

FUNDAÇÃO CENTRO UNIVERSITÁRIO DA ZONA OESTE
MESTRADO PROFISSIONAL EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**ESTUDO COMPARATIVO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE
BORRACHA DE PNEU INSERVÍVEL**

Maurício Lamego Pinho

Rio de Janeiro
2017

FUNDAÇÃO CENTRO UNIVERSITÁRIO DA ZONA OESTE
METRADO PROFISSIONAL EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**ESTUDO COMPARATIVO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE
BORRACHA DE PNEU INSERVÍVEL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais do Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO.

Área de concentração: Desenvolvimento e caracterização de materiais não-metálicos.

Orientado: Maurício Lamego Pinho
Orientador: Prof. Florêncio Gomes de Ramos Filho

Rio de Janeiro
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

003 PINHO, Maurício Lamego.

Estudo comparativo do concreto com adição de borracha de pneu inservível / Maurício Lamego Pinho – 2017. 79f.

Orientador: Florêncio Gomes de Ramos Filho.

Dissertação (Mestrado) – Fundação Centro Universitário da Zona Oeste - UEZO, Rio de Janeiro/RJ.

XXX 000.000

FOLHA DE APROVAÇÃO

Maurício Lamego Pinho

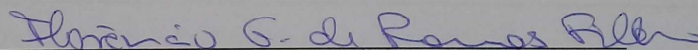
**ESTUDO COMPARATIVO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE
BORRACHA DE PNEU INSERVÍVEL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais do Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO.

Área de concentração: Desenvolvimento e caracterização de materiais não-metálicos.

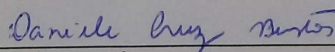
Aprovado em: 08 de novembro de 2017

Banca Examinadora:



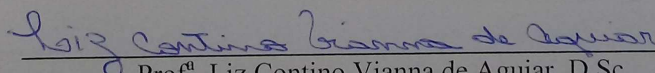
Prof. Florêncio Gomes de Ramos Filho, D.Sc.

Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste - UEZO



Prof.^a. Daniele Cruz Bastos, D.Sc.

Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste - UEZO



Prof.^a. Liz Contino Vianna de Aguiar, D.Sc.

Universidade Federal Fluminense - UFF

Dedico este trabalho aos meus familiares, especialmente à minha esposa

Patrícia dos Santos Matta e filhas Ana Beatriz e Maria Alice.

AGRADECIMENTOS

Finalizando mais uma etapa da vida, gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos e profunda admiração a diversas pessoas:

Primeiramente aos meus Pais, Sonildes Lamego Vieira Pinho e José Emmanoel de Souza Pinho, que me acolheram em suas vidas com muito amor, dedicação e carinho, e proporcionaram todos os meios necessários para que eu pudesse seguir meus caminhos com conhecimento, ética e responsabilidade.

À minha esposa, Patrícia dos Santos Matta, que esteve ao meu lado sempre me apoiando sem nunca medindo esforços para me ajudar e sempre me dizendo que Deus em sua grandeza não escolhe os capacitados, mas capacita os escolhidos.

Enfim, a todos vocês sou grato pela compreensão, que por diversas vezes abriram mão do direito de momentos tão aprazíveis destinados ao convívio familiar, para não comprometer o andamento deste trabalho.

Aos amigos Felipe Augusto Melo de Oliveira, Carlos Alberto Soares Cunha e Régis Lopes de Azevedo do Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI, pelo apoio, incentivo e amizade.

Ao orientador Professor Doutor Florêncio Gomes de Ramos Filho do corpo docente da Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – pelo incentivo e orientação técnica segura, paciência e compreensão, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – ANIP localizada em São Paulo pelo fornecimento das amostras de resíduos triturados de borracha de pneu e por todas as informações prestadas.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente auxiliaram no desenvolvimento e conclusão deste trabalho, o meu profundo agradecimento.

RESUMO

PINHO, Maurício Lamego. **Estudo comparativo do concreto com adição de borracha de pneu inservível**. 2017. Dissertação (Mestrado Profissional). Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais – Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO.

Em países desenvolvidos, o aproveitamento de resíduos na composição de novos materiais é uma tendência que vem crescendo em todos os ramos de atividade. O concreto sustentável produzido à base de borracha triturada de pneu inservível, em substituição a parte do agregado na sua formulação, já é uma realidade e garante destinação ecologicamente correta a este passivo ambiental que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública. O reaproveitamento deste resíduo de pneu tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores, pois se justifica como alternativa atraente para a gestão da geração de resíduos sólidos, bem como na racionalização do uso de recursos naturais, questões de grande impacto da sociedade moderna. O estudo foi elaborado a partir da revisão sistemática sobre a matéria. As pesquisas apontam que quanto maior o teor de borracha incorporado ao concreto, maior é a redução das propriedades mecânicas mais requeridas pelo material: resistência à compressão e resistência à tração na flexão, dessa forma, não podendo ser aplicado como estrutural. No entanto, outros pesquisadores concluíram, com base nos resultados dos experimentos, que essa modificação das propriedades do concreto com borracha pode ser benéfica para certas aplicações, que requerem características específicas, como por exemplo, maior capacidade de deformação e comportamento à fratura menos frágil do que o concreto convencional. Tais características podem ser interessantes para a redução do risco de trincas e fissuras, bem como na absorção de impacto e aderência, quando aplicados em pisos. Neste contexto, compilar as informações das pesquisas, através de uma revisão sistemática apresentando os materiais utilizados, as metodologias empregadas e os resultados obtidos pelos experimentos, contribui para a produção de documento técnico-científico que norteará o avanço nas pesquisas, bem como na viabilidade de incorporação de outros materiais alternativos às matrizes de concreto.

Palavras-chave: Materiais – Concreto – Borracha - Sustentabilidade

ABSTRACT

PINHO, Maurício Lamego. **Comparative study of concrete with addition of waste tire rubber**. 2017. Dissertation (Master). Graduate Program in Materials Science and Technology – State University Center Foundation of the West Zone – UEZO.

In developed countries, the use of waste in the composition of new materials is a trend that has been growing in all branches of activity. The sustainable concrete produced from crushed rubber of unserviceable tire, replacing the part of aggregate in its formulation, is already a reality and guarantee ecologically correct destination to this environmental liability that results in serious risk to the environment and public health. The reuse of this tire residue has been the object of study by several researchers, as it is justified as an attractive alternative for a solid waste generation management, as well as the rationalization of the use of natural resources, issues of great impact of modern society. The study was elaborated from the systematic review on the subject. As research always points out, the greater is a reduction of the mechanical properties more demanding by the material: compressive strength and tensile strength in flexion, this form, is not being put as structural. However, other researchers have concluded, based on the results of the experiments, that this modification of the good of concrete with rubber can be beneficial for certain applications, which require specific characteristics, such as greater processing capacity and fracture behavior less fragile than conventional concrete. Such features may be of interest for reducing the risk of cracks and cracks, as well as impact and adhesion absorption when applied to floors. In this context, to compile as research information, through a systematic review presenting the materials used, as methodologies used and the results obtained by experiments, contributions to the production of a technical-scientific document that will guide the research progress, as well as the feasibility of incorporation of alternative materials to concrete dies.

Keywords: Materials - Concrete - Rubber - Sustainability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Prioridades a considerar no projeto de uma construção sustentável (TORGAL, 2010).	17
Figura 2 – Pneus inservíveis dispostos no ambiente (DESTINO CERTO, 2000).	18
Figura 3 – Composição média de um pneu radial para automóveis (KAMIMURA, 2012).	21
Figura 4 – Estrutura do pneumático (INDÚSTRIHOJE, 2016).	22
Figura 5 – Dados da produção de pneus no Brasil (ANIP, 2017).	23
Figura 6 – Galpão da Prefeitura de Belo Horizonte/MG onde são armazenados os pneus inservíveis (REVISTA PNEUS & CIA, N°40).	24
Figura 7 – Evolução dos pontos de coleta de pneus inservíveis no Brasil (ANIP, 2017).	25
Figura 8 – Volume de pneus inservíveis coletados e destinados pela Reciclanip (ANIP, 2017).	25
Figura 9 – Alocação dos pneus inservíveis por forma de destinação (ANIP, 2017).	26
Figura 10 – Resíduo de borracha de pneu na forma de fibras (KHALOO <i>et al</i> , 2008).	28
Figura 11 – Ciclo de moagem e separação da borracha de pneu (GRANZOTTO, 2010).	28
Figura 12 – Elementos constituintes do concreto (PORTAL DO CONCRETO, 2016).	29
Figura 11 – Representação esquemática da estrutura do concreto (METHA e MONTEIRO, 2008).	31
Figura 14 – Procedimento para realização do <i>Slump Test</i> (NBR NM 67, 1998).	39
Figura 15 – Exemplo de vibrador de imersão elétrico.	42
Figura 16 – Corpos-de-prova cilíndricos moldados segundo a ABNT NBR 5739:2015 (MAGALHÃES, 2009).	42
Figura 17 – Exemplo de tanque de cura de corpos-de-prova com controlador automático de temperatura (MAGALHÃES, 2009).	43
Figura 18 – Esquema de utilização de discos de neoprene para rompimento à compressão de corpo-de-prova (METHA e MONTEIRO, 2008).	43
Figura 19 – Tipos de ruptura dos corpos-de-prova (ANBT NBR 5739:2007).	45
Figura 20 – Rompimento à tração sob flexão de CP prismático (a) e detalhe do plano de fratura no concreto (b) (MAGALHÃES, 2009).	47
Figura 21 – Gráfico força-deformação para o concreto de referência (SANTOS, 2005).	50
Figura 22 – Gráfico força-deformação para o CAB (SANTOS, 2005).	50
Figura 23 – Gráfico de flexão-deformação para o concreto de referência (SANTOS, 2005).	51
Figura 24 – Gráfico de flexão-deformação para o CAB (SANTOS, 2005).	51

Figura 25 – Gráfico de resistência à tração por compressão diametral (FREITAS, 2007).	53
Figura 26 – Gráfico de resistência à tração na flexão (FREITAS, 2007).	53
Figura 27 – Micrografias por MEV das superfícies de CP's rompidos (FREITAS, 2007).	54
Figura 28 – Relação entre resistência à compressão, teor de borracha e relação água/cimento (GIACOBBE, 2008).	55
Figura 29 – Relação entre resistência à tração e teor de borracha (GIACOBBE, 2008).	56
Figura 30 – Relação entre resistência à compressão e resistência à tração (GIACOBBE, 2008).	56
Figura 31 – Resistência à compressão relativa das diversas dosagens de CAB em relação à referência (ALBUQUERQUE, 2009).	58
Figura 32 – Resistência à tração por compressão diametral das diversas dosagens de CAB em relação à referência (ALBUQUERQUE, 2009).	58
Figura 33 – Módulo de elasticidade das diversas dosagens de CAB em relação à referência (ALBUQUERQUE, 2009).	59
Figura 34 – Massa específica relativa das diversas dosagens de CAB em relação à referência (ALBUQUERQUE, 2009).	59
Figura 35 – Resistência à compressão C20 com substituição de areia natural (GRANZOTTO, 2010).	60
Figura 36 – Resistência à compressão C25 com substituição de areia natural (GRANZOTTO, 2010).	61
Figura 37 – Evolução da resistência à tração C20 com substituição de areias (GRANZOTTO, 2010).	62
Figura 38 – Evolução da resistência à tração C25 com substituição de areias (GRANZOTTO, 2010).	62
Figura 39 – Resistência à compressão do concreto borracha auto-compactante (YUNG <i>et al.</i> , 2013).	63
Figura 40 – Resultado do ensaio de resistência à compressão (SILVA <i>et al.</i> 2015).	64
Figura 41 – Resultado do ensaio de resistência à flexão (SILVA <i>et al.</i> 2015).	65
Figura 42 – Imagem de MEV do concreto com adição de borracha (SILVA <i>et al.</i> 2015).	65
Figura 43 – Imagem de MEV de concreto com adição de 10% de borracha.	66
Figura 44 – Imagem de MEV de concreto com adição de 30% de borracha – A zona de transição entre borracha e pasta de cimento (SILVA <i>et al.</i> 2015).	66
Figura 45 – Microestrutura de imagem de concreto com 50% de borracha analisada por MEV (SILVA <i>et al.</i> 2015).	67

Figura 46 – Fibra de borracha totalmente envolvida por pasta de cimento examinada por MEV (SILVA <i>et al.</i> 2015).	67
Figura 47 – Resistência à compressão do concreto modificado com borracha (GIRSKAS e NAGROCKIENE, 2017).	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Os Sete Princípios da Construção Sustentável (TORGAL, 2010).	17
Tabela 2 - Características importantes e aplicações típicas dos elastômeros NR e SBR (CALISTER, 2002).	21
Tabela 3 – Teores dos componentes do cimento Portland composto (NBR 11578, 1991).	33
Tabela 4 – Exigências químicas (NBR 11578, 1991).	34
Tabela 5 – Exigências físicas e mecânicas (NBR 11578, 1991).	34
Tabela 6 – Exigências físicas e mecânicas - facultativas (NBR 11578, 1991).	34
Tabela 7 – Classe de resistência do cimento Portland composto (NBR 11578, 1991).	35
Tabela 8 – Caracterizações realizadas na areia natural (ABNT - Adaptado pelo autor) (continua).	36
Tabela 9 – Caracterizações realizadas no agregado graúdo (ABNT - Adaptado pelo autor). .	37
Tabela 10 – Resultados dos ensaios utilizados na análise com diferentes percentuais (SANTOS, 2005).	49
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial (FREITAS, 2007).	52
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial (FREITAS, 2007).	52
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à flexão (SILVEIRA <i>et al</i> , 2016).	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos.

ASTM – *American Society for Testing and Materials.*

CAB – Concreto com Adição de Borracha.

CIB – Conselho Internacional da Construção.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

CP – Corpo-de-prova.

CR – Concreto Referência.

E – Módulo de Elasticidade.

MR – Módulo de Referência.

NBR – Norma Brasileira Registrada.

RBP – Resíduo de Borracha de Pneu.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Objetivo Geral	14
1.2. Objetivos Específicos	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Construção sustentável	16
2.2 Resíduos Sólidos	18
2.3. Pneu	19
2.3.1. Borracha	19
2.3.2. Composição dos Pneus.....	22
2.3.3. Pneus Inservíveis.....	23
2.3.4. Legislação	26
2.3.5. Resíduo de borracha de pneu - RBP	27
2.4. Tecnologia do concreto	29
2.4.1. Tipos de Concreto	31
2.4.2. Cimento	32
2.4.3. Água de amassamento.....	35
2.4.4. Agregados miúdo e graúdo	36
2.4.5. Aditivos	37
2.4.6. Propriedades do concreto no estado fresco	38
2.4.6.1. <i>Trabalhabilidade – “Slump Test”</i>	39
2.4.6.2. <i>Massa unitária</i>	40
2.4.7. Propriedades do concreto no estado endurecido	40
2.4.7.1. <i>Massa específica</i>	40
2.4.7.2. <i>Ensaio de resistência à compressão</i>	41
2.4.7.3. <i>Ensaio de Resistência à Tração</i>	45
2.5. Concreto com adição de borracha – Resultados obtidos pelos pesquisadores	48
2.6. Alternativas de incorporação à matriz de concreto	70
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma disposição ao crescimento e desenvolvimento tecnológico respeitando-se os conceitos de desenvolvimento sustentável. A busca por materiais tradicionais alternativos, em todos os setores comerciais, colabora para melhoria contínua no desenvolvimento de pesquisas relacionadas à utilização racional de recursos naturais e aproveitamento de resíduos inseridos na natureza (TORGAL, 2010).

O concreto produzido com cimento Portland é o material mais consumido no mundo, perdendo apenas para a água. Considerando que, para a maioria das aplicações oferece propriedades adequadas a um baixo custo, o futuro do concreto parece ser ainda mais promissor (METHA e MONTEIRO, 2008).

Embora seu uso seja completamente disseminado, o concreto traz implicações ambientais. As críticas ambientais se justificam, afinal, o concreto leva cimento e durante sua produção, por exemplo, são gerados cerca de 5% das emissões mundiais de CO₂, além de consumir recursos naturais. Alternativas para redução dos impactos ambientais, diretos e indiretos, já fazem parte de pesquisas científicas (REVISTA CONCRETO & CONSTRUÇÕES, 2009).

O concreto produzido à base de borracha triturada de pneu inservível, em substituição à parte do agregado natural na sua formulação, já é uma realidade e garante destinação ecologicamente correta a este passivo ambiental que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública (CONAMA, 2009).

Assim, o pneu que seria descartável no meio ambiente entra na produção de concreto, contribuindo na gestão de resíduos sólidos, bem como na racionalização do uso de recursos naturais, questões de grande impacto da sociedade moderna.

1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo principal a realização de uma pesquisa descritiva

através da revisão bibliográfica sobre o estudo comparativo entre o concreto convencional ou módulo de referência (MR) e o concreto com adição de borracha triturada de pneu inservível (CAB), de modo a agregar evidências de pesquisa para nortear o avanço tecnológico no desenvolvimento de materiais sustentáveis empregados na construção civil.

1.2. Objetivos Específicos

Especificamente, pretende-se responder os seguintes questionamentos:

- a) O concreto com incorporação de borracha triturada de pneus inservíveis na sua formulação atende aos requisitos normativos legais para construção civil?
- b) Como se comportaram os concretos com incorporação de borracha triturada de pneus inservíveis frente às características/propriedades mecânicas?
- c) Que outros materiais alternativos, também, estão sendo incorporados nas matrizes de concretos que contribuam para um meio ambiente mais sustentável?

Considera-se finalmente que, revisões sistemáticas são recursos importantes ante o crescimento acelerado da informação científica e que esse estudo ajudará a sintetizar a evidência disponível na literatura sobre uma intervenção, podendo auxiliar profissionais e pesquisadores no seu cotidiano de trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Construção sustentável

As civilizações e as engenharias evoluíram com o passar do tempo e ainda continuam a fazê-lo, ou seja, vivemos em um mundo em incessante evolução, e os materiais não são exceções (CALISTER JR, 1993).

O concreto é o material mais largamente utilizado em construção, normalmente feito com a mistura de cimento Portland (que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulico) com areia, pedra e água. Os silicatos de cálcio hidratados, formados pela hidratação do cimento Portland, são os principais responsáveis por sua característica adesiva e são estáveis em meios aquosos. O homem não consome nenhum outro material em tal quantidade, a não ser água (METHA e MONTEIRO, 2008).

Reconhecidamente, a indústria da construção civil é um dos maiores e mais ativos setores mundiais. Em termos ambientais, é responsável por 30% das emissões de carbono, sendo que o parque edificado consome 42% da energia produzida. Além disso, a indústria da construção civil consome mais matérias-primas (aproximadamente 3.000 Mt/ano, quase 50% em massa) que qualquer outra atividade econômica, o que evidencia um setor claramente insustentável (TORGAL, 2010).

O paradigma da construção sustentável surge na busca de eliminar ou minimizar os impactos ambientais provocados pela construção. Segundo Torgal (2010), em 1994, o Conselho Internacional da Construção – CIB definiu o conceito de construção sustentável como:

“a criação e manutenção responsável de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e no projeto baseado em princípios ecológicos”.

Na Tabela 1, Torgal (2010) representa os sete princípios para a construção sustentável, segundo o Conselho Internacional da Construção – CIB, em 1994. Já na Figura 1, o mesmo

autor elenca as prioridades que devem estar presentes durante a fase de projeto de uma construção sustentável.

Tabela 1 - Os Sete Princípios da Construção Sustentável (TORGAL, 2010).

1	Redução do consumo de recursos.
2	Reutilização de recursos.
3	Utilização de recursos recicláveis.
4	Proteção da natureza.
5	Eliminação de tóxicos.
6	Aplicação de análises de ciclo de vida em termos econômicos.
7	Ênfase na qualidade.



Figura 1 – Prioridades a considerar no projeto de uma construção sustentável (TORGAL, 2010).

Atualmente, existe uma disposição ao crescimento respeitando-se os conceitos de sustentabilidade. A busca por materiais alternativos em todos os setores econômicos colabora para o crescimento de estudos relacionados com a utilização racional de recursos naturais e o aproveitamento de resíduos inseridos na meio ambiente (TORGAL, 2010).

2.2 Resíduos Sólidos

A questão dos resíduos é alvo de discussão e pesquisa há algumas décadas, tanto na esfera nacional como internacional, devido à expansão da consciência coletiva com relação ao meio ambiente. Dentre os vários resíduos sólidos produzidos pelo ser humano, os pneus inservíveis tornaram-se um problema de saúde pública (ANIP, 2017).

Para Giacobbe (2008), os pneus são considerados resíduos especiais e iniciaram papel de destaque nas discussões dos impactos sanitários e ambientais. Os pneus inservíveis descartados de forma inadequada contribuem para entupimentos de redes de esgoto e enchentes, poluição de rios e oceanos, além de ocuparem um enorme volume nos aterros sanitários e serem potenciais focos para a reprodução de mosquitos causadores de doenças (ANIP, 2017).

Na Figura 2 é possível constatar os impactos ambientais ocasionados pelo descarte inadequado dos pneus inservíveis.



Figura 2 – Pneus inservíveis dispostos no ambiente (DESTINO CERTO, 2000).

Para Najin e Hall (2010), evitar e proibir o armazenamento e deposição de pneus inservíveis, na grande maioria dos países, proporciona um incentivo a explorar alternativas e estratégias de reciclagem, que envolve transformá-los em agregados alternativos, e assim, gerar maior valor econômico, enquanto reduz o consumo de agregado primário de origem natural.

Neste contexto, Najin e Hall (2010) afirmam que nas últimas duas décadas, o interesse internacional em pesquisar as propriedades e uso potencial do concreto com borracha triturada

de pneus inservíveis tem crescido.

Segundo os mesmos autores, em termos de comportamento mecânico, é um tanto quanto incomum, à medida que não obedece a equações empíricas relacionando o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, ao mesmo tempo em que exige um aumento considerável da capacidade de deformação e, conseqüentemente, de ductibilidade. Todavia, afirmam que o reaproveitamento de resíduos na construção civil pode ajudar a prevenir a poluição ambiental, simultaneamente, contribuir para a concepção de edifícios mais econômicos (NAJIN e HALL, 2010).

2.3. Pneu

2.3.1. Borracha

A borracha de pneu é composta basicamente por um polímero elastomérico, que foi submetido a diversos processos termoquímicos até adquirir as características desejáveis de resistência e durabilidade requeridas para sua aplicação final (ALBUQUERQUE, 2009).

A borracha natural ou elastômero natural (NR) é o único elastômero extraído de fonte perene, a seringueira *hevea brasiliensis*, todas as demais são borrachas sintéticas obtidas a partir, em sua maioria, de derivados do petróleo. A borracha natural é a mais elástica, chegando a atingir alongamento de 900% em relação ao comprimento inicial e sua flexibilidade e resiliência são outras propriedades características (GRISON, 2010).

Segundo GRISON (2010), o elastômero de estireno-butadieno (SBR) é sintético, porém bastante parecido com a borracha natural, embora menos elástico. O SBR é a borracha mais consumida no mundo e está presente na maior parte da composição típica de pneus radiais para automóveis, além de grande quantidade de artefatos para as mais variadas aplicações.

Os polímeros elastoméricos possuem característica de, sob tensão, desenvolverem excepcional deformação e retornarem elasticamente à condição original quando a tensão é retirada (CALISTER JR., 2002).

Os materiais poliméricos são compostos por moléculas muito grandes, formadas por

cadeiras de átomos de carbono, às quais vários átomos ou radicais estão lateralmente ligados. Uma característica obrigatória para o comportamento elastomérico é que a sua estrutura molecular seja provida de ligações cruzadas (CALISTER JR., 2002).

Segundo Albuquerque (2009), o processo de formação de ligações cruzadas nos elastômeros que formam a borracha é conhecido como vulcanização, tratamento através do qual compostos de enxofre se ligam com as cadeias principais do polímero que se encontram adjacentes, formando pontes entre elas.

O módulo de elasticidade, a resistência à degradação, a resistência à abrasão e o limite de resistência à tração, são aumentados com a vulcanização. Essas propriedades são diretamente proporcionais à densidade de ligações cruzadas, que podem ser melhoradas pela adição de uma carga mineral chamada de negro de fumo. Esse negro de fumo consiste em partículas muito pequenas e essencialmente esféricas de carbono, produzidas pela combustão de gás natural ou óleo. A borracha de pneu possui de 15% a 30% em volume de negro de fumo e de 3% a 5% de enxofre (CALISTER JR., 2002).

De acordo com Kamimura (2012), a composição final da borracha de pneu tem, aproximadamente, 50% de cargas minerais. O autor ainda afirma que a borracha natural confere as propriedades elásticas, enquanto que, a sintética proporciona a estabilidade térmica do pneumático.

Na Figura 3 está representada uma composição típica, em peso, de pneus radiais para automóveis. Com base nessa figura, é possível observar que a borracha de pneu, em sua totalidade, representa aproximadamente 85% do peso, uma vez que os produtos químicos (entre eles o enxofre), o negro de fumo e os óleos são incorporados à borracha durante seu processamento (KAMIMURA, 2012).

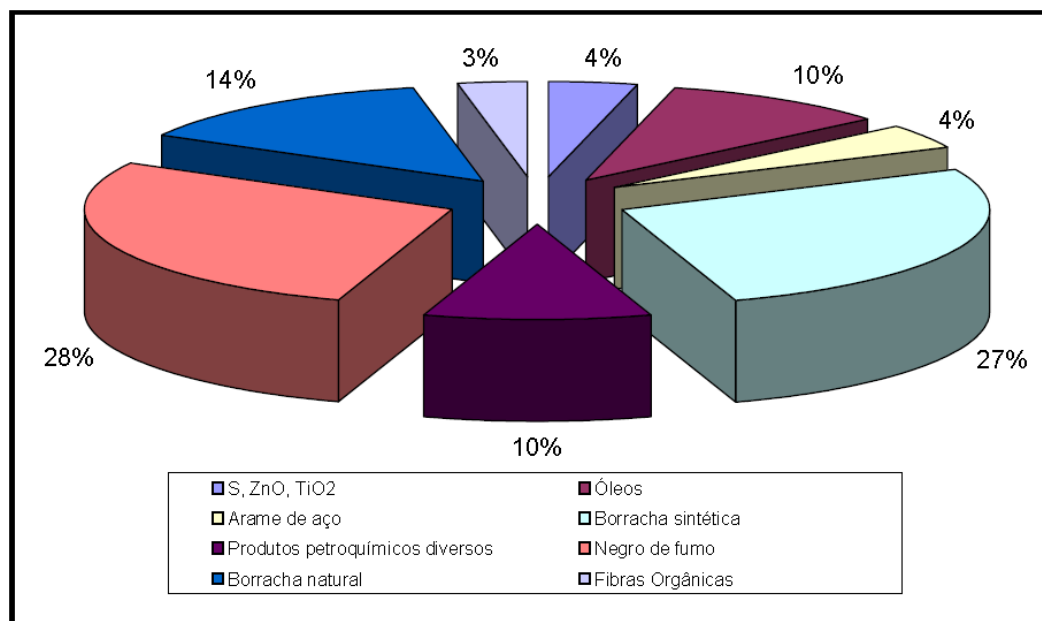


Figura 3 – Composição média de um pneu radial para automóveis (KAMIMURA, 2012).

Na Tabela 2 estão especificadas algumas características importantes das borrachas naturais (NR) e de estireno-butadieno (SBR) (CALISTER, 2002).

Tabela 2 - Características importantes e aplicações típicas dos elastômeros NR e SBR (CALISTER, 2002).

Nome Comercial	Tipo químico	Principais características de aplicação	Aplicações típicas
Borracha natural (NR)	Poli-isopreno natural	Excelentes propriedades físicas; boa resistência ao corte, ao entalho e à abrasão; baixa resistência ao calor, ao ozônio e ao óleo; boas propriedades elétricas.	Pneus e tubos; biqueiras e solas; juntas e gaxetas.
SBR	Copolímero estireno-butadieno	Boas propriedades físicas; excelente resistência à abrasão; não possui resistência a óleo, ozônio ou ao tempo; boas propriedades elétricas.	

O pó de borracha tem hoje muitas aplicações como: aditivo para asfalto na pavimentação de rodovias, onde aumenta a durabilidade da pista de rolamento; como suporte para grama sintética em quadras esportivas; como carga em composição de borracha (#40); e como matéria-prima para produção de regenerado. O pó #40 é o mais comercializado, sendo obtido a partir de pneus inservíveis e se constitui num componente de grande valor porque propicia um aumento de volume desproporcional ao aumento de peso; assim, o composto torna-se menos denso. A utilização crescente que atualmente se verifica desse produto viabiliza unidades recicladoras de pneus inservíveis e rebarbas industriais (GRISON, 2010).

2.3.2. Composição dos Pneus

De acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP (2017), a complexidade na construção de um pneu vai desde a preparação da borracha até a produção de itens para compor o produto final.

As partes de um pneu contam com propriedades físicas e químicas diferentes. A aparência externa remete à borracha, no entanto, o pneu fabricado para rodar por milhares de quilômetros em todos os tipos de estrada, em terrenos enlameados, pistas pedregosas, desertos e até terras geladas, conta com variados componentes responsáveis pelo desempenho necessário para garantir, com segurança, todas as características exigidas por esse complexo produto (ANIP, 2017).

O pneu é formado por diversos componentes, cada um com uma formulação própria para melhorar o desempenho específico, isto é, pode-se encontrar em um único pneumático mais de uma dezena de compostos de borracha (PINHEIRO, 2001).

O pneu conta com diferentes partes, conforme mostra a Figura 4. Entre elas é possível constatar: parede lateral que é feita de borracha; lona de corpo produzida com uma mistura elástica de borracha, poliéster e náilon; lona estabilizadora, fabricada com pequenas placas de fios de aço; capa de rodagem formada por três tipos de borracha com diferentes composições; talões, que são aros de aço envolvidos por uma camada de borracha; e, estanque, feito por várias camadas de borracha (INDÚSTRIAHOJE, 2016).

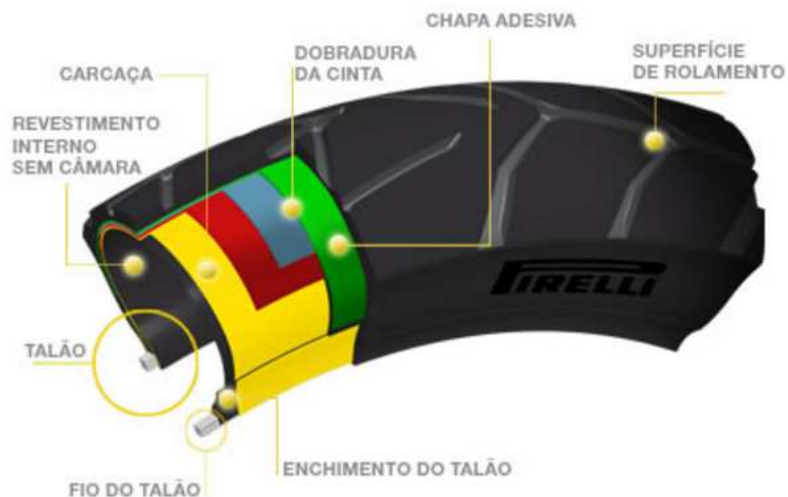


Figura 4 – Estrutura do pneumático (INDÚSTRIAHOJE, 2016).

2.3.3. Pneus Inservíveis

Conforme dados divulgados pela ANIP (2017), o pneu tupiniquim começou a trilhar sua história no ano de 1934. Nesse ano se iniciou, de fato, a produção brasileira de pneus, com a implantação do Plano Geral de Viação Nacional, concretizado em 1936 com a instalação, no Rio de Janeiro, da Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha (popularmente conhecida como Pneus Brasil), que, em seu primeiro ano fabricou mais de 29 mil pneus.

O setor começou a prosperar quando fabricantes internacionais começaram a produzir seus pneus no país, alavancando a produção nacional para 441 mil pneus. Atualmente, o país tem dezenas de fábricas de pneus instaladas, dentre elas cinco fabricantes internacionais, Bridgestone, Continental, Goodyear, Michelin e Pirelli. O resultado mostrado na Figura 4 é que, o país fabricou em 2016 aproximadamente 70 milhões de unidades (ANIP, 2017).

PRODUÇÃO POR CATEGORIA (Milhares de unidades)											
	2006	2007	2008	2009	2010 ^(*)	2011	2012	2013 ^(**)	2014	2015	2016
CARGA	6.947,40	7.319,30	7.367,10	6.033,60	7.735,30	7.448,80	7.138,00	8.231,33	7.894,36	6.829,05	7.431,21
CAMIONETA	5.894,00	6.058,40	5.841,90	5.599,80	7.940,80	8.470,60	8.267,80	9.904,48	8.860,74	8.843,08	10.014,59
PASSEIO	28.948,70	28.791,40	29.585,90	27.489,30	33.812,80	32.568,20	30.406,40	32.554,32	33.266,71	37.399,85	36.584,87
MOTO	11.438,80	13.725,50	15.249,30	13.158,10	15.205,60	16.078,50	14.519,50	15.041,60	15.514,35	14.614,75	12.888,09
AGRÍCOLA	559,30	698,20	776,00	593,30	781,40	793,80	807,20	928,49	873,85	719,49	796,58
OTR	129,30	131,90	127,20	86,70	136,00	109,70	107,80	103,30	118,42	103,20	105,72
INDUSTRIAL	498,50	462,10	716,40	1083,30	1633,20	1396,90	1360,30	2072,81	151,55	120,80	49,29
AVIÃO	51,00	60,90	47,60	41,80	60,00	60,10	54,00	52,57	50,52	0,79	0,00
TOTAL	54.467,00	57.247,70	59.711,40	54.085,90	67.305,10	66.926,60	62.661,00	68.888,90	66.730,50	68.631,00	67.870,35

Figura 5 – Dados da produção de pneus no Brasil (ANIP, 2017).

Se a invenção do pneu melhorou a mobilidade, tornando o transporte em veículos mais seguro, prático e confortável, também, trouxe consigo um problema de ordem ambiental. Ainda que o pneu dure cerca de sete anos, em algum momento ele se tornará inservível (REVISTA PNEUS & CIA, 2010).

Pneu inservível é aquele usado que apresente danos irreparáveis em sua estrutura não se prestando mais à rodagem ou à reforma (CONAMA, 2009).

Segundo publicado na Revista pneus & cia (2016), quando o assunto em questão é a proliferação do mosquito *aedes aegypti* (popularmente conhecido como mosquito da Dengue, Chikungunya e Zica), as pessoas rapidamente associam essas doenças aos milhares de pneus “velhos” (inservíveis) descartados de forma inadequada no meio ambiente. E não é à toa, por acumularem facilmente a água proveniente das chuvas, assim como garrafas e vasos de plantas, os pneus inservíveis são, de fato, recipientes bastante propícios para o

desenvolvimento do mosquito responsável pela transmissão do vírus das doenças Dengue, Zica e Chikungunya.

Criada pelo Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus, a Reciclanip (Associação sem fins lucrativos), tem por missão assegurar a sustentabilidade do processo de coleta e destinação de pneus inservíveis de responsabilidade dos fabricantes de pneus, em todas as regiões do Brasil, atuando de forma responsável nas áreas ambiental, social e econômica (ANIP, 2017).

O Programa funciona em âmbito nacional, a partir da celebração de convênios de cooperação mútua, com instalação dos chamados Pontos de Coleta (ver Figura 6), locais cobertos disponibilizados e controlados pelas prefeituras municipais e outros parceiros, para onde são levados os pneus recolhidos pelo serviço público, ou descartados voluntariamente pelo município e por empresas (ANIP, 2017).

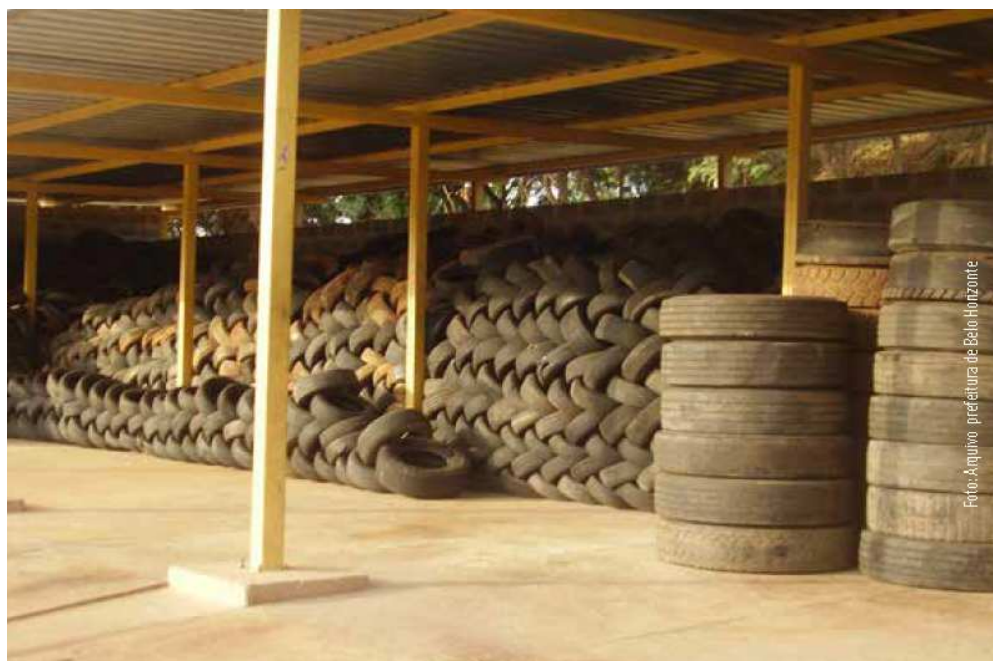


Figura 6 – Galpão da Prefeitura de Belo Horizonte/MG onde são armazenados os pneus inservíveis (REVISTA PNEUS & CIA, N°40).

De acordo com a ANIP (2017), a partir desses pontos de coleta, a Reciclanip recolhe os pneus considerados inservíveis e os encaminha para a destinação final ambientalmente adequada, realizada por empresas devidamente autorizadas e licenciadas pelos órgãos ambientais. Desde o início do Programa até 2014 a entidade contabilizou para destinação

ambientalmente adequada, mais de 3 milhões de toneladas de pneus inservíveis, equivalentes a cerca de 600 milhões de pneus de automóveis. Só em 2014, foram coletados e destinados corretamente 445 mil toneladas de pneus inservíveis, o que corresponde a 89 milhões de pneus de passeio (ver Figuras 7 e 8).

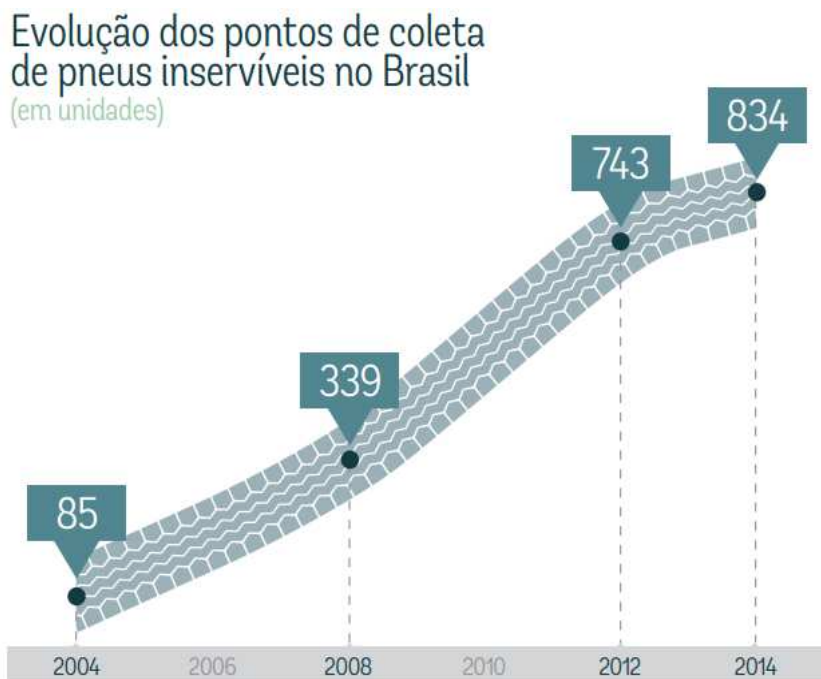


Figura 7 – Evolução dos pontos de coleta de pneus inservíveis no Brasil (ANIP, 2017).

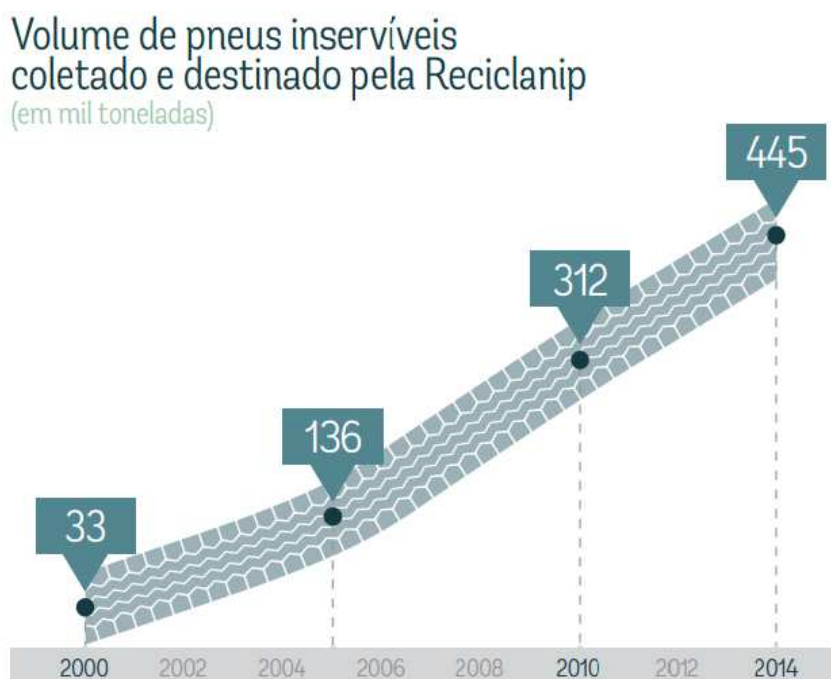


Figura 8 – Volume de pneus inservíveis coletados e destinados pela Reciclanip (ANIP, 2017).

Atualmente, a forma mais comum de destinação dos pneus inservíveis é como

combustível alternativo para a indústria de cimento, que em 2014 respondeu por 69,7% do total (ver Figura 9). Em segundo lugar do ranking está a fabricação de granulado e pós de borracha para utilização em artefatos de borracha, ou asfalto borracha, respondendo por 17,8% da destinação. Na sequência, está a laminação, que utiliza o pneu inservível como matéria prima para fabricar solado de sapato, dutos fluviais, etc., que representam 6,0%. O aço corresponde a 6,5% e é também reaproveitado ANIP (2017).

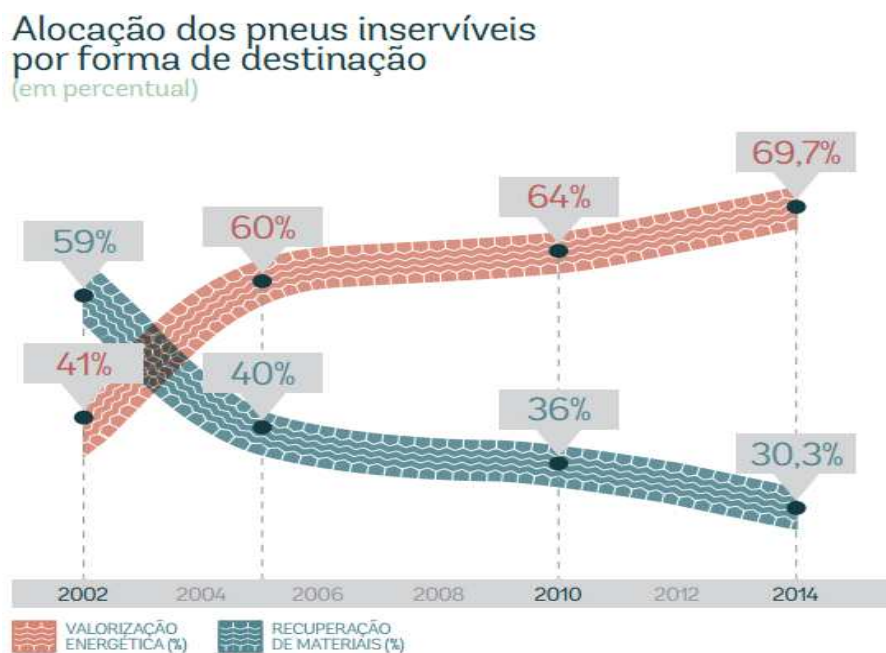


Figura 9 – Alocação dos pneus inservíveis por forma de destinação (ANIP, 2017).

2.3.4. Legislação

O Brasil foi pioneiro em legislação que dispõe sobre as obrigações imposta aos fabricantes e importadoras de pneumáticos a compensar a produção e a importação dos mesmos com destruição de grande quantidade de pneus inservíveis ou de carcaças abandonadas (KAMIMURA, 2002).

Desde o início da fabricação dos pneus em 1936, no Brasil, cerca de 1 bilhão de unidades já foram produzidas e o descarte ocorreu, em grande maioria, de forma inadequada, seja por incineração sem controle de emissão de gases ou pelo depósito a revelia em áreas ambientais, como rios, oceanos, desertos, etc (ANIP, 2017).

Desta feita, com o objetivo de minimizar os danos ao meio ambiente, em razão da disposição inadequada dos pneus inservíveis e conseqüentemente, em alguns casos, danos à

saúde pública, em razão do potencial risco de proliferação de mosquitos causado pelo acúmulo de água nesses pneus inservíveis, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), publicou em 2009 a Resolução nº 416 que:

“Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências.”

Segundo a Resolução nº 416, todos os fabricantes e importadores de pneus novos, com peso unitário superior a 2,0 kg são obrigados a coletar e dar a destinação adequada aos pneus inservíveis no território nacional. De acordo com a Resolução, considera-se pneu o componente de um sistema de rodagem, constituído de elastômeros, produtos têxteis, aço e outros materiais que quando montado em uma roda de veículo e contendo fluido(s) sobre pressão, transmite tração dada a sua aderência ao solo, sustenta elasticamente a carga do veículo e resiste à pressão provocada pela reação do solo (CONAMA, 2009).

A destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis é o procedimento técnico em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial, e que seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outra(s) técnica(s) admitida(s) pelos órgãos ambientais competentes, observando a legislação vigente e normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e a minimizar os impactos ambientais adversos (CONAMA, 2009).

2.3.5. Resíduo de borracha de pneu - RBP

O material utilizado pelos pesquisadores citados para substituir parte do agregado miúdo na formulação das matrizes de concreto foi a borracha na forma de fibras (ver Figura 10), proveniente de resíduo de indústria de recauchutagem de pneu e cujo material vem sendo utilizado, atualmente, para queima em fornos de cimenteira. Igualmente, foi utilizada a borracha na forma de grânulos, oriundos da trituração mecânica de pneu inservível (à temperatura ambiente), sendo eliminadas as fibras de nylon e metálicas (ver Figura 11).

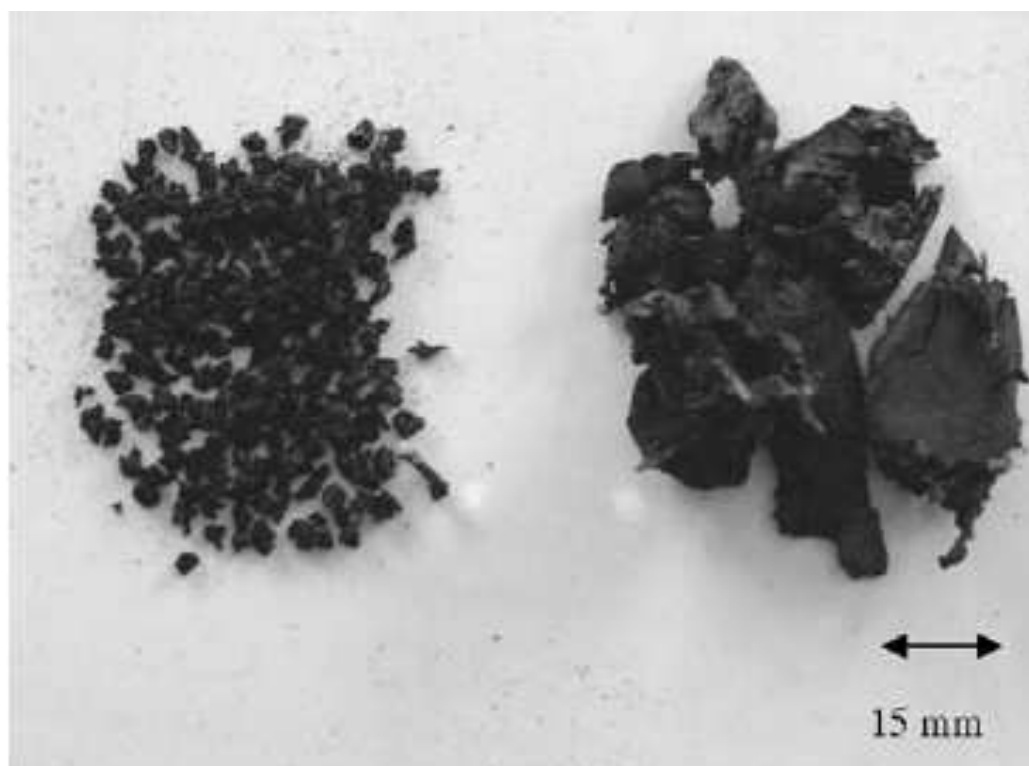


Figura 10 – Resíduo de borracha de pneu na forma de fibras (KHALOO *et al*, 2008).



Figura 11 – Ciclo de moagem e separação da borracha de pneu (GRANZOTTO, 2010).

2.4. Tecnologia do concreto

Segundo a ASTM – *Standard Specification Portland Cement*, o concreto é um material compósito (ver Figura 12) que consiste de um meio aglomerante no qual estão aglutinadas partículas de diferentes naturezas:

a) O aglomerante é o cimento na presença de água;

b) O agregado é qualquer material granular, como areia, pedregulho, seixos, rocha britada, escória de alto-forno e resíduos de construção e demolição; se as partículas de agregado são maiores do que 4,8 mm (peneira n.º 4), o agregado é dito graúdo; caso contrário, o agregado é miúdo;

c) Os aditivos e adições são substâncias químicas adicionadas ao concreto em seu estado fresco que lhe alteram algumas propriedades, adequando-as às necessidades construtivas.

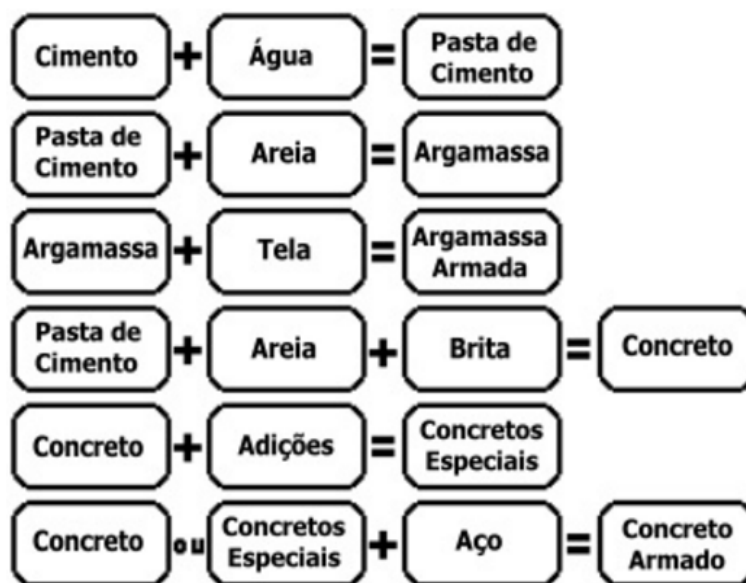


Figura 12 – Elementos constituintes do concreto (PORTAL DO CONCRETO, 2016).

O concreto é o material estrutural mais amplamente utilizado. É possível encontrá-lo em residências de alvenaria, nos edifícios mais altos do mundo, em pontes, em rodovias, em torres de resfriamento, em usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento, até em plataformas de extração petrolíferas móveis (METHA e MONTEIRO, 2008).

Estima-se que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que dá, segundo a *Federación Iberoamericana de Homigón Premesclado* (FIHP), aproximadamente, um consumo médio de 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água. No Brasil o concreto que sai de centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos (REVISTA CONCRETO & CONSTRUÇÕES, 2009).

Concreto é um material composto e heterogêneo resultante da mistura de um aglomerante hidráulico com materiais inertes e água. O aglomerante frequentemente aplicado é o cimento Portland, ainda que possam ser empregados outros tipos de cimento. Os materiais inertes do concreto são denominados por agregados, que quando classificados conforme granulometria (dimensões) recebem as denominações de agregados miúdos e agregados graúdos (ROMANO, 2004).

Segundo Romano (2004), o agregado miúdo mais usual é a areia natural, todavia, também, pode ser utilizado pó de pedra. E o agregado graúdo mais comumente é a pedra de britada.

Para efeitos da pesquisa, o termo “concreto” refere-se sempre a “concreto de cimento Portland” - Material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, metacaulim ou sílica ativa), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água) (NBR 12655, 2015).

De acordo com Metha e Monteiro (2008), a utilização de aditivos no concreto é, atualmente, largamente conhecido devido aos vários benefícios resultantes da sua correta aplicação. Ainda, segundo os autores, aditivos químicos podem modificar as características de pega e de endurecimento da pasta, influenciando na taxa de hidratação do cimento. Aditivos redutores de água podem tornar plásticos concretos frescos, reduzindo a tensão superficial da água, aditivos incorporadores de ar podem melhorar a durabilidade do concreto exposto ao frio e aditivos minerais, como as pozolanas (materiais contendo sílica reativa) que podem reduzir a fissuração térmica do concreto massa.

As relações microestrutura-propriedades são o foco da moderna ciência dos materiais. Conforme exemplifica a Figura 11, no concreto fica muito difícil elaborar modelos realistas

de sua microestrutura, considerando sua complexidade e heterogeneidade. Entretanto, o conhecimento tanto da microestrutura e das propriedades individuais dos constituintes do concreto, quanto da relação entre eles serve para auxiliar no controle de suas propriedades. (METHA e MONTEIRO, 2008).

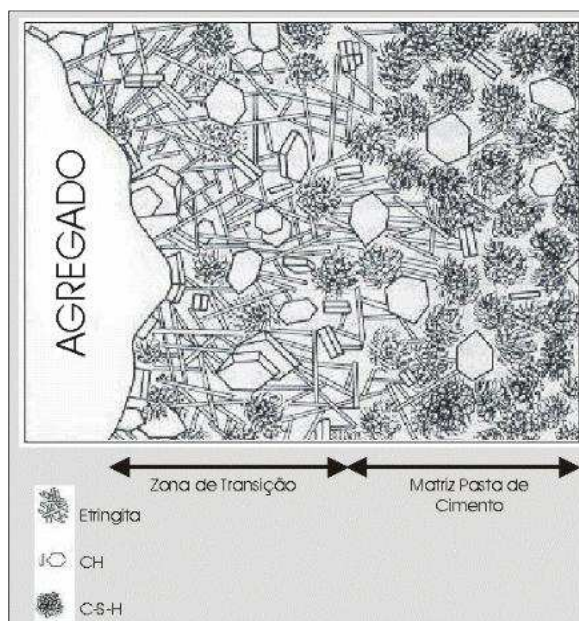


Figura 13 – Representação esquemática da estrutura do concreto (METHA e MONTEIRO, 2008).

2.4.1. Tipos de Concreto

Tomando como base a massa específica, o concreto pode ser classificado em três categorias: concreto de peso normal ou concreto corrente, concreto leve e concreto pesado. O concreto que contém areia natural e seixo rolado ou pedra britada, em geral pesando 2.400 kg/m³ é titulado concreto de peso normal ou concreto corrente e é mais usualmente empregado em peças estruturais. O termo concreto leve é aplicado para concreto cuja massa é menor que 1.800 kg/m³ e concretos pesados, usados às vezes na blindagem de radiações, é o termo usado para concreto a partir de agregados de alta densidade e que geralmente pesa mais do que 3.200 kg/m³ (METHA e MONTEIRO, 2008).

A resistência do concreto varia de 5,0 em 5,0 MPa, a partir de 10,0 até 40,0 MPa e seu abatimento (*Slump Test*) varia de 40 a 70 mm (REVISTA CONCRETO & CONSTRUÇÕES, 2009).

De acordo com METHA e MONTEIRO (2008), do ponto de vista das diferenças nas

relações estrutura-propriedade é útil dividir o concreto em três categorias gerais, baseadas na resistência à compressão, referida a 28 dias:

1. Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa;
2. Concreto de resistência moderada: resistência à compressão de 20 a 40 MPa;
3. Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

2.4.2. Cimento

De acordo com a Associação Brasileira do Cimento Portland - ABCP (2017), cimento é o nome popular para o mundialmente famoso cimento Portland (patenteado por Joseph Aspdin - 1824). Refere-se a um pó fino com propriedades ligantes que endurece sob a ação da água e que, depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido a água, não se decompõe mais. O cimento é composto principalmente do material clínquer – mistura de calcário, argila e componentes químicos – e diferenciado conforme a adição de outros materiais, como:

- a) Gesso – aumenta o tempo de pega;
- b) Escória – aumenta a durabilidade na presença de sulfato, mas quando em grandes quantidades, pode diminuir a resistência;
- c) Argila pozolânica – confere maior impermeabilidade ao concreto; e
- d) Calcário – utilizado, muitas vezes, em maior quantidade para reduzir o custo do cimento.

As diferenças na composição do material apresentam impactos diretos em suas características e propriedades de resistência, trabalhabilidade, durabilidade e impermeabilidade (ABCP, 2017).

O cimento Portland comum ou CP-I recebe este nome porque não possui nenhum tipo de aditivo, apenas o gesso, que tem a função de retardar o início de pega do cimento para possibilitar mais tempo na aplicação. Tem alto custo e menos resistência (25 MPa) e sua produção é direcionada para a indústria, no entanto, já é ausente no mercado brasileiro (ABCP, 2017).

O CP-I utilizado nas pesquisas de Khallo *et al.* (2008) e Yung *et al.* (2013) apresentava as especificações requeridas pela norma internacional ASTM – *Standard Specification Portland Cement*, adicionado de cinzas volantes do tipo F e escória.

Outro tipo de cimento utilizado nas pesquisas foi o cimento Portland composto ou CP-II, titulado dessa forma porque possui adições de outros materiais na sua mistura que conferem a este cimento um menor calor de hidratação, ou seja, acontece a liberação de menos calor quando entra em contato com a água (ABCP, 2017).

O CP-II pode ser apresentado em três opções: CP-II E – cimento Portland com adição de escória de alto-forno, sendo da classe de resistência 32 MPa, utilizado na pesquisa de Silveira *et al.* (2016); CP-II F – cimento Portland com adição de material carbonático, sendo da classe de resistência 32 MPa, utilizado na pesquisa de Albuquerque (2009) e da classe de resistência 40 MPa, utilizado na pesquisa de Lijuan *et al.* (2014); e CP-II Z – cimento Portland com adição de material pozolânico, sendo da classe de resistência 32 MPa, utilizado nas pesquisas de Santos (2005), Freitas (2007) e Granzotto (2010).

Segundo a NBR 11578 (1991), os teores dos componentes do cimento Portland do tipo CP-II (E, F e Z) são apresentados (ver Tabela 3); as exigências químicas (ver Tabela 4); as exigências físicas e mecânicas (ver Tabela 5); as exigências físicas e mecânicas facultativas (ver Tabela 6); e a classe de resistência do cimento Portland composto (ver Tabela 7) são apresentadas a seguir:

Tabela 3 – Teores dos componentes do cimento Portland composto (NBR 11578, 1991).

Sigla	Classe de resistência	Componentes (% em massa)			
		Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CP II-E	25	94 - 56	6 - 34	-	0 - 10
	32				
	40				
CP II-Z	25	94 - 76	-	6 - 14	0 - 10
	32				
	40				
CP II-F	25	94 - 90	-	-	6 - 10
	32				
	40				

Tabela 4 – Exigências químicas (NBR 11578, 1991).

Determinações químicas	Limites (% em massa)		
	CP II-E	CP II-Z	CP II-F
Resíduo insolúvel (RI)	≤ 2,5	≤ 16,0	≤ 2,5
Perda ao fogo (PF)		≤ 6,5	
Óxido de magnésio		≤ 6,5	
Trióxido de enxofre (SO ₂)		≤ 4,0	
Anidrido carbônico (CO ₂)		≤ 5,0	

Tabela 5 – Exigências físicas e mecânicas (NBR 11578, 1991).

Características e propriedades		Unidade	Limites de classe		
			25	32	40
Finura	Resíduo na peneira	%	≤ 12,0	≤ 12,0	≤ 10,0
	75 µm				
	Área específica	m ² /kg	≥ 240	≥ 260	≥ 280
	Tempo de início de pega	h	≥ 1	≥ 1	≥ 1
	Expansibilidade a quente	mm	≤ 5	≤ 5	≤ 5
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	≥ 8,0	≥ 10,0	≥ 15,0
	7 dias de idade	MPa	≥ 15,0	≥ 20,0	≥ 25,0
	28 dias de idade	MPa	≥ 25,0	≥ 32,0	≥ 40,0

Tabela 6 – Exigências físicas e mecânicas - facultativas (NBR 11578, 1991).

Características e propriedades	Unidade	Limites		
		CP II-E	CP II-Z	CP II-F
Tempo de início de pega	h	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Expansibilidade a frio	mm	≤ 5	≤ 5	≤ 5
Teor de escória	%	6 - 10	-	-
Teor de material pozolânico	%	-	6 - 14	-
Teor de material carbonático	%	0 - 10	0 - 10	6 - 10

Tabela 7 – Classe de resistência do cimento Portland composto (NBR 11578, 1991).

Classe de resistência	Resistência à compressão aos 28 dias de idade (MPa)	
	Limite inferior	Limite superior
25	25,0	42,0
32	32,0	49,0
40	40,0	-

Já o cimento Portland de Alta Resistência Inicial ou CP-V ARI, foi utilizado na pesquisa de Silva *et al.* (2015). Em função do seu processo de fabricação, este cimento apresenta alta reatividade nas primeiras horas de aplicação, conseguindo atingir resistências elevadas em curto intervalo de tempo (ABCP, 2017).

Ainda segundo a ABCP (2017), ao final dos 28 dias de cura, também atinge resistências maiores que os cimentos convencionais e é largamente utilizado em obras industriais que exigem um tempo de desforma menor, sendo recomendável apenas para a fabricação de concretos.

Os cimentos CEM I (42,5 MPa) e CEM II (52,5 MPa), embora utilizados apenas no mercado internacional e atendendo aos requisitos da norma ASTM – *Standard Specification Portland Cement*, foram utilizados por Girskas e Nagrockiene (2017); e Raffoul *et al.* (2016), respectivamente.

2.4.3. Água de amassamento

A água destinada ao amassamento do concreto deve ser isenta de impurezas que possam vir a prejudicar as reações entre ela e o cimento. No geral as águas potáveis apresentam padrões satisfatórios para o uso em concreto (GRANZOTTO, 2010).

Ainda segundo Granzotto (2010), embora, na prática, quase todas as águas naturais são utilizáveis, os maiores defeitos provenientes da água tem maior relação com o excesso de água empregada, do que propriamente com os elementos que ela possa conter.

A reação química do cimento com a água é fundamental para dar ao concreto as propriedades mais importantes: resistência, durabilidade, trabalhabilidade, impermeabilidade e etc. Pesquisadores e tecnólogos do concreto, afirmam que todas as propriedades do

concreto melhoram com a redução da água aplicada, desde que a massa continue plástica e trabalhável (GRANZOTTO, 2010).

De acordo com a norma ABNT NBR 15900:2009, a trabalhabilidade do concreto exige relação água/cimento (ou fator água/cimento) e relação entre o peso da água e do cimento empregado na mistura, que usualmente é de 0,45 a 0,65 (Kg/Kg).

2.4.4. Agregados miúdo e graúdo

Em todas as pesquisas, observou-se uma padronização quanto à utilização dos agregados miúdo e graúdo. O agregado miúdo utilizado na confecção dos concretos foi a areia natural média lavada que possui dimensões menores que 4,8 mm. Já o agregado graúdo utilizado foi a brita nº 01 com dimensões igual ou maior que 4,8 mm e máximo de 19 mm.

Os parâmetros legais para os ensaios de caracterização da areia natural estão discriminados na Tabela 8. Estes ensaios tem por objetivo qualificar os materiais, o teor de impurezas, possibilitar as correções de dosagem e o de comparação com o RBP, substituto de parte do agregado natural.

Tabela 8 – Caracterizações realizadas na areia natural (ABNT - Adaptado pelo autor) (continua).

Determinação	Título	Referência
Granulometria	Agregados – Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248 (2003)
Teor de argila em torrões	Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis	NBR 7218 (2010)
Material pulverizado	Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem	NBR NM 46 (2003)
Avaliações das impurezas orgânicas	Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas	NBR NM 49 (2001)
Massa específica	Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente	NBR NM 52 (2009)
Absorção	Agregado miúdo – Determinação da absorção de água	NBR NM 30 (2001)

Os parâmetros legais para os ensaios de caracterização da pedra britada estão discriminados na Tabela 9. Estes ensaios têm por objetivo qualificar o material e possibilitar

as correções de dosagem.

Tabela 9 – Caracterizações realizadas no agregado graúdo (ABNT - Adaptado pelo autor).

Determinação	Título	Referência
Análise granulométrica	Agregados – Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248 (2003)
Teor de argila em torrões	Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis	NBR 7218 (2010)
Material pulverizado	Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem	NBR NM 46 (2003)

2.4.5. Aditivos

O termo “aditivo” refere-se ao material adicionado durante o processo de mistura do concreto em pequenas quantidades (geralmente inferior a 5%), proporcional à massa de cimento para modificar as propriedades do concreto fresco ou endurecido.

Os aditivos podem ser classificados em plastificante (tipo P), retardador (tipo R), acelerador (tipo A), plastificante retardador (tipo PR), plastificante acelerador (tipo PA), incorporador de ar (tipo IAR), superplastificante (tipo SP), superplastificante retardador (tipo SPR) e superplastificante acelerador (tipo SPA). (ABNT NBR 11768:2011).

Segundo a NBR 11768:2011:

- Aditivo plastificante (tipo A) – Produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 6% da quantidade de água de amassamento para produzir um concreto com determinada consistência.
- Aditivo retardador (tipo R) – Produto que aumenta os tempos de início e fim de pega do concreto.
- Aditivo acelerador (tipo A) – Produto que diminui os tempos de início e fim de

pega do concreto, bem como acelera o desenvolvimento das suas resistências iniciais.

- Aditivo plastificante retardador (tipo PR) – Produto que combina os efeitos dos aditivos plastificantes e retardador.
- Aditivo plastificante acelerador (tipo PA) – Produto que combina os efeitos dos aditivos plastificantes e acelerador.
- Aditivo incorporador de ar (tipo IAR) – Produto que incorpora pequenas bolhas de ar ao concreto.
- Aditivo superplastificante (tipo SP) – Produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento, para produzir um concreto com determinada consistência.
- Aditivo superplastificante retardador (tipo SPR) – Produto que combina os efeitos dos aditivos superplastificante e retardador.
- Aditivo superplastificante acelerador (tipo SPA) – Produto que combina os efeitos dos aditivos superplastificante e acelerador.

Com a finalidade de proporcionar melhor trabalhabilidade para o concreto com adição de resíduo de borracha de pneu (RBP), o aditivo foi empregado apenas nas pesquisas de Santos (2005), Freitas (2007), Albuquerque (2009), Yung *et al.* (2013), Lijuan *et al.* (2014), Silva *et al.* (2015), Raffoul *et al.* (2016) e Girskas e Nagrockiene (2017).

2.4.6. Propriedades do concreto no estado fresco

O conhecimento das características e propriedades do concreto, logo após sua dosagem, é de fundamental importância para garantir a qualidade da mistura e a correta aplicação do mesmo. Embora o concreto só tenha sua aprovação garantida com quatro semanas (28 dias) de idade, alguns requisitos precisam ser verificados quando este se encontra em estado plástico ou fresco como condição de aceitação. O concreto é considerado como

fresco até o momento em que tem início a pega do aglomerante e após o fim desse processo o material é considerado concreto endurecido (METHA e MONTEIRO, 2008).

2.4.6.1. Trabalhabilidade – “Slump Test”

A trabalhabilidade é uma propriedade cuja definição ainda provoca divergência no meio técnico. Para Metha e Monteiro (2008), a trabalhabilidade determina a facilidade com que um concreto pode ser manipulado sem segregação nociva.

O *Slump Test* ou teste de trabalhabilidade do concreto se dá durante o processo de produção da matriz, onde é possível obter valores de consistência da massa do concreto pelo abatimento do tronco de cone. O método é normalizado pela ABNT NBR NM 67 (1998) e a metodologia para determinação dessa consistência está demonstrada na Figura 14.

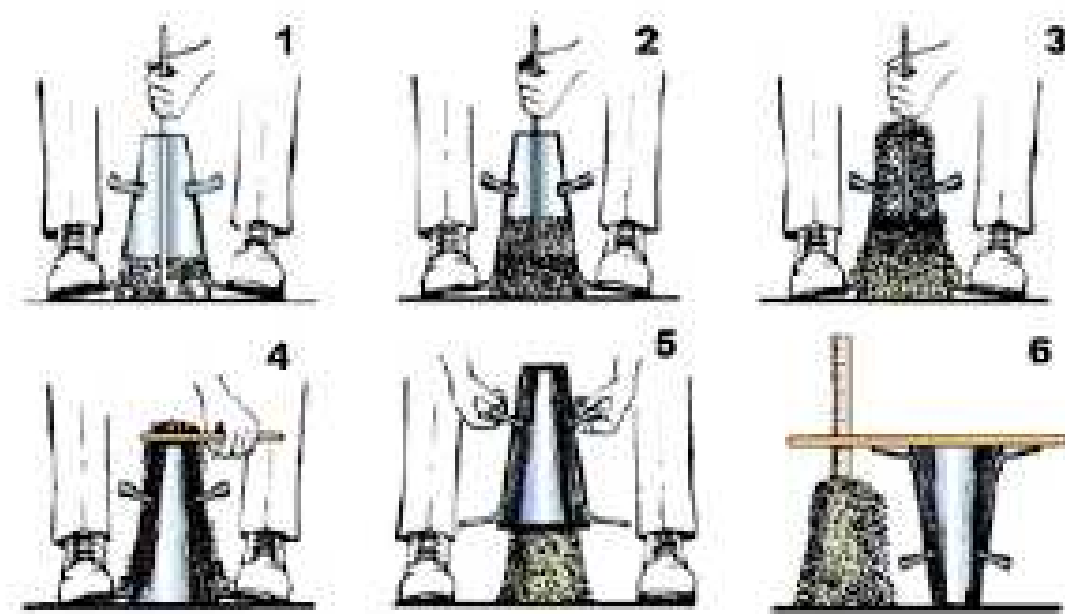


Figura 14 – Procedimento para realização do *Slump Test* (NBR NM 67, 1998).

O procedimento, que dura no máximo 3 minutos, consiste nas seguintes etapas:

- a) O concreto é colocado, em 3 camadas individuais compactadas com 25 golpes de uma haste metálica de socamento com extremidades semiesférica e diâmetro de 1,6 cm, em um molde metálico tronco-cônico com 30 cm de altura, diâmetro superior de 10 cm e diâmetro inferior de 20 cm;

- b) Após o preenchimento das 3 camadas, o excesso de concreto é nivelado com a base do tronco de cone (cone de Adams);
- c) Retirar lentamente o troco de cone sem esforços laterais;
- d) Colocar o tronco de cone, em posição invertida ao lado do concreto e mede-se com uma régua o abatimento do concreto.

2.4.6.2. Massa unitária

Outro ensaio realizado com o concreto ainda no estado fresco é chamado massa unitária de um agregado, ou seja, é a relação entre sua massa e seu volume sem compactar, considerando-se também os vazios entre os grãos.

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq. 01})$$

Usualmente a massa unitária é apresentada em g/cm³, mas de acordo com o Sistema Internacional (SI) a unidade é o kg/m³. A relação entre elas é a seguinte:

$$1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \frac{10^{-3} \text{kg}}{10^{-6} \text{m}^3} = 10^3 \text{kg/m}^3 \quad (\text{Eq. 02})$$

A determinação da massa específica do concreto no estado fresco é efetuada de acordo com a ABNT NBR 9833 (2008) – “Concreto fresco – Determinação da massa unitária e do teor de ar pelo método gravimétrico”.

2.4.7. Propriedades do concreto no estado endurecido

O processo de endurecimento do concreto ocorre a partir do início da pega do cimento. As propriedades do concreto endurecido variam em função da idade e das condições a que o mesmo é submetido (METHA e MONTEIRO, 2008).

2.4.7.1. Massa específica

A massa específica do concreto no estado endurecido é determinada segundo a norma ABNT NBR 9778:2009 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de

água, índices de vazios e massa específica.

Os concretos endurecidos são classificados segundo sua massa específica como:

a) Concreto normal: apresenta, quando seco em estufa, massa específica entre 2000 e 2800 kg/m³;

b) Concreto leve: apresenta, quando seco em estufa, massa específica entre 800 e 2000 kg/m³; e

c) Concreto pesado: apresenta, quando seco em estufa, massa específica superior a 2800 kg/m³.

2.4.7.2. Ensaio de resistência à compressão

Segundo Metha e Monteiro (2008), a resistência à compressão é a única propriedade especificada para o concreto endurecido que é efetivamente controlada, devido à facilidade desta propriedade ser determinada.

É sabido que, somente o controle da resistência à compressão não é capaz de identificar a qualidade do concreto, porém este se caracteriza como um parâmetro de elevada importância para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas. O concreto é um material cuja capacidade de resistir aos esforços de compressão é bastante elevada, sobretudo quando esta propriedade é comparada com a resistência à tração.

A verificação da resistência à compressão do concreto é determinada com base na norma ABNT NBR 5739 (2007) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

A norma ABNT NBR 5738 (2015) – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova – define as condições para a preparação dos corpos-de-prova a serem ensaiados. Nesta norma, são definidos os principais parâmetros a serem considerados no momento de moldar os corpos-de-prova (CP's), desde a escolha das dimensões, passando pela preparação das formas, adensamento, cura e identificação.

Segundo a ABNT, para determinar a resistência à compressão são utilizados corpos-

de-prova cilíndricos que podem apresentar-se nos diâmetros 10, 15, 20, 25, 30 ou 45 cm; possuindo altura igual ao dobro do seu diâmetro. No entanto, na prática, os CP's de medidas 10 x 20 cm e 15 x 30 cm são os mais utilizados no mercado brasileiro. Estes podem ser adensados através de haste de socamento ou através de vibrador de imersão (ver Figura 15).



Figura 15 – Exemplo de vibrador de imersão elétrico.

Fonte: Bosch.

A Figura 16 apresenta um exemplo de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de dimensões 10 x 20 cm moldados e devidamente identificados para posterior rompimento.



Figura 16 – Corpos-de-prova cilíndricos moldados segundo a ABNT NBR 5739:2015 (MAGALHÃES, 2009).

Após a fase de moldagem dos corpos-de-prova, estes devem ser mantidos em câmaras úmidas ou imersos em água. A norma ABNT NBR 9479 (2006) – Argamassa e concreto – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova – especifica as condições deste processo, determinando a umidade relativa das câmaras úmidas e a temperatura em que a água deve manter no caso dos tanques de cura (ver Figura 17).



Figura 17 – Exemplo de tanque de cura de corpos-de-prova com controlador automático de temperatura (MAGALHÃES, 2009).

Depois de submetido às condições prescritas na ABNT NBR 9479 (2006), os CP's cilíndricos são capeados de forma a regularizar seus topos. Este capeamento é normalmente realizado através de enxofre aquecido. Alternativamente ao capeamento com enxofre, podem ser utilizados discos compostos de borracha (neoprene) devidamente confinadas em pratos metálicos como elemento regularizador dos topos dos CP1s (ver Figura 18). Este procedimento permite maior agilidade no ensaio e reduz os riscos à saúde dos laboratoristas; por outro lado, tende a aumentar a variabilidade dos resultados.



Figura 18 – Esquema de utilização de discos de neoprene para rompimento à compressão de corpo-de-prova (METHA e MONTEIRO, 2008).

Segundo METHA e MONTEIRO (2008), o carregamento de ensaio sobre o CP deve ser realizado de forma contínua, com velocidade de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s. Ainda segundo o autor, o carregamento só deverá ser cessado quando houver uma queda de força que indique a ruptura do corpos-de-prova.

A resistência à compressão do corpo-de-prova de concreto é calculada através da equação 03:

$$f_c = \frac{4.F}{\pi . D^2} \quad (\text{Eq. 03})$$

Onde:

f_c - é a resistência à compressão (MPa);

F - é a força máxima alcançada na prensa (N); e

D - é o diâmetro do corpo-de-prova (mm).

A resistência da amassada (exemplar) é dada pelo maior resultado de resistência individual entre dois corpos-de-prova de concreto moldados da mesma amostra e rompidos com a mesma idade. Em outras palavras, o menor valor dentre os dois CP's rompidos é destacado. O conceito de exemplar é definido como elemento de amostra constituído por dois corpos-de-prova da mesma amassada, moldados no mesmo ato, para cada idade de rompimento (METHA e MONTEIRO, 2008).

Os tipos de ruptura que podem ocorrer em um corpo-de-prova submetido à compressão são apresentados pela norma ABNT NBR 5739:2007 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos –, sendo expostos pela Figura 19. A verificação do tipo de rompimento é importante para aferir sobre a qualidade da moldagem dos CP's. As rupturas dos tipos F e G, geralmente apresentam dispersões significativas nos resultados de um mesmo exemplar.

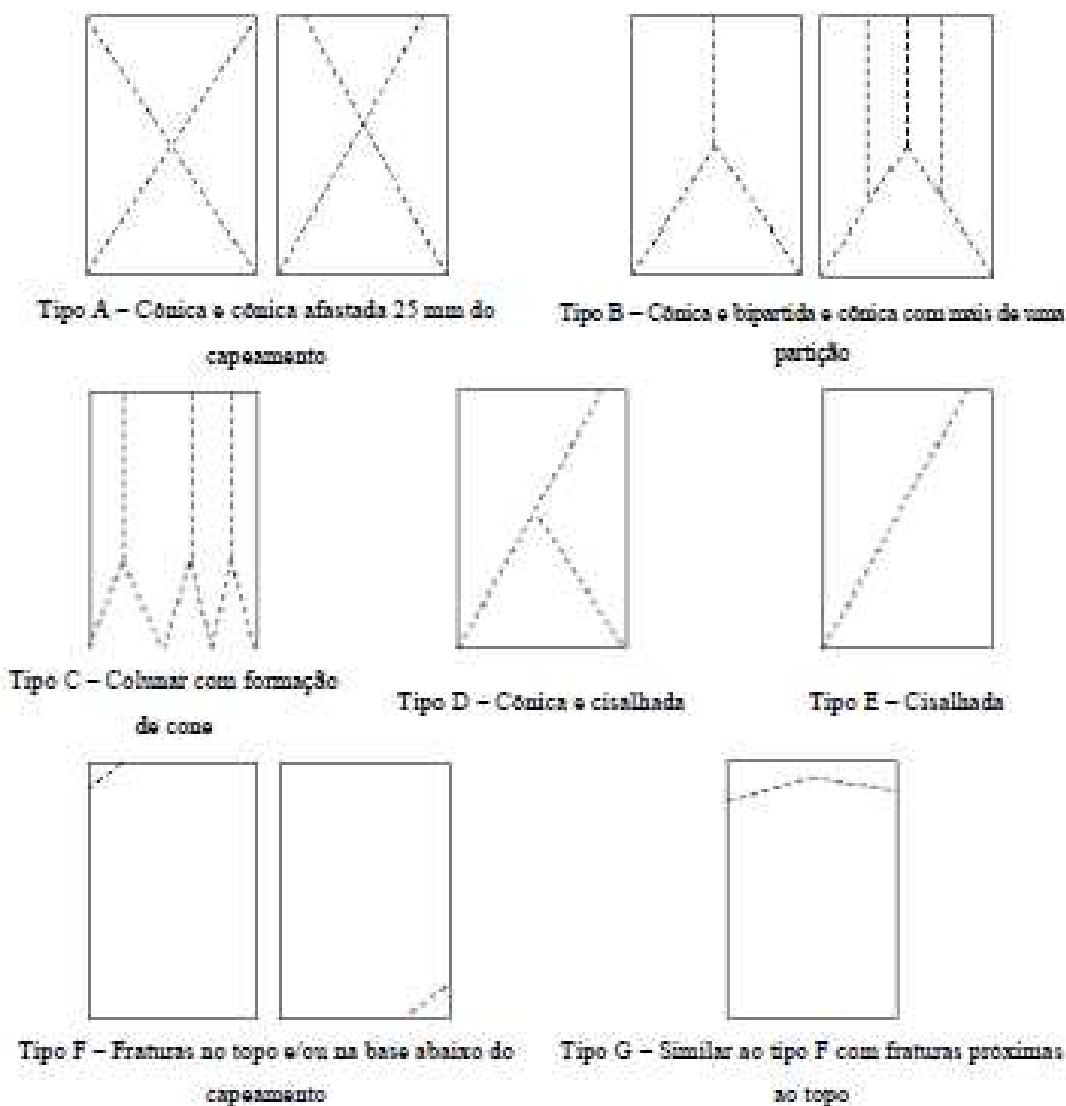


Figura 19 – Tipos de ruptura dos corpos-de-prova (ANBT NBR 5739:2007).

2.4.7.3. Ensaio de Resistência à Tração

Embora a resistência à tração do concreto não seja a propriedade de melhor desempenho deste material, sua mensuração faz-se fundamental em algumas situações como quesito de aceitação e de segurança das estruturas.

Amplamente considerados nos cálculos de pavimentos e pisos industriais de concreto, a resistência à tração do concreto vem sendo cada vez mais verificada em ensaios de laboratórios e de campo, garantindo um controle de qualidade mais completo para as construções (METHA e MONTEIRO, 2008).

O ensaio de tração por compressão diametral é conhecido mundialmente como o ensaio brasileiro, haja vista que foi desenvolvido no Brasil, em 1943, pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro.

A norma brasileira ABNT NBR 7222:2010 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos – especifica os métodos deste ensaio. A resistência à tração por compressão diametral é determinada através da equação 04:

$$f_{t,D} = \frac{2.F}{\pi.d.L} \quad (\text{Eq. 04})$$

Onde:

f_{cD} = é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascals (MPa);

F = é a força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N);

d = é o diâmetro do corpo-de-prova, expresso em milímetros (mm); e

L = é o comprimento do corpo-de-prova, expresso em milímetros (mm).

Já o ensaio de resistência à tração na flexão consiste em romper corpos-de-prova prismáticos moldados de acordo com a norma ABNT NBR 12142:2010 – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos – que estabelece a metodologia de ensaio de tração por flexão de corpos-de-prova de concreto, empregando o princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão.

Consiste basicamente em aplicar duas cargas linearmente distribuídas nos terços médios de um prisma, de modo a provocar tração na face inferior do corpo-de-prova. Esta face terá suas fibras tracionadas até a ruptura do concreto. Devido à forma de aplicação da carga de ruptura no elemento de concreto, o terço central da peça fica sob ação de flexão pura, não havendo efeitos de esforços cortantes, como pode ser observado através de diagrama de esforços solicitantes.

O ensaio de resistência à tração por flexão é amplamente utilizado devido às propriedades importantes que o mesmo determina. A análise deste ensaio é mais comum na

execução de pisos industriais de concreto, uma vez que ela reproduz parte dos esforços principais deste tipo de estrutura. A Figura 20 apresenta um modelo de execução do ensaio de tração na flexão e o plano de fratura após a aplicação da carga (MAGALHÃES, 2009).

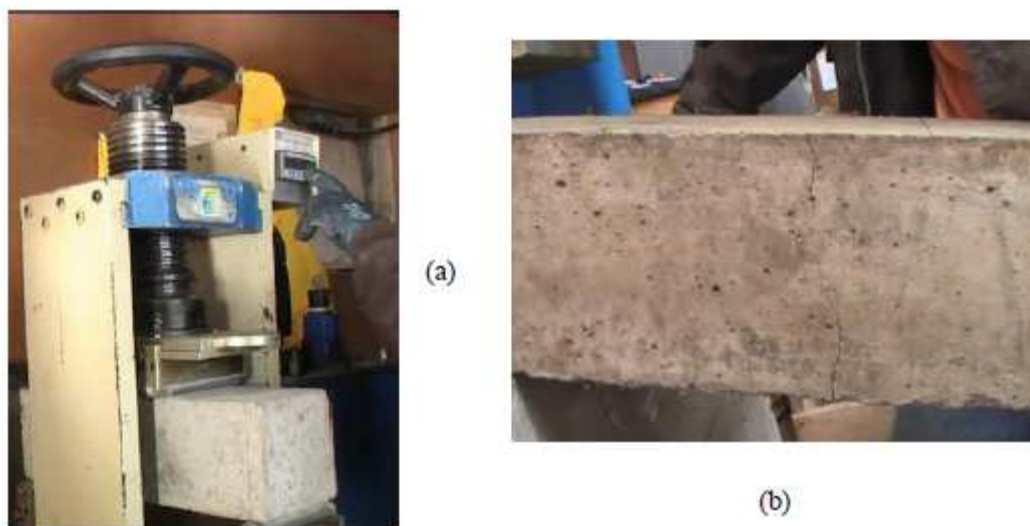


Figura 20 – Rompimento à tração sob flexão de CP prismático (a) e detalhe do plano de fratura no concreto (b) (MAGALHÃES, 2009).

Segundo a ABNT NBR 12142:2010, a resistência à tração na flexão do concreto (f_{ctM}) pode ser determinada de duas formas distintas. Dependendo do local onde ocorre a ruptura, a norma estabelece duas equações para o cálculo da resistência. As equações 05 e 06 referem-se, respectivamente, a rupturas ocorridas no terço médio e fora do terço médio da peça.

$$f_{ctM} = \frac{P \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (\text{Eq. 05})$$

$$f_{ctM} = \frac{3 \cdot P \cdot a}{b \cdot d^2} \quad (\text{Eq. 06})$$

Onde:

P – é a carga aplicada (N);

l – é a distância entre os cutelos de suporte (mm);

b e d – são a largura e a altura média do CP (mm); e

a – representa a distância entre a linha de ruptura e o apoio mais próximo (mm).

2.5. Concreto com adição de borracha – Resultados obtidos pelos pesquisadores

Há que se registrar para o cuidado na comparação entre as pesquisas, haja vista que distintos autores utilizam diferentes tipos, proporções e dimensões na incorporação da borracha triturada de pneu à matriz de concreto. Todavia, algumas diretrizes gerais podem ser identificadas pela análise da literatura disponível:

- a) geralmente, são usados resíduos de pneu na forma de grânulos (procedentes da trituração de pneus inservíveis) ou na forma de fibras (procedentes do processo de recauchutagem);
- b) as partículas utilizadas tendem a ter dimensão característica menor que 4,8mm (característica do agregado miúdo);
- c) as partículas de pneu geralmente substituem frações (%) volumétricas do agregado miúdo (areia lavada média);
- d) os valores de consumo de cimento e relação água/cimento são mantidos fixos;
- e) os parâmetros físico-químico da água de amassamento são mantidos fixos;
- f) em geral, o controle das alterações de trabalhabilidade é feito por meio de aditivos plastificantes ou superplastificantes.

Santos (2005) apresenta na Tabela 10, os resultados dos ensaios iniciais e dos ensaios de confirmação para as propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto de referência e do CAB com teor de 2% de borracha, em relação ao peso de cimento, utilizados na análise. Os percentuais foram obtidos da seguinte forma: faz-se a diferença entre os valores do concreto de referência e divide-se pelo maior dos dois (valor em linha). Este mesmo procedimento é repetido para o CAB. Em seguida, faz-se a diferença entre os valores do concreto de referência e do CAB, dividindo-se pelo maior dos dois valores (valores em coluna).

Tabela 10 – Resultados dos ensaios utilizados na análise com diferentes percentuais (SANTOS, 2005).

	Ensaio iniciais	Ensaio de confirmação	Diferença (%)
	Compressão		
Referência	30,5 MPa	34,8 MPa	12,36%
CAB	21,1 MPa	23,8 MPa	11,34 %
Diferença (%)	30,81 %	31,61 %	
	Tração		
Referência	4,0 MPa	4,3 MPa	6,97%
CAB	2,4 MPa	3,6 MPa	33,33 %
Diferença (%)	40,00 %	16,28 %	
	Módulo de deformação longitudinal		
Referência	24927 MPa	31100 MPa	19,85%
CAB	21767 MPa	25443 MPa	14,44%
Diferença (%)	12,68 %	18,19 %	

Analisando os resultados do concreto de referência nos ensaios de confirmação (resistência de 34,8 MPa) e comparando com aqueles obtidos nos ensaios iniciais (resistência 30,5 MPa), verifica-se uma significativa diferença de 12%. Assim, com uma resistência média de 34,8 MPa o concreto dos ensaios de confirmação se aproximou mais daqueles para o qual fora projetado (32 MPa). Para o CAB dos ensaios de confirmação (resistência 23,8 MPa) em comparação com o CAB dos ensaios iniciais (resistência 21,1 MPa), esta diferença de 11,3% foi muito próxima da diferença vista no concreto de referência. Comparando-se a resistência obtida para o CAB com a resistência do concreto de referência nos ensaios de confirmação, verifica-se uma perda percentual de 31,6% (ver Figuras 21 e 22) (SANTOS, 2005).

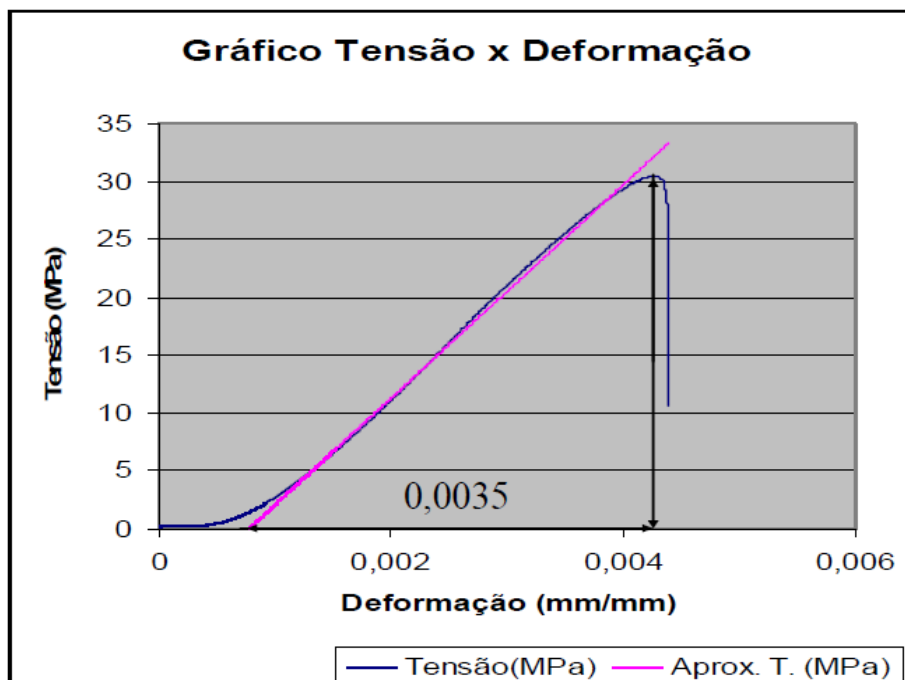


Figura 21 – Gráfico força-deformação para o concreto de referência (SANTOS, 2005).

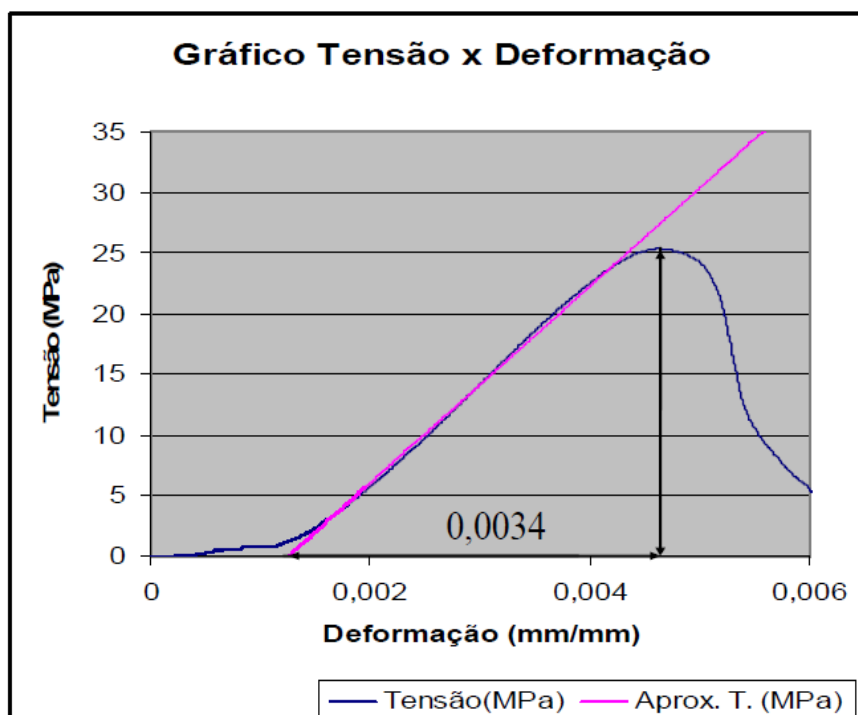


Figura 22 – Gráfico força-deformação para o CAB (SANTOS, 2005).

Ainda segundo Santos (2005), assim como nos ensaios de compressão, a resistência à tração por compressão diametral do concreto de referência apresentou um aumento quando comparados os valores nos ensaios iniciais em relação aos ensaios de confirmação de 7%. Quanto ao CAB, verifica-se um aumento de 33,3%, quase cinco vezes mais do que no

concreto de referência. No entanto, confrontando-se os resultados do concreto de referência com o CAB nos ensaios de confirmação, verifica-se uma perda de 16% da resistência à tração. Já os resultados de resistência à tração por flexão, verificou-se que o concreto de referência teve uma carga de ruptura maior que a do CAB. Esta diferença entre os dois tipos de concreto foi avaliada como de 33% (ver Figuras 23 e 24).

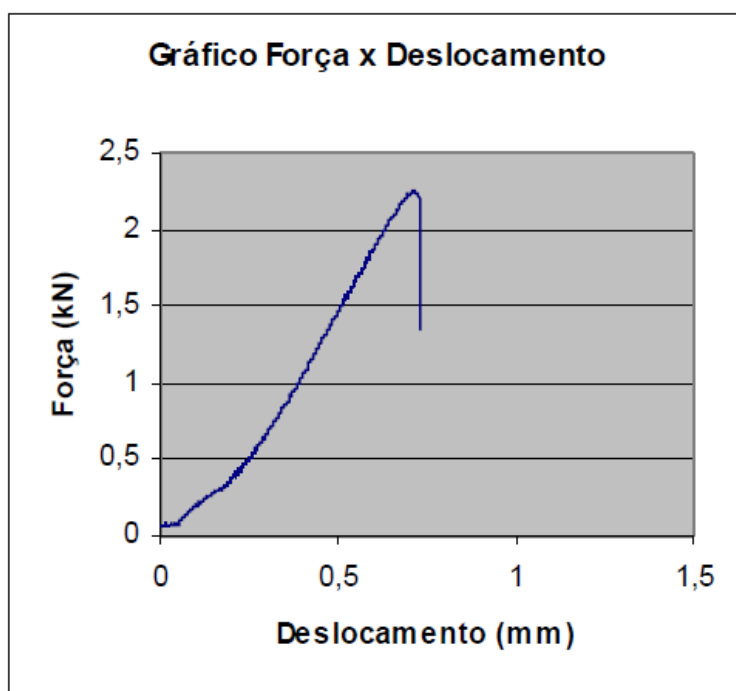


Figura 23 – Gráfico de flexão-deformação para o concreto de referência (SANTOS, 2005).

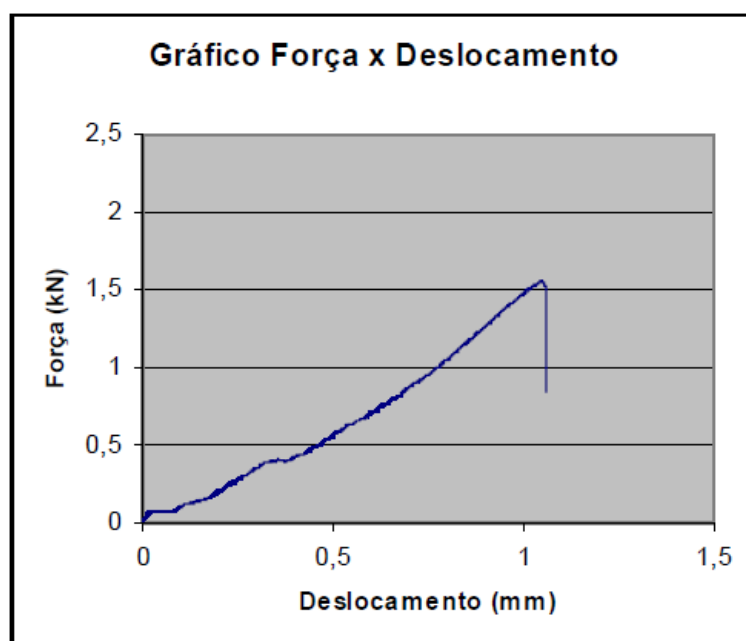


Figura 24 – Gráfico de flexão-deformação para o CAB (SANTOS, 2005).

Segundo Freitas (2007), com a adição de partículas de borracha ao concreto a resistência à compressão axial tendeu a diminuir e os resultados dos ensaios aos 3, 7, 28 e 90 dias (idades) podem ser analisados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial (FREITAS, 2007).

Idades de cura (dias)	Resistência à compressão axial simples dos concretos (MPa)									
	CR	sd	CAB 5	Sd	CAB 10	sd	CAB 15	sd	CAB 20	Sd
3	21,30	0,5	16,00	0,21	13,00	0,00	8,90	0	4,4	0,15
7	26,40	0,28	20,10	0,28	16,30	0,28	15,2	0,07	12,2	0,28
28	34,60	0,72	27,10	0,85	20,30	0,57	19,20	0,28	15,6	0,35
90	41,90	1,13	31,50	0,56	26,70	0,12	21,10	0,70	18,00	1,98

Para os CAB's 5 e 10, o concreto perdeu 21,7% e 41,3%, respectivamente, da sua resistência à compressão inicial. Para as adições de 15% e 20% o concreto perdeu 45% e 48% da resistência à compressão axial em relação com concreto de referência (CR). Os CAB's 15 e 20 apresentaram maior taxa de desenvolvimento da resistência à compressão dentre os traços para as primeiras idades. O desenvolvimento da resistência entre 7 e 28 dias foi semelhante para todos os concretos dosados. As perdas de resistência apresentadas pelos CAB 5 e CAB 10 permaneceram percentualmente constantes ao longo do tempo. Já os traços CAB 15 e CAB 20 apresentaram grandes perdas aos 3 dias, que posteriormente diminuíram e permaneceram constantes para idades mais avançadas (FREITAS, 2007).

Freitas (2007) afirmou que a resistência à tração diminuiu, podendo tal propriedade estar atribuída às diferenças entre os materiais trabalhados, polímeros e cerâmicos, podendo os primeiros ser considerados defeitos internos à matriz de concreto e, também, à diminuição do consumo de cimento e ao aumento do teor de ar no concreto (ver Tabela 12 e Figuras 25 e 26).

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial (FREITAS, 2007).

Traço de Concreto	Resistência à Compressão (MPa)	Sd (MPa)	Resistência à Tração (MPa)				Módulo de elasticidade (Gpa)	Sd (MPa)
			Por compressão diametral	sd	Na flexão	sd		
CR	34,6	0,72	2,85	0,12	4,05	0,35	34,28	1,70
CAB 5	27,1	0,85	2,55	0,28	3,25	0,21	28,59	3,51
CAB 10	20,30	0,57	2,25	0,07	2,80	0,00	25,27	1,56
CAB 15	19,20	0,28	2,30	0,14	2,80	0,00	23,28	1,02
CAB 20	15,60	0,35	2,10	0,00	2,90	0,00	19,46	1,07

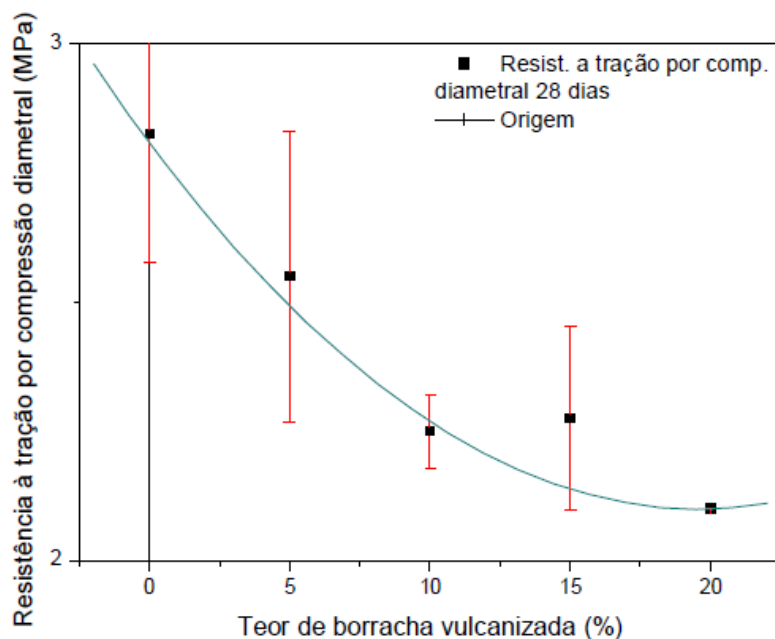


Figura 25 – Gráfico de resistência à tração por compressão diametral (FREITAS, 2007).

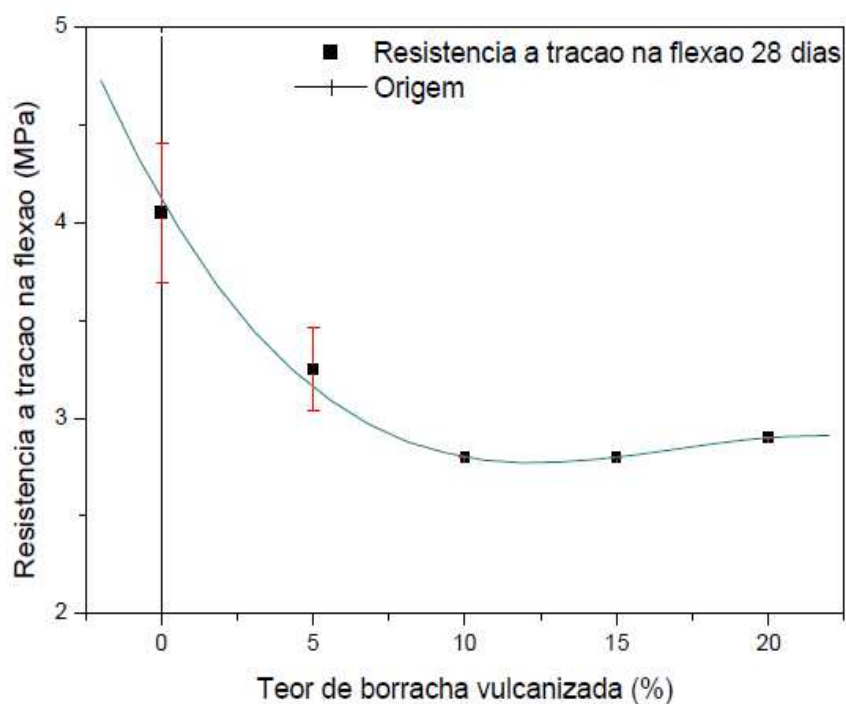


Figura 26 – Gráfico de resistência à tração na flexão (FREITAS, 2007).

Freitas (2007) realizou análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), que permitiu verificar a porosidade e a aderência entre a pasta de cimento e os agregados. Como pode ser visualizado na Figura 27, com o aumento na adição de fibras de borracha houve um aumento na quantidade de pequenos poros, bem como aumento na quantidade de ar no

concreto.

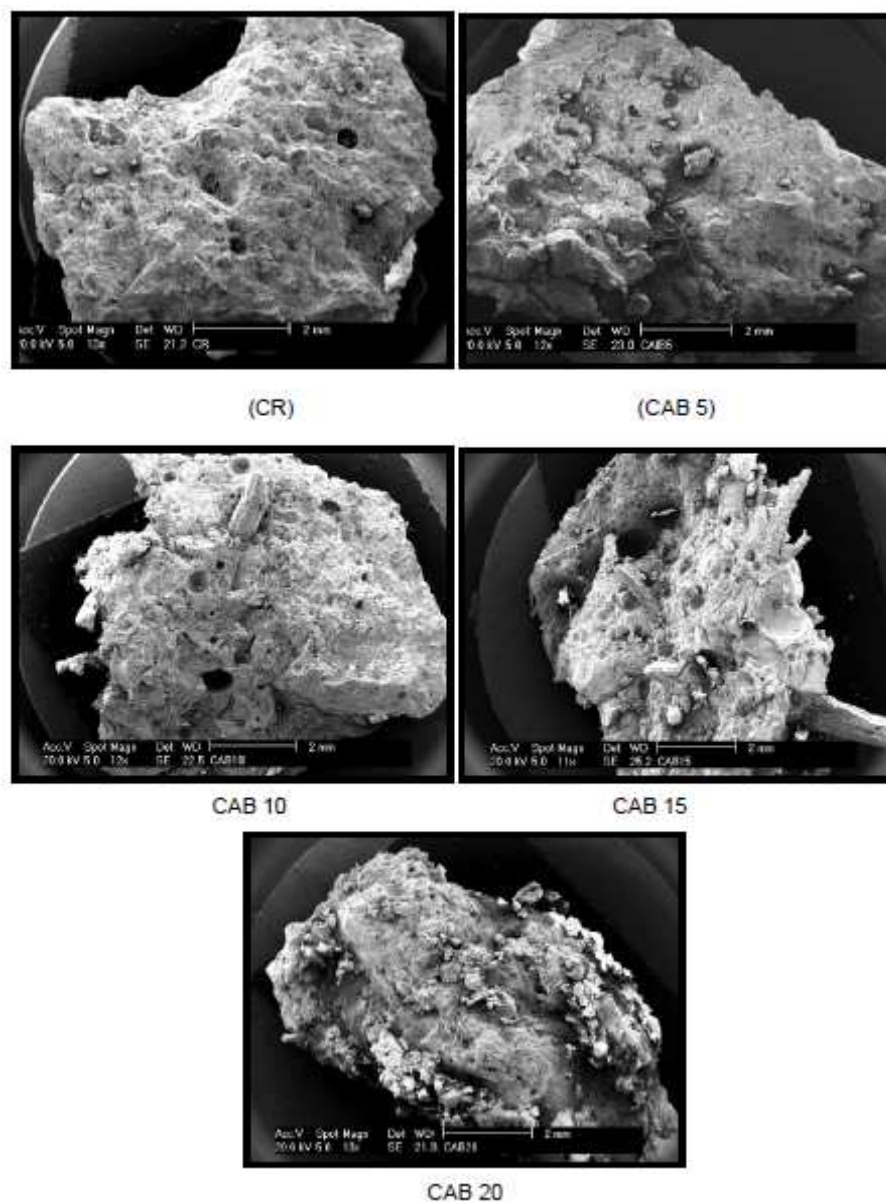


Figura 27 – Micrografias por MEV das superfícies de CP's rompidos (FREITAS, 2007).

No entanto, nas micrografias, obtidas por MEV, não demonstraram nenhuma interface visível entre o MR e o CR, o que corrobora o resultado dos ensaios mecânicos de que há boa aderência entre estes materiais, ou seja, as partículas de borracha vulcanizada apresentam-se totalmente envolvidas pela pasta de cimento e a região de interface entre os materiais não pôde ser visualizada indicando uma aderência satisfatória entre a pasta de cimento e as raspas de borrachas utilizadas.

Giacobbe (2008) substituiu teores de 7,5% e 15% de agregado natural por resíduo de

borracha, em diferentes traços, e afirma que os resultados do ensaio de compressão apresentaram o mesmo comportamento verificado pelos autores pesquisados, ou seja, valores decrescentes com o aumento do teor de borracha no concreto e com aumento da relação água/cimento (ver Figura 28).

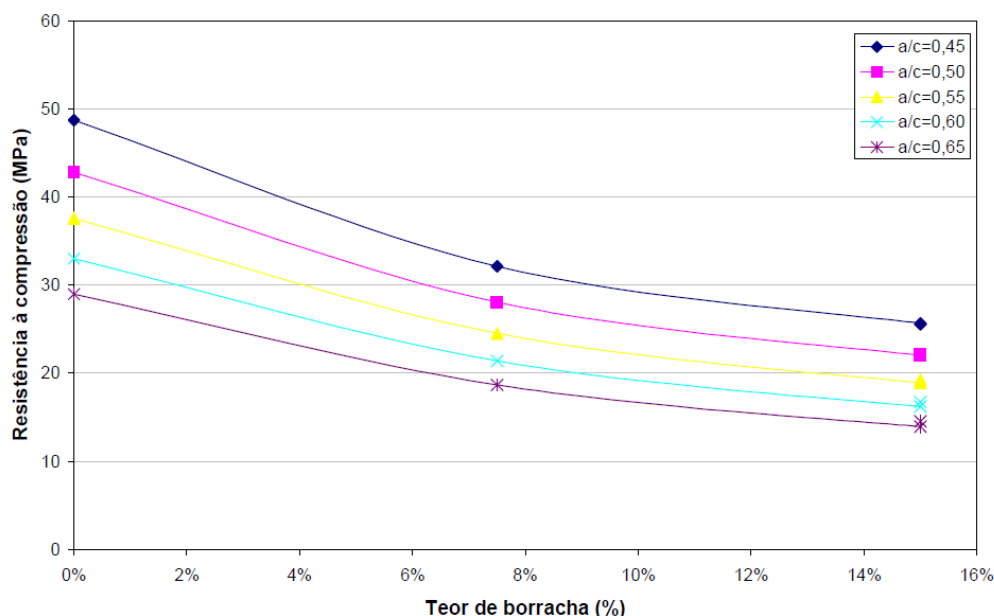


Figura 28 – Relação entre resistência à compressão, teor de borracha e relação água/cimento (GIACOBBE, 2008).

Aos 28 dias, o concreto com 7,5% de borracha apresentou queda de resistência para os traços 1:4, 1:5 e 1:6 de 30,5%, 39,4% e 38,7%, respectivamente, o concreto com 15% de borracha mostrou reduções de 53,1%, 60,1% e 60,9%, enquanto que o concreto com 15% de borracha e relação água/cimento igual ao concreto de referência indicou reduções de 47,8%, 48,2% e 50% (GIACOBBE, 2008).

Ainda segundo o autor, as reduções da resistência mecânica, provavelmente, estão relacionadas com o comportamento da borracha na matriz que atua como um vazio. O mesmo comportamento foi verificado na resistência à tração na flexão, no entanto, com menor impacto (ver Figura 29). Não se utilizou o tratamento prévio das borrachas (solução de hidróxido de sódio – NaOH), uma vez que pesquisas neste sentido verificaram que este procedimento pouco interfere nos resultados mecânicos, apenas resulta em melhoria na tenacidade do compósito.

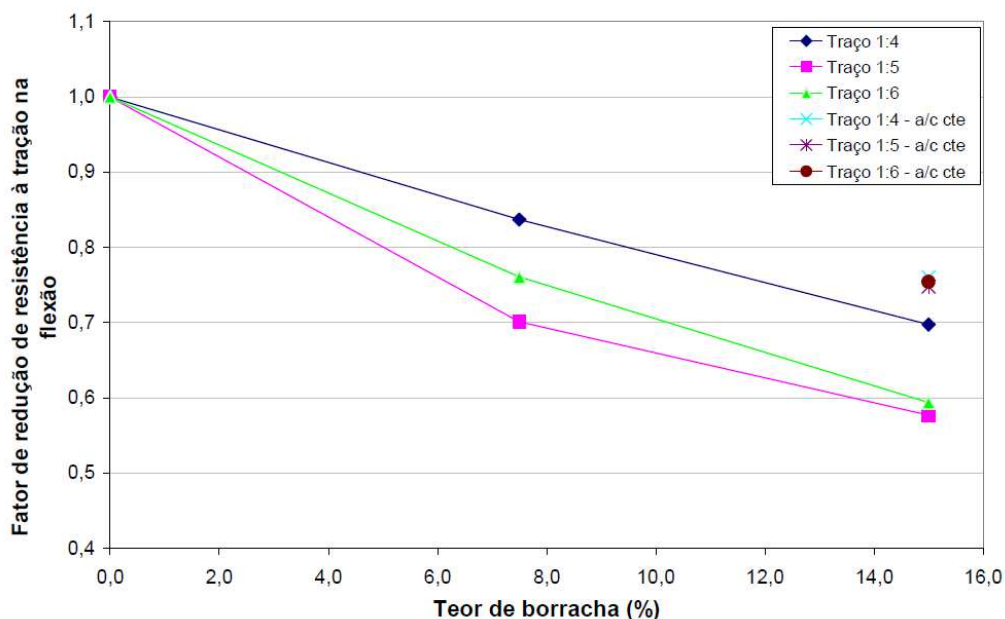


Figura 29 – Relação entre resistência à tração e teor de borracha (GIACOBBE, 2008).

A Figura 30 mostra a relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão, obtida com os resultados dos ensaios. Verifica-se que quanto maior o teor de borracha, maior é a resistência à tração em relação à resistência à compressão. Tradicionalmente, considera-se que em concretos convencionais a resistência à tração corresponde a 10% da resistência à compressão (GIACOBBE, 2008).

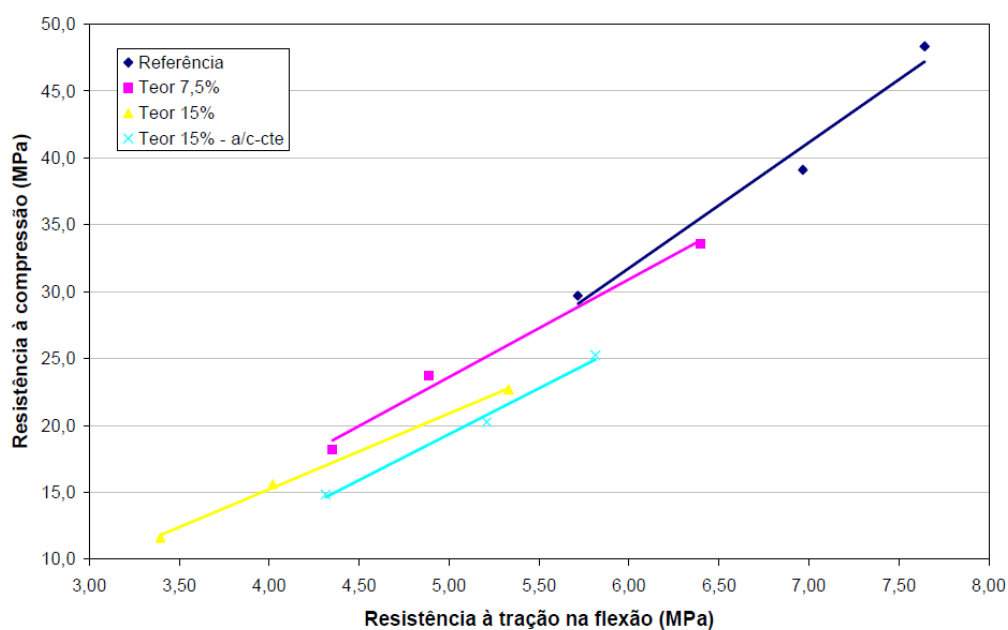


Figura 30 – Relação entre resistência à compressão e resistência à tração (GIACOBBE, 2008).

Quanto à tenacidade, Giacobbe (2008) verificou que nos concretos com borracha é superior a do concreto de referência. Porém, com tendência ao decréscimo com o aumento do teor de borracha. O autor ainda afirma ser provável que a redução esteja intrinsecamente relacionada com o aumento da porosidade do compósito, resultando uma matriz resistente, facilitando o desprendimento das partículas de borracha do concreto.

Para Khallo *et al.* (2008), as misturas de concreto com adição de borracha no estado fresco com concentrações crescentes do teor de borracha apresentam pesos unitários mais baixos em relação ao concreto referência. A trabalhabilidade do CAB com partículas maiores de borracha é reduzida, no entanto, com finas partículas exibe uma capacidade aceitável em relação ao concreto convencional.

A substituição de agregados minerais por partículas de borracha de pneus no concreto resulta em considerável redução de resistência, não recomendando concentrações superiores a 25% de borracha. O pré-tratamento da superfície da borracha deve ser considerado para melhorias das propriedades mecânicas (KHALLO *et al.*, 2008).

O comportamento mais dúctil é observado por Khallo *et al.* (2008) no concreto contendo borracha, que ao contrário do convencional, apresenta estado de falha (ruptura) mais lento e não causa desprendimento nos elementos amostrados, ou seja, a largura da fissura no concreto borracha é menor e a propagação de sintomas de falhas é mais gradual e uniforme.

Albuquerque (2009) verificou que as amostras contendo teores de borracha superiores a 10% apresentaram uma redução contínua da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral, do módulo de elasticidade e da massa específica, relativos aos 91 dias de idade, como pode ser observado nas Figuras 31, 32, 33 e 34.

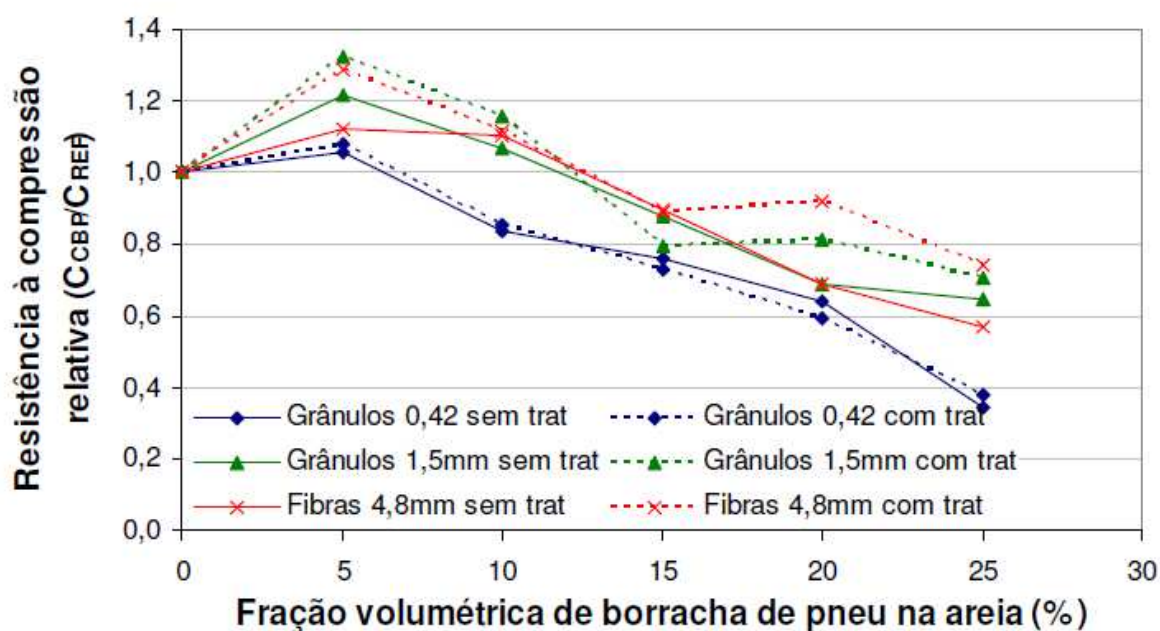


Figura 31 – Resistência à compressão relativa das diversas dosagens de CAB em relação à referência (ALBUQUERQUE, 2009).

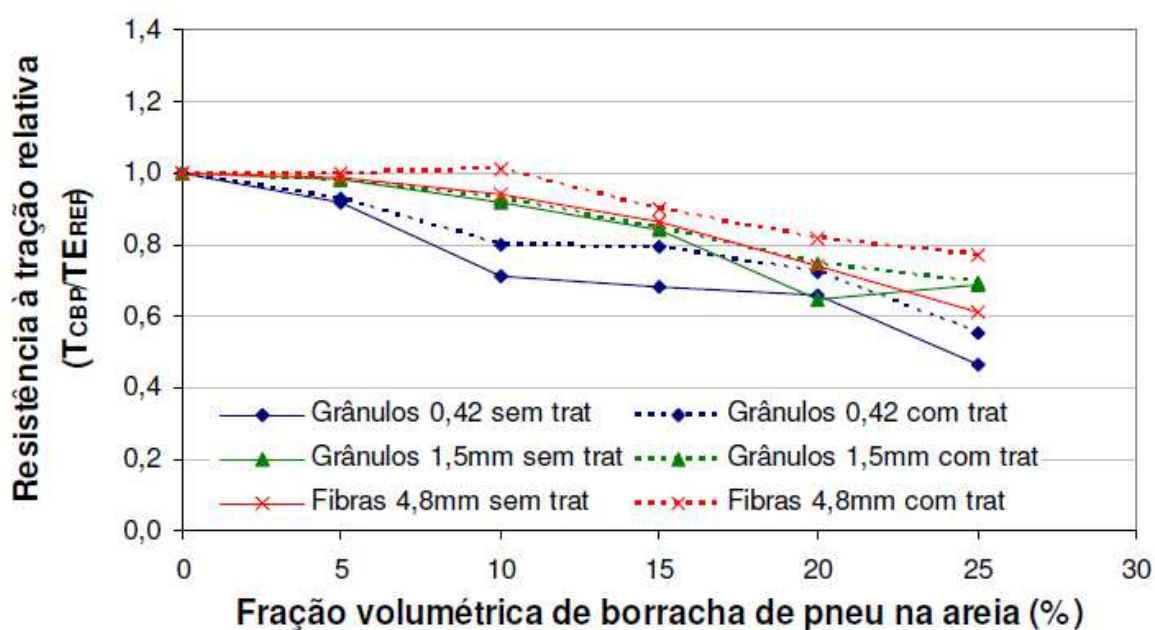


Figura 32 – Resistência à tração por compressão diametral das diversas dosagens de CAB em relação à referência (ALBUQUERQUE, 2009).

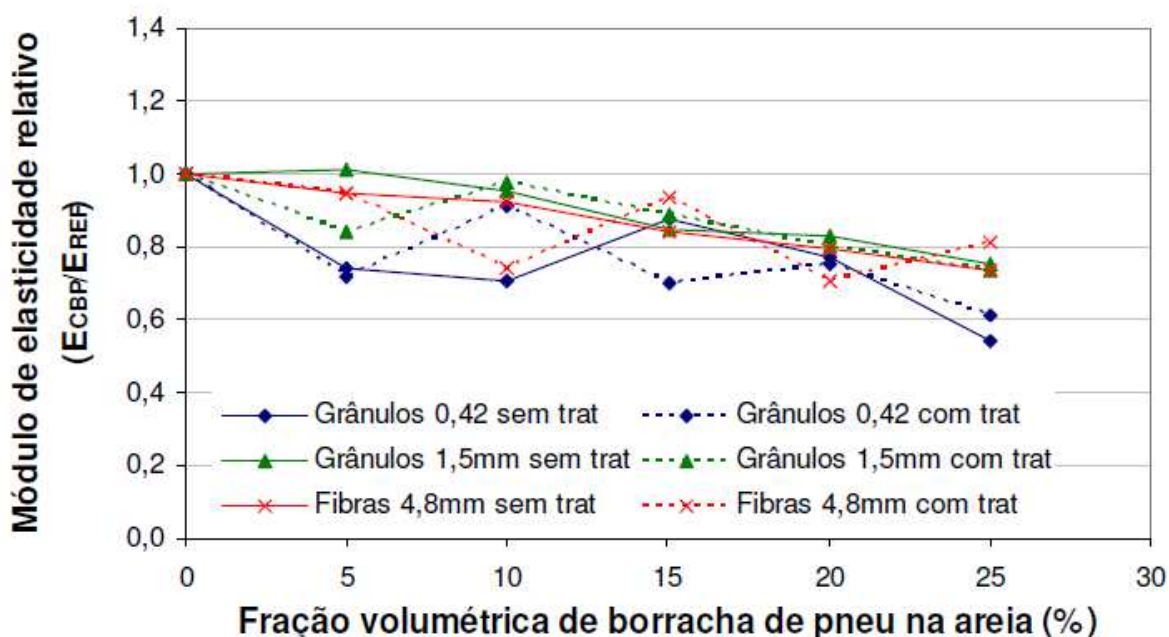


Figura 33 – Módulo de elasticidade das diversas dosagens de CAB em relação à referência (ALBUQUERQUE, 2009).

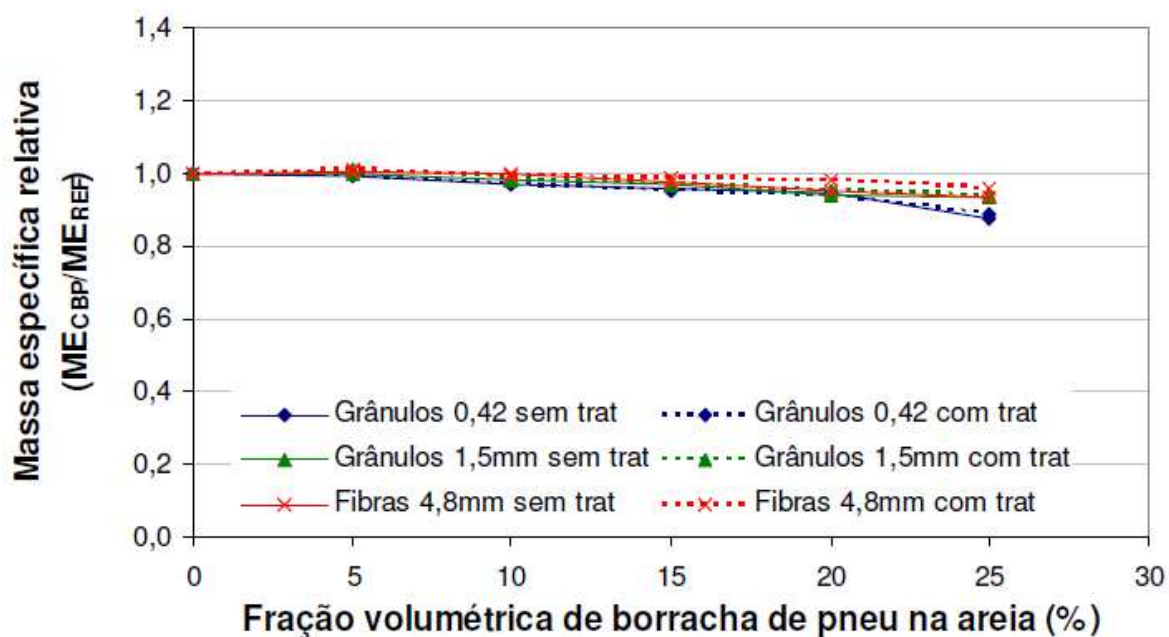


Figura 34 – Massa específica relativa das diversas dosagens de CAB em relação à referência (ALBUQUERQUE, 2009).

De maneira geral, Albuquerque (2009), verificou que as dosagens contendo partículas de 1,5 mm e 4,8 mm, com e sem tratamento superficial da borracha, apresentam valores de resistência à compressão, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral satisfatórios, quando utilizadas em teores de até 10%. Teores crescentes de borracha levaram

a um aumento gradual do teor de ar incorporado, principalmente no caso das partículas de menor dimensão, o que pode ser a principal causa da redução das propriedades mecânicas e da massa específica.

Além disso, o aumento no teor de borracha reduziu a trabalhabilidade do concreto, causando uma demanda crescente de aditivo superplastificante, a fim de que se possa manter a trabalhabilidade sem alterar a relação água/cimento (ALBUQUERQUE, 2009).

Granzotto (2010) também afirma que com a adição de borracha ao concreto na resistência à compressão tendeu a diminuir (ver Figuras 35 e 36), este efeito pode ser verificado em outros trabalhos encontrados na literatura, que citam a perda de resistência devido à adição de borracha.

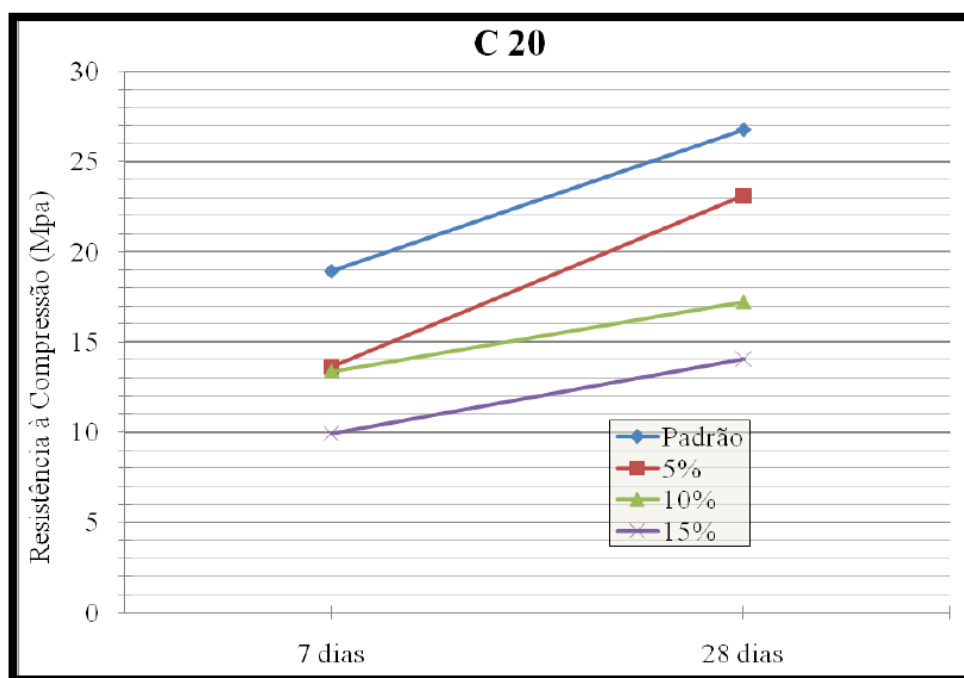


Figura 35 – Resistência à compressão C20 com substituição de areia natural (GRANZOTTO, 2010).

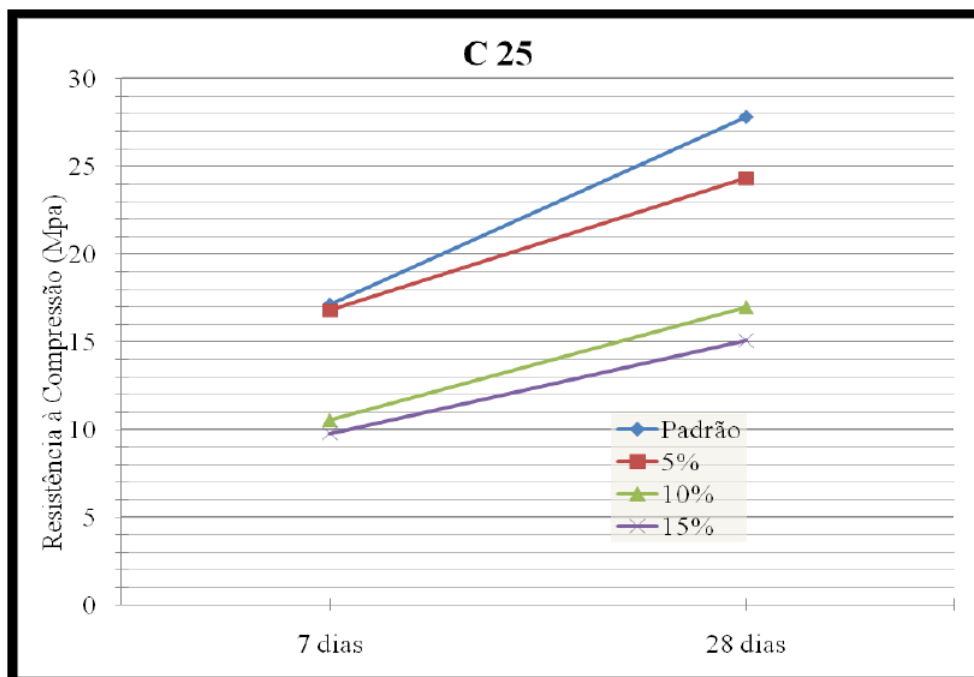


Figura 36 – Resistência à compressão C25 com substituição de areia natural (GRANZOTTO, 2010).

Para os CB's de Classe 20, os compósitos formado com a substituição de 5 e 10% de areia por borracha, verificou-se perda significativamente baixa, entretanto, para a substituição de 15% a perda verificada foi maior quando comparado ao compósito padrão de mesma classe. Já na análise dos CB's de Classe C25, os valores apresentados pelos compósitos de concreto com substituição parcial do agregado miúdo natural por resíduo de borracha, apresentaram perdas menores se comparados a Classe C20, sendo significativamente baixas para o teor de 5%. A perda de resistência verificada com a incorporação da borracha de pneu pode ser atribuída além do módulo de deformação elástica, à má aderência entre a pasta de cimento e a borracha. (GRANZOTTO, 2010).

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, encontrados por Granzotto (2010), estão mostrados na Figura 37 e 38.

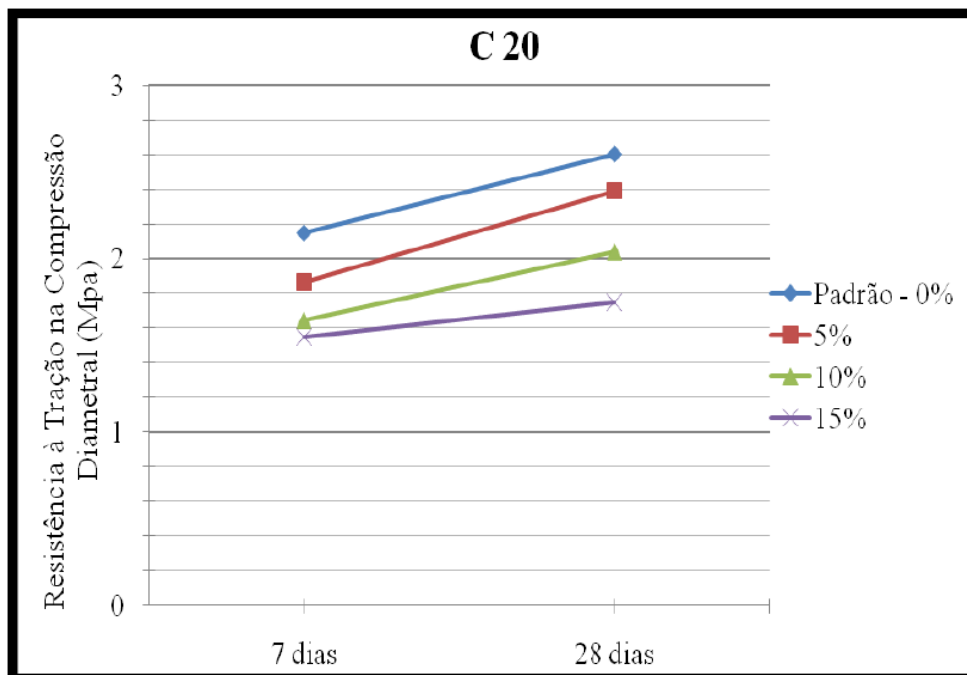


Figura 37 – Evolução da resistência à tração C20 com substituição de areias (GRANZOTTO, 2010).

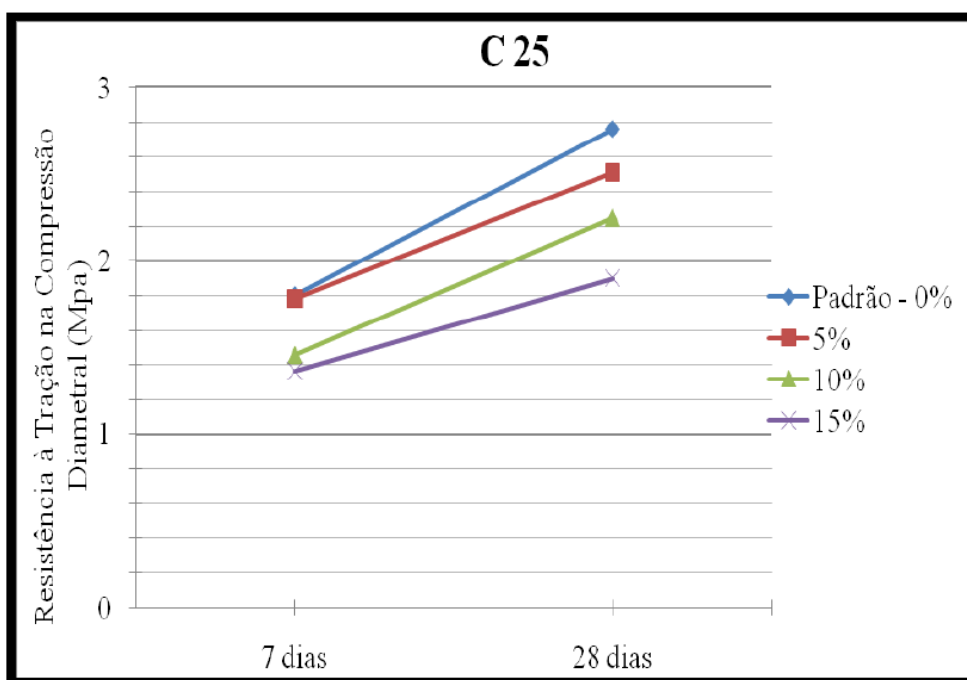


Figura 38 – Evolução da resistência à tração C25 com substituição de areias (GRANZOTTO, 2010).

Para os concretos com substituição parcial de areia por borracha, na classe C20 do concreto, as perdas de resistência à tração por compressão diametral, em relação ao concreto padrão, foram respectivamente baixas apresentando percentual elevado para o teor de 15% de borracha incorporada. Ao analisar os percentuais, nota-se que a menor perda na resistência à

tração inicial é apresentada pelo menor percentual de substituição, 5% (GRANZOTTO, 2010).

Para Yung *et al.* (2013), a resistência à compressão do CAB foi melhor quando adicionados 5% do pó de borracha de pneu que passaram pela peneira #50 (aumentando 1-10%), o que significou que a adição do pó de borracha de pneu pode atender aos requisitos de desempenho de segurança dispostos na legislação (ver Figura 39). Verificou também que, não procede a informação de que quanto menor o resíduo de borracha, maior a resistência à compressão.

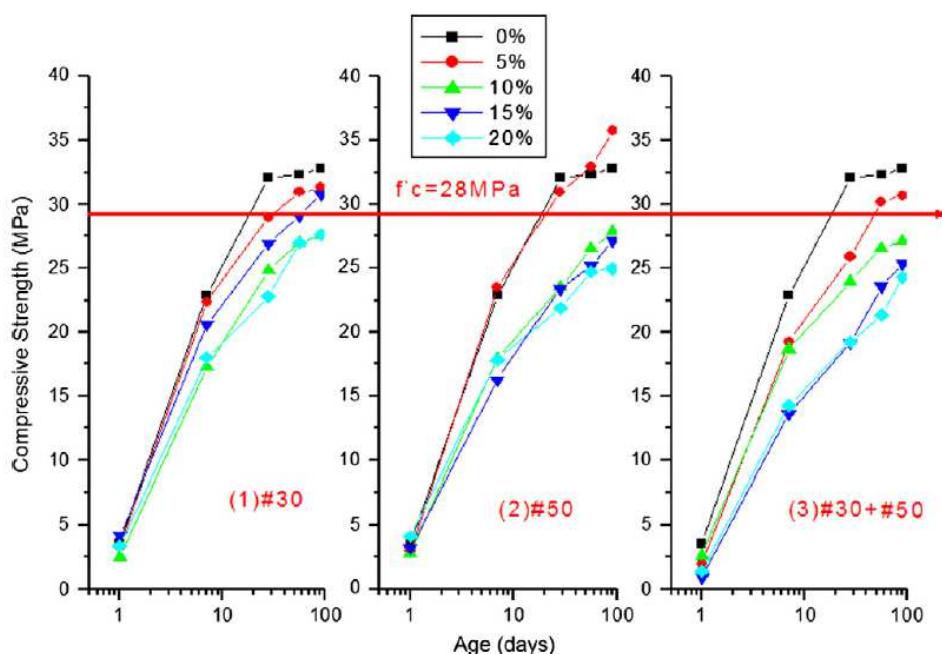


Figura 39 – Resistência à compressão do concreto borracha auto-compactante (YUNG *et al.*, 2013).

Para Lijuan *et al.* (2013) a adição de borracha de pneu no concreto enfraquece a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade do concreto. Entretanto, a mistura de borracha pode aumentar a tensão final do concreto, à medida que o teor de borracha aumenta e o tamanho das partículas diminui. Quando o teor de borracha for inferior a 8%, o concreto com adição de borracha (CAB) pode ser usado como material estrutural para o projeto de estruturas sísmicas.

Segundo Silva *et al.* (2015), as misturas de concreto apresentaram consistência adequada para aplicação de blocos de pavimentação tátil, contudo, com o aumento do teor de borracha de pneus, foi observada uma redução que deixou o concreto mais seco. Com 40% e

50% de substituição de areia natural por borracha triturada, a redução foi de 94% e 90%, respectivamente, em comparação com o concreto convencional.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão são mostrados na Figura 40 e apresentam redução da resistência. Quanto maior o teor de borracha de pneu, menor a resistência, com exceção do concreto com teor de 10% de pneus que apresentou aumento de 8,5% na resistência à compressão aos 7 dias e 2,2% aos 28 dias. Esta melhoria está relacionada à quantidade adequada de borracha. Para 50% de substituição, a redução da resistência à compressão foi de 18% aos 7 dias e 22% aos 28 dias (SILVA *et al.*, 2015).

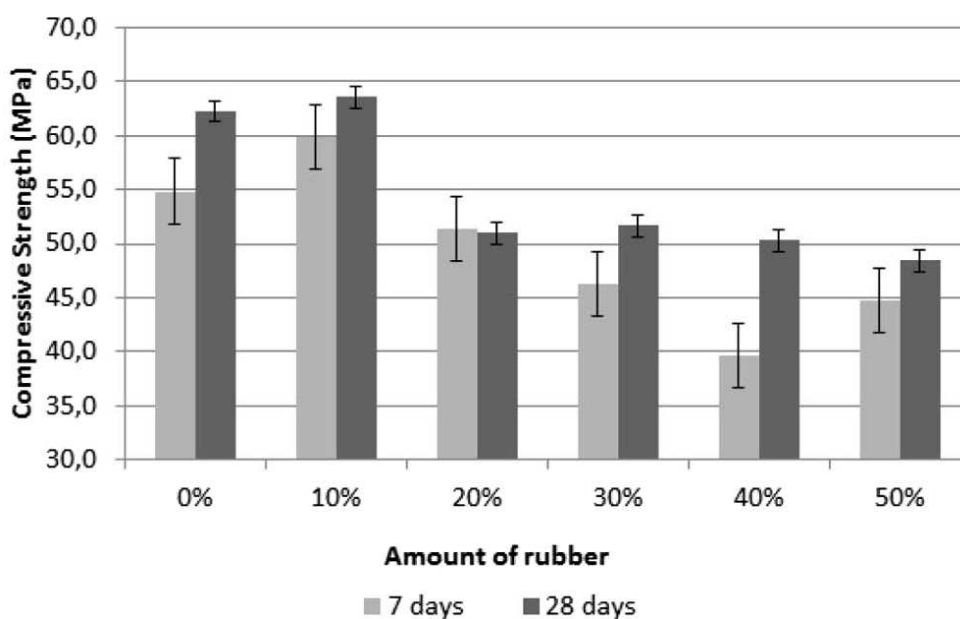


Figura 40 – Resultado do ensaio de resistência à compressão (SILVA *et al.* 2015).

Quanto à resistência à flexão, houve diminuição com o aumento do teor de borracha, sendo mais significativa com 50% de substituição, atingindo aproximadamente 32% de redução em relação ao concreto convencional. A Figura 41 mostra os resultados da resistência à flexão para o concreto convencional e para todas as misturas de concreto com adição de borracha de pneu. No geral, todas as misturas de concreto obtiveram excelentes valores de resistência à flexão. Com 50% de substituição, a média aos 28 dias foi de 6,95 MPa (SILVA *et al.*, 2015).

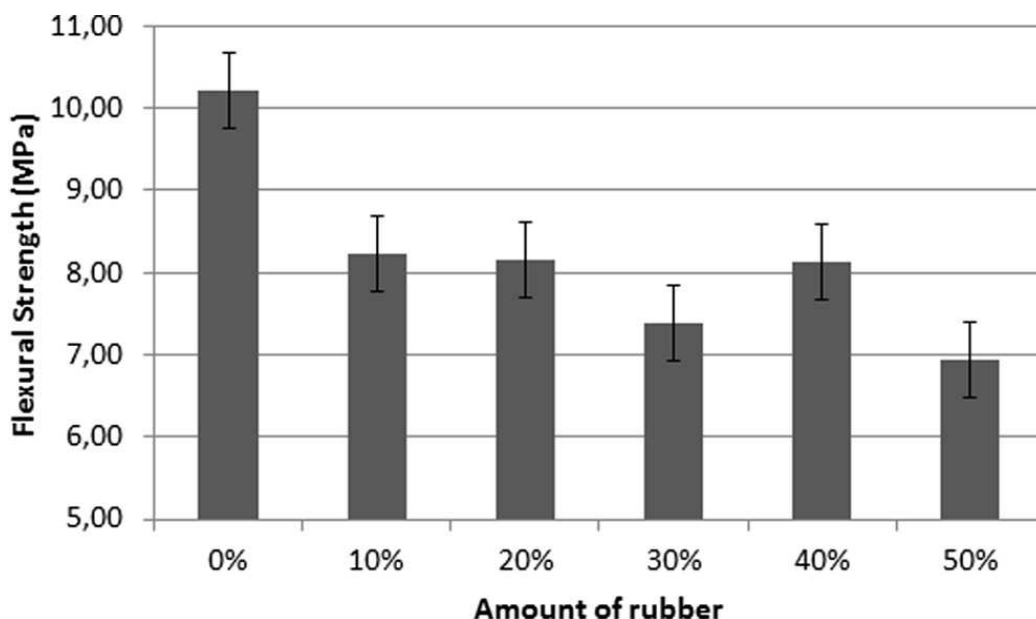


Figura 41 – Resultado do ensaio de resistência à flexão (SILVA *et al.* 2015).

Silva *et al.* (2015) através da análise da microestrutura do concreto com adição de borracha de pneu em comparação com o concreto convencional (ver Figura 42), observou-se aumento de microporos no concreto, que resulta em pontos fracos.

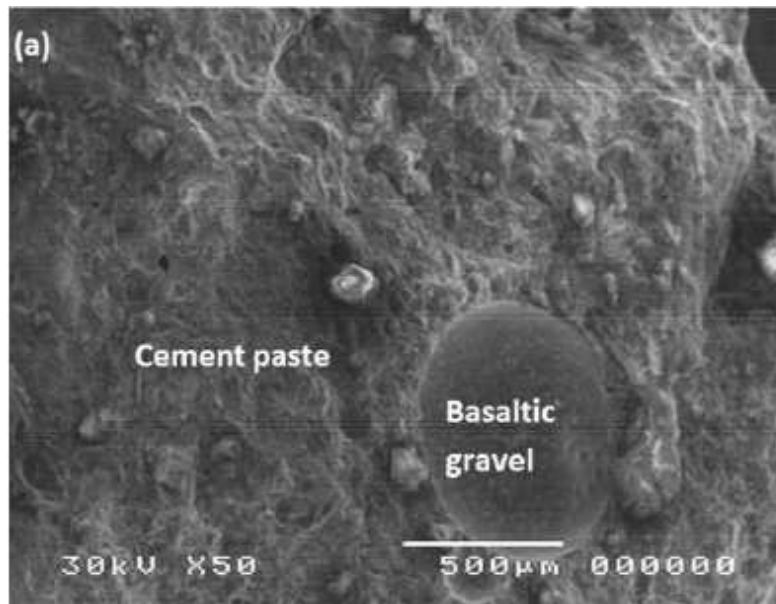


Figura 42 – Imagem de MEV do concreto com adição de borracha (SILVA *et al.* 2015).

Ainda segundo o autor, no concreto com adição de borracha de pneu é possível verificar uma pasta de cimento mais porosa em torno do agregado de borracha (ver Figura 43) e a zona de transição entre o agregado de borracha e a pasta de cimento (ver Figura 44).

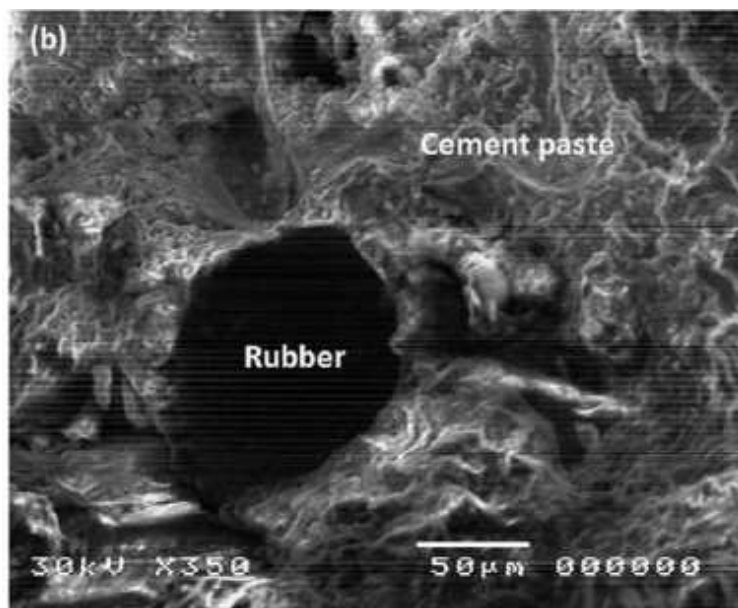


Figura 43 – Imagem de MEV de concreto com adição de 10% de borracha.

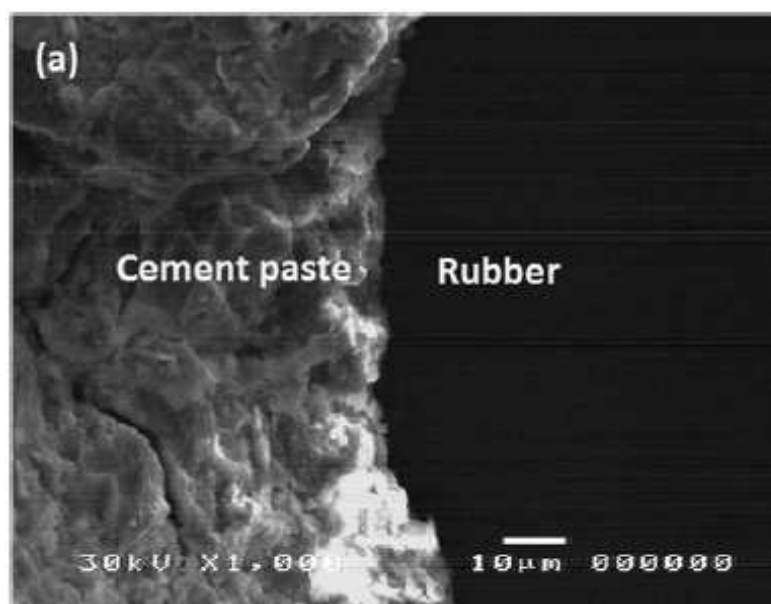


Figura 44 – Imagem de MEV de concreto com adição de 30% de borracha – A zona de transição entre borracha e pasta de cimento (SILVA *et al.* 2015).

Através da Figura 45 é possível observar uma imagem de concreto com 50% de substituição de areia por borracha de pneus, onde se pode identificar a presença de fissuras na zona de transição. Já na Figura 46 é possível verificar que as fibras de borracha foram completamente envolvidas por pasta de cimento (SILVA *et al.*, 2015).

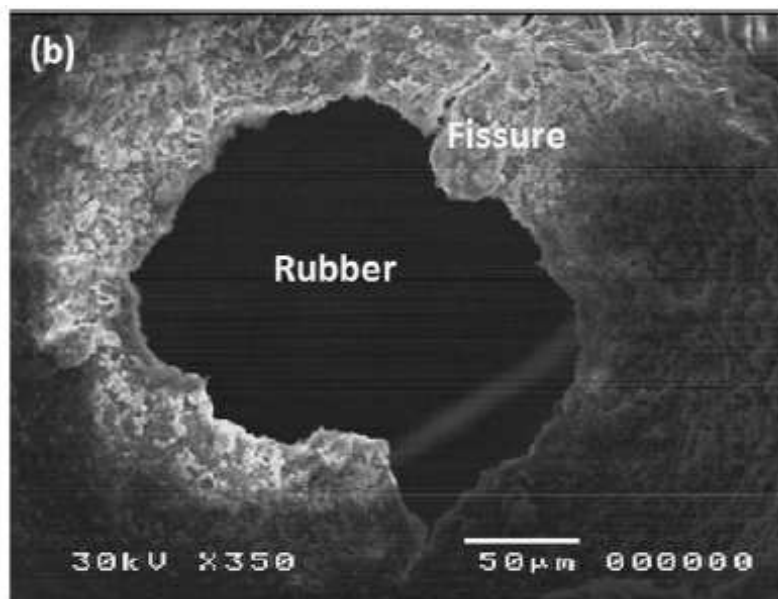


Figura 45 – Microestrutura de imagem de concreto com 50% de borracha analisada por MEV (SILVA *et al.* 2015).

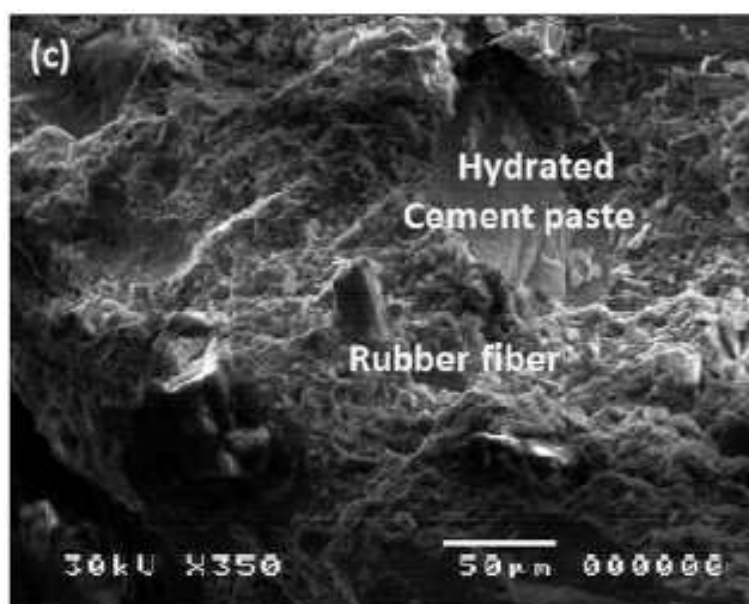


Figura 46 – Fibra de borracha totalmente envolvida por pasta de cimento examinada por MEV (SILVA *et al.* 2015).

Silva *et al.*, (2015) afirma que a MEV mostrou que a borracha foi totalmente cercada pela pasta de cimento, formando microporos que provocam fraquezas em torno do agregado de borracha, o que provoca a diminuição da resistência à compressão. Entretanto, afirmou também, que o desempenho dos blocos de pavimentação tátil foi inteiramente satisfatório, mostrando que é viável usar pneus de borracha como agregados em concreto para esta aplicação.

Os resultados dos ensaios de compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à flexão, encontrados por Silveira *et al.* (2016), estão representados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à flexão (SILVEIRA *et al.*, 2016).

TRAÇO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPA)	DESVIO-PADRÃO	MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO (GPA)	DESVIO-PADRÃO	RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPA)	DESVIO-PADRÃO
T1	32,34	± 1,26	35,758	± 0,900	4,69	0,28
T2	18,03	± 2,98	25,359	± 1,406	2,68	0,32
T3	29,7	± 1,93	32,078	± 1,122	4,25	0,41
T4	23,2	± 1,62	30,476	± 2,804	-	-
T5	24,1	± 2,12	30,503	± 0,910	-	-
T6	23,6	± 2,26	29,210	± 1,260	-	-
T7	25,9	± 2,93	31,151	± 1,444	-	-
T8	25,1	± 1,65	30,371	± 2,812	-	-

Segundo o autor, a partir dos resultados exibidos na Tabela 13, é possível observar que houve redução do módulo de elasticidade, portanto pode-se afirmar que, a um mesmo nível de tensão, dentro do regime elástico do material, o concreto com borracha deformará mais que o concreto sem borracha, o que pode ser favorável para determinadas aplicações, como quando o elemento está sujeito à impacto e cargas dinâmicas.

A comparação dos resultados obtidos mostrou que a adição de borracha provoca significativa redução na resistência mecânica do concreto, e que para obter a mesma resistência do concreto convencional, faz-se necessário acrescentar cerca de 30% a mais de cimento ao concreto com borracha, ou seja, faz-se necessário um expressivo aumento do consumo de cimento para que o concreto modificado com borracha apresentasse resistência equivalente ao concreto convencional (SILVERIRA *et al.* 2016).

Segundo Silveira *et al.* (2016) para a análise da fadiga, foi considerado o critério das relações de tensões (RT). Os resultados mostraram que para uma menor relação de tensão, o concreto sem borracha apresenta um número maior de ciclos antes da ruptura do que o concreto com borracha. Com o aumento dos níveis da relação de tensões, o concreto com borracha, com mesmo consumo de cimento que o concreto convencional apresentou melhor desempenho médio. Devido ao alto valor do desvio padrão nos ensaios de fadiga, não foi

possível observar se o concreto com borracha se mostrou sensível à variação de relação de tensões, diferente do material sem borracha que mostrou maior sensibilidade para essas mesmas variações (75%, 80% e 85%). Foi observado também que o concreto com borracha e maior consumo de cimento obteve o pior resultado dentre todos.

O autor também afirma que, tal fato deve ter ocorrido porque o acréscimo de cimento aumentou o módulo de elasticidade tornando o concreto mais rígido, e a presença da borracha deve ter aumentado o índice de vazios. Além disso, este aumento no consumo de cimento inviabiliza a proposta de redução da poluição pelo aproveitamento das sobras de pneus descartados, além de encarecer o produto final. Por outro lado, a redução do módulo de elasticidade, constatada nos testes realizados com o concreto com borracha sem acréscimo de cimento, mostra que a presença da borracha aumenta a deformação para um mesmo nível de tensão, o que é bastante desejável em situações que envolvem ações de impacto e vibrações (SILVERIRA *et al.* 2016).

Para Girskas e Nagrockiene (2017) modificar as características de concreto incorporando na sua formulação de borracha triturada de pneus, reduz significativamente a resistência à compressão do material. Os resultados mostraram que a substituição de 20% em peso de agregado fino com fração 2/4 e fração 4/6 de borracha triturada faz com que a resistência à compressão caia 68% e 61,3%, respectivamente (ver Figura 47).

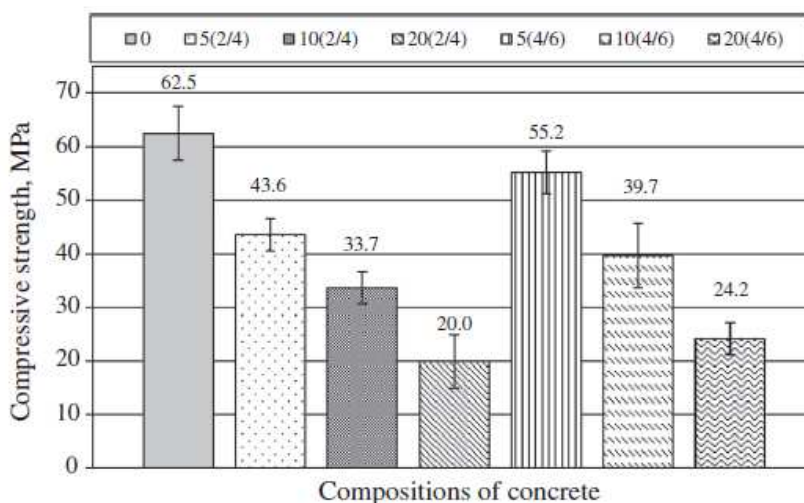


Figura 47 – Resistência à compressão do concreto modificado com borracha (GIRSKAS e NAGROCKIENE, 2017).

O concreto referência sem adição de borracha obteve a média mais alta de resistência à compressão (62,5 MPa). Com adição de 5% de borracha o valor da resistência à compressão

caiu para 43,6 MPa, com 10% caiu para 33,7 MPa e com 20% caiu para 20,0 MPa, com fração 2/4. Já no concreto com fração de 4/6, os valores de redução para 5%, 10% e 20%, caíram para 55,2 MPa, 39,7 MPa e 24,2 MPa, respectivamente. Portanto, o teste revelou valores superiores de queda da resistência à compressão para a fração 2/4 (GIRSKAS e NAGROCKIENE, 2017).

2.6. Alternativas de incorporação à matriz de concreto

O concreto, por ser um material compósito e heterogêneo, permite a incorporação de resíduos, seja pela adição simples ou decorrente da substituição parcial ou total de seus agregados, ainda na fase de mistura. Essa facilidade de incorporação permite aos pesquisadores desenvolver alternativas à adição de borracha de pneu, como por exemplo, resíduos de construção e demolição (RCD), adições minerais, EVA, dentre outros.

De acordo com Leite (2001) a reciclagem dos resíduos tem se mostrado uma alternativa viável para controlar ou minimizar danos causados pelo consumo indiscriminado de matéria prima e energia e pelo alto volume de resíduos gerados. Neste sentido, a construção civil tem se mostrado um setor promissor na utilização de resíduos de outras indústrias ou seu próprio resíduo, prática considerada por muitos pesquisadores como a forma mais eficaz de tentar fechar o ciclo de vida dos materiais utilizados na construção civil.

A resistência à compressão dos concretos é muito influenciada pela porosidade dos materiais que o compõe e pela porosidade da zona de transição. O RCD obedeceu ao comportamento da lei de Abrams, ou seja, quanto maior a relação a/c, menor a resistência do concreto. Também, confirmou-se que o grau de hidratação do concreto influencia os resultados de resistência à compressão do concreto com RCD, da mesma forma que ocorre com o concreto convencional (LEITE, 2001).

Segundo Leite (2001) o estudo da resistência à tração dos concretos com RCD apresentou uma tendência à redução dos valores de resistência, com o aumento da relação a/c. Esta redução foi cerca de 26% para a resistência à tração na flexão e de 42% para a tração por compressão diametral.

De forma geral, Leite (2001), concluiu que o uso de agregados reciclados (RCD) é perfeitamente viável para produção de concretos, pelo menos do ponto de vista das

propriedades mecânicas avaliadas em seu estudo. No entanto, é importante ressaltar que, para relações a/c baixas, a combinação de duas frações de agregados reciclados merece atenção especial, visto que foram observadas reduções das propriedades mecânicas.

Outro material que vem despertando o interesse de pesquisadores e empresários no desenvolvimento de novos materiais para a construção civil é o aproveitamento do resíduo de E.V.A. (*Ethylene Vinil Acetate*), polímero muito utilizado na indústria calçadista para a confecção de solados e palmilhas internas de calçados. Devido a sua baixa massa unitária ($\pm 180 \text{ kg/m}^3$), o material vem sendo direcionado para o desenvolvimento de um agregado leve, a ser utilizado na produção de concreto e de componentes de vedação na construção civil (GARLET, 1998).

Segundo Garlet (1998), os resultados mostraram um novo tipo de concreto leve, cuja principal propriedade é a grande ductilidade, devido às propriedades elásticas do agregado de EVA. Como aplicações em potencial são apontadas o uso como contrapiso de lajes, entrepisos para atenuação do ruído de impacto, isolamento térmico, absorção acústica, além da possibilidade de produção de artefatos de concreto, desde que a resistência à compressão seja adequada, na dosagem do concreto.

Na pesquisa realizado por Isaia e Gastaldini (2004), acerca da investigação de concreto com baixo consumo de cimento e alto conteúdo de adições minerais (cinzas volantes, escória de alto forno e escória com cinza volante), os resultados evidenciaram que, à medida que se aumenta o teor de adições minerais de 50 para 90% os índices médios de durabilidade decresceram 34% para 40 MPa e 46% para 55 MPa. No entanto, o consumo de energia decresceu fortemente com o aumento do teor de adição mineral, haja vista que o cimento, isoladamente, contém mais de 80% do total da energia embutida no concreto.

Os índices médios de desempenho de durabilidade, custo, consumo de energia e emissão de CO_2 , em conjunto, mostraram as mesmas tendências de diminuição à medida que aumentou o teor de adições minerais na matriz de concreto. Dessa forma, os resultados da pesquisa revelaram que a utilização de altos teores de adições minerais possui viabilidade técnica e econômica, pois existe disponibilidade destes resíduos que conferem maior durabilidade para o concreto, bem como ganhos ambientais significativos (ISAIA e GASTALDINI, 2004).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da revisão bibliográfica e compilação dos resultados estudados é possível concluir que, diversas são as pesquisas realizadas em todo o mundo sobre a incorporação de resíduos na produção de concretos e a utilização do resíduo de borracha de pneus inservíveis, seja procedente do processo de recauchutagem (fibras) ou procedente do processo de trituração mecânica (grânulos), é bem difundida no meio técnico-científico pelos benefícios ambientais, de saúde pública e até mesmo de ordem técnica para aplicações específicas.

Convém registrar, no entanto, para o cuidado na comparação dos resultados, haja vista que distintos autores utilizaram diferentes tipos de cimento, dimensões, formas e, em alguns casos, metodologias específicas na realização experimental da incorporação da borracha à matriz do concreto.

Preliminarmente foi possível constatar que, a influência da presença dos resíduos de borracha de pneu nas propriedades do concreto no estado fresco altera seu comportamento quanto à fluidez e, conseqüentemente, interfere no processo de moldagem do material. Quanto à trabalhabilidade do compósito com adição de borracha pelo método do abatimento do tronco de cone (*Slump Test*), os resultados indicam uma redução da fluidez do concreto com o aumento do teor e do tamanho das partículas incorporadas, embora a mistura apresente aspecto homogêneo e de fácil adensamento.

Quanto à massa específica, já era esperado uma redução com o aumento do teor de borracha, uma vez que os resíduos de borracha são adicionados em substituição à areia natural, cuja massa específica é aproximadamente o dobro da massa específica da borracha. Outro fator que também influenciou na drástica redução de massa específica foi o aumento no teor de ar aprisionado.

Quanto à influência da presença dos resíduos de borracha de pneu nas propriedades do concreto no estado endurecido, foi possível concluir que a resistência à compressão axial diminui com o aumento da fração volumétrica de borracha incorporada ao concreto, sendo que, quanto maior for o tamanho das partículas, mais significativa é essa redução. Essa redução na resistência do concreto foi apontada por diversos autores à fraca adesão entre os resíduos de borracha de pneu (baixa hidrofiliabilidade – dificuldade de criar ligações com a

pastas de cimento fresca) e a matriz de concreto, gerando uma interface sem aderência à matriz, conseqüentemente, a criação de vazios que afetam diretamente a resistência mecânica do material.

Alguns estudos conseguiram minimizar a redução da resistência mecânica com aplicação de aditivos plastificantes e superplastificantes, bem como tratamentos químicos superficiais aplicados aos resíduos de borracha, a fim de melhorar a aderência borracha/matriz. Dessa forma, os valores obtidos se assemelharam aos requeridos em desempenho pelos requisitos normativos. A utilização de tratamentos químicos superficiais no resíduo de borracha de pneu incorporado ao concreto sustentável ainda não se justifica, dada a pequena eficiência, maior custo e maior complexidade. Estudos adicionais, todavia, deveriam ser efetuados para verificar se a leve tendência de melhora nas propriedades pode ser incrementada.

Quanto à resistência à tração, comumente avaliada por meio de teste de tração por compressão diametral e de flexão, os resultados mostraram que os valores sofreram diminuição com adição de borracha de pneu, mas que essa taxa de redução é menos intensa do que na compressão. Apesar disso, foi possível observar uma maior deformação dos corpos-de-prova e um comportamento na fratura mais dúctil, indicando maior absorção de energia quando comparado ao concreto convencional. Propriedade esta muito requerida para aplicações em pisos, muros de proteção, em casos de abalos sísmicos, entre outros.

Diante dos resultados encontrados e as possibilidades de aditivos e tratamento químicos disponíveis para mitigar os resultados negativos de desempenho do concreto com adição de borracha triturada de pneu inservível, é correto afirmar que, dependendo da aplicabilidade do produto, o mesmo se torna equivalente ao convencional em desempenho, atendendo aos requisitos normativos exigidos. Claramente que a relação custo/benefício não foi tratada no estudo, mas assim como toda prática sustentável, os benefícios socioeconômicos são percebidos a médio longo prazo.

Considerando que, em uma única pesquisa é praticamente impossível esgotar todas as possibilidades de estudo sobre o comportamento de um material, principalmente em se tratando de inovação sustentável, seguem sugestões para aprofundamento do conhecimento:

- Verificar o comportamento do concreto com diferentes adições quando exposto às intempéries;
- Realizar um estudo econômico do uso de agregado reciclado, avaliando custos com gerenciamento do resíduo, implantação de programas de reciclagem e produção de concretos e argamassas com uso de resíduos industriais;
- Realizar um estudo da influência dos vários tipos de impureza, que podem estar presentes no material reciclado e que podem influenciar nas propriedades mecânicas;
- Aprofundar o estudo dos tratamentos e aditivos capazes de melhorar as propriedades mecânicas, sem onerar em demasia a produção do concreto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – **Associação Brasileira do Cimento Portland**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/>>. Acesso em 18/03/2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2015 9p.

_____ **NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2007. 9p.

_____ **NBR 7218 – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro, 2011. 5p.

_____ **NBR 7222 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2010. 3p.

_____ **NBR 9479 – Argamassa e concreto – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2006. 2p.

_____ **NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009. 4p.

_____ **NBR 9833 – Concreto fresco – Determinação da massa específica, do recebimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2008. 7p.

_____ **NBR 11578 – Cimento Portland composto – Especificação**. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

_____ **NBR 11768 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2011. 19p.

_____ **NBR 12142 – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2010. 5p.

_____ **NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015. 23p.

_____ **NBR 15900 – Água para amassamento do concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009. 11p.

_____ **NBR NM 30 – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001. 3p.

_____ **NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006. 8p.

_____ **NBR NM 46 – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

_____ **NBR NM 49 – Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas**. Rio de Janeiro, 2001. 3p.

_____ **NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009. 6p.

_____ **NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998. 8p.

_____ **NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ALBUQUERQUE, A. C. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu.** Tese de Doutorado (vinculada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS). Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/16484>>. Acessado em 18/03/2017.

ANIP - **Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos.** Disponível em: <<http://www.anip.com.br/index.php>> Acesso em: 12/01/2017.

ASTM: **American Society for Testing and Material.** Disponível em: <<https://www.astm.org>>. Acesso em: 20/03 2017.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Pneus: áreas de operações industriais.** Gerência Setorial 2. Brasília, 1998. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/6481/1/A%20atua%C3%A7%C3%A3o%20da%20C3%81rea%20Industrial%20do%20BNDES%20na%20Regi%C3%A3o%20Sudeste_2_P.pdf>. Acessado em: 18/03/2017.

CALISTER JR, W. D. **Foundations of materials science and engineering.** 1nd Edition, MacGrawHill, Inc, 1993. P.921

CALISTER JR, W. D. **Ciência dos Materiais: uma introdução.** Editora LTC. 5a edição. Rio de Janeiro-RJ, 2002.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>>. Acessado em: 18/03/2017.

DESTINO CERTO. 2000. Disponível em: <<http://www.cursilhomaringa.com.br/destinocerto/pneus.html>>. Acesso em: 26/10/2016.

FRETIAS, C. **Estudo do desempenho mecânico de concreto com adição de partículas de borracha para aplicação como material de reparo em superfícies hidráulicas.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia – UFPR. Curitiba/PR, 2007. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/126.pdf>>. Acessado em: 23/03/2017.

GARLET, G. **Aproveitamento de resíduo de E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) como agregado para concreto leve na construção civil.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS. Porto Alegre/RS, 1998. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/118243>>. Acessado em: 04/08/2017.

GIACOBBE, S.. **Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento Portland com adição de borracha de pneu.** Dissertação (Mestrado) – Unidade da USP - Escola Politécnica. São Paulo/SP, 2008. Disponível em:<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-15082008-100223/pt-br.php>>. Acessado em: 08/09/2016.

GIRSKAS, G.; NAGROCKIENE, D. **Crushed rubber waste impact f concrete basic properties.** *Science Direct: Elsevier – Construction and Building Materials*. Vol. 140. Junho/2017. p.36-42. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817302969>>. Acessado em: 04/08/2017.

GRANZOTTO, L.. **Concreto com adição de borracha: Uma alternativa ecologicamente viável.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá. Maringá/PR, 2010. Disponível em: <<http://nou-rau.uem.br/nou-rau/document/?code=vtls000182452>>. Acessado em: 23/03/2017.

GRISON, E. C.. **Borrachas e seus aditivos: componentes, influências e segredos.** Ed. Letra Vida. Porto Alegre/RS, 2010. Disponível em:<<http://www.cya.com.br/docs/borracha-e-seus-aditivos.pdf>>. Acessado em: 23/03/2017.

INDÚSTRICAHOJE. 2013. Disponível em:<<http://www.industriahoje.com.br/como-e-fabricado-um-pneu>>. Acessado em: 15/07/2016.

ISAIA, G.; GASTALDINI, A. **Concreto “verde” com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade.** (Anais) I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável. X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo/SP, 2004. Disponível em: <ftp://ip20017719.eng.ufjf.br/Public/AnaisEventosCientificos/ENTAC_2004/trabalhos/PAP0270d.pdf>. Acessado em: 04/08/2017.

KAMIMURA, E. **Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC. Florianópolis-SC, 2002. Disponível em <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/83493>>. Acessado em: 23/03/2017.

KHALOO, A. R.; DEHESTANI, M.; RAHMATABADI, P. **Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles.** *Science Direct – Waste Management*. Vol. 28. Dezembro/2008. p.2472-2482. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X08000366>>. Acessado em: 23/03/2017.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS. Porto Alegre/RS, 2001. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/21839>>. Acessado em: 04/08/2017.

LIJUAN, L.; SHENGHUA, R.; LAN, Z. **Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tires rubber particles.** *Science Direct – Elsevier - Construction and Building Materials*. Vol. 70. Novembro/2014. p.291-308. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814008678>>. Acessado em: 23/03/2017.

MAGALHÃES, F.C. **Estudo probabilístico da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão dos concretos utilizados na construção do dique do estaleiro Rio Grande, no superporto, em Rio Grande-RS.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Oceânica, Escola de Engenharia – UFRG. Rio Grande/RS, 2009. Disponível em:<<http://repositorio.furg.br/handle/1/3444>>. Acessado em: 04/08/2017.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2008). **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674p.

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

PINHEIRO, E. G. **Modelos numéricos aplicados a vulcanização de pneus**. Dissertação (Mestrado) – Unidade da USP: Escola Politécnica. Área de Conhecimento: Engenharia Mecânica. São Paulo/SP, 2001. Disponível em:<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-25082003-090611/pt-br.php>>. Acessado em: 23/03/2017.

PORTAL DO CONCRETO. <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento>>. Acesso em 05/10/2016.

RAFFOUL, S.; GARCIA, R.; PILAKOUTAS, K.; GUADAGNINI, M.; MEDINA, N. F. *Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation*. *Science Direct: Elsevier – Construction and Building Materials*. Vol. 124. Outubro/2016. p.391-404. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816311527>>. Acessado em: 18/06/2017.

REVISTA CONCRETO & CONSTRUÇÕES. São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2009. Trimestral. Ano XXXVII, n° 53. ISSN 1809-7197.

REVISTA PNEUS & CIA: Belo Horizonte/MG: Sindipneus, 2010. Bimestral. Ano 2, n° 14.

REVISTA PNEUS & CIA: Belo Horizonte/MG: Sindipneus, 2016. Bimestral. Ano 8, n° 51.

ROMANO, C. A.. **Apostila de tecnologia do concreto**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Departamento Acadêmico de Construção Civil - Engenharia de Produção. 2004. Disponível em:<<http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2013/04/Concreto-02.pdf>>. Acessado em: 23/03/2017.

SANTOS, A.C. dos. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus com aplicação em placas pré-moldadas**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFAL. Maceió/AL, 2005. Disponível em:<http://web-resol.org/textos/antonio_carlos_dos_santos.pdf>. Acessado em: 23/03/2017.

SILVA, F. M. da; BARBOSA, L. A. G.; LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P. G. A. *Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber*. *Science Direct: Elsevier – Construction and Building Materials*. Vol. 91. Agosto/2015. p.71-79. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815005243>>. Acessado em: 18/06/2017.

SILVEIRA, P. M.; ALBUQUERQUE, M. da C. F.; CASSOLA, S.; BORTOLUCCI, A. A.; PAULLI, L. D.; VILLA, F. M. D. **Estudo do comportamento mecânico do concreto com borracha de pneu.** Revista Matéria. Artigo 11711, pp.416-428, 2016. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/5125>>. Acessado em: 04/08/2017.

TORGAL, A. I. **A sustentabilidade dos materiais de construção.** 2a edição. Editora TecMinho, Portugal, 2010. P. 462. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/28852>>. Acessado em: 23/03/2017.

YAMASAKI, S. (2003) **Grandes conquistas da humanidade.** Vol. 1, Ed. Klick. São Paulo/SP, 2003. 65p.

YUNG, W. H.; YUNG, L. C.; HUA, L. H. *A study of durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete.* Science Direct: Elsevier – Construction and Building Materials. Vol. 41. Abril/2013. p.665-672. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812008306>>. Acessado em: 18/06/2017.