



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**PEDRO HENRIQUE FONSECA GUEDES**

**Análise da viabilidade técnica do uso de resíduos sólidos em concreto**

**GUARATINGUETÁ - SP**

**2021**

**Pedro henrique fonseca guedes**

**Análise da viabilidade técnica do uso de resíduos sólidos em concreto**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Isabel Cristina de Barros Trannin

GUARATINGUETÁ - SP

2021

Guedes, Pedro Henrique Fonseca  
G924a Análise da viabilidade técnica do uso de resíduos sólidos em concreto /  
Pedro Henrique Fonseca Guedes – Guaratinguetá, 2020.  
51 f. : il.  
Bibliografia : f. 40-51

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual  
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Isabel Cristina de Barros Trannin

1. Construção sustentável. 2. Resíduos sólidos. 3. Materiais de  
construção. 4. Sustentabilidade. I. Título.

CDU 69

Luciana Máximo

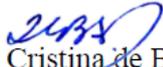
Bibliotecária-CRB-8/3595



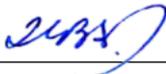
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**PEDRO HENRIQUE FONSECA GUEDES**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**“GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL”**  
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

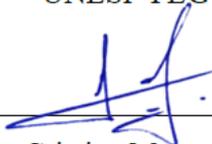
  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Isabel Cristina de Barros Trannin  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Isabel Cristina de Barros Trannin  
Orientadora/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

UNESP-FEG

  
Dr<sup>ª</sup> Eliana Cristina Moraes dos Santos

UNESP-FEG

Fevereiro de 2021

## **DADOS CURRICULARES**

**PEDRO HENRIQUE FONSECA GUEDES**

**NASCIMENTO**

05.03.1997 – Itamonte/MG

**FILIAÇÃO**

Márcio Henrique Guimarães Guedes

Vanda Aparecida Fonseca Guedes

**2016/2020**

Curso de Graduação em Engenharia Civil

Universidade Estadual Paulista – “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Guaratinguetá.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas que sempre me apoiaram e se esforçaram para que eu tivesse a oportunidade de estar onde eles não puderam.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família que fez de mim quem sou hoje, que me incentivou a seguir meus objetivos e me apoiou para que eu nunca desistisse de realizá-los.

Aos meus amigos que se mantiveram presentes em todos os momentos, bons e ruins, de minha caminhada na graduação.

A Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Isabel Cristina de Barros Trannin, por sua atenção, dedicação e apoio não só em minha vida acadêmica, mas também pessoal.

Agradeço a todos os professores e funcionários da UNESP, campus de Guaratinguetá, que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal.

A todos que participaram dessa jornada, deixo aqui o meu muito obrigado.

“A melhor maneira de prever o  
futuro é inventá-lo”

Alan Kay

## RESUMO

O concreto é o material de construção civil mais utilizado em todo o mundo e com o crescimento populacional e a urbanização acelerada promoveram um aumento de obras de infraestrutura urbana e um maior consumo de recursos naturais para a produção de materiais utilizados em obras de construção civil, em especial, de concreto. Neste contexto, tornou-se imprescindível o desenvolvimento de pesquisas sobre materiais alternativos com potencial de substituição dos recursos naturais utilizados na produção de concreto, visando reduzir os impactos ambientais e o custo das obras. O objetivo deste trabalho de graduação foi compilar os resultados fornecidos pela literatura técnica e científica, para gerar informações sobre a viabilidade técnica do uso de diferentes resíduos sólidos como componentes alternativos na fabricação de concreto, utilizando como referência, as normas brasileiras estabelecidas para agregados e concreto. Os resultados analisados indicaram que raspas de pneus podem substituir até 10% da areia natural, sem comprometer as propriedades mecânicas do concreto, podendo ser usado para pavimentação de rodovias, construção de meio fio e calçadas. A substituição de areia por 25% de pó de pedra, no traço 1:3,5, aumentou a resistência mecânica do concreto, podendo ser usado para confecção de blocos de concreto, em asfalto e em concreto compactado. Resíduos de PET podem substituir a areia natural em até 10% na confecção de concreto com relação água/cimento de 0,45, utilizado em obras sem função estrutural para tráfego de pedestres e veículos leves. A cinza de bagaço de cana de açúcar pode ser utilizada como suplemento ao cimento por apresentar características pozolânicas e substituindo a areia em 30% a 50%, sem causar alterações na resistência à compressão e à tração, na absorção de água por imersão, na capilaridade e no índice de vazios do concreto, sendo usada em lajes, baldrame e pilares (para 25 Mpa) e em pisos e calçadas (para 20 Mpa). Os agregados reciclados de RCD podem substituir em 50% os agregados naturais em concreto sem função estrutural, para peças de drenagem e em blocos de concreto. Esta prática pode trazer benefícios ambientais, pela redução do consumo de recursos naturais e pelo aproveitamento de resíduos sólidos, bem como, sociais pela geração de empregos relacionados à reciclagem de resíduos, além da diminuição dos custos de obras e, dessa forma, pode contribuir para o desenvolvimento sustentável e para a economia circular.

**PALAVRAS-CHAVE:** Construção sustentável. Reciclagem de resíduos sólidos. Materiais de construção civil.

## ABSTRACT

The concrete is the most used material in the civil construction and with the population growth and the accelerated urbanization promoted an increase in the constructions of the urban infrastructure and a bigger consume of the natural resources for the production of materials used in concrete constructions. In this context, it became essential the development of research about alternatives materials with the potential of full or partial replacement of the natural resources used in the production of concrete, aiming to reduce the environmental impacts caused for the costs of the constructions. The goal of this graduation work was to compile the results provided for the technique and scientific literature, to gerente informations about the technique viability of the use of differents solids wastess as an alternative components in the fabrication of concrete, using as reference, the brazilian technique standards settled down for concrete and aggregates. The analysed results indicate that shaving of tires in concentrations of 10% as a substitute of natural sand, without compromised the mechanics properties of concrete, can be used for the pavementation of road, construction of curb and sidewalk. The substitution of sand for 25% of grit, in the trace 1:3,5, rised the the mechanics resistant of concrete and can be used for the confection of blocks of concrete, in asphalt and in compacted concrete. The waste of PET can substitute the natural sand in 10% in the confection of concrete with a relation water/cement of 0,45 used in constructions without estrutural function for people and lights vehicles traffic. The sugar cane bagace can be used as suplemente for the concrete to present pozolanics propreties and replacing the sand in 30% to 50%, without caused consistentes alterations in the compressive and traction strenght, in the water absorption by immersion and capillarity and in the void index, being used in slabs, buckets and pillars (for 25Mpa) and in floord and sidewalks (for 20Mpa). The recycled aggregates can replace in 50% the natural aggregates in the production of concrete without estrutural function, for drain parts and concrete blocks. This practice may bring great benefits, for the reduction of the consumed of naturals resources and for the utilization of solid waste, as well as new Jobs with the recycling of the waste, decrease with the costs of the constructions and, thus, contribute with the sustainable development and to movement the economy.

**KEYWORDS:** Sustainable construction. Recycle of solid waste. Civil construction materials.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas para a mistura manual dos componentes do concreto .....	18
Figura 2 - Estrutura em concreto armado .....	19
Figura 3 - Componentes do concreto protendido .....	20
Figura 4 - Superfície do concreto leve .....	20
Figura 5 - Peças de concreto celular .....	21
Figura 6 - Lançamento do concreto de alta resistência inicial .....	22
Figura 7 - Peça de concreto pesado .....	23
Figura 8 - Execução do concreto projetado .....	24
Figura 9 - Lançamento do concreto autoadensável .....	25
Figura 10 - Lançamento do concreto de alto desempenho .....	26
Figura 11 - Concreto no estado fresco .....	28
Figura 12 - Concreto no estado endurecido .....	30
Figura 13 - Raspas de borrachas de pneus .....	32
Figura 14 - Pó de pedra gerado pelo britamento de rochas em pedreiras .....	33
Figura 15 - Resíduos plásticos .....	33
Figura 16 - Cinzas de bagaço de cana de açúcar .....	35
Figura 17 - Classificação dos resíduos de construção civil e demolição .....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consistência do concreto fresco e resistência à compressão, contendo diferentes proporções de raspas de pneus, em diferentes períodos de cura .....	39
Tabela 2 - Consistência do concreto fresco, resistência à compressão e à tração por compressão diametral, do concreto contendo diferentes proporções de raspas de pneus ....	40
Tabela 3 - Resistência à compressão do concreto contendo diferentes proporções de pó de pedra após três períodos de cura .....	41
Tabela 4 - Absorção de água de concreto contendo diferentes proporções de resíduos PET, traços e relação água/cimento.....	42
Tabela 5 - Resistência à compressão axial de concreto contendo diferentes proporções de resíduos PET, traços e relação água/cimento .....	43
Tabela 6 - Resistência à abrasão do concreto contendo diferentes proporções de resíduo PET para a relação água/cimento 0,45.....	44
Tabela 7 - Resistência à compressão do concreto contendo proporções de cinza de bagaço de cana .....	45
Tabela 8 - Resistência à tração do concreto contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana aos 28 dias de cura .....	45
Tabela 9 - Absorção de água de concreto contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana aos 28 dias de cura .....	45
Tabela 10 - Capilaridade do concreto contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana aos 28 dias de cura .....	46
Tabela 11 - Trabalhabilidade do concreto no estado fresco, contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana .....	46
Tabela 12 - Resultados do <i>Slump Test</i> para o concreto no estado fresco .....	47
Tabela 13 - Resistência à compressão do concreto contendo três tipos de cimento e cinza de bagaço de cana aos 28 dias de cura .....	48
Tabela 14 - Resistência à tração por compressão diametral do concreto contendo diferentes proporções de bagaço de cana, aos 28 dias de cura .....	48
Tabela 15 - Índice de vazios do concreto contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana .....	49
Tabela 16 - Resistência à compressão média para as faixas granulométricas E <sub>1</sub> e E <sub>2</sub> para o traço 1:5 aos 7 dias de cura .....	50

Tabela 17 – Resistência à compressão média do concreto contendo agregados de entulho de RCD aos 28 dias .....	50
Tabela 18 - Resistência à compressão média do concreto contendo agregados de entulho de RCD aos 34 dias de cura .....	51
Tabela 19 - Resistência à compressão média do concreto contendo agregados de entulho de RCD aos 60 dias de cura .....	51
Tabela 20 - Resistência à abrasão média do concreto contendo agregados de entulho de RCD aos 34 dias de cura para o traço 1:5.....	52
Tabela 21 - Permeabilidade do concreto contendo agregados reciclados, no traço 1:5, aos 34 dias de cura.....	52
Tabela 22 - Resistência à compressão do concreto contendo 50% de agregados reciclados aos 7, 28 e 63 dias de cura .....	53
Tabela 23 - Resistência à tração por compressão diametral do concreto contendo 50% de agregados reciclados em substituição ao agregado natural graúdo aos 28 dias de cura.....	54

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
RCD	Resíduos da Construção Civil e Demolição
PET	Polietileno tereftalato
ARI	Alta Resistência Inicial
RS	Resistência a Sulfato
CBC	Cinza de Bagaço de Cana
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	16
2.1 OBJETIVO GERAL .....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
3.1 TIPOS DE CONCRETO APLICADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	17
3.1.1 Concreto Armado .....	18
3.1.2 Concreto Protendido .....	19
3.1.3 Concreto Leve .....	20
3.1.4 Concreto Celular .....	21
3.1.5 Concreto de Alta Resistência Inicial .....	22
3.1.6 Concreto Pesado .....	22
3.1.7 Concreto Projetado .....	23
3.1.8 Concreto Autoadensável .....	24
3.1.9 Concreto de Alto Desempenho .....	25
3.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO .....	26
3.2.1 Concreto no Estado Fresco .....	26
3.2.2 Concreto no Estado Endurecido .....	28
3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS COMO COMPONENTES DE CONCRETO .....	32
3.3.1 Resíduos de Pneus .....	32
3.3.2 Pó de Pedra .....	32
3.3.3 Resíduos Derivados de Plásticos .....	33
3.3.4 Cinza de Bagaço de Cana de Açúcar .....	34
3.3.5 Resíduos da Construção Civil e Demolição (RCD) .....	35
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	37
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
5.1 RASPAS DE PNEUS COMO COMPONENTES DE CONCRETO .....	39
5.2 PÓ DE PEDRA COMO COMPONENTES DE CONCRETO .....	41
5.3 RESÍDUOS DE PET COMO COMPONENTES DE CONCRETO .....	42
5.4 CINZA DE BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR COMO COMPONENTE DE CONCRETO .....	44

5.5 AGREGADOS RECICLADOS DE RCD COMO COMPONENTE DE CONCRETO.....	49
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos maiores pilares da economia mundial. No entanto, apesar de ser uma grande geradora de empregos e de renda, também tem atrelada às suas atividades, muitos impactos negativos, como o consumo de matérias primas minerais, o desperdício de materiais em obras, a geração de resíduos, elevado consumo de energia e outros. Entre os materiais de construção civil, o concreto se destaca, por ser o mais utilizado no Brasil e no mundo.

Para amenizar os impactos causados pelo setor de construção civil, muitos estudos têm avaliado o uso de diferentes tipos de resíduos que podem ser transformados e utilizados na composição do concreto, visando a melhoria de suas propriedades. Entretanto, para que diferentes tipos de resíduos possam ser utilizados na composição do concreto, são necessários estudos para avaliar o atendimento aos padrões de qualidade do concreto estabelecidos por normas brasileiras.

Recentemente, no Brasil, o pó de pedra, resíduo oriundo da britagem de rochas em pedreiras vem sendo utilizado em substituição à areia natural na fabricação de concreto, prática desenvolvida desde a década de 70 por países como Canadá e Estados Unidos, na produção de concreto com melhores propriedades mecânicas (NUGENT, 1979).

Os resíduos da construção civil e demolição (RCD) têm sido utilizados como agregados em concretos, principalmente no Brasil. Na década de 1980, Pinto (1986) começou a pesquisar um novo material que ao substituir o agregado miúdo na produção de concreto poderia trazer benefícios para a construção civil e para o meio ambiente.

Os estudos de Levy e Helene (1996), bem como, de Hamassaki, Sbrighi e Florindo (1996), apesar de terem como foco a confecção de argamassas com entulhos de obras, foram importantes para colocar o assunto em pauta no setor de construção civil e para aumentar a participação dos RCD na produção de concreto, com benefícios para todas as partes envolvidas no processo.

Neste contexto, este trabalho de graduação apresenta a compilação dos resultados obtidos na literatura nacional e internacional e uma análise da viabilidade técnica da adição de diferentes resíduos sólidos como substituintes parciais ou totais de agregados naturais, na confecção de concreto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Analisar a literatura para reunir informações sobre a viabilidade técnica do uso de diferentes resíduos sólidos em concreto, visando subsidiar a indústria da construção civil na adoção de materiais mais sustentáveis e que atendam as normas brasileiras.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Realizar revisão bibliográfica, buscando informações em artigos técnicos e científicos, teses e dissertações, para a fundamentação técnica e científica deste trabalho.

Analisar os resultados dos efeitos da adição de diferentes resíduos sólidos nas propriedades do concreto, considerando as exigências normativas brasileiras para o uso do concreto em diferentes funções.

Gerar informações para subsidiar o setor da construção civil quanto à viabilidade técnica da adição de diferentes resíduos sólidos na produção de concreto sem o comprometimento de seu desempenho.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentará sobre os principais tipos de concreto e como o concreto pode se comportar de acordo com as propriedades e afins. Será abordado também algumas técnicas que são usadas para se fabricar concretos com os diversos resíduos abordados neste trabalho. A incorporação de resíduos sólidos aos demais componentes do concreto, além de diminuir a dependência de recursos naturais, pode melhorar as propriedades mecânicas do concreto, gerando diminuição da demanda por recursos minerais e, conseqüentemente, benefícios ambientais, que podem tornar o setor da construção civil mais sustentável.

#### 3.1 TIPOS DE CONCRETO APLICADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O concreto é um dos principais e mais importantes materiais usados na construção civil em todo o mundo, sendo um produto gerado da mistura de aglomerante, aglomerados e água (BAUER, 2008). O principal aglomerante aplicado na mistura é o cimento e os aglomerados são: o agregado miúdo (areia) e o agregado graúdo (brita). Em situações especiais, é permitido o uso de aditivos no concreto, que buscam melhorar suas propriedades como a trabalhabilidade, a resistência mecânica, a resistência a intempéries, a modificadores de cura, a impermeabilizantes, entre outras (BAUER, 2008).

No Brasil, o concreto passou a ser comercializado em meados dos anos 1920, sendo distribuído na forma de materiais patenteados por empresas internacionais e difundido por todo o país a partir desta época até se estabilizar por todo o território nos anos 1940, com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), criadas e consolidadas para uso de engenheiros em obras de construção civil, e para que as instituições de pesquisa e universidades pudessem realizar ensaios laboratoriais em cursos de engenharia civil (SANTOS, 2008). Por exemplo, para realizar a mistura dos componentes manualmente, devem ser atendidas as diretrizes da norma NBR 6118/2014 da ABNT, que estabelece os seguintes procedimentos:

1. Misturar, primeiramente, o cimento (aglomerante) com a areia (aglomerado miúdo), a seco, a fim de resultarem em uma cor uniforme do concreto;

2. Adicionar água, de forma gradativa, na mistura até se atingir o ponto em que toda a massa esteja uniforme e com as quantidades esperadas de cada elemento. A Figura 1 apresenta as etapas do processo de mistura dos componentes do concreto (aglomerados, aglomerante e água).

Figura 1 – Etapas para a mistura manual dos componentes do concreto



Fonte: Blog da Engenharia Civil (2015).

Ao longo dos anos, desde a década de 1920, diversas variedades de concreto foram sendo desenvolvidas, por meio de estudos, de forma a melhorar a operacionalidade do uso do concreto no setor da construção civil brasileira, oferecendo várias opções que podem ser aplicadas em obras, buscando gerar benefícios a todas as partes envolvidas. Os diversos tipos de concreto, além do tradicional são apresentados a seguir.

### 3.1.1 Concreto Armado

Atualmente, o concreto armado é o mais utilizado na construção civil, por permitir o aliar as propriedades do concreto (durabilidade, boa resistência à compressão) com as do aço (ductilidade, resistência a tração e compressão) possibilitando que os dois principais componentes se compensem, de acordo com as características de cada um, permitindo um trabalho em conjunto de ambos os materiais. Na Figura 2, pode-se perceber a armadura de aço coberta por concreto que impede a ocorrência de corrosão do metal, sendo uma proteção eficaz por impedir que o oxigênio do ar penetre a camada de concreto e cause corrosão no

aço. Uma vez que o ar entre em contato e ocorra o processo corrosivo, toda a estrutura em que será aplicado o concreto armado pode ser totalmente comprometida, trazendo prejuízos à obra como um todo (BASTOS, 2019).

Figura 2 – Estrutura em Concreto Armado



Fonte: Mapa da Obra (2016).

A NBR 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, da ABNT, é a principal norma que estabelece as diretrizes e as prescrições para o concreto armado.

### **3.1.2 Concreto Protendido**

O concreto protendido é menos utilizado que o concreto armado, mas também é composto de aço e concreto, entretanto, a armadura de aço usada neste caso é disposta de forma diferente. Ao se usar a protensão no concreto, são introduzidos esforços prévios na peça, que podem reduzir ou até mesmo anular as tensões de tração, que são provocadas pelas solicitações em serviço. O concreto protendido pode ser empregado em diferentes tipos de construções como plataformas marítimas, plataformas de exploração, plataformas de gás, em pontes estaiadas, torres de concreto e outras obras semelhantes (VERÍSSIMO e JR., 1998). A Figura 3 mostra um exemplo de como é usado o concreto protendido em uma obra.

Figura 3 – Componentes do concreto protendido



Fonte: AWA Comercial (2018).

As normas NBR 6118/2014: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento e NBR 14931/2004: Execução de estruturas de concreto – Procedimento, da ABNT, estabelecem as diretrizes para uso, os padrões de qualidade e as prescrições para uso do concreto protendido.

### 3.1.3 *Concreto Leve*

O concreto leve possui massa específica menor que a do concreto tradicional, e possui uma excelente capacidade de isolamento térmico e acústico, sendo amplamente empregado para desempenhar funções específicas na obra, como o preenchimento de lajes, na fabricação de blocos de concreto, para auxiliar a regularizar superfícies, para envelopar as tubulações de esgoto, entre outras (PORTAL DO CONCRETO, 2018). A Figura 4 mostra um exemplo de concreto leve.

Figura 4 – Superfícies do concreto leve



Fonte: Total Construção (2019).

A norma NBR 12644/2014: Concreto leve celular estrutural - Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco, da ABNT, estabelece as diretrizes que devem ser seguidas e prescreve o método para determinar a densidade de massa aparente quando o concreto leve se encontra em seu estado fresco.

### 3.1.4 Concreto Celular

O concreto celular possui uma quantidade de vazios mais elevada que os demais e se caracteriza como um material espumado e poroso (PEREIRA, 2018), sendo muito usado na fabricação de blocos, com as funções de vedar os vãos existentes, para preencher lajes nervuradas e, quando é armado com aço, pode ser usado em paredes e lajes. Na mistura dos componentes do concreto (aglomerantes, aglomerados e água) é adicionada uma quantidade de espuma ou, se necessário, uma porcentagem de aditivo que funcionará como um agente de expansão ao se misturar todos os componentes. Dessa forma, a massa específica deste tipo de concreto se torna menor em comparação ao concreto tradicional, o que possibilita seu uso para isolamento térmico e acústico dos ambientes e em locais que necessitam de resistência ao fogo (PEREIRA, 2018). A Figura 5 mostra um exemplo sobre o concreto celular.

Figura 5 – Peças de concreto celular



Fonte: Aecweb (2020).

As normas da ABNT NBR 13438/2013: Blocos de concreto celular autoclavado - Requisitos, NBR 13440/2013: Blocos de concreto celular autoclavado - Métodos de ensaios, NBR 14956-1/2013: Blocos de concreto celular autoclavado - Execução de alvenaria sem função estrutural Parte 1: Procedimento com argamassa colante industrializada e a NBR

14956-2/2013: Blocos de concreto celular autoclavado - Execução de alvenaria sem função estrutural Parte 2: Procedimento com argamassa colante industrializada, prescrevem as diretrizes para o uso e propriedades do concreto celular.

### **3.1.5 Concreto de Alta Resistência Inicial**

Este concreto apresenta propriedades que satisfazem os critérios de desempenho em obras que demandam de elevada durabilidade das estruturas e uma alta resistência do produto final (SILVA, 1995). O concreto de alta resistência é muito usado, principalmente, em edifícios, pontes, plataformas marítimas e em aplicações especiais, como túneis, galpões e barreiras. De acordo com Silva (1995), para a obtenção de alta resistência, a seleção dos materiais a serem misturados deve ser mais criteriosa que na confecção do concreto tradicional, o que ocorre por meio de adições de minerais e aditivos químicos, que juntamente com uma relação água/cimento menor, pode-se chegar a alta resistência específica para este tipo de concreto. Este concreto deve obedecer às prescrições estabelecidas pelas normas NBR 16697/2018: Cimento Portland de alta resistência inicial e NBR 12655/2015: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. A Figura 6 mostra um exemplo sobre o concreto de alta resistência inicial.

Figura 6 – Lançamento de concreto de alta resistência inicial



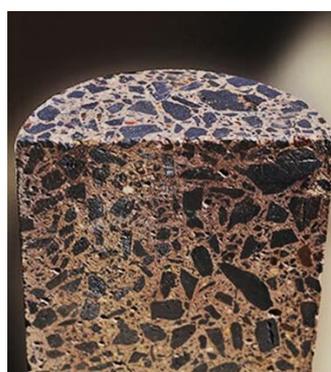
Fonte: TopMix20 (2020).

### **3.1.6 Concreto Pesado**

Da mesma forma que existe o concreto leve, que possui uma massa específica menor que a do concreto tradicional, existe também, o concreto pesado, que possui uma densidade maior que  $2800 \text{ Kg m}^{-3}$  (CARPES, 2018). Em sua composição podem estar presentes

agregados graúdos que contenham ferro, como hematita, a barita, a magnetita, limalhas de aço, entre outros e, que não são empregados no concreto tradicional, como agregados miúdos, podem ser usadas areias artificiais, o que permite seu uso, principalmente, em blindagens de reatores de usinas nucleares (SCHMIDT, 1972). A Figura 7 mostra um exemplo sobre o concreto pesado.

Figura 7 – Peça de concreto pesado



Fonte: TopMix20 (2020).

O concreto pesado deve atender as prescrições estabelecidas pelas normas da ABNT NBR 8953/2015: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência e NBR 12655/2015: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.

### ***3.1.7 Concreto Projetado***

De acordo com a ABNT (2012), o concreto projetado é um concreto que é transportado por uma tubulação e é projetado, sob pressão, na superfície à alta velocidade, sendo compactado em seguida. De acordo com a forma que o concreto projetado é aplicado, por meio do lançamento em tubos, pode ser aplicado em diversas situações como: revestimentos, contenção de taludes, reforços na estrutura, impermeabilizantes, formas livres, em obras subterrâneas e outras. A capacidade de ser aplicado para estes fins deve-se à grande versatilidade que esse material apresenta, o que possibilita sua utilização em diversas

obras de construção civil (FIGUEIREDO, 1992). A Figura 8 mostra um exemplo sobre o concreto projetado.

Figura 8 – Execução do concreto projetado



Fonte: Asope Engenharia (2018).

Para obtenção de bons resultados com o concreto projetado, dois fatores interdependentes devem ser considerados: 1) o método de projeção empregado, de acordo com as recomendações do fabricante, pois pode influenciar na trabalhabilidade do concreto e, 2) a granulometria dos materiais utilizados, pois para que o concreto projetado tenha bom desempenho, os agregados usados devem apresentar uma dimensão máxima inferior à 16 mm, principalmente porque os materiais de granulometria maior podem danificar o instrumento de lançamento de concreto. Além desses fatores também é necessário buscar equilíbrio técnico e econômico durante a execução (FIGUEIREDO, 1992). O concreto projetado deve atender às prescrições estabelecidas pela norma NBR 14026/2012: Concreto projetado — Especificação da ABNT.

### **3.1.8 Concreto Autoadensável**

Este tipo de concreto, ao ser lançado na fôrma ou no local de aplicação, deve possuir a capacidade de se adensar sob o efeito da gravidade, não sendo necessário o adensamento por equipamentos, como por vibrador, como acontece no caso do método tradicional (CAVALCANTI, 2006). Portanto, para que seja definido como concreto autoadensado, deve satisfazer propriedades como: capacidade de preenchimento de todos os espaços vazios

possíveis, sofrendo efeito somente do peso próprio e conseguir manter a estabilidade, sem que durante o processo, ocorra o efeito de exsudação. De acordo com Skarendahl e Petersson (2000), a exsudação ocorre quando a água migra da composição da mistura do concreto para a superfície em consequência do concreto não estar completamente adensado, seja pela ação da gravidade ou por um instrumento de adensamento. A Figura 9 mostra um exemplo sobre o concreto autoadensável.

Figura 9 – Lançamento do concreto autoadensável



Fonte: Massa Cizenta (2016).

O concreto autoadensável deve atender as prescrições estabelecidas pelas normas da ABNT, NBR 15823-1/2017: Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco e NBR 15823-2/2017: Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams.

### **3.1.9 Concreto de Alto Desempenho**

O concreto de alto desempenho deve suportar resistência à compressão superior a 40 Mpa, sendo essencial que a relação água/cimento seja baixa, pois do contrário o concreto de alto desempenho não consegue alcançar o valor mínimo de resistência exigida. Outra consideração importante a ser feita é com relação à dosagem de aditivos, para alcançar a resistência mínima e as principais propriedades deste tipo de concreto como a baixa permeabilidade, a trabalhabilidade e o uso de menor quantidade de agregados, que são as

maiores vantagens desse concreto em relação ao concreto tradicional, no que diz respeito à maior economia dos componentes utilizados, além da capacidade de preencher uma quantidade duas vezes maior de uma estrutura (SILVA, 2010). O concreto de alto desempenho deve atender às prescrições estabelecidas pela norma da ABNT NBR 15575-2/2013: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. A Figura 10 mostra um exemplo sobre o concreto de alto desempenho.

Figura 10 –Lançamento do concreto de alto desempenho



Fonte: Solotudo (2020).

## 3.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO

Após ser realizada a mistura manual ou mecânica, na proporção correta de aglomerante, agregados e água, específica para cada tipo de concreto, o material passa por dois estados muito importantes e que são essenciais para se atingir a resistência necessária, definidos como estado fresco e estado endurecido, descritos a seguir.

### 3.2.1 *Concreto no Estado Fresco*

O concreto no estado fresco corresponde ao material recém misturado, conforme ilustra a Figura 11, em que os componentes, agregados (miúdos e graúdos), cimento (aglomerante) e água, são adicionados em proporções específicas, pré-estabelecidas por normas, para evitar alterações nas propriedades e no desempenho das funções de cada tipo de concreto. A proporção correta, atendendo as normas existentes, garante que todas as propriedades do concreto estejam adequadas, como por exemplo, a trabalhabilidade, que é a

mais importante para o concreto no estado fresco, apresentando bom rendimento ao ser executado, além de mostrar que todos os elementos misturados estão coesos, principalmente, em relação à uniformidade do concreto e à compacidade (BAUER, 2008). A trabalhabilidade está correlacionada, principalmente, com a consistência em que o concreto se encontra, pois se não for bem realizado, ele deixa ser trabalhável e não pode ser aplicado no local desejado, gerando perda de materiais, de tempo e maiores custos. Além da proporção adequada dos componentes, outros fatores podem influenciar a trabalhabilidade do concreto como: consistência; transporte; lançamento; adensamento; moldagem e posicionamento de armaduras. Quanto ao transporte do concreto, é preciso atentar se este foi realizado por um caminhão-betoneira, ao tipo de lançamento a que foi submetido, se foi por uso de uma bomba ou de um carrinho-de-mão; à maneira como foi adensado, se por um vibrador, a vácuo ou manualmente; e se foi moldado manualmente ou por máquina. Estes fatores agem em conjunto, pois cada um deve ser executado dentro dos limites especificados pelas normas, pois apesar de o concreto ser transportado, lançado e adensado de inúmeros modos, é muito importante que se alcance a principal propriedade que é a trabalhabilidade, a fim de não ocorrer segregação da mistura e esteja compacto (BAUER, 2028).

Dentre os fatores citados, o que mais impacta como o concreto é trabalhado em construções e afins, é a sua consistência. Esta é uma das características mais importantes, pois de acordo com Bauer (2008) “é a capacidade do concreto de escoar”, ou seja, é o fator que permite trabalhar em sua melhor forma, que esteja totalmente compacto e atinja a mobilidade necessária para sua aplicação. Alguns intervenientes que podem influenciar na consistência do concreto são teor de água; granulometria; forma do agregado; tempo; temperatura e aditivos. Se todos estes itens forem bem utilizados e todos os fatores de concreto estejam dentro das especificações estabelecidas, um possível problema recorrente, como a segregação, é evitado e também algumas particularidades que são consequências de quando o concreto não é trabalhado da forma correta, como a exsudação que se caracteriza como a percolação da água presente na mistura que, em excesso, se eleva até a superfície do concreto e afeta o estágio final (BAUER 2008).

Figura 11 - Concreto no estado fresco



Fonte: Massa Cinzenta (2013).

### **3.2.2 Concreto no Estado Endurecido**

Após o concreto ser misturado e passar pelo estado fresco, em que se encontra trabalhável, este será aplicado de acordo com a função a ser desempenhada em diferentes obras de construção civil, sofrendo o processo conhecido como “pega”, que consiste em estágios de consolidação até que toda a mistura se encontre no estado endurecido.

As características do concreto no estado endurecido dependem, principalmente, de onde o material é aplicado e de sua função, por exemplo, se for usado um concreto armado, será a densidade, dentre todas as características do concreto, que atuará para que seja desempenhada a função quando o concreto endurecer com o aço da armadura e a resistência à abrasão, que permitirá em sua superfície a movimentação das cargas atuantes (BAUER, 2008).

Além da densidade, existem outras propriedades que devem ser avaliadas para que o concreto endurecido apresente bom desempenho na função a que será submetido, como o atrito, a resistência à abrasão, a condutibilidade elétrica, a propriedade térmica, propriedade radiativa, propriedade acústica, durabilidade, permeabilidade, entre outras (BAUER, 2008). Dentre as características do concreto endurecido, as mais importantes para que este material apresente bom desempenho de suas funções, são descritas a seguir.

#### **1. Propriedade Térmica**

Esta propriedade corresponde ao comportamento do concreto endurecido quando exposto a alguma fonte de calor e inclui três parâmetros, que são a condutibilidade, a dilatação térmica e a resistência ao fogo.

### *Condutibilidade*

Os concretos tradicionais apresentam uma maior capacidade de conduzir calor que o concreto de baixa densidade e as alvenarias, pois possuem maior densidade, o que auxilia na transmissão de calor. Em contrapartida os concretos leves, que têm baixa densidade, apesar de não serem bons condutores de calor, são muito usados como isolantes térmicos (BAUER, 2008).

### *Dilatação térmica*

De acordo com Bauer (2008), não se tem um valor único para a dilatação do concreto, porém sabe-se que concretos que possuem maior quantidade de cimento em sua composição apresentam maior dilatação. Para identificar qual tipo de concreto apresenta maior ou menor dilatação térmica, esta depende da seção transversal da peça, em consequência da forma como se propaga o calor dentro do concreto, se é com alta ou baixa velocidade. O ensaio de dilatação térmica linear do concreto deve atender a NBR 12815/2012: Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear - Método de ensaio.

### *Resistência ao fogo*

Para avaliar a resistência do concreto ao fogo, o material pode ser submetido a duas situações que envolvem a exposição a altas temperaturas. A primeira quando o material é exposto a uma fonte que emite temperaturas razoavelmente elevadas, como chaminés e a segunda situação, quando a fonte de calor emite temperaturas altas de forma rápida e sujeitas a grandes variações, como é o caso de ocorrências de incêndio. Estas duas situações permitem verificar como cada componente do concreto se comporta em relação à exposição a altas temperaturas, sejam elas em aumento gradual ou de forma rápida. Assim, ao expor a água, o cimento, os agregados e até mesmo o aço, em casos de concreto armado e protendido, estes componentes devem estar em suas proporções corretas, do contrário a elevação da temperatura causará distúrbios na mistura de concreto e este não conseguirá desempenhar sua função na obra de construção civil (BAUER, 2008).

## **2. Propriedade Radioativa**

Em locais que emitem energia radioativa como salas de tomografias, usinas nucleares, indústrias correlatas e afins, o material usado para impedir que a radiação seja emitida para ambientes externos era o chumbo, porém por ser tratar de um elemento tóxico e de alto custo,

o concreto que usa agregados de alta densidade surge como uma alternativa mais barata, pois além de conseguir suportar as radiações emitidas, possuem uma alta capacidade de resistir às altas temperaturas, que são emitidas em usinas de energia nuclear (BAUER, 2008).

### ***3. Propriedade Acústica***

O concreto endurecido, apresentado na Figura 12, quando aplicado em alvenarias e lajes, possui uma particularidade em relação à acústica da construção, podendo agir como um ótimo condutor de sons e ruídos e, também, pode ter a função de isolar e/ou amenizar os sons. É importante salientar que em peça de concreto longa, de preferência armada, o som pode se propagar muito bem, caso não aparecerem fissuras ou trincas, que podem afetar este comportamento. Alguns estudos indicam que a posição das armaduras dentro de uma estrutura de concreto armado, se colocadas na mesma direção em que ocorrerá a propagação do som e com distâncias superiores a 5 cm, não têm efeito sobre essa propagação, pois não serão obstáculos para a trajetória dos sons, que podem ocorrer dentro da peça de concreto (BAUER, 2008).

Figura 12 - Concreto no estado endurecido



Fonte: Ars Aedificativa (2016).

### ***4. Durabilidade***

A capacidade dos diferentes tipos de concreto de tolerar ações de diversos processos destrutivos por muitos anos, corresponde a sua durabilidade, permitindo seu uso em diversas situações em que estará sujeito a muitos efeitos, que podem comprometer o seu uso e seu

desempenho (BAUER, 2008). De acordo com Bauer (2008), a durabilidade pode ser considerada a mais importante dentro das características do concreto endurecido, por permitir a resistência a diversas ações destrutivas como a abrasão (em pavimentos e pisos), choques, vibrações, corrosão sob tensão (ocorre em concreto protendido, que faz uso de ligas de aço para a armadura), agentes climáticos (como as águas puras, que podem corroer as peças de concreto e podem diminuir o tempo de vida das estruturas, como em aquedutos), por águas sulfatadas, por águas marinhas (em obras marítimas), altas temperaturas, agentes químicos (reservatórios de concreto, usados para guardar reagentes químicos, como ácidos) e agentes biológicos (ataque de fungos, bactérias ativas, nutrientes orgânicos e micro-organismos).

Apesar do concreto ser um material de alta durabilidade, para evitar que diversos processos encurtem o tempo de vida ou até mesmo danifiquem a peça, é importante que sejam muito bem cuidadas, para manter o uso por mais tempo, o que é possível com o uso de aditivos (BAUER, 2008).

### ***5. Permeabilidade***

Dependendo da proporção dos materiais usados na mistura, o concreto resultante pode apresentar muitos ou poucos vazios, o que implica diretamente na permeabilidade, pois um concreto que possui elevada quantidade de vazios, ou seja, que é muito poroso, pode conter maior quantidade de água e ar em seus poros, comprometer a trabalhabilidade e possibilitar a ocorrência de trincas e fissuras, influenciando diretamente seu desempenho e comprometendo a estrutura, em seu estado endurecido (BAUER, 2000).

Apesar de todo o cuidado na dosagem dos componentes é muito difícil produzir um concreto não apresente vazios, assim é muito comum o uso de aditivos, como os impermeabilizantes, que possibilitam diminuir a quantidade de poros e tornar o concreto menos permeável. Entretanto a elevada concentração de aditivos pode danificar o concreto e trazer sérias consequências, assim recomenda-se usar mais cimento, que não danifica o concreto no estado endurecido e reduz o custo com aditivos impermeabilizantes (BAUER, 2008).

### 3.3. RESÍDUOS SÓLIDOS COMO COMPONENTES DE CONCRETO

#### 3.3.1 *Resíduos de Pneus*

Anualmente grandes quantidades de pneus inservíveis são descartadas e, embora existam pontos para entrega aos fabricantes, no sistema de logística reversa, nem sempre estes resíduos são destinados de forma correta, o que tem gerado muitos impactos ambientais que vão desde a poluição visual, devido as enormes pilhas mantidas a céu aberto, poluição atmosférica, com a queima (SILVA et al., 2019). Porém, nos últimos anos, diversos pesquisadores têm avaliado o aproveitamento da borracha de pneus inservíveis em materiais de construção civil, como mostra a Figura 13, por exemplo os estudos de Albuquerque (2004) e Rodriguez et al. (2006), que avaliaram os efeitos da adição de diferentes proporções de raspas de borracha de pneus, substituindo total ou parcialmente os agregados naturais, sobre as propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Figura 13 – Raspas de borracha de pneus



Fonte: Reso Soluções Ambientais (2020).

#### 3.3.2 *Pó de Pedra*

O uso do pó de pedra como componente do concreto vem sendo estudado desde a década de 1980 no Brasil (ANDRIOLO, 2005), isso porque o principal agregado miúdo usado na fabricação da mistura, a areia natural, é retirada dos rios, na maioria dos casos trazendo impactos ambientais. Este resíduo é gerado nas pedreiras como resultado do britamento das rochas, como mostra a Figura 14, para uso em construção civil e por não ter nenhum descarte específico e nenhum valor comercial, grandes quantidades de pó de pedra acabam sendo destinadas de forma inadequada (MENOSSI, 2004). Por não possuir um

destino final estabelecido por normas, o pó de pedra descartado no ambiente pode ser carregado pelas águas de chuva em grandes quantidades, causando o assoreamento de corpos d'água e, conseqüentemente, alagamento do entorno, com sérios prejuízos econômicos e ambientais (MENOSSI *et al*, 2010). Neste contexto, o uso de pó de pedra como componente do concreto é uma excelente alternativa para substituir total ou parcialmente a areia natural, e sua aplicabilidade tem sido comprovada por inúmeros estudos realizados, sendo o primeiro realizado com a construção da hidrelétrica de Itaipu (ANDRIOLO, 2005).

Figura 14 - Pó de pedra gerado pelo britamento de rochas em pedreiras



Fonte: Almeida Representações (2020).

### 3.3.3 Resíduos derivados de plástico

O plástico é um polímero que possui ligações moleculares orgânicas e tem ampla aplicação, variando desde sacolas plásticas de supermercados, garrafas PET, embalagens variadas e muitas outras (PIATTI e RODRIGUES, 2005). Por ser um material derivado do petróleo e apresentar elevado tempo de decomposição no ambiente, seu descarte de forma incorreta pode gerar sérios impactos ambientais e à saúde pública (MARTINS *et al.*, 2018). De acordo com a Lei Federal 12305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a destinação adequada dos resíduos plásticos deve priorizar as técnicas de reciclagem, conforme mostra a Figura 15, e reutilização e, somente quando não houver alternativa de tratamento, a disposição em aterro sanitário.

Figura 15 - Resíduos plásticos



Fonte: Massa Cinzenta (2015).

Nos últimos anos alguns estudos concluíram que os resíduos plásticos também podem ser utilizados na produção do concreto em substituição parcial aos agregados. Segundo Barth et al. (2004) resíduos de garrafas PET podem ser utilizados como painéis de modulação de paredes. Coelho (2006) relatou que resíduos plásticos foram usados em sistemas de lajes nervuradas e Nunes et al. (2007) e Kanning et al. (2004) indicaram que resíduos de garrafas PET podem ser usados na confecção de blocos de concreto.

### **3.3.4 Cinzas do Bagaço de Cana de Açúcar**

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de cana de açúcar, que é usada, principalmente, para a fabricação de álcool, uma das fontes de energias renováveis, cujo consumo tem aumentado ao longo dos anos. Além de ser uma fonte de combustível, da cana de açúcar também são gerados a levedura seca, linhaça e o bagaço (BORTOLETTO et al., 2004).

O bagaço de cana de açúcar, de acordo com a Figura 16, corresponde a, aproximadamente, 30% de toda a cana de açúcar produzida e, destes, 95% são queimados em caldeiras, para geração de energia, gerando como resíduo, a cinza derivada do bagaço da cana de açúcar (DE PAULA et al., 2009). A cinza do bagaço de cana de açúcar tem sido pesquisada quanto ao potencial de substituição do agregado miúdo (areia) na produção de concreto, principalmente, para evitar os impactos ambientais da extração de areia, tendo em vista que a redução de custos da produção de concreto não é significativa com o uso de cinza (LOPES *et al*, 2014).

Alguns estudos apontam que a cinza do bagaço de cana apresenta propriedades reativas e pozolânicas, com certa similaridade ao cimento, aglomerante usado na fabricação do concreto convencional e, portanto, com elevado potencial de aplicação para este fim (MARTINS FILHO, 2015).

Figura 16 - Cinza de bagaço da cana de açúcar



Fonte: Mandacaru Online (2018).

### 3.3.5 Resíduos da Construção Civil e Demolição (RCD)

De acordo com a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil (ABRECON), resíduo da construção civil corresponde a qualquer resíduo gerado no processo de construção, de reforma, de demolição ou escavação de uma obra.

Na Figura 17 são apresentadas as classes de resíduos da construção civil e demolição, determinadas pela Resolução Conama nº 307/2002 e suas complementares:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, como os de construção, demolição, reparos de pavimentação, reformas e outros;
- Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, derivados de gesso, latas de tintas e outros;
- Classe C: resíduos que ainda não foram encontrados métodos e tecnologias que permitam que passem pelo processo de reciclagem.
- Classe D: resíduos considerados perigosos oriundos das construções como as tintas, solventes, óleos, etc, que dependendo da forma como é descartado (clandestinamente) pode causar diversos problemas, tanto de saúdes quanto ambientais, no local em que é descartado.

Figura 17 – Classificação dos resíduos de construção civil e demolição



Fonte: Prefeitura de São José dos Pinhais (2018).

Com o desenvolvimento da construção civil gerado pelo processo de urbanização intenso das cidades, houve um aumento dos resíduos gerados e descartados de forma incorreta no ambiente. Na busca de soluções foram desenvolvidas pesquisas para avaliar técnicas de aproveitamento e destinação menos impactante para os resíduos da construção civil (GONÇALVEZ, 2011).

De acordo com a Resolução Conama nº 307/2002, entre as soluções para a destinação correta dos resíduos de construção civil e demolição, especialmente os de classe A e B, tem-se a alternativa de envio para usinas de reciclagem. Nos últimos anos pesquisas têm sido desenvolvidas para avaliar o uso de agregados reciclados de resíduos de Classe A na fabricação de concreto. O uso de agregados reciclados na confecção de concreto tem como principal objetivo reduzir o consumo de recursos naturais, como a areia e agregados derivados de rochas, que são utilizados em grandes volumes no setor de construção civil (GONÇALVEZ, 2001). O aproveitamento dos resíduos como agregados reciclados também pode reduzir o custo da obra de forma significativa (SILVA, 2019).

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente foi realizada uma revisão da literatura técnica e científica para obter informações sobre os diferentes tipos de concreto e as respectivas exigências normativas brasileiras.

Com base nessa revisão verificou-se que a caracterização dos agregados é realizada por meio da aplicação de ensaios previstos nas normas técnicas:

- NBR NM 27/2001: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório
- NBR NM 30/2001: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água
- NBR NM 45/2009: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios
- NBR NM 46/2003: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75  $\mu\text{m}$ , por lavagem
- NBR NM 49/2001: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas
- NBR NM 51/2001: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"
- NBR NM 52/2009: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente
- NBR NM 53/2009: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água
- NBR NM 248/2003: Agregados - Determinação da composição granulométrica

Quanto à avaliação do desempenho do concreto, normalmente, são aplicados os ensaios determinados pelas normas técnicas:

- NBR 13278/2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado
- NBR 9778/2009 Versão Corrigida 2/2009: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica
- NBR 13555/2012: Solo-cimento — Determinação da absorção de água — Método de ensaio
- NBR 7222/2011: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos
- NBR 9779/2012: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade
- NBR 11579/2012 Versão corrigida 2013: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200)
- NBR 12042/2012: Materiais inorgânicos - Determinação do desgaste por abrasão
- NBR 9781/2013: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio

- NBR 9457/2013: Ladrilho hidráulico para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio
- NBR 5738/2015 Versão corrigida 2016: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova
- NBR 5739/2018: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos
- NBR 7211/2009 Versão corrigida 2019: Agregados para concreto - Especificação
- NBR 7215/2019: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos
- NBR 7218/2010: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis
- NBR 16889/2020: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

Posteriormente foram consultados artigos técnicos e científicos, teses e dissertações, relacionados à aplicação de resíduos sólidos das mais variadas origens, na fabricação do concreto. Em seguida, os resultados mais relevantes foram compilados e analisados os potenciais de aplicação dos diferentes resíduos na confecção de concreto, considerando seus efeitos nas propriedades do concreto e o atendimento aos padrões estabelecidos pelas normas brasileiras.

Com base nesta análise foram geradas informações sobre os efeitos da adição de resíduos nas propriedades mecânicas e na trabalhabilidade do concreto, bem como, sobre os benefícios ambientais, sociais e econômicos gerados por esta prática.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fundamentação teórica e científica obtida na revisão de literatura foi compilada e os resultados mais relevantes foram analisados, considerando o potencial de aplicação dos diferentes resíduos na confecção de concreto, em função dos efeitos sobre suas propriedades e o atendimento às normas brasileiras. Com base nesta análise foram geradas informações sobre os efeitos da adição de diferentes resíduos sólidos nas propriedades mecânicas e na trabalhabilidade do concreto, bem como, sobre os benefícios ambientais, sociais e econômicos gerados por esta prática.

### 5.1. RASPAS DE PNEUS COMO COMPONENTE DE CONCRETO

Dentre os estudos que abordaram o potencial de uso de raspas de borrachas de pneus como componentes do concreto, destacam-se os realizados por Freitas et al. (2017) e por Santos (2018). Freitas et al. (2017) avaliaram a consistência do concreto fresco determinada pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*<sup>1</sup>), de acordo com a NBR 16889/2020. Estes autores também analisaram a resistência à compressão do concreto, contendo as proporções de 0, 10, 20, 40 e 80% de raspas de pneus inservíveis, para os períodos de cura de 3, 7 e 28 dias dos corpos de prova, conforme NBR 5739/2018. Os resultados de resistência à compressão em diferentes tempos de cura dos corpos de prova e de consistência do concreto fresco, contendo proporções crescentes de raspas de pneus inservíveis são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Consistência do concreto fresco e resistência à compressão, contendo diferentes proporções de raspas de pneus, em diferentes períodos de cura

Raspas de pneus, %	<i>Slump Test</i> , mm	Resistência à Compressão, Mpa		
		3 dias	7 dias	28 dias
0	80	14,50	20,50	20,61
10	80	14,41	13,98	20,61
20	83	11,64	13,63	16,86
40	161	7,31	9,25	10,90
80	141	3,79	4,22	5,45

Fonte: Freitas et al. (2017).

<sup>1</sup>*slump text*: método rápido para definir as características do concreto fresco antes da sua aplicação.

Os autores verificaram que a resistência à compressão do concreto diminuiu com o aumento da proporção de raspas de pneus, mas destacaram que a trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi melhorada e atribuíram esse comportamento à propriedade da borracha de aumentar a flexibilidade do material. Embora o concreto se torne mais trabalhável com o aumento da proporção de raspas de pneus, se for aplicado em obras que demandam altos valores de resistência à compressão, pode vir a sofrer fissuras, rachaduras e comprometer a construção como um todo.

Santos (2018) também avaliou a consistência do concreto fresco, determinada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*<sup>1</sup>), de acordo com a NBR16889/2020; a resistência à compressão (conforme NBR 5739/2018) e a resistência à tração por compressão diametral, seguindo a metodologia da NBR 7222/2011, para concreto contendo as proporções de 0, 5, 10 e 15% de raspas de pneus. A Tabela 2 mostra os resultados para os ensaios de *slump test*, de resistência à compressão e de resistência à compressão diametral.

Tabela 2 - Consistência do concreto fresco, resistência à compressão e à tração por compressão diametral, do concreto contendo diferentes proporções de raspas de pneus

Raspas de pneus, %	<i>Slump Test</i> , mm	Resistência à compressão, MPa			Resistência à tração, Mpa
		3 dias	7 dias	28 dias	
0	3,76	20,14	24,54	26,35	2,77
5	3,68	8,16	10,54	13,39	2,35
10	3,51	6,59	7,23	10,72	2,00
15	3,47	5,72	6,74	8,37	1,50

Fonte: Santos (2018).

Santos (2018) verificou que o concreto apresentou uma pequena redução no valor do *slump test* com o aumento da proporção das raspas de pneus em sua composição, mas esclareceu que, mesmo atendendo ao que determina a norma vigente, a força de compactação aplicada no soquete por uma única pessoa não é a mesma durante todo o ensaio, o que pode ter contribuído para a diminuição dos valores finais do teste de *slump test* para cada concentração de pneus. Os resultados de resistência do concreto à compressão foram semelhantes aos obtidos por Freitas et al. (2017), havendo redução da resistência do concreto com o aumento da proporção de raspas de pneus em sua composição. Santos (2018) obteve menores valores de resistência à compressão que Freitas et al. (2017), o que pode ser devido

<sup>1</sup>O *Slump Test* ou teste de abatimento, é um teste rápido para avaliar a trabalhabilidade do concreto fresco antes de sua aplicação

ao maior tamanho das partículas das raspas de pneus utilizadas por este autor. Neste aspecto, Shu e Huang (2013) recomendaram que a adição de borracha na forma de raspas de pneus, seja feita em partículas de tamanho muito reduzido, sendo para as lascas de pneus de 2,5 cm a 5,0 cm e para o pó de borracha de pneu de 0,475 cm a 0,075 cm, para que a resistência à compressão do concreto não seja diminuída. Santos (2018) verificou que a resistência do concreto à tração por compressão diametral também foi reduzida com o aumento da proporção de raspas de pneus.

Os resultados indicaram que o aumento da proporção de raspas de pneus, em substituição ao agregado miúdo, promoveu a diminuição da resistência do concreto à compressão e à tração por compressão diametral, bem como, da consistência. Desta forma, para que o teste de *slump* do concreto não ultrapasse o valor mínimo de 6 a 8 cm, é necessária a resistência à compressão mínima de 24 Mpa e resistência à tração mínima de 1 a 1,5 Mpa para o concreto simples. De acordo com estes resultados verificou-se que é possível substituir a areia natural por uma proporção de no máximo 10% de raspas de pneus para que não ocorra comprometimento das propriedades do concreto.

## 5.2. PÓ DE PEDRA COMO COMPONENTE DE CONCRETO

Menossi (2004) avaliou o efeito do resíduo conhecido como pó de pedra nas propriedades do concreto, quando aplicado em substituição total e parcial da areia natural. As proporções de pó de pedra utilizadas foram de 25, 50, 75 e 100% que corresponderam aos traços de cimento:agregados secos totais de 1:3,5; 1:5,0; 1:6,5; 1:8,5. Para isso, os agregados, como areia e pó de pedra, foram caracterizados de acordo com a NBR 7211/2019 e com a NBR NM 248/2003. O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a NBR 5739/2018, empregando corpos de prova com os períodos de cura de 7, 28 e 91 dias, sendo os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resistência à compressão do concreto contendo diferentes proporções de pó de pedra após três períodos de cura

Traço	Resistência à compressão, Mpa					
	Pó de Pedra			Areia Natural		
	7 dias	28 dias	91 dias	7 dias	28 dias	91 dias
1:3,5	29,60	36,30	39,30	13,90	18,20	19,80
1:5,0	22,10	25,90	30,60	25,10	29,50	38,10
1:6,5	15,90	22,60	28,10	32,70	38,00	48,00
1:8,5	9,30	13,60	16,30	-	-	-

Fonte: Menossi (2004).

De acordo com estes resultados verificou-se que a resistência à compressão para o concreto contendo pó de pedra no traço 1:3,5 (25% de pó de pedra) foi maior que a do concreto contendo somente areia natural. No traço 1:6,5 a presença de pó de pedra em 75% não teve efeito significativo sobre a resistência do concreto, visto que o resultado final para todas as idades foi inferior à resistência apresentada pelo concreto contendo areia natural. Sá (2006) também concluiu que o pó de pedra pode ser usado na produção de concreto, apresentando melhores resultados quando utilizado como complemento à areia a fim de aumentar a resistência do concreto à compressão.

### 5.3. RESÍDUO DE PET COMO COMPONENTE DE CONCRETO

Almeida (2016) analisou o efeito da adição de resíduo de polietileno tereftalato - PET na confecção de concreto aplicado em piso intertravado de asfalto, substituindo o agregado miúdo por resíduos de PET nas proporções de 2,5; 5; 7,5 e 10%, nos traços (cimento:brita:areia): traço 1 = 1:1,5:1,5; traço 2 = 1:2:2 e traço 3 = 1:2,5:2,5; sendo a relação água/cimento para cada traço de 0,45; 0,50 e 0,55, respectivamente. Os agregados miúdos e graúdos foram caracterizados pelas NBR NM 248/2003, NBR NM 45/2006, NBR NM 30/2001, NBR NM 52/2009, NBR NM 46/2003, NBR NM 49/2001, NBR NM 7218/2010, NBR NM 53/2009, NBR NM 51/2001, conforme prescrevem as normas brasileiras. O cimento foi submetido aos ensaios de massa específica (NBR 6458/2017) e módulo de finura (NBR 11579/2013) e para caracterizar os resíduos de PET foram realizados os ensaios de granulometria e de massa unitária no estado solto e compactado. Após a caracterização dos componentes, os corpos de prova foram moldados e curados por um período de 28 dias. Após o processo de cura, realizaram-se os ensaios de absorção de água (NBR 13555/2012), de resistência à compressão (NBR 5739/2018) e de abrasão (NBR 9781/2013). Na Tabela 4, são apresentados os resultados do ensaio de absorção de água.

Tabela 4 - Absorção de água de concreto contendo diferentes proporções de resíduos PET, traços e relação água/cimento

(continuação)

Relação água/cimento	Traço	Absorção de água, %				
		PET, %				
		0	2,5	5,0	7,0	10,0
0,45	1	4,90	5,17	5,98	6,23	6,56
0,50	1	5,72	6,23	5,69	7,21	7,26
0,55	1	6,84	6,95	7,48	7,93	8,63
0,45	2	4,02	4,62	4,71	4,87	5,83
0,50	2	4,80	5,26	5,38	7,19	7,2

Tabela 4 - Absorção de água de concreto contendo diferentes proporções de resíduos PET, traços e relação água/cimento

(conclusão)

Relação água/cimento	Traço	Absorção de água, %				
		PET, %				
		0	2,5	5,0	7,0	10,0
0,55	2	6,17	6,66	7,02	8,13	8,15
0,45	3	4,30	4,83	4,88	5,74	6,27
0,50	3	4,91	5,08	5,38	6,09	6,90
0,55	3	5,83	5,78	6,12	7,17	8,22

Fonte: Almeida (2016).

Os maiores valores para absorção de água foram obtidos com os corpos de prova de concreto contendo 10% de resíduo PET, o que segundo o autor, ocorreu devido à fraca interação química entre o plástico e a massa de cimento, promovendo maior absorção de água. Na Tabela 5, são apresentados os resultados obtidos pelo autor para o ensaio de resistência à compressão axial do concreto contendo diferentes proporções de PET, traços e relação água/cimento, conforme metodologia descrita na NBR 5739/2018.

Tabela 5 - Resistência à compressão axial de concreto contendo diferentes proporções de resíduos PET, traços e relação água/cimento

Relação água/cimento	Traço	Resistência à compressão axial, Mpa				
		PET, %				
		0	2,5	5,0	7,0	10,0
0,45	1	42,46	39,90	39,43	36,16	35,01
0,50	1	46,47	45,91	41,78	37,67	36,99
0,55	1	51,61	50,21	48,85	42,53	38,47
0,45	2	40,20	34,61	33,33	33,13	26,78
0,50	2	41,41	38,72	38,18	36,32	31,33
0,55	2	50,63	49,37	43,57	38,96	37,63
0,45	3	33,49	32,55	33,52	31,18	24,74
0,50	3	38,14	36,37	35,67	33,49	29,14
0,55	3	41,18	40,76	40,16	36,21	33,07

Fonte: Almeida (2016).

Almeida (2016) verificou diminuição da resistência à compressão axial do concreto com o aumento da relação água/cimento e da proporção de resíduos PET em sua composição, resultado semelhante aos obtidos por Modro (2008) e por Martins et al. (2018). Esse comportamento do concreto contendo maior proporção de resíduos PET, pode ser explicado

pela baixa interação química entre o plástico e o cimento, não sendo recomendada sua adição em substituição à areia na composição de concreto utilizado para fins estruturais. A adição de resíduos PET ao concreto pode ser realizada para uso em pavimentos (MARTINS et al., 2018). Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de abrasão, conforme NBR 9781/2013, utilizando o concreto no traço 1.

Tabela 6 – Resistência à abrasão do concreto contendo diferentes proporções de resíduo PET para a relação água/cimento 0,45

PET, %	Largura de cavidade, mm
0,0	17,60
2,5	17,60
5,0	18,30
7,5	19,70
10,0	20,20

Fonte: Almeida (2016).

O concreto apresentou maior resistência à abrasão com a adição de 2,5% de resíduo PET e com a relação água/cimento de 0,45, atendendo as especificações da NBR 9781/2013, podendo ser aplicado em pisos intertravados de concreto para asfalto, em pátios de carga de indústrias petroquímicas, frigoríficas e alimentícias (ALMEIDA, 2016).

#### 5.4. CINZA DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR COMO COMPONENTE DE CONCRETO

Martins Filho e Alves (2017) avaliaram o efeito da cinza do bagaço da cana de açúcar como substituto parcial da areia natural na produção de concreto, quando aplicada em proporções de 30, 40 e 50% da fração do agregado miúdo. Os agregados miúdo e graúdo foram caracterizados por meio de ensaios estabelecidos pelas normas brasileiras. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão; resistência à tração; absorção de água por imersão e capilaridade. Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão.

Tabela 7 - Resistência à compressão do concreto contendo proporções de cinza de bagaço de cana

Cinza de Bagaço de cana, %	Resistência à compressão para 7 e 28 dias, Mpa					
	CP* 1	CP* 2	CP* 3	CP* 1	CP* 2	CP* 3
0	22,55	24,09	22,10	29,34	29,18	29,93
30	24,04	23,40	24,70	20,73	39,89	31,35
40	24,99	24,51	24,53	29,96	30,34	29,38
50	21,83	19,09	17,33	28,31	25,74	27,94

\* CP: Corpo de prova.

Fonte: Martins Filho e Alves (2017).

O concreto contendo 30 e 40% de cinza de bagaço de cana apresentou resistência à compressão semelhante ao tradicional (MARTINS FILHO e ALVES, 2017). Na Tabela 8 são apresentados os resultados para o ensaio de resistência à tração aos 28 dias de cura do concreto contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana.

Tabela 8 - Resistência à tração do concreto contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana aos 28 dias de cura.

Cinza de bagaço de cana, %	Resistência à tração para 28 dias, Mpa		
	CP* 1	CP* 2	CP* 3
0	2,58	2,65	2,55
30	2,76	2,70	3,14
40	2,73	2,92	3,17
50	2,90	2,81	2,18

\* CP: Corpo de prova.

Fonte: Martins Filho e Alves (2017).

A resistência à tração foi similar entre as proporções de cinza de bagaço de cana em relação ao concreto de referência, sendo que em cada corpo de prova, uma proporção da cinza obteve resultado próximo ao do concreto de referência. Na Tabela 9 são apresentados os resultados encontrados para o teste de absorção de água.

Tabela 9 - Absorção de água de concreto contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana aos 28 dias de cura

Cinza de bagaço de cana, %	Absorção de água aos 28 dias, %		
	CP* 1	CP* 2	CP* 3
0,0	6,93	7,08	7,02
30,0	6,94	5,32	5,96
40,0	6,48	6,39	5,15
50,0	5,02	5,10	4,72

\* CP: Corpo de prova.

Fonte: Martins Filho e Alves (2017).

A absorção de água diminuiu com o aumento da proporção de cinza de bagaço de cana no concreto, por promover um arranjo mais compacto dos grânulos, reduzindo os capilares e os vazios, que normalmente são preenchidos por água neste material. Na Tabela 10 são apresentados os resultados do teste de capilaridade para o concreto contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana, aos 28 dias de cura.

Tabela 10 - Capilaridade do concreto contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana aos 28 dias de cura

Cinza de bagaço de cana, %	Capilaridade aos 28 dias, g/cm <sup>2</sup>		
	CP* 1	CP* 2	CP* 3
0,0	0,60	0,48	0,67
30,0	0,62	0,59	0,49
40,0	0,52	0,57	0,28
50,0	0,20	0,18	0,18

\* CP: Corpo de prova.

Fonte: Martins Filho e Alves (2017).

A capilaridade do concreto diminuiu com o aumento da proporção de cinza de bagaço de cana nas amostras.

A trabalhabilidade do concreto no estado fresco, foi avaliada pelo método do *slump test* (método rápido para definir as características do concreto fresco antes da sua aplicação) e os resultados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Trabalhabilidade do concreto no estado fresco, contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana

Cinza de bagaço de Cana, %	Slump Test, cm
0	8
30	5
40	5
50	2

Fonte: Martins Filho e Alves (2017).

A trabalhabilidade do concreto diminuiu com o aumento da proporção de cinza de bagaço de cana.

A adição de cinza de bagaço de cana substituindo em 30 e 40% a areia natural na produção de concreto melhorou sua resistência à compressão e à tração; a absorção de água por imersão e capilaridade.

Bessa (2011) também avaliou a adição da cinza de bagaço de cana em substituição parcial da areia natural nas proporções de 10, 20, 30, 50 e 100% na produção de corpos de prova de argamassa submetidos aos ensaios de resistência à compressão (NBR 5738/2016 e NBR 7215/2019) e de massa específica (NBR 13278/2005). A argamassa contendo 30% e 50% de cinza de bagaço de cana apresentou maior resistência à compressão, sendo estas proporções aplicadas, posteriormente, na produção de concreto. Para a realização desse estudo, inicialmente foram realizados ensaios de caracterização da areia quartzosa (NBR NM 30/2001, NBR NM 52/2009, NBR NM 45/2009 e NBR NM 248/2003), da brita basáltica (NBR NM 53/2009, NBR NM 45/2009 e NBR NM 248/2003) e da cinza de bagaço de cana (NBR 16605/2017 e NBR NM 45/2006). Os cimentos utilizados foram o Portland V ARI RS (de alta resistência inicial), o Portland III 40 RS (de alto forno, resistente a sulfatos) e o Portland II E 32 (cimento de alto forno). Para o concreto, foi aplicado o Método de Dosagem ABCP, sendo atribuída a resistência de cada tipo de cimento. O concreto no estado fresco foi submetido ao *Slump Test* (método rápido para definir as características do concreto fresco antes da sua aplicação), cujos resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados do *Slump Test* para o concreto no estado fresco

Cinza de bagaço de cana, %	CPV ARI RS	CPIII 40 RS	CPII E 32
	Abatimento, cm		
0	6,5	7,0	7,0
30	6,5	6,5	8,0
50	7,5	6,0	7,5

Fonte: Bessa (2011).

O *Slump Test* (método rápido para definir as características do concreto fresco antes da sua aplicação) não indicou a ocorrência de exsudação e segregação de materiais do concreto no estado fresco.

Para o concreto no estado sólido, foram realizados os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e análise do índice de vazios no

período de cura de 28 dias. Os resultados de resistência à compressão são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resistência à compressão do concreto contendo três tipos de cimento e cinza de bagaço de cana aos 28 dias de cura

Cinza de bagaço de cana, %	CPV ARI RS	CPIII 40 RS	CPII E 32
	Resistência à compressão, Mpa		
0	44,77	25,61	23,78
30	42,67	23,47	27,98
50	43,05	22,47	28,72

Fonte: Bessa (2011).

O concreto contendo 50% de cinza de bagaço de cana apresentou a menor resistência à compressão, quando foi usado o cimento Portland III 40 RS. A resistência à compressão foi mais próxima a do concreto de referência quando foi usado o cimento Portland V ARI RS, independentemente da quantidade de cinza adicionada à mistura.

A Tabela 14 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral do concreto contendo diferentes proporções de bagaço de cana, aos 28 dias de cura.

Tabela 14 - Resistência à tração por compressão diametral do concreto contendo diferentes proporções de bagaço de cana, aos 28 dias de cura.

Cinza de bagaço de cana, %	CPV ARI RS	CPIII 40 RS	CPII E 32
	Resistência à tração aos 28 dias, Mpa		
0	3,05	2,52	2,89
30	3,02	2,65	2,97
50	2,99	2,96	3,36

Fonte: Bessa (2011).

A resistência à tração por compressão diametral, quando se usou 30% da cinza de bagaço apresentaram resultados mais próximos ao de referência, e quando se usou a concentração de 50% houve uma leve diferença entre os valores sem a presença da cinza.

A Tabela 15 representa os resultados para índice de vazios do concreto contendo proporções de cinza de bagaço de cana.

Tabela 15 - Índice de vazios do concreto contendo diferentes proporções de cinza de bagaço de cana

Cinza de bagaço de cana, %	CPV ARI RS	CPIII 40 RS	CPII E 32
	Índice de Vazios, %		
0	12,10	15,93	12,16
30	12,06	12,51	11,92
50	12,55	13,87	13,16

Fonte: Bessa (2011).

O menor índice de vazios do concreto ocorreu quando foi utilizado o cimento CPII E 32 na proporção de 30% de cinza e o maior valor foi encontrado quando se usou 50% de proporção da cinza e o cimento CPIII 40 RS. Estes resultados foram semelhantes aos obtidos por Lopes et al. (2004) e Bortolletto et al. (2004), indicando que a adição da cinza de bagaço de cana é uma opção tecnicamente viável na produção de concreto.

#### 5.5. AGREGADOS RECICLADOS DE RCD COMO COMPONENTE DE CONCRETO

Zordan (1997) apresentou uma análise consistente da substituição de agregados naturais por agregados reciclados de resíduos da construção civil e demolição (RCD) de Classe A (argamassa, cerâmica, concreto, pedras) na produção de concreto. Foram coletadas quatro amostras de agregados reciclados em quatro dias distintos que foram denominadas de amostras A, B, C e D. Estas amostras de agregados reciclados, foram caracterizadas quanto à granulometria, conforme determinam as normas NBR NM 248/2003 e NBR NM 27/2001 e os agregados naturais foram caracterizados conforme a NBR 7211/2009.

O concreto foi avaliado nos traços (cimento:areia) 1:3, 1:5 e 1:7, em corpos de prova de 15x30 cm e para o traço 1:5 na dimensão de 7,5x7,5x7,5 cm. Os corpos de prova foram submetidos à cura por 7, 28, 34 e 63 dias e, posteriormente, aos ensaios de resistência à compressão, resistência à abrasão e de permeabilidade.

Inicialmente foi realizado um ensaio de resistência à compressão com os corpos de prova contendo somente agregados reciclados na idade de 7 dias para estimar a resistência das amostras em idades mais elevadas. As amostras dos agregados reciclados foram separadas em duas faixas granulométricas, denominadas E<sub>1</sub> (material passante pela peneira 38mm e retido na peneira 0,15mm) e E<sub>2</sub> (material passante pela peneira 38mm e retido na peneira 0,30mm). Na Tabela 16 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à

compressão aos 7 dias de cura para as faixas granulométricas E<sub>1</sub> e E<sub>2</sub> das amostras de agregados reciclados no traço 1:5 (cimento:areia).

Tabela 16 - Resistência à compressão para as faixas granulométricas E<sub>1</sub> e E<sub>2</sub> no traço 1:5 aos 7 dias de cura

Faixa Granulométrica	Resistência à compressão, Mpa			
	Agregados Reciclados			
	A	B	C	D
E <sub>1</sub>	11,40	10,10	10,50	11,50
E <sub>2</sub>	12,40	10,60	8,50	10,60

Fonte: Zordan (1997).

As amostras de agregados reciclados A e D apresentaram maior resistência à compressão que as demais. Na Tabela 17 são apresentados os resultados de resistência à compressão do concreto contendo agregados reciclados e agregados naturais aos 28 dias de cura.

Tabela 17 - Resistência à compressão do concreto contendo agregados reciclados de entulho de RCD aos 28 dias

Traço do concreto	Resistência à compressão, Mpa				
	Agregados Reciclados				Agregados naturais
	A	B	C	D	R*
1:3	30,30	23,60	21,10	23,50	50,00
1:5	20,60	18,20	16,50	18,60	29,90
1:7	15,20	14,00	13,20	13,70	15,10

\* R: Concreto de Referência, contendo agregados naturais (areia e brita).

Fonte: Zordan (1997).

O concreto contendo agregados reciclados da amostra A apresentou uma maior resistência à compressão quando se usou o traço 1:3 em relação às demais. No entanto, a resistência do concreto contendo agregados reciclados foi inferior a do concreto de referência, contendo areia e brita. Somente no traço 1:7, a resistência foi próxima a do concreto de referência, o que pode ter ocorrido devido ao menor consumo de cimento neste traço. A Tabela 18 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão axial do concreto contendo agregados reciclados, no traço 1:5, aos 34 dias de cura.

Tabela 18 - Resistência à compressão axial do concreto contendo agregados reciclados de entulhos de RCD aos 34 dias de cura

Traço	Resistência à compressão axial, Mpa				
	Agregados Reciclados				Agregados Naturais
	A	B	C	D	R*
1:5	19,5	16,90	15,70	20,80	36,10

\* R: Concreto de Referência, contendo agregados naturais (areia e brita).

Fonte: Zordan (1997).

A resistência à compressão axial do concreto contendo agregados reciclados com a granulometria de 7,5x7,5x7,5 cm, aos 34 dias de cura, foi inferior à do concreto de referência, sendo inferior também à resistência obtida aos 28 dias de cura.

A Tabela 19 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão axial do concreto contendo agregados reciclados aos 60 dias de cura.

Tabela 19 – Resistência à compressão axial do concreto contendo agregados reciclados de entulho de RCD aos 60 dias de cura

Traço	Resistência à compressão axial, Mpa				
	Agregados Reciclados				Agregados naturais
	A	B	C	D	R*
1:3	32,00	25,30	22,90	25,50	57,80
1:5	23,00	20,20	17,90	20,10	36,30
1:7	17,10	16,20	14,00	15,80	17,60

\* R: Concreto de Referência, contendo agregados naturais (areia e brita).

Fonte: Zordan (1997).

O concreto contendo agregados reciclados aos 60 dias de cura também apresentou resistência à compressão axial inferior à do concreto de referência, sendo os resultados semelhantes aos obtidos para o concreto aos 28 dias de cura.

Em todos os períodos de cura, o concreto no traço 1:7, apresentou resistência à compressão mais próxima a do concreto de referência, diferentemente dos concretos contendo maior proporção de cimento, nos traços 1:3 e 1:5. Segundo Zordan (1997) esse comportamento pode ser justificado pela presença de cimento nos agregados reciclados, o que permite um aumento da resistência à compressão quando é utilizado um traço mais fraco (1:7) na produção do concreto.

A Tabela 20 apresenta os resultados de resistência à abrasão do concreto contendo agregados reciclados aos 34 dias de cura no traço 1:5.

Figura 20 - Resistência à abrasão do concreto contendo agregados reciclados de entulhos de RCD aos 34 dias de cura no traço 1:5

Desgaste	Resistência à abrasão, mm				
	Agregados Reciclados				Agregados Naturais
	A	B	C	D	R*
500m	1,08	1,00	0,81	0,83	1,18
1000m	1,79	1,60	1,39	1,42	1,96

\* R: Concreto de Referência, contendo agregados naturais (areia e brita).

Fonte: Zordan (1997).

O concreto contendo agregados reciclados de RCD aos 34 dias de cura apresentou menor resistência à abrasão que o concreto de referência e atendeu à NBR 9457/2013, que determina que o desgaste aos 1000m deve ser menor que 3mm.

A Tabela 21 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de permeabilidade do concreto contendo agregados reciclados, no traço 1:5, aos 34 dias de cura.

Tabela 21 - Permeabilidade do concreto contendo agregados reciclados de entulho de RCD, no traço 1:5, aos 34 dias de cura

	Permeabilidade média, $10^{-16} \text{ m}^2$				
	Agregados Reciclados				Agregados naturais
	A	B	C	D	R*
CP <sub>1</sub>	0,148	0,290	0,022	0,014	0,174
CP <sub>2</sub>	0,125	1,105	0,067	0,243	0,066
média	0,137	0,698	0,045	0,129	0,120

\* R: Concreto de Referência, contendo agregados naturais (areia e brita). CP<sub>1</sub> e CP<sub>2</sub>: Corpos de prova

Fonte: Zordan (1997).

De acordo com Zordan (1997), todos os corpos de prova apresentaram valores de permeabilidade semelhantes aos do concreto de referência, somente na amostra B foi obtido um valor muito elevado para um dos corpos de prova, o que pode significar problemas com o corpo de prova e não com o concreto em si. Por outro lado, a amostra C apresentou valores de permeabilidade bem inferiores às demais, sendo a amostra com os menores valores de

resistência à compressão do concreto. Portanto, a maior permeabilidade do concreto não está necessariamente relacionada à menor resistência à compressão (ZORDAN, 1997).

Os ensaios realizados por Zordan (1997) indicaram que, à medida que se diminuiu o consumo do cimento, a resistência à compressão do concreto contendo agregados reciclados se aproximou dos valores apresentados pelo concreto de referência, enquanto a resistência à abrasão foi maior em todos os casos onde se usou agregado reciclado. Os resultados deste estudo permitiram concluir que os agregados reciclados podem ser utilizados na confecção de concreto não estrutural destinados à infraestrutura urbana.

Gonçalves (2011) avaliou os efeitos da substituição de 50% do agregado natural graúdo por agregado reciclado de RCD nas propriedades do concreto. A empresa fornecedora dos agregados reciclados realiza a cura convencional (ao ar) e a cura térmica (por vapor d'água) destes agregados. A caracterização dos agregados graúdos foi realizada de acordo com as normas NBR NM 45/2009, NBR NM 52/2009 e NBR NM 248/2003.

Os corpos de prova de concreto de referência e contendo 50% de agregados reciclados com cura tradicional e térmica, e com as diferentes relações água/cimento (0,6; 0,49, 0,42), foram moldados nos tamanhos de 10x20 cm, curados nos períodos de 7, 28 e 63 dias. Estes corpos de provas foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão (NBR 5739/2018) e resistência à tração por compressão diametral (NBR 5739/2018). A Tabela 22 apresenta os resultados de resistência à compressão do concreto contendo 50% de agregados reciclados em substituição ao agregado natural graúdo, com diferentes relações água/cimento, aos 7, 28 e 63 dias de cura.

Tabela 22 - Resistência à compressão do concreto contendo 50% de agregados reciclados aos 7, 28 e 63 dias de cura.

Água/cimento	Agregado	Resistência à compressão, Mpa		
		7 dias	28 dias	63 dias
0,60	Natural	17,90	26,60	31,10
	Com cura convencional	24,70	28,80	32,30
	Com cura térmica	20,10	23,90	25,60
0,49	Natural	21,00	29,10	37,40
	Com cura convencional	31,40	35,10	43,70
	Com cura térmica	21,50	30,40	28,20
0,42	Natural	28,10	45,60	44,30
	Com cura convencional	31,80	44,90	48,70
	Com cura térmica	25,90	31,20	38,30

Fonte: Gonçalves (2011).

O concreto contendo agregados reciclados submetidos à cura convencional apresentou maior resistência à compressão que o concreto contendo agregados reciclados submetidos à cura térmica. O concreto contendo agregados reciclados submetidos à cura tradicional foi mais resistente à compressão que o concreto contendo agregado natural, sendo menor somente na relação água/cimento 0,42 e para o período de 28 dias. O concreto contendo agregados reciclados submetidos à cura térmica, apresentou menor resistência à compressão que o concreto contendo agregado natural, sendo superior na relação água/cimento 0,60 para a idade de 7 dias e para a relação água/cimento 0,49 para as idades de 7 e 28 dias.

A Tabela 23 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral do concreto contendo 50% de agregados reciclados submetidos a cura térmica e convencional em substituição ao agregado natural graúdo, com diferentes relações água/cimento aos 28 dias de cura.

Tabela 23 - Resistência à tração por compressão diametral do concreto contendo 50% de agregados reciclados em substituição ao agregado natural graúdo aos 28 dias de cura

Água/cimento	Agregados	Resistência à tração, Mpa
0,60	Natural	8,60
	Com cura convencional	9,20
	Com cura térmica	6,20
0,49	Natural	10,10
	Com cura convencional	10,50
	Com cura térmica	8,40
0,42	Natural	12,70
	Com cura convencional	12,90
	Com cura térmica	9,90

Fonte: Gonçalves (2011).

O concreto contendo 50% de agregados reciclados tratados por cura tradicional em substituição ao agregado natural graúdo apresentou maior resistência à tração por compressão diametral que o concreto de referência, sendo menor a resistência do concreto contendo agregados reciclados tratados por cura térmica. Estes resultados indicam que os processos de cura podem ter efeito sobre o desempenho dos agregados reciclados e afetar as propriedades do concreto no estado sólido.

A análise dos resultados fornecidos pela literatura permitiu concluir que os resíduos da construção civil e demolição de Classe A, na forma de agregados reciclados, apresentam elevado potencial de uso como componente de concreto sem função estrutural ou que exija menor resistência mecânica.

## 5. CONCLUSÕES

As informações obtidas na literatura nacional evidenciaram a necessidade de mudanças conceituais nos modelos construtivos tradicionais adotados pela indústria brasileira da construção civil, para que materiais, como o concreto contendo diferentes resíduos sólidos, sejam utilizados efetivamente, visando aumentar a sustentabilidade deste setor econômico.

O uso de raspas de borracha de pneus na produção de concreto impede a queima ou a destinação inadequada de pneus inservíveis, reduzindo os potenciais impactos ambientais destes resíduos, quando não são devolvidos aos fabricantes no sistema de logística reversa. As raspas de borracha de pneus podem ser utilizadas como componente do concreto, substituindo parcialmente a areia natural em até 10%, sem comprometer as propriedades mecânicas do concreto, que pode ser utilizado em pavimentação de rodovias, em construção de meio fio, de calçadas e outras obras similares.

O pó de pedra pode ser empregado na produção de concreto, substituindo parcialmente a areia natural na proporção de 25%, no traço de 1:3,5 (cimento:agregado seco), visando aumentar a resistência mecânica deste material, que pode ser utilizado em blocos de concreto, em camadas de asfalto e como concreto compactado.

Resíduos de PET podem substituir a areia natural em até 10,0% na confecção de concreto com relação água/cimento de 0,45, que pode ser utilizado em obras sem função estrutural, como em pátios de indústrias e em asfaltos, em situações de elevado tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais.

A cinza de bagaço de cana pode ser utilizada como suplemento para o cimento por apresentar características pozolânicas e pode substituir a areia em 30% a 50%, sem causar alterações consistentes na resistência à compressão e à tração, na absorção de água por imersão e capilaridade e no índice de vazios. O concreto contendo cinza de bagaço de cana pode ser aplicado na construção de pilares, lajes e baldrames, que exigem materiais com resistência à compressão de 25 Mpa, e em pisos e calçadas, com resistência à compressão de 20 Mpa.

Os resíduos da construção civil e demolição de Classe A podem ser utilizados como agregados reciclados, substituindo em 50% o agregado natural na produção de concreto,

aplicado em peças para drenagem superficial de estradas e em blocos de concreto sem função estrutural, com elevado potencial de uso como componente de concreto sem função estrutural ou que exija menor resistência à compressão.

É necessário o desenvolvimento de tecnologias que possam auxiliar a segregação dos resíduos de construção civil e demolição no canteiro de obras, para que os agregados reciclados atendam aos padrões de qualidade e possam substituir totalmente os agregados naturais na produção de concreto e reduzir o consumo de agregados naturais, gerando benefícios ambientais e econômicos para o setor da construção civil.

## REFERÊNCIAS

- AECWEB. **Com ar incorporado, concreto celular proporciona isolamento termoacústico.** Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/com-ar-incorporado-concreto-celular-proporciona-isolamento-termoacustico/15378>. Acesso em: 05 fev. 2021.
- ALBUQUERQUE, A. C. *et al.* Adição de borracha de pneu ao concreto compactado com rolo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 2004, Florianópolis - SC. **Anais [...]**. Florianópolis - SC: IBRACON, 2004.
- ALMEIDA, S.P. **Uso de politereftalato de etileno (PET) como agregado em peças de concreto para pavimento intertravado.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2016.
- ALMEIDA REPRESENTAÇÕES. **Pó de brita.** Disponível em: <https://almeidarepresentacoes.com.br/produtos/po-de-brita/>. Acesso em: 07 jul. 2020.
- ANDRIOLO, F. R. Uso e abusos do pó de pedra em diversos tipos de concreto. *In: SEMINÁRIO O USO DA FRAÇÃO FINA DA BRITAGEM-SUFFIB*, 2005, São Paulo-SP. **Anais [...]**. São Paulo - SP: EPUSP, 2005.
- ARS AEDIFICATIVA. **Estudo do concreto como material: o concreto endurecido.** Disponível em: <https://www.arsaedificativa.com/2016/02/estudo-doconcreto-como-material.html>. Acesso em: 07 jul. 2020.
- ASOPE ENGENHARIA. **Concreto projetado: principais características e vantagens.** Disponível em: <https://www.asope.com.br/single-post/2018/11/05/concreto-projetado>. Acesso em: 05 fev. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118: projetos de estruturas de concreto: procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14931: execução de estruturas de concreto: procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12644: concreto leve celular estrutural: determinação da densidade de massa aparente no estado fresco.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13438: blocos de concreto celular autoclavado: requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13440: blocos de concreto celular autoclavado: métodos de ensaios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14956-1: Blocos de concreto celular autoclavado: execução de alvenaria sem função estrutural parte 1: procedimento com argamassa colante industrializada.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14956-2:** blocos de concreto celular autoclavado: execução de alvenaria sem função estrutural parte 2: procedimento com argamassa colante industrializada. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16697:** cimento portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12655:** concreto de cimento portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8953:** concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14026:** concreto projetado: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15823-1:** concreto autoadensável parte 1: classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15823-2:** concreto autoadensável parte 2: determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual: método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15575-2:** edificações habitacionais: desempenho parte 2: requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12815:** concreto endurecido: determinação do coeficiente de dilatação térmica linear: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7222:** concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211:** agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739:** concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16889:** concreto: determinação do teor de ar em concreto fresco: método pressométrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45:** agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248:** agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 30:** agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 27:** agregado: redução da amostra de campo para ensaios de laboratórios. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52:** agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 46:** agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75  $\mu\text{m}$ , por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 49:** agregado miúdo: determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 53:** agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 51:** agregado graúdo: ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6458:** grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11579:** cimento portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13555:** solo-cimento: determinação da absorção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9781:** projetos de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9457:** ladrilhos hidráulicos: especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118:** peças de concreto para pavimentação: especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738:** concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7215:** cimento portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7218:** agregados: determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13278:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9778:** argamassa e concreto endurecido: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9779:** argamassa e concreto endurecido: determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12042:** materiais inorgânicos: determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

AWA COMERCIAL. **Concreto protendido reduz custos, materiais e tempo de obra.** 2020. Disponível em: <http://awacomercial.com.br/blog/concreto-protendido-reduz-custos-materiais-e-tempo-de-obra/>. Acesso em: 07 jul. 2020.

BARTH, F.; *et al.* Reciclagem de garrafas PET para a pré-fabricação de habitação de interesse social. *In:* CONGRESSO NACIONAL DE CONSTRUÇÃO, 2004, Porto. **Atas** [...]. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Portugal, 2004. Tema: Construção 2004: Repensar a Construção.

BASTOS, P.S.S. **Fundamentos do concreto armado.** Disponível em: [www.feb.unesp.br/pbastos](http://www.feb.unesp.br/pbastos). Acesso em: 06 jun. 2020.

BAUER, L.A. F. **Materiais de construção:** Novos materiais para construção. 5.ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. v.1.

BESSA, A.R.L. **Utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2011.

BLOG DA ATEX. **Conheça os principais tipos de concreto utilizados na construção civil.** 2020. Disponível em: <https://www.atex.com.br/blog/materiais/conheca-os-principais-tipos-de-concreto-utilizado-na-construcao-civil/>. Acesso em: 06 jun. 2020.

BLOG DA ENGENHARIA CIVIL. **Plano de concretagem.** Disponível em: <https://blogdaengenhariacivil.wordpress.com/2015/03/12/plano-de-concretagem/>. Acesso em: 06 jun. 2020.

BORTOLETTO, M.M.F. *et al.* Confecção de concreto utilizando a cinza de bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo. *In:* ENCONTRO DE TECNOLOGIA DA

UNIUBE, 2014, Uberaba - MG. **Anais** [...]. Uberaba - MG: UNIUBE, 2014. Disponível em: [www.uniube.com.br](http://www.uniube.com.br). Acesso em: 14 out. 2020.

CARPES, J. V. **A influência de substituição parcial dos agregados naturais por resíduo da indústria metal mecânica, com vista a produção de concreto pesado**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí - RS, 2018.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió - AL, 2006.

COELHO, F. C. A. Utilização de garrafa PET na fabricação de lajes nervuradas. *In*: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES, 2006, Havana. **Anais** [...]. Havana, 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução Conama nº 307, de 5 de julho de 2002. Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Brasília, nº136, de 17 de julho de 2002, seção 1, p. 95-96. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>. Acesso em: 07 dez.2020.

FAZ FÁCIL. **Traços do concreto**: misturas e cuidados gerais para um resultado bom. 2020. Disponível em: <https://www.fazfacil.com.br/reforma-construcao/tracos-concreto-mistura/>. Acesso em: 02 jul. 2020.

FIGUEIREDO, A. F. **Concreto projetado**: fatores intervenientes no controle de qualidade do Processo. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 1992.

FORLIN, M.; BIRCK, M. **Concreto pesado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2020. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/jrmarquinhos/concreto-pesado>. Acesso em: 08 jun. 2020.

FREITAS, M. S. *et al.* Estudo de concreto não estrutural produzido com resíduo de recauchutagem de pneu. *In*: IBRACON - CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2017, Bento Gonçalves - RS. **Anais** [...] Bento Gonçalves - RS: IBRACON, 2017.

GONÇALVEZ, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado para a produção de novos concretos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo - RS, 2011.

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto**: um novo material para dosagens naturais. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2001.

HAMASSAKI, L. T. *et al.* Uso do entulho como agregado para argamassas de alvenaria. *In*: SEMINÁRIO SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo - SP. **Anais** [...] São Paulo- SP: PCC - USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo - SP, 1996.

KANNING, R. C. *et al.* **A tecnologia do concreto aliado ao meio ambiente.** Disponível em: <https://mac.arq.br/wp-content/uploads/2016/03/Blocos-ISOPET-An%C3%A1lise-T%C3%A9cnica.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2020.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Propriedades mecânicas de argamassas produzidas com entulho de construção civil. *In: SEMINÁRIO SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO*, 1996, São Paulo - SP. **Anais [...]** São Paulo - SP: PCC - USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1996.

LOPES, B.C.S. *et al.* Análise da viabilidade da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento portland. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 9, n. 3, 2014. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/index.php/reec/index>. Acesso em: 14 out. 2020.

MANDACARU ONLINE. **Bagaço de cana pode substituir cimento para a fabricação de tijolos baratos e ecologicamente sustentável.** 2020. Disponível em: <https://www.mandacaruonline.com/post/2018/03/15/baga%C3%A7o-de-cana-pode-substituir-cimento-para-a-fabrica%C3%A7%C3%A3o-de-tijolos-baratos-e-ecologicame>. Acesso em: 07 jul. 2020.

MAPA DA OBRA. **Concreto armado.** Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/negocios/concreto-armado-2/>. Acesso em: 06 jul. 2020.

MARTINS, C.H; MARCANTONIO, G.P.A; LENINE, A. **Resistência simples à compressão e módulo de elasticidade do concreto produzido com substituição parcial de agregado miúdo por resíduos plásticos.** Mix Sustentável, Florianópolis - SC, 2018.

MARTINS FILHO, S. T. **Utilização da cinza leve e pesada do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo mineral na confecção de blocos de concreto para pavimentação.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá - PR, 2015.

MARTINS FILHO, S.T.; ALVES, L.S. Concreto com adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar com granulometria específica. **Synergismus scyentifica**, Pato Branco - PR, v.12, n.1, 2017.

MASSA CINZENTA. **Garrafas PET substituem areia em bloco de concreto.** 2020. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/garrafas-pet-em-bloco-de-concreto/>. Acesso em: 07 jul. 2020.

MASSA CINZENTA. **Transporte do concreto requer cuidados especiais.** Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/transporte-do-concreto-requercuidados-especiais/>. Acesso em: 07 jul. 2020.

MASSA CINZENTA. **Concreto autoadensável: o que é mito e o que é verdade.** Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/concreto-autoadensavel-mitos-verdades/>. Acesso em: 05 fev. 2021.

MENOSSEI, R.T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira - SP, 2004.

MENOSSE, R. T. *et al.* Pó de pedra: uma alternativa ou um complemento ao uso da areia na elaboração de misturas de concreto? **HOLOS Environment**, Ilha Solteira - SP v. 10, n. 2, 2010.

MODRO, N.L.R. **Desenvolvimento e caracterização de concreto de cimento Portland contendo resíduos poliméricos de PET**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville - SC, 2008.

NUGENT, F.R. Ensaios com areia artificial: como melhorar seu concreto. *In*: COLÓQUIO SOBRE “AGREGADOS PARA CONCRETO”, 1979, São Paulo - SP. **Anais [...]** São Paulo - SP: IBRACON, 1979.

NUNES, G. F. N.; ALVIN, R. C.; ALVIN, R. A. A. Uso de concreto leve para a produção de elemento estrutural na região cacauzeira. *In*: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13.; SEMANA DE PESQUISA PÓS-GRADUAÇÃO DA UESC, 9., 2007, Bahia. **Anais [...]**. Ilhéus - BA: UESC, 2007.

PAULA, M. O. *et al.* Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v. 13, n. 3, 2009.

PEREIRA, C. **O que é concreto celular?** Disponível em:  
<https://www.escolaengenharia.com.br/concreto-celular/>. Acesso em: 07 jul. 2020.

PIATTI, T. M.; RODRIGUES, R. A. F. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**. Alagoas: Editora da Universidade Federal de Alagoas, 2005. Disponível em: [http://www.usinaciencia.ufal.br/multimidia/livros-digitais-cadernos-tematicos/Plasticos\\_caracteristicas\\_usos\\_producao\\_e\\_impactos\\_ambientais.pdf](http://www.usinaciencia.ufal.br/multimidia/livros-digitais-cadernos-tematicos/Plasticos_caracteristicas_usos_producao_e_impactos_ambientais.pdf). Acesso em: 03 set. 2017.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção: estudo de uso em argamassa**. 1986. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Arquitetura e Planejamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 1986.

PORTAL DO CONCRETO. **Concreto leve**. Disponível em:  
<https://www.portaldoconcreto.com.br/concreto-leve>. Acesso em: 07 jul. 2020.

PRÉ-FABRICAR. **Concreto na construção civil: o básico**. Disponível em: <https://prefabricar.com.br/concreto-na-construcao-civil-o-basico/>. Acesso em: 02 jul. 2020.

RESO SOLUÇÕES AMBIENTAIS. **Vende-se raspas de borrachas de pneus**. Disponível em: <http://resoambiental.com/portfolio-item/vende-se-raspas-de-borracha-de-pneu/>. Acesso em: 07 jul. 2020.

RODRÍGUEZ, A.L.; *et al.* Aprimoramento tecnológico de habitações populares construídas com materiais alternativos. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2006, Porto Alegre - RS. **Anais [...]** Porto Alegre - RS: ABES, 2006.

SÁ, M.V.V.A. **Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2006.

SÃO JOSÉ DOS PINHAIS (Município). **Empresas transportadoras de resíduos de construção civil**. Disponível em: <http://www.sjp.pr.gov.br/secretarias/secretaria-meio-ambiente/servicos/empresas-transportadoras-de-residuos-de-construcao-civil/>. Acesso em: 07 jul. 2020.

SANTOS, R. E. **A armação do concreto no Brasil: história da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia**. 2008. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2008.

SANTOS, R. M. **Sugestões de aplicação concreto borracha em obras civis**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Roraima, Boa Vista - RR, 2018.

SHU, X.; HUANG, B. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement: an overview. **Construction and Building Materials**, 67, 2014. Disponível em: <https://tarjomefa.com/wp-content/uploads/2018/01/8536-English-TarjomeFa.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2020.

SILVA, I. S. **Concreto de alta resistência: composição, propriedades e dimensionamento**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos - SP, 1995.

SILVA, L.S. *et al.* Concreto com borracha de recauchutagem de pneu para uso em pavimentação de baixo tráfego. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, 2019. Belém - PA, 2019.

SILVA, R. N. **Um estudo sobre o concreto de alto desempenho**. 2010. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana - BA, 2010.

SILVA, R. B. A. Concreto reciclável a partir da utilização de resíduos sólidos da construção civil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 9., 2019, Ponta Grossa - PR. **Anais [...]**. Ponta Grossa, - PR 2019.

SKARENDAHL, A; PETERSSON, Ö. **Concreto autoadensável de última geração**. *In*: RELATÓRIO DO COMITÊ TÉCNICO RILEM 174-SCC. Estocolmo: RILEM Publications, 2000.

SOLOTUDO. **Concreto de alto desempenho em Avaré**. Disponível em: <https://www.solotudo.com.br/classificados/sp/avare/concreto-de-alto-desempenho-emavare-23924>. Acesso em: 05 fev. 2021.

TEIXEIRA, J. H. S; OLIVEIRA, M. P. S. L. O. **Resíduos de construção e demolição: concreto reciclável**. Manaus - AM: Centro Universitário do Norte, 2018. Disponível em: [www.semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo\\_concreto.pdf](http://www.semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_concreto.pdf). Acesso em: 28 out. 2020.

TENÓRIO, J. J.L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió - AL, 2007.

TOPMIX20. **Concreto de alta resistência inicial.** Disponível em: <http://topmix.com.br/concreto-usinado/concreto-de-alta-resistencia-inicial/>. Acesso em: 05 fev. 2021.

TOPMIX20. **Concreto pesado:** para que serve? Disponível em: <http://topmix.com.br/concreto-usinado/concreto-de-alta-resistencia-inicial/>. Acesso em: 05 fev. 2021.

TOTAL CONSTRUÇÃO. **Concreto leve:** o que é? tipos, vantagens e desvantagens. Disponível em: <https://www.totalconstrucao.com.br/concreto-leve/>. Acesso em: 05 fev. 2021.

TROMBIM, D.C; PORTELA, I.F. **Concreto reciclado:** utilização de resíduos da construção civil como agregado graúdo. Estudo da dosagem de cimento para a manutenção das propriedades mecânicas. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos - SJ, 2016.

VERÍSSIMO, G. S; CÉSAR JUNIOR., K. M. L. **Concreto protendido:** fundamentos básicos. Disponível em: <http://C:/Users/Cliente/Documents/FEG%20%20UNESP/Ano%205/TCC/Pesquisa/Artigos/Links%20Usados%20%20Introdu%C3%A7%C3%A3o/CONCRET O%20PROTENDIDO%20-%20USADO.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2021.

VERZEGNAZZI, E. *et al.* Concreto convencional com adição de borracha de pneus: estudo das propriedades mecânicas. **Estudos Tecnológicos**, Limeira - SP, v.7, n. 2, p. 98-108, 2011.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção de concreto.** 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 1997.