está dentro dos limites estabelecidos.

Figura 20 – Limites da granulometria dos agregados graúdos (ABNT NBR 7211/2009).



Fonte - Autor

Na Tabela 11 estão os resultados calculados do módulo de finura e da massa específica para a brita zero.

Tabela 11 – Características da brita zero.

| | | | |
|-------------------------|------|-------------------|--------------------|
| D_{max} | 9,5 | mm | ABNT NBR 7211/2009 |
| Mód Finura | 5,78 | [1] | ABNT NBR 7211/2009 |
| Massa Específica | 2,75 | g/cm ³ | ABNT NBR 53/2009 |

6.3 – Dosagem dos Traços do Concreto

Através das granulometrias, dos valores reais de massa específicas e a curva gerada pela equação do método de “Andreassen Modificado” foi obtido o traço de controle para esse trabalho (Tabela 12).

Tabela 12 – Traço de concreto controle.

| Produto | Cimento | Brita Zero | Pó de borracha | Areia | Água | Aditivo (1,25%) | Areia Alterada |
|-------------------------------------|----------------|-------------------|-----------------------|--------------|-------------|------------------------|-----------------------|
| Traço | 1,00 | 1,08 | 0,00 | 1,50 | 0,54 | 0,0125 | 0,64 |
| Densidade [g/cm³] | 2,95 | 2,75 | 1,19 | 2,57 | 1 | 1,06 | 2,61 |

O traço para as amostras seguiu conforme a Tabela 13 para a produção de 13 litros do concreto de controle.

Tabela 13 – Quantidade para a produção do traço de controle.

| Produto | Massa [g] |
|------------------------|------------------|
| Cimento | 6.098,0 |
| Brita 0 | 6.606,0 |
| Pó de borracha | 0 |
| Areia | 9.135,0 |
| Água | 3.293,0 |
| Aditivo (1,25%) | 78,0 |
| Areia Alterada | 3.915,0 |

Para os traços com substituições, foi considerado o traço de controle e somente substituindo a areia alterada por pó de pneu por volume como mostrado na Tabela 14.

Tabela 14 – Traço com 10% de pó de pneu.

| Produto | Cimento | Brita Zero | Pó de borracha | Areia | Água | Aditivo (1,25%) | Areia Alterada |
|-------------------------------------|----------------|-------------------|-----------------------|--------------|-------------|------------------------|-----------------------|
| Traço | 1,00 | 1,08 | 0,10 | 1,50 | 0,54 | 0,0125 | 0,43 |
| Densidade [g/cm³] | 2,95 | 2,75 | 1,19 | 2,57 | 1 | 1,06 | 2,61 |

Os traços para as amostras com substituição seguiram conforme a Tabela 15 para a produção de 13 litros do concreto com 10% de pó de pneu.

Tabela 15 – Traço para a produção das amostras do traço com 10% de PP.

| Produto | Massa [g] |
|------------------------|------------------|
| Cimento | 6.094,0 |
| Brita 0 | 6.602,0 |
| Pó de borracha | 605,0 |
| Areia | 9.130,0 |
| Água | 3.291,0 |
| Aditivo (1,25%) | 78,0 |
| Areia Alterada | 2.609,0 |

O processo é repetido para as substituições de 20% e 30% de pó de pneu conforme Tabelas 16 e 18. As tabelas dos traços para as amostras com 20% e 30% de substituição de pó de pneu estão nas Tabelas 17 e 19 respectivamente.

Tabela 16 – Traço com 20% de PP.

| Produto | Cimento | Brita Zero | Pó de borracha | Areia | Água | Aditivo (1,25%) | Areia Alterada |
|-------------------------------------|----------------|-------------------|-----------------------|--------------|-------------|------------------------|-----------------------|
| Traço | 1,00 | 1,08 | 0,20 | 1,50 | 0,54 | 0,0125 | 0,21 |
| Densidade [g/cm³] | 2,95 | 2,75 | 1,19 | 2,57 | 1 | 1,06 | 2,61 |

Tabela 17 – Traço para a produção das amostras do traço com 20% de PP.

| Produto | Massa [g] |
|------------------------|------------------|
| Cimento | 6.090,0 |
| Brita 0 | 6.598,0 |
| Pó de borracha | 1.209,0 |
| Areia | 9.124,0 |
| Água | 3.289,0 |
| Aditivo (1,25%) | 78,0 |
| Areia Alterada | 1.303,0 |

Tabela 18 – Traço com 30% de PP.

| Produto | Cimento | Brita Zero | Pó de borracha | Areia | Água | Aditivo (1,25%) | Areia Alterada |
|-------------------------------------|----------------|-------------------|-----------------------|--------------|-------------|------------------------|-----------------------|
| Traço | 1,00 | 1,08 | 0,30 | 1,50 | 0,54 | 0,0125 | 0,00 |
| Densidade [g/cm³] | 2,95 | 2,75 | 1,19 | 2,57 | 1 | 1,06 | 2,61 |

Tabela 19 – Traço para a produção das amostras do traço com 30% de PP.

| Produto | Massa [g] |
|------------------------|------------------|
| Cimento | 6.087,0 |
| Brita 0 | 6.594,0 |
| Pó de borracha | 1.812,0 |
| Areia | 9.119,0 |
| Água | 3.287,0 |
| Aditivo (1,25%) | 78,0 |
| Areia Alterada | 0 |

6.4 – Resultados dos traços no estado fresco

Conforme a NBR NM 15823/2017 (ABNT, 2017), todos os traços desse trabalho foram submetidos aos três testes mais importantes e os resultados estão na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios dos traços de concreto sem e com adição de pó de pneu (PP).

| | Controle 0% PP | 10% PP | 20% PP | 30% PP | Resultados Esperados CAA | ABNT |
|--|-------------------|--------|--------|--------|--------------------------------|----------------------|
| Slump Flow Test T₅₀₀ (s) | 4 | NA | NA | NA | ≤2 | NBR 15823- 2/2017 |
| Slump Flow Test D_{final} (mm) | 550 | 480 | 460 | 460 | 600 a 800 | NBR 15823- 2/2017 |
| Funil “V” T_v(s) | 6,0 | 5,5 | 4,5 | 4,0 | 6 e 15 | NBR 15823- 5/2017 |
| Caixa “L” (H₁/H₂) | 0,50 | 0,22 | 0,20 | 0,20 | 0,8 a 1 | NBR 15823- 4/2017 |

NA = Não alcançado

Segundo Tutikian et al. (2008) e Gomes e Barros. (2009), os valores deveriam estar; no *Slump flow test* o D_{final} entre 600 a 800mm, no ensaio do funil “V” o T_v entre 6 e 15 segundo e no ensaio da Caixa “L” a relação de alturas H_1/H_2 deveria estar entre 0,80 e 1. Portanto, o traço de concreto controle são classificados como CAA, e os demais com adição de pó de pneu também não.

O traço de controle foi o que melhor se aproximou das características do concreto autoadensável, obteve um diâmetro de espalhamento no *Slump Flow Test* de 550 mm, ainda longe medida mínima para CAA (Figura 21) e conseguiu um T_v dentro do esperado por Tutikian et al. (2008) e Gomes e Barros (2009). Porém, no ensaio da Caixa “L”, foi bastante fraco. O traço de controle deveria fluir na faixa horizontal da caixa e se nivelar ou o mais próximo disso. O resultado foi um valor de H_1/H_2 bem inferior ao de um traço com características de CAA. A trabalhabilidade não foi muito afetada pela adição de 10% do pó de pneu, esta obteve um espalhamento próximo do espalhamento do concreto de controle (Figura 22).

Figura 21 – Resultado do *Slump Flow Test* para a mistura de controle (55cm).

Fonte - Autor



Figura 22 – Resultado do *Slump Flow Test* para a mistura com 10% de pó de pneu (48cm).

Fonte – Autor.



Ainda no traço de controle, vale ressaltar que sua aparência, homogeneidade e fluidez foram adequadas. Devendo então suas falhas nos ensaios primeiramente por causa da

dosagem do SP que precisa ser aprimorada ou até mesmo um estudo para a utilização de outro SP disponível no mercado. Outro fator que pode ter prejudicado a mistura, foi a menor quantidade de finos. Caso fosse inserido na mistura outro componente com granulometria mais fina que a areia, isso provocaria menos vazios na mistura. A quantidade de vazios é importante por que a proporção ideal de uma mistura é sempre a que resulta um menor índice de vazios (TUTIKIAN E PACHECO, 2012).

6.5 – Resultados dos traços no estado endurecido

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados utilizando a máquina Time Testing Machine® WAW-1000C no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil da UNIFEI.

Os corpos de prova foram moldados e preparados para a cura seguindo a NBR NM 5738/2015 (ABNT, 2015), Figura 23 e Figura 24 respectivamente, e após os 28 dias de cura, foram ensaiados conforme a NBR NM 5739/2007 (ABNT, 2007), Figura 25.

Figura 23 – Corpos de prova. Fonte - Autor



Figura 24 – Corpos de prova em cura úmida. Fonte – Autor



Figura 25 – Corpo de prova sendo posicionado para o ensaio de resistência à compressão. Fonte Autor



Os resultados do ensaio de resistência à compressão estão na Tabela 21, onde fica evidenciado que o traço controle de concreto atingiu uma resistência a compressão muito superior a exigida pela norma NBR NM 6118/2014 (ABNT, 2014) (20 MPa), embora não possa ser classificado como de alto desempenho (CAD) e nem auto adensável (CAA).

Tabela 21 – Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

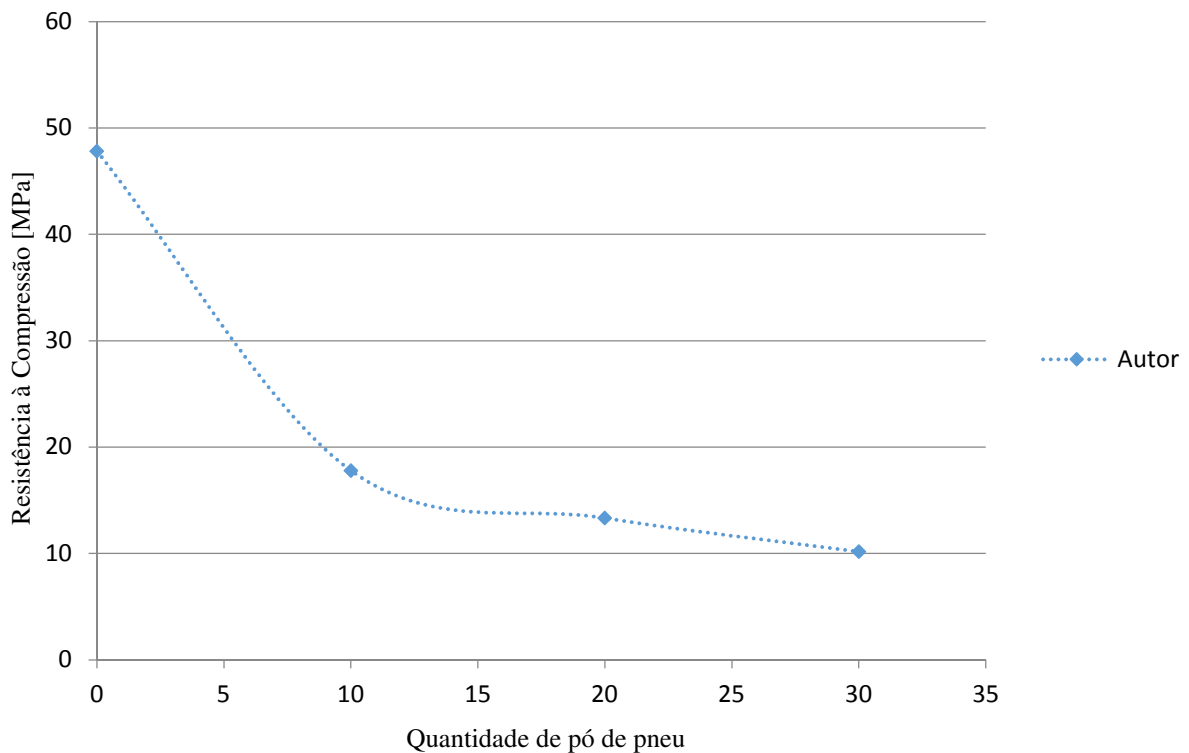
Fonte - Autor

| Resistência à Compressão (MPa) | | | | |
|---------------------------------------|----------------|--------|--------|--------|
| Traço | Traço Controle | 10% PP | 20% PP | 30% PP |
| 1 | 45,3 | 18,8 | 13,0 | 9,1 |
| 2 | 45,8 | 17,2 | 13,8 | 11,1 |
| 3 | 46,8 | 18,5 | 12,9 | 10,6 |
| 4 | 50,1 | 17,6 | 14,4 | 9,1 |
| 5 | 48,0 | 17,2 | 13,2 | 10,3 |
| 6 | 50,9 | 17,5 | 12,7 | 10,7 |
| Média | 47,8 | 17,8 | 13,3 | 10,2 |

A Figura 26 apresenta as médias obtidas nos ensaios de resistência à compressão. Nota-se que houve uma grande queda na resistência à compressão dos traços com o pó de pneu em relação ao traço de controle. As resistências à compressão das misturas foram em média 37% menores em relação à de controle com 10% de pó de pneu, 28% para 20% de pó de pneu e 21% para 30% de pó de pneu, ou seja, a redução foi de 63%, 72% e 79% respectivamente. Isso por que a adição da borracha deixa a pasta menos resistente já que a ligação entre as partículas de borracha e os agregados é menor do que se fossem elementos naturais e também a resistência de um material é proporcional à resistência dos seus elementos (GANJIAN et al., 2009).

Figura 26 – Efeito do pó de pneu (PP) na resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

Fonte - Autor

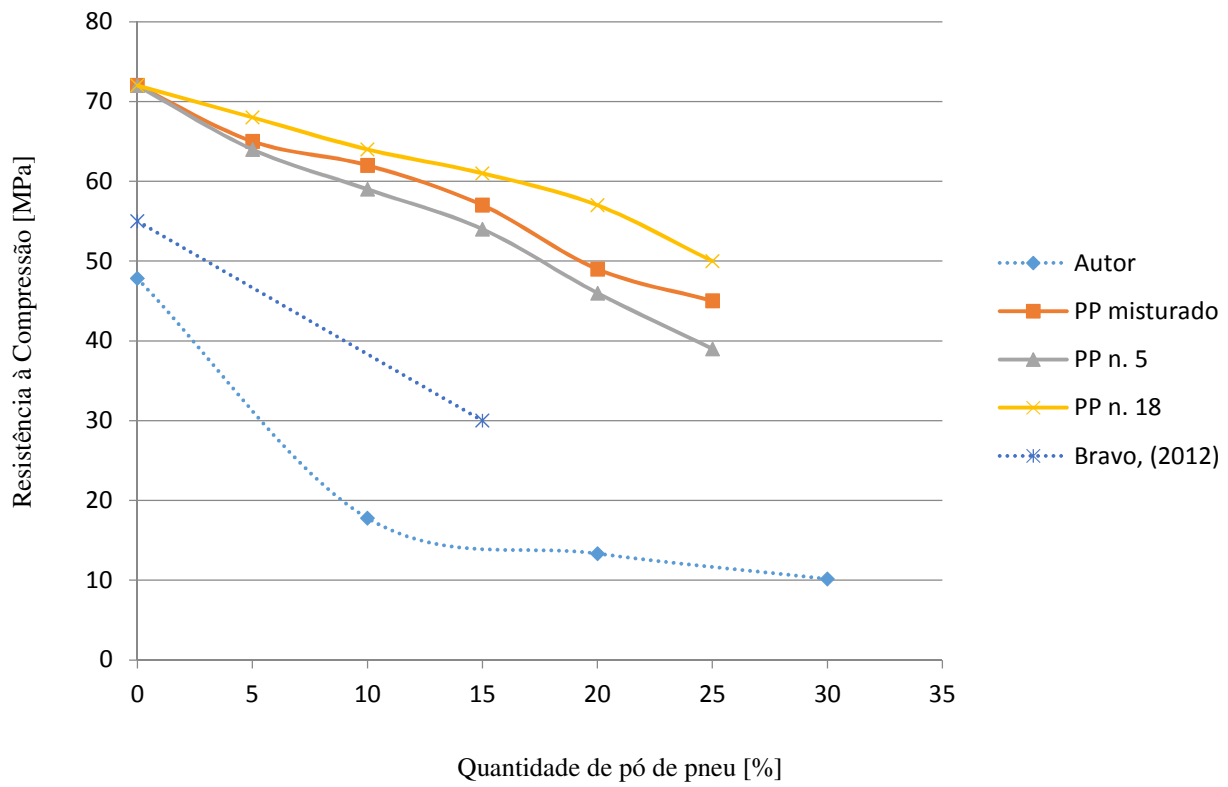


A Figura 27 apresenta os resultados de resistência a compressão obtidos e para efeito de comparação com os obtidos por Hilal (2017) com adição de pós de borracha com dois tamanhos de grãos de e também a mistura deles. Para o caso de Hilal (2017) como se trata de um CAA sem a borracha, foi atingido aproximadamente 70 MPa de resistência à compressão (90 dias) e com 25% de componente de borracha houve uma queda na resistência de 40% em média (HILAL, 2017).

Bravo (2012) também mostrou que a resistência caiu com a substituição de agregados por pó de pneu em concretos convencionais. A queda foi em torno de 45% na resistência com acréscimo de aproximadamente 15% de borracha, tendo como valor de 55 MPa o concreto sem o resíduo.

Figura 27 – Resultado de resistência à compressão de CAA variando o tamanho de grãos.

Fonte – Autor.



A adição de pó de pneu em concretos convencionais e auto-adensáveis reduzem a resistência à compressão, porém, para um ambiente de baixa agressividade a norma NBR NM 6118/2014 (ABNT, 2014) estipula como valor mínimo de resistência à compressão do concreto armado ou estrutural é 20 MPa. Assim, para as condições utilizadas neste trabalho, e interpolando os valores da curva produzida com dados obtidos nos ensaios (Figura 26), o valor de resistência mínima é alcançado com aproximadamente 9% de substituição de pó de pneu.

6.6 – Custos dos traços

Os custos são de grande importância em qualquer processo produtivo, em especial na construção civil. Foi feita uma análise dos custos dos principais componentes dos traços a fim de verificar o impacto financeiro em cada dosagem. Considerando os custos médios desses produtos na região para o mês de junho de 2018, tem-se a Tabela 22. Nesta mesma tabela também estão as dosagens de todos os traços ensaiados.

Tabela 22 – Análise financeira dos custos dos traços.

Fonte - Autor

| Produto | Preço [R\$/kg] | Dosagem [kg/m ³] | | | |
|----------------------------------|----------------|------------------------------|--------|--------|--------|
| | | Controle | 10% PP | 20% PP | 30% PP |
| Cimento | 0,34 | 469 | 469 | 469 | 469 |
| Brita 0 | 0,06 | 508 | 508 | 508 | 508 |
| Pó de Pneu | 0 | 0 | 47 | 93 | 139 |
| Areia | 0,04 | 703 | 702 | 702 | 701 |
| Aditivo | 8,71 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Areia Alterada | 0,04 | 301 | 201 | 100 | 0 |
| Total [R\$/m³] | | 282 | 278 | 274 | 270 |

Nos resultados da Tabela 22, observa-se que o cimento é o componente de maior peso no custo, seguido do aditivo e depois areia e brita respectivamente. A relação água/cimento de 0,54 é relativamente alta e produziu um traço de controle com resistência média de 48 MPa, mais que o dobro do mínimo exigido pela NBR NM 6118/2014 (ABNT, 2014). Dessa forma, uma relação mais pobre de cimento poderia deixar a mistura com um custo menor em detrimento da resistência mecânica, porém, ainda atendendo a norma.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final do trabalho, ficou evidenciado que a adição de pó de pneu no concreto diminui bastante a sua resistência à compressão conforme visto na literatura. A adição da borracha deixa a pasta menos resistente já que a ligação entre as partículas de borracha e os agregados é menor do que se fossem elementos naturais e também a resistência de um material é proporcional à resistência dos seus elementos (GANJIAN et al., 2009).

A trabalhabilidade do traço de concreto ficou reduzida proporcionalmente à quantidade de pó de pneu adicionado. A absorção de água por parte da borracha reduz a água disponível na mistura dificultando sua fluidez e assim distanciando ainda mais da condição de CAA.

Segundo Silva (2000), o concreto com resistência à compressão maior que a resistência dos CCVs, é considerado CAD, assim, o traço de controle ficou na faixa de resistência à compressão de CAD já que alcançou aproximadamente 48 MPa, porém, segundo Aïtcin (2011), o CAD possui um fator a/c bem menor que os concretos convencionais e o fator a/c do traço do experimento é 0,54, bem maior do que um CAD que está na faixa de 0,40 a 0,30. Isso ocorreu por que o visava-se formular um traço com boa resistência e baixo custo. De forma que, quando fossem inserido os percentuais de pó de pneu a queda de resistência mecânica esperada não o deixasse com valores menores que o mínimo esperado pela norma NBR NM 6118/2014 (ABNT, 2014).

Vale ressaltar que para a utilização de concretos para trabalhos que exigem menor resistência à compressão como em calçadas, revestimentos de estruturas, isolamento acústico, pode-se adicionar uma quantidade maior de pó de pneu por metro cúbico.

Em relação à parte financeira do estudo, verificou-se que a diferença entre os custos dos principais produtos do traço com maior concentração de pó de pneu e o traço de controle é de apenas 1% aproximadamente. Valor pequeno para um experimento pequeno, mas em grandes volumes isso se torna significativo.

A ausência de finos na mistura fez grande diferença no resultado da caracterização do concreto para CAA. A intenção de simplificar e reduzir o custo do traço eliminando os componentes finos prejudicou a caracterização do concreto como CAA. Também como sugestão para um próximo trabalho, a inclusão de componentes finos e também outro componente graúdo para aumentar sua a proporção na mistura.

Em trabalhos posteriores, seguindo essa linha de investigação, é sugerido o estudo da faixa de 0% a 10% de pó de pneu para se verificar se a extrapolação foi próxima da realidade ou não. Como o cimento tem importante peso na formulação do custo da mistura, vale ressaltar também que uma diminuição da relação água / cimento pode ter um impacto positivo no custo final, porém, uma redução na resistência à compressão é esperada. Outras sugestões seriam averiguar qual seria a melhor dosagem visando o custo mínimo, utilizando a maior quantidade de resíduo, mantendo as características de CAA e a resistência à compressão normalizada, averiguar o quanto o pó de pneu absorve de água e corrigir esse componente no traço é uma sugestão viável. Esse efeito de absorção ocorre devido à porosidade do pó de pneu e pode ser medido em ensaios. Por fim, um estudo mais aprofundado do superplastificante utilizado a fim de se obter uma melhor eficiência com uma quantidade otimizada, podendo até mesmo substituí-lo por outro produto do mercado que promova melhores características.

Nota-se que o custo do superplastificante no traço tem um peso grande, assim, é sugerido que se analise também o custo e efeitos de outros aditivos do mercado.

8 CONCLUSÕES

Utilizando o modelo matemático baseado em ANDREASSEN & ANDERSEN (1930), foi possível produzir um concreto com resistência à compressão em torno de 50 MPa, valor bem acima do mínimo da Norma NBR NM 6118/2014 que requer 20 MPa para concretos estruturais e também ficou acima da faixa de resistência para concretos convencionais que é de 20 a 40 MPa e alcançando a faixa de resistência à compressão de Concretos de Alto Desempenho.

Quanto as características do CAA, fluidez e homogeneidade, o concreto de controle não atingiu os parâmetros mínimos segundo Tutikian et al. (2008) e Gomes e Barros (2009).

A adição do pó de pneu reduziu a resistência à compressão para todas as concentrações testadas. Para atingir os 20 MPa exigidos para concretos estruturais, o máximo de adição de pó de pneu no concreto seria 9% em volume obtido por extrapolação.

9 REFERÊNCIAS

AICTIN, P. C. *High Performance concrete (Hpc)*. In 36th Conference on Our World in Concrete & Structures Singapore, August 14-16, 2011.

ALBANO, C., CAMACHO, N., REYES, J., FELIU, J.L., HERNÁNDEZ, M., *Influence of scrap rubber to Portland I concrete composites: destructive and non-destructive testing*. Composites Structures. v 71, p 439-446, 2005.

ALENCAR, R. S. A. *Dosagem do concreto autoadensável: produção de pré-fabricados*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008

ANDREASSEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. *Kolloid Z. Ind. Eng. Chem* . v. 50, 1930, p. 217-228, 1930.

ANIP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. *Produção e Vendas 2016*. Disponível em:< <http://www.anip.com.br/arquivos/producao-vendas.pdf>>. Acesso em: 10/06/2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. ABCP: *Pesquisa Inédita e Exclusiva Revela Cenário do Mercado Brasileiro de Concreto*, Disponível em <www.abcp.org.br>. Acesso em: 10/06/2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____.NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____.NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____.NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 11768: Aditivos para Concreto de Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 12655 Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 6118: Concreto – Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 15823-1: Concreto autoadensável: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 15823-2: Concreto autoadensável. Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 15823-4: Concreto autoadensável. Determinação da habilidade passante - Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 15823-5: Concreto autoadensável. Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação, Rio de Janeiro, 2009.

AZEVEDO, F., PACHECO-TORGAL, F. JESUS, C., BARROSO, J.L.A., CANÕES, A.F. *Properties and durability of HPC with tire rubber wastes*. Construction and Building Materials. v 34, p 186-191, 2012.

BORJA, E.V. *Efeito da adição da argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

BRAVO, M., BRITO, J. *Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance*. Journal of Cleaner Production. v 25, p 42-50, 2012.

CAVALCANTI, D. J. H. *Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Alagoas – UFAL. Maceió, 2006.

CHUNLIN, L. KUNPENG, Z. DEPEND, C. *Possibility of concrete prepared with steel slag as fine and coarse aggregate: a preliminary study*. Procedia Engineering. v 24, p 412-416, 2011.

DINGER, D. R.; FUNK, J. E. *Particle packing Part I – Fundamentals of particle packing monodisperse spheres*. Interceram, v. 41, n. 1, p. 10-14, 1992.

DINGER, D. R.; FUNK, J. E. *Particle packing IV – Computer Modelling of particle packing phenomena*. Interceram, v. 42, n. 3, p. 150-152, 1993.

DOMONE, P.L. *Self-compacting concrete: an analyses of 11 years of cases studies*. In: Cement & Concrete Composites, nº 28, p. 197-208, 2006.

EFNARC. *The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete - Specification, Production and Use. p. 63, 2005.

FHWA, U.S. Federal Highway Administration. *Ultra-High Performance Concrete*. Disponível em <https://highways.dot.gov/bridges-and-structure/ultra-high-performance-concrete/ultra-high-performance-concrete>. Acesso em: 6 de outubro de 2018.

FREEDONIA GROUP BLOG. Disponível em:< <https://www.freedoniagroup.com/>>. Acesso em: 18/05/2018.

FURNAS, C. C. *Grading Aggregates*: I. Ind. Eng. Chem , v. 23, p. 1052-1058, 1931.

GANJIAN, E., KHORAMI, M., MAGHSOUDI A. A. *Scrap-type-rubber replacement for aggregate and filler in concrete*. Construction and Building Materials. v 23, p 1828-1836, 2009.

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.

GESOGLU, M.; GUNEYISI, E. *Permeability properties of self-compacting rubberized concretes*. Construction and Building Materials, v. 25, n. 8, p. 3319–3326, 2011.

GJORV, O.E. *High-strength concrete. Advances in Concrete Technology, Athens. Proceedings*. Montreal: CANMET, p 21-77, 1992.

GOMES, J. F., MAESTRO, M. B. *Guia práctica para la utilización del hormigón autocompactante*. Instituto Espanol del cemento y sus aplicaciones. Madrid, 2005.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. *Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável*. 1^a ed. São Paulo: Pini, 2009.

GUO, Y., ZHANG, J., CHEN G., XIE, Z. *Compressive behavior of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fiber, subjected to elevated temperatures*. Journal of Cleaner Production. v 72, p 193-203, 2014.

GÜNEYISI, E. *Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash*. Material and Structure. v 43, p 1037-1048, 2010.

HARTMANN, C. T. *Avaliação de aditivos superplastificantes base poliearboxilatos destinados a concretos de cimento Portland*. São Paulo, 2002. 234p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HILAL, N. N. *Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content*. International Journal of Sustainable Built Environment. v 6, p 191-206, 2017.

KANADASAN, J., RAZAK, H. A. *Mix design for self-compacting palm oil clincker concrete based on particle packing*. Materials and Design. v 56, p 9-19, 2014.

LIJUAN, L. SHENGHUA, R, LAN, Z. *Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles*. Construction and Building Materials. v 70, p 291-308, 2014.

- MARTINS, M. A. B. *Estudo da viabilidade do uso da areia retida no sistema de exaustão de uma indústria de autopeças* – Em concreto convencional. Dissertação de Mestrado Profissional. Universidade Federal de Itajubá. MG, 2016.
- MATHEW, T. V. *Dry Mix Design*. – Transportation System Engineering. Indian Institute of Technology Bombay, India, Chapter 16, 2017
- MEYER, C. *The greening of the concrete industry*. Cement & Concrete Composites. v 31, p 601-605, 2009.
- MOHAMMADI, I., KHABBAZ, H., VESSALAS, K. *In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements*. Construction and Building Materials. v 71, p 456-471, 2014.
- NACIF, G.L., PAZERA, T.H., STRECKER, K., CHRISTOFORO, A.L., PAINE, K. *Investigations on cementitious composites based on rubber particle waste additions*. Materials Research. v 16, p 259-268, 2013.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. *Self-compacting concrete. Development, present use and future*. Kochi University of Technology, p. 1–14, 1999.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. *Self-Compacting Concrete*. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003.
- OLIVEIRA, O. C., MACIEL, G. F., CASTRO, A. L., BARBOSA, M. P., CAMPOS, R. S. *Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho*. Revista Matéria. v 23, n 1, 2018.
- PEDROSO, Fábio Luís. *Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem*. Concreto e construções, v. 53, p. 14-19, 2009.
- PELISSER, F., ZAVARISE, N. LONGO, T.A., BERNARDIN, A.M. *Concrete made with recycled tire rubber: effect of alkaline activation and silica fume addition*. Journal of Cleaner Production. v 19, p 757-763, 2011.
- PEREIRA, C., *Tipos de concretos utilizados na construção civil*. Escola Engenharia, 2016. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-concreto/>. Acesso em: 6 de outubro de 2018.
- 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.
- 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.
- RASHAD, M. A. *A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials*. International Journal of Sustainable Built Environment. v 5, p 46-82, 2016.

RESOLUÇÃO CONAMA 416, de 30 de setembro de 2009. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em: 17/05/2018.

SIENKIEWICZ, M., JANIK, H., BORZEDOWSKA-LABUDA, K., KUCINSKA-LIPKA, J. ***Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tires: A review.*** Journal of Cleaner Production. v 147, p 560-571, 2017.

SILVA, A. ***O que é resíduo industrial e quais são suas classificações?*** Disponível em: <<http://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/o-que-e-residuo-industrial-e-quais-sao-suas-classificacoes>> acesso em: 18/05/2018

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos 279 p. 2000.

SKRIPKIŪNAS, G., GRINYS, A., CERNIUS, B. ***Deformation properties of concrete with rubber waste additives.*** Materials Science. v 13, p 219-223, 2007.

SOFI, A. ***Sustainable Concrete with Waste Tire Rubber – An Overview.*** J. Chem. Pharmaceut. Sci. v. 9, p. 848-53, 2016

SU, H., YANG, J., LING, T.C., GHATAORA, G.S., DIRAR, S. ***Properties of concrete prepared with waste tire rubber particles of uniform and varying sizes.*** Journal of Cleaner Production. v 91, p 288-296, 2014.

SU, N.; HSU, K.C.; CHAI, H.W. ***A simple mix design method for self-compacting concrete.*** In: Cement and Concrete Research, n. 31, p. 1799-1807, 2001.

THOMAS, B. S., GUPTA, R. C. ***A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete.*** Renewable and Sustainable Energy Reviews. v 54, p 1323-1333, 2016.

TSA, Tyre Stewardship Australia. Tyre Product Stewardship Scheme. Disponível em <www.tyrestewardship.org.au/about-tsa/tyre-productstewardship-scheme>. Acesso em 21/07/2018.

TUTIKIAN, B. F. ***Método para dosagem de concretos auto adensáveis.*** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. ***Concreto Autoadensável.*** 2ª Edição ed. São Paulo: Editora Pini, 2015.

TUTIKIAN, B. F., PACHECO, M. ***Concreto autoadensável (CAA) – comparativo entre métodos de dosagem.*** IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JOURNAL, v 5, N 4, p 500-529, 2012.

TUTIKIAN, B. F., HELENE, P. ***Concretos de Cimento Portland.*** In: ISAIA, G. C., ed. Concreto: Ciência e Tecnologia. 1. ed. São Paulo, IBRACON, v. 1, cap. 12, p. 415-51. 2011.

USINAMIX – *Concreto e Serviços em São Paulo*. Disponível em <http://www.usinamixconcreto.com.br/tipos-de-concreto-para-cada-obra/>. Acesso em: 6 de outubro de 2018.

VANDERLEI, R. D. *Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VANDERLEI, R. D.; GIONGO, J. S. *Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas*. Cadernos de Engenharia de Estruturas Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, v8, n. 33, p. 115-148, 2006.

YOUSSEF, O., ELGAWADY, M. A., MILLS J. E., MA, X. *An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fiber reinforced polymer tubes*. Construction and Building Materials. v 53, p 522-522, 2014.