



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



Trabalho de Conclusão de Curso

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUO  
DE BORRACHA DE PNEUS PARA APLICAÇÃO EM PAREDES DE  
CONCRETO**

Uberlândia – MG

2018



*Iago Camargos Cunha Queiroz*

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUO  
DE BORRACHA DE PNEUS PARA APLICAÇÃO EM PAREDES DE  
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Universidade Federal de Uberlândia como  
parte dos requisitos exigidos para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leila Aparecida de  
Castro Motta

Uberlândia – MG

2018

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus por guiar meus passos.

À minha esposa Ileanna e ao meu filho Heitor por serem tudo aquilo que me sustenta e me dá forças para seguir.

À toda minha família, em especial aos meus pais, irmão, sogro e sogra pelo carinho e compreensão especialmente aos momentos dedicados ao trabalho.

Sinceros agradecimentos à Professora Doutora Leila Aparecida de Castro Motta, pela atenção e suporte fundamentais para o desenvolvimento deste.

À Cristiane e à colega de turma Marcela, pelo auxílio na realização dos ensaios e esclarecimento dos processos.

Por fim agradeço a todos àqueles que contribuíram de alguma forma não só na realização deste trabalho, mas para meu crescimento pessoal e profissional.

## RESUMO

A construção civil consome um percentual muito elevado dos recursos naturais extraídos em todo o planeta, dos quais grande maioria não são renováveis. Anualmente, são produzidos mais de 67 milhões de pneus somente no Brasil, onde grande parte são indevidamente descartados no meio ambiente, causando problemas ambientais e de saúde pública. A partir de incentivos econômicos nacionais para programas de habitações populares, construtoras estão adotando o sistema construtivo de paredes de concreto para suprir a demanda por moradias, dado que o método proporciona um bom controle tecnológico e elevada produtividade. Diante do exposto e da temática de sustentabilidade, o presente trabalho propõe a análise das propriedades do concreto com substituição parcial do agregado miúdo natural por resíduo de borracha de pneus (granulometrias graúda e miúda) para aplicação em paredes de concreto. O programa experimental consiste na caracterização dos materiais constituintes das misturas, produção e ensaios do concreto no estado fresco, endurecido e ensaio térmico. Constatou-se uma redução da massa específica no estado fresco e da trabalhabilidade dos concretos com incorporação de resíduo de borracha. Houve queda nas propriedades mecânicas de resistência à compressão e à tração, comparadas ao concreto sem adição de borracha. Para as propriedades físicas, há a diminuição de absorção por imersão, por capilaridade e da massa específica dos concretos com borracha no estado endurecido. Os traços com adição de borracha apresentaram ser ligeiramente mais isolante comparado com o de referência. De modo geral, o concreto com agregado de borracha somente de granulometria graúda apresentou os melhores resultados para fins de aplicação em paredes de concreto.

**Palavras-chave:** Concreto com borracha. Paredes de concreto. Desempenho térmico.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Recomendação de execução de laje/piso.....	15
Figura 2.2: Execução de montagem de armaduras para paredes de concreto.....	16
Figura 2.3: Montagem das instalações prediais.....	17
Figura 2.4: a) Espaçador; b) Amarração com arame recozido.....	17
Figura 2.5: Montagem dos painéis do sistema paredes de concreto.....	18
Figura 2.6: Montagem de gabarito para esquadria.....	19
Figura 2.7: Partes constituintes do pneu.....	28
Figura 3.1: Aditivo superplastificante MasterGlenium 3400 NV.....	37
Figura 3.2: a) Borracha graúda; b) Borracha miúda.....	38
Figura 3.3: a) Materiais na betoneira; b) Mistura dos materiais.....	41
Figura 3.4: Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos.....	42
Figura 3.5: Moldagem de placa para ensaio de desempenho térmico.....	42
Figura 3.6: a) Cura inicial em câmara úmida; b) Cura em reservatório com água e cal.....	43
Figura 3.7: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco-de-cone.....	44
Figura 3.8: Determinação da massa específica do concreto no estado fresco.....	44
Figura 3.9: Ensaio de resistência à compressão.....	45
Figura 3.10: Ensaio de resistência à tração.....	46
Figura 3.11: Disposição dos corpos-de-prova para ensaio de absorção por capilaridade.....	47
Figura 3.12: Forno autoclave.....	48
Figura 3.13: Moldes cúbicos com placas de concreto para ensaio térmico.....	48
Figura 3.14: Seção transversal do esquema do ensaio térmico proposto.....	49

Figura 4.1: Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco-de-cone: (a) CR; (b) CBG; (c) CBM; (d) CBGM.....	50
Figura 4.2: Massa específica dos concretos no estado fresco.....	52
Figura 4.3: Seção transversal dos corpos-de-prova: (a) CR; (b) CBG; (c) CBM; (d) CBGM.....	53
Figura 4.4: Seção longitudinal dos corpos-de-prova: (a) CR; (b) CBG; (c) CBM; (d) CBGM.....	54
Figura 4.5: Absorção de água por capilaridade.....	57
Figura 4.6: Ascensão capilar: (a) CR; (b) CBG; (c) CBM; (d) CBGM.....	58
Figura 4.7: Temperatura na face externa das placas.....	59
Figura 4.8: Temperatura na face interna das placas.....	60
Figura 4.9: Temperatura no interior dos compartimentos.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Transmitância térmica de paredes externas.....	24
Tabela 2.2: Capacidade térmica de paredes externas.....	25
Tabela 3.1: Caracterização do cimento CP V ARI.....	35
Tabela 3.2: Caracterização da areia fina.....	36
Tabela 3.3: Caracterização da areia média.....	36
Tabela 3.4: Caracterização da Brita 0.....	36
Tabela 3.5: Características do aditivo superplasticificante MasterGlenium 3400 NV..	37
Tabela 3.6: Características das borrachas de pneus.....	39
Tabela 3.7: Consumo dos materiais para produção de 1 m <sup>3</sup> dos concretos.....	40
Tabela 4.1: Resultados do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco-de-cone.....	51
Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral.....	54
Tabela 4.3: Resultados dos ensaios de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos no estado endurecido.....	56
Tabela 4.4: Resultados do ensaio de absorção por capilaridade.....	56
Tabela 4.5: Nomenclatura dos sensores para cada traço.....	59
Tabela 4.6: Correlação entre a maior temperatura e seu respectivo horário.....	61

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACEPE – Associação Industrial do Poliestireno Expandido

ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos

ARI – Alta Resistência Inicial

CBAB – Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção

CDHU – Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano

CEF – Caixa Econômica Federal

CESED – Centro de Ensino Superior e Desenvolvimento

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DATec – Documento de Avaliação Técnica

EPS – Poliestireno Expandido

HSE – Helth and Safety Executive

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

SINAT – Sistema Nacional de Aprovações Técnicas

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1. Justificativa.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2. Objetivo .....</b>	<b>13</b>
1.2.1. <i>Objetivo geral</i> .....	13
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Paredes de concreto .....</b>	<b>14</b>
2.1.1. <i>Fundações</i> .....	14
2.1.2. <i>Montagem das armaduras</i> .....	16
2.1.3. <i>Montagem das instalações elétricas e hidráulicas</i> .....	16
2.1.4. <i>Montagem das fôrmas</i> .....	18
2.1.5. <i>Concretagem</i> .....	19
<b>2.2. Concreto para parede .....</b>	<b>20</b>
2.2.1. <i>Concreto celular (Tipo L1)</i> .....	21
2.2.2. <i>Concreto com alto teor de ar incorporado (Tipo M)</i> .....	21
2.2.3. <i>Concreto com agregados leves ou com baixa massa específica (Tipo L2)</i> .....	22
2.2.4. <i>Concreto convencional ou auto-adensável (Tipo N)</i> .....	23
<b>2.3. Desempenho térmico .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4. Borracha de pneu .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5. Concreto com borracha .....</b>	<b>30</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1. Metodologia aplicada.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2. Materiais utilizados .....</b>	<b>35</b>

3.2.1. <i>Cimento</i> .....	35
3.2.2. <i>Agregado miúdo</i> .....	35
3.2.3. <i>Agregado graúdo</i> .....	36
3.2.4. <i>Água e aditivo</i> .....	37
3.2.5. <i>Borracha de pneu</i> .....	38
<b>3.3. Produção do concreto .....</b>	<b>39</b>
3.3.1. <i>Traço dos concretos utilizados</i> .....	39
3.3.2. <i>Mistura dos materiais</i> .....	40
3.3.3. <i>Moldagem e cura dos corpos-de-prova</i> .....	41
<b>3.4. Ensaios do concreto no estado fresco .....</b>	<b>43</b>
3.4.1. <i>Consistência pelo abatimento do tronco-de-cone</i> .....	43
3.4.2. <i>Massa específica</i> .....	44
<b>3.5. Ensaios do concreto no estado endurecido .....</b>	<b>45</b>
3.5.1. <i>Resistência à compressão</i> .....	45
3.5.2. <i>Resistência à tração por compressão diametral</i> .....	45
3.5.3. <i>Absorção de água por capilaridade</i> .....	46
3.5.4. <i>Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica</i> .....	47
3.5.5. <i>Desempenho térmico</i> .....	48
<b>4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1. Concreto no estado fresco .....</b>	<b>50</b>
<b>4.2. Concreto no estado endurecido .....</b>	<b>52</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil, segundo estimativas nos anos 2000, era responsável por cerca de 50% do consumo dos recursos naturais extraídos do planeta (JOHN, 2000). Contudo, a utilização de resíduos como matéria-prima para construção pode vir a reduzir a quantidade de recursos naturais retirados do meio ambiente.

A possibilidade de utilização de resíduos de pneus como agregado em concretos de cimento Portland, tem sido estudada nos últimos anos, como uma alternativa na solução do problema ambiental, decorrente do descarte desses materiais em quantidades cada vez maiores em todo o mundo.

Turatsinze e Garros (2008) concluíram que os concretos de cimento Portland produzidos com borracha de pneus reciclados, em composições adequadas, melhoraram algumas propriedades, incluindo isolamento térmico e acústico, durabilidade e reduz a densidade. Além disso, é possível obter concretos de média e alta resistência mecânica para uso geral.

Segundo Misurelli e Massuda (2009), com o crescimento do mercado imobiliário brasileiro e as contínuas medidas públicas para ampliar a oferta de moradias, o sistema construtivo de paredes de concreto tem sido um método de construção racionalizado que oferece produtividade, qualidade e economia de escala quando o desafio é a redução do déficit habitacional.

Diante do exposto, este trabalho propõe a análise de um concreto que tenha em sua composição raspas de pneus, em diferentes granulometrias, com consequente redução dos agregados miúdos naturais, verificando a possibilidade de aplicação do mesmo para produção de paredes de concreto, buscando a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento sustentável.

A viabilidade desta aplicação, depende de algumas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, serem atendidas conforme normalização vigente, tais como: consistência, massa específica, resistência à compressão e à tração, absorção de água e condutividade térmica.

### **1.1. Justificativa**

Segundo a ANIP (2016), houve um salto de 54,5 milhões de unidades de pneus em 2006 para 67,9 milhões de unidades em 2016. Junto a esses números podem-se levar em consideração os pneus importados e projetar a quantidade desse produto a entrar em uso no mercado.

Portanto, é notório o grande volume de pneus que podem ser gerados a partir da produção e do descarte pós consumo dos mesmos. Além do potencial quantitativo para aplicação de resíduos da borracha de pneus em concreto, aqueles por sua vez, necessitam de uma destinação adequada para evitar possíveis problemas ambientais.

Segundo Morosini (2006), os pneus quando queimados, provocam a emissão de gases tóxicos e contaminação do solo e da água; quando abandonados nos cursos d'água, obstruem canais, córregos e galerias de águas pluviais, contribuindo para as enchentes; e tornam-se locais ideais para a proliferação dos mosquitos transmissores de doenças, como febre amarela e dengue.

Contudo, além de haver a disponibilidade de material e ser uma solução sustentável para o descarte de pneus, é necessário que a borracha agregue vantagens, no que diz respeito ao seu comportamento e aptidão para os fins de engenharia.

Segundo Rodrigues e Santos (2013), os agregados reciclados de borracha de pneu são muito promissores na indústria da construção civil, devido às características inerentes a este material: leveza, elasticidade, absorção de energia, propriedades térmicas e acústicas.

Portanto, justifica-se o estudo das propriedades dos concretos produzidos com resíduos de pneus, colaborando através de ensaios normalizados de laboratório, a viabilidade técnica dos mesmos e a sua aplicação para produção de paredes de concreto.

## **1.2. Objetivo**

### *1.2.1. Objetivo geral*

Analisar a viabilidade técnica da substituição parcial do agregado miúdo pelo agregado proveniente de resíduo de pneus na produção de concreto para aplicação em paredes de concreto.

### *1.2.2. Objetivos específicos*

- a. Comparar as propriedades de concretos com diferentes granulometrias de resíduo de borracha de pneus em substituição parcial ao agregado miúdo natural;
- b. Comparar o desempenho térmico dos diferentes concretos produzidos;
- c. Comparar os valores obtidos nos ensaios de laboratório com os mínimos exigidos pela normalização vigente.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Paredes de concreto

A ABNT NBR 16055 (2012, p.3) define parede de concreto como

Um elemento estrutural autoportante, moldado no local, com comprimento maior que dez vezes sua espessura e capaz de suportar carga no mesmo plano da parede.

O sistema parede de concreto é inspirado em experiências consagradas e bem-sucedidas de construção industrializada em concreto celular (sistema Gethal) e em concreto convencional (sistema Outinord), além de várias obras com painéis de fôrmas deslizantes ou trepantes, sobretudo nas décadas de 70 e 80 (ABCP *et al.*, 2008).

A falta de escala e de continuidade das obras, principalmente devido às limitações do sistema financeiro da habitação da época, impediu que essas tecnologias se consolidassem no mercado brasileiro, retardando a própria evolução da construção civil no Brasil.

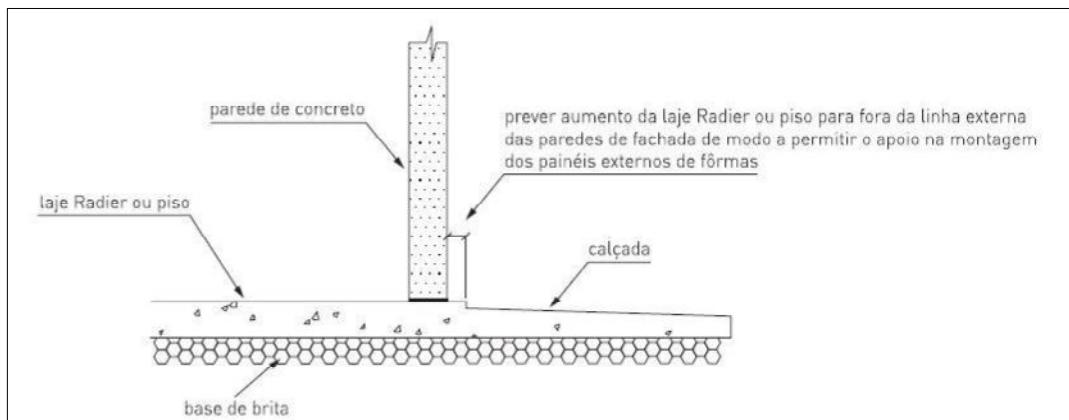
Hoje, com o “boom” do mercado imobiliário nacional, o sistema parede de concreto encontra o ambiente propício para desenvolver-se, tal como vem ocorrendo em outros países latino-americanos onde, a exemplo do Brasil, existe uma grande demanda por moradias e uma vigorosa produção de edificações (ABCP *et al.*, 2008, p. 16).

#### 2.1.1. Fundações

De acordo com Misurelli e Massuda (2009), o tipo de fundação mais utilizado para o sistema, é o radier, que deve ser construído com espaço excedente em relação à espessura dos painéis externos das fôrmas, permitindo o apoio e facilitando a sua montagem.

Para uma boa execução do sistema de paredes de concreto, as fundações, independente do sistema construtivo, devem obedecer um alinhamento e nivelamento rigoroso, permitindo boas condições de apoio e montagem das fôrmas. A ABCP *et al.* (2008), recomenda a execução de uma laje/piso na cota do terreno, conforme Figura 2.1, a fim de constituir um apoio nivelado para as fôrmas para minimizar os desaprumos e evitando o contato direto das fôrmas com o solo.

Figura 2.1: Recomendação de execução de laje/piso.



Fonte: ABCP *et al.* (2008, p. 82).

Segundo Curvello (2016), como regra geral e a partir do detalhamento definido em projeto, as fundações são construídas contendo embutidas as tubulações de água servidas e outros pontos de conexão. Portanto, antes da concretagem, devem-se posicionar as tubulações com uso de gabarito específico, conforme projetos de instalações, e após a concretagem, marcam-se as posições das faces internas e externas das paredes de modo a orientar a montagem e o posicionamento dos painéis. A ancoragem das paredes com a fundação deve ser realizada segundo projeto estrutural, sendo o mais comum em fundações superficiais, o grauteamento de barras nos apoios das paredes.

### *2.1.2. Montagem das armaduras*

Quando a armadura principal do sistema é composta por telas eletrosoldadas, usualmente sua montagem pode anteceder a das fôrmas, sendo está posicionada no eixo vertical da parede, em toda sua extensão, sem interrupções, conforme Figura 2.2, estando essas com os cortes na malha para posicionamento de janelas e portas previamente executadas.

Figura 2.2: Execução de montagem de armaduras para paredes de concreto.



Fonte: Soluções para Cidades (2015).

### *2.1.3. Montagem das instalações elétricas e hidráulicas*

Após a montagem das armaduras, são executadas as instalações hidráulicas e elétricas (Figura 2.3), sendo a segunda, disponível em padrões específicos para a utilização em paredes de concreto, compostas por tampas vedantes e auxílios para a fixação nas armaduras.

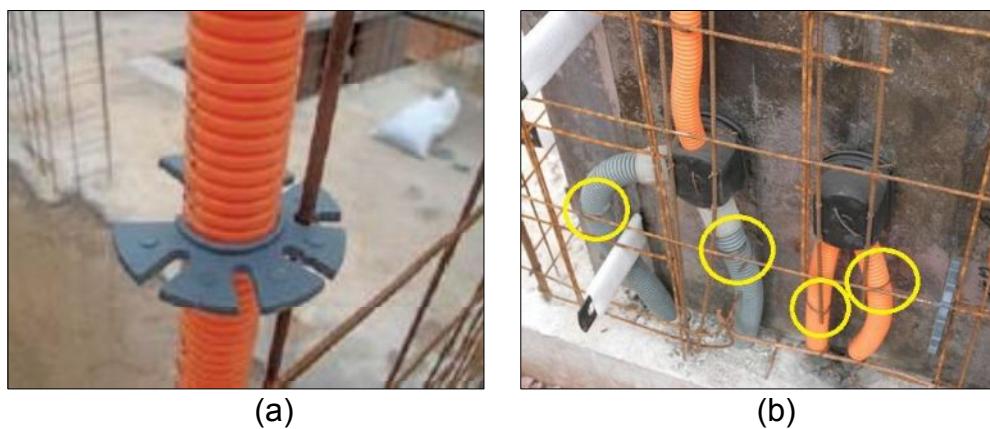
Figura 2.3: Montagem das instalações prediais.



Fonte: CESED (2015).

De acordo com Curvello (2016), como o sistema construtivo possui suas instalações embutidas nas paredes de concreto, torna-se necessário tomar precauções para que as tubulações assim como as armaduras, mantenham os cobrimentos de projeto com o mínimo de movimentação durante a concretagem das paredes, portanto, recomenda-se o uso de espaçadores ou sua amarração por meio de arame recozido, conforme Figura 2.4a e Figura 2.4b.

Figura 2.4: a) Espaçador; b) Amarração com arame recozido.



Fonte: Comunidade da Construção (2015).

#### 2.1.4. Montagem das fôrmas

Previamente é feito a aplicação de desmoldante, o que evita a aderência das fôrmas aos elementos constituintes do sistema.

O projeto deve fornecer sequencia executiva da montagem dos painéis (Figura 2.5), sendo esta inicialmente iniciada pelas áreas que possuem instalações hidráulicas, como banheiros e cozinhas, colocando-se primeiro os painéis de canto, de modo a formar um “L”, e posteriormente os das faces internas das paredes, sendo esta escolha importante pois permite o posicionamento das tubulações no centro das paredes.

Figura 2.5: Montagem dos painéis do sistema paredes de concreto.



Fonte: Comunidade da Construção (2015).

Após a montagem dos painéis, é realizada a colocação dos gabaritos das aberturas das esquadrias, conforme Figura 2.6, com folga de 1 cm, para garantir suas dimensões e possibilitar a futura instalação das mesmas.

Figura 2.6: Montagem de gabarito para esquadria.



Fonte: PONZONI (2011, p. 27).

#### 2.1.5. *Concretagem*

De acordo com ABCP *et al.* (2008, p. 87-88), o lançamento deve ser iniciado por um dos cantos da edificação, até que uma significativa parcela das paredes próximas ao ponto esteja totalmente cheia. Em seguida, muda-se a posição em direção ao canto oposto, até que se complete o rodízio dos quatro cantos opostos da estrutura. Finaliza-se a concretagem com o lançamento na linha mais elevada das fôrmas e dois oitões, para o caso de habitações térreas.

Durante e imediatamente após o lançamento, o concreto deve ser vibrado com equipamento adequado para a trabalhabilidade. O adensamento deve ser cuidadoso, para que a mistura preencha todos os espaços da fôrma. Deve-se também acompanhar o enchimento das fôrmas por meio de leves batidas com martelo de borracha nos painéis.

Ainda de acordo com a ABCP *et al.* (2008), enquanto não atingir o endurecimento satisfatório, o concreto deve ser protegido contra agentes que lhe são prejudiciais: mudanças bruscas de temperatura, secagem, vento, chuva forte, água torrencial, agentes químicos, choques e vibrações de intensidade que possam produzir fissuração na massa do concreto ou afetar sua aderência à armadura.

Todas as paredes de cada ciclo construtivo de uma edificação são moldadas em uma única etapa de concretagem, permitindo que, após a desforma, as paredes já contenham, em seu interior, vãos para portas e janelas, tubulações ou eletrodutos de pequeno porte, elemento de fixação para coberturas e outros elementos específicos quando for o caso. As instalações com tubos de grande diâmetro não são embutidas nas paredes, mas sim alojadas em *shafts*, previamente deixados nas paredes, como aberturas (ABNT NBR 16055, 2012).

## **2.2. Concreto para paredes de concreto**

O sistema construtivo paredes de concreto, requer que o concreto adotado tenha consistência mais fluida. Essa propriedade é fundamental para o preenchimento completo das fôrmas, sem segregações, e para o bom acabamento da superfície.

Segundo Benigno (2011), o abatimento (slump test) para concreto das paredes é de  $200 \pm 30$  mm, a menos que se utilize o concreto auto-adensável, porém as construtoras evitam sua aplicação devido ao seu alto custo.

Por se tratar de um sistema construtivo em que os elementos constituintes do mesmo desempenham função estrutural, a ABNT NBR 6118 (2014) fixa que a mínima resistência característica à compressão do concreto é de  $f_{ck} = 20$  MPa e que a relação água cimento não deve exceder a  $a/c = 0,65$ , variando de acordo com a classe de agressividade ambiental.

O sistema paredes de concreto é constituído por placas com elevada superfície de contato com o meio externo, mais susceptíveis as tensões residuais que podem ocorrer devido a retração hidráulica ou devido ao gradiente térmico no interior das paredes, causando fissuração das mesmas. Portanto, é recomendado a adição de fibras ao concreto, que tem por característica melhorar a distribuição destas tensões nas peças, assim diminuindo e por vezes evitando a fissuração das mesmas (CURVELLO, 2016).

De acordo com a ABCP *et al.* (2008, p. 147), quatro tipos de concreto são recomendados para a utilização no sistema de paredes de concreto moldadas no local, podendo essas ser executadas com concretos celulares (tipo L1), com elevado

teor de ar incorporado (tipo M), utilizando agregados leves ou com baixa massa específica (tipo L2), convencional e auto-adensável (tipo N).

### *2.2.1. Concreto celular (Tipo L1)*

A ABNT NBR 12645 (1992, p. 1) define concreto celular como concreto leve obtido pela introdução em argamassa de bolhas de ar, com dimensões milimétricas, homogêneas, uniformemente distribuídas, estáveis, incomunicáveis e indeformadas ao fim do processo, cuja densidade de massa aparente no estado fresco está compreendida entre 1300 kg/m<sup>3</sup> e 1900 kg/m<sup>3</sup>.

A ABNT NBR 12646 (1992, p. 2), define que os corpos de prova ensaiados segundo a ABNT NBR 5739 (2007), devem apresentar uma resistência característica a compressão  $f_{ck} = 2,5$  MPa aos 28 dias de idade, sendo usualmente utilizados concretos celulares com resistência à compressão acima de 4 MPa. Esse tipo de concreto segundo a ABCP *et al.* (2008, p. 147), tem como principais características a baixa massa específica e o bom desempenho térmico e acústico, uma vez que possui grande quantidade de bolhas de ar distribuídas uniformemente em seu interior. No entanto, deve ser estudada sua utilização em áreas com alta agressividade, pois o alto índice de bolhas pode aumentar sua permeabilidade à agentes agressivos, assim diminuindo sua vida útil. O concreto celular em sistemas de paredes de concreto tem sua utilização usualmente limitada a sobrados e edificações de até dois pavimentos, podendo ser utilizado para edificações de múltiplos pavimentos, desde que especificados os parâmetros de resistência mínima à compressão de cada caso (ABCP *et al.*, 2008).

### *2.2.2. Concreto com alto teor de ar incorporado (Tipo M)*

Este concreto é obtido pela adição de aditivos incorporadores de ar na mistura de concreto que gera a formação de bolhas de ar na matriz cimentícia, segundo Neville e Brock (2013, p. 290), as bolhas de ar incorporadas atuam como um agregado miúdo

adicional, com uma alta compressibilidade e baixíssimo atrito superficial em relação aos demais componentes da mistura, gerando um aumento da plasticidade e trabalhabilidade do concreto fresco.

Assim como o concreto celular, também possui bom desempenho térmico e acústico, porém assim como o concreto celular sua utilização em locais de alta agressividade ambiental deve ser estudada devido ao aumento de permeabilidade a certos agentes agressivos como íons cloreto e dióxido de carbono, podendo a utilização indevida resultar em significativa redução de vida útil das armaduras (SACHT, 2008).

Apesar de não normalizada para utilização em sistemas construtivos de paredes de concreto moldadas no local, sua utilização é abordada na DIRETRIZ SINAT Nº 001, Revisão 03 (2017), e a ABCP *et al.* (2008, p. 147) atribui a utilização deste tipo de concreto para paredes de casas com até dois pavimentos, desde que a resistência especificada seja igual ou superior a 6 MPa e com teor de ar incorporado máximo de 9%.

#### *2.2.3. Concreto com agregados leves ou com baixa massa específica (Tipo L2)*

Como agregados leves naturais, são utilizados os produtos extraídos diretamente de jazidas, seguida de classificação granulométrica, como exemplo a pedra pome, que possui pouca utilização na fabricação de concretos estruturais devido a decorrência de variações em suas propriedades (SACHT, 2009).

Os agregados leves artificiais, são obtidos industrialmente e classificados conforme o processo de fabricação e matéria-prima utilizada. Desses, o mais utilizado no Brasil, é a argila expandida, composto por particular entre 1 e 25 mm (RISSIGNOLO, 2009).

Este tipo de concreto torna-se uma alternativa interessante para a utilização no sistema de paredes de concreto moldadas no local, devido a sua baixa massa específica, abaixo de 1700 kg/m<sup>3</sup>, o que alivia as cargas nas fundações, trabalhabilidade adequada ao bombeamento e moldagem, valores de resistência à compressão às 12 horas de idade acima de 2 MPa e aos 28 dias de idade acima de 30 MPa. Também possui um desempenho térmico e acústico superior aos concretos convencionais e baixa permeabilidade a agentes agressivos (SACHT, 2009).

Apesar de atingir resistências à compressão similares aos concretos convencionais, sua utilização não está prevista na ABNT NBR 16055 (2012), sendo essa especificada à concretos com massa específica da ordem de 2300 kg/m<sup>3</sup>, o que exige um Documento de Avaliação Técnica (DATec). Ainda assim, a ABCP *et al.* (2008, p. 147), indica o emprego deste concreto em edificações de qualquer tipologia desde que os seus requisitos de resistência à compressão sejam de até 25 MPa, e restringe a utilização de agregados a somente a argila expandida, alegando que outras opções não atingem a resistência necessária.

#### *2.2.4. Concreto auto-adensável (Tipo N)*

Este concreto é produzido pela utilização de aditivos superplastificantes, cujo tempo de duração dos mesmos é de cerca de 40 minutos, conferindo uma alta plasticidade ao concreto fresco. Como suas principais vantagens, podemos citar sua maior velocidade de lançamento e não necessidade de adensamento, otimizando a produtividade da mão de obra e melhora significativa no acabamento das superfícies. Seu melhor adensamento pode aumentar a durabilidade das estruturas devido à falta de falhas de concretagem, no entanto, seu uso exerce mais esforço sobre as fôrmas (CHAPE, 2007).

### **2.3. Desempenho térmico**

Segundo a organização britânica reguladora de normas para a segurança e saúde de trabalhadores HSE (2014), existem seis fatores básicos que afetam o conforto térmico dos ocupantes de uma edificação. São eles: temperatura do ar, níveis de radiação de calor, velocidade do ar, umidade, capacidade isolante de peças e vestuários e calor metabólico. Acrescenta-se que a sensação de conforto térmico depende muito das condições de ventilação dos ambientes, com grande influência do posicionamento e dimensões das aberturas de janelas e seus níveis de satisfação ou insatisfação, variam de acordo com o tipo de atividade no interior do imóvel, quantidade de mobília,

tipo de vestimenta, números de ocupantes, idade, sexo, condições fisiológicas e psicológicas dos usuários (CBIC, 2013, p. 136).

O desempenho térmico de edificações é função das características dos materiais que compõem seus elementos e repercute no conforto térmico dos usuários. De acordo com CBIC (2013, p. 135), o adequado desempenho térmico garante condições adequadas para o sono e atividades normais em uma habitação, contribuindo ainda para a economia de energia.

Segundo Graf (2011), uma boa forma de melhorar o desempenho térmico de uma edificação, é através do invólucro (paredes externas e internas) e seu isolamento térmico correto conforme o clima estudado. Quanto mais isolado o invólucro, uma quantidade maior de materiais será utilizada e, consequentemente, mais energia será incorporada à edificação, porém menor será a transmitância térmica. De acordo com a norma ABNT NBR 15575-4:2013, menores valores de transmitância térmica do invólucro garantem melhores níveis de desempenho térmico de edificações, como é apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Transmitância térmica de paredes externas.

Transmitância térmica – U (W/m <sup>2</sup> .K)		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
U ≤ 2,5	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5

<sup>a</sup> $\alpha$  é a absorância à radiação solar da superfície externa da parede

Fonte: ABNT NBR 15575-4 (2013).

**Transmitância térmica (U)** – transmitância térmica pode ser explicada como uma medida da quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária de um elemento do invólucro da edificação por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que este separa (ACEPE, 2014). Esta grandeza física é utilizada para a definição das propriedades do isolamento térmico em materiais, pois expressa suas características de permeabilidade à passagem de calor (GRAF, 2011). Algebricamente, a norma ABNT NBR 15220-1:2005 define

transmitância térmica como o inverso da resistência térmica de componentes e elementos.

Ainda de acordo com a norma ABNT NBR 15575-4:2013, maiores valores de capacidade térmica do invólucro garantem melhores níveis de desempenho térmico de edificações, como é apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Capacidade térmica de paredes externas.

<b>Capacidade térmica (CT)</b> <b>kJ/m<sup>2</sup>.K</b>	
Zona 8	Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6, e 7
Sem exigência	$\geq 130$

Fonte: ABNT NBR 15575-4 (2013).

**Capacidade térmica** – a norma ABNT NBR 15220-1:2005 define capacidade térmica como a quantidade de calor necessária para variar uma unidade de temperatura de um sistema, ou seja, é a propriedade indicativa da habilidade que um material tem de absorver calor de fontes externas ao seu redor (CALLISTER, 2003).

De acordo com a ABNT NBR 15220-3 (2003, p. 18), paredes maciças de concreto convencional e com 10 cm de espessura possui transmitância térmica  $U = 4,40 \text{ W/m}^2.\text{K}$  e capacidade térmica  $CT = 240 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ , ou seja, atende ao primeiro requisito mas não ao segundo da ABNT NBR 15575-4 (2013), sendo necessário alguma medida para redução da transmitância térmica. Contudo, segundo a DIRETRIZ SINAT Nº 001, Revisão 03 (2017, p. 21), paredes de concreto destinadas a casas térreas, sobrados, casas sobrepostas e a edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, com as características abaixo apresentadas, atendem aos critérios mínimos de desempenho fixado pela norma ABNT NBR 15575-4 (2013).

Características: pé direito mínimo de 2,5 m; espessura mínima das paredes de 100 mm; espessura mínima das lajes de 100 mm (de forro ou de piso); telhado de telhas de fibrocimento

(espessura mínima de 6 mm), ou telhas de concreto (espessura mínima de 11 mm) ou telhas cerâmicas; presença de ático entre a laje horizontal e o telhado (altura mínima de 500 mm); faces externas das paredes externas em cores de tonalidades médias ou claras para as zonas bioclimáticas Z1 a Z7 e tonalidades claras para a zona bioclimática Z8; emprego de produto isolante térmico na cobertura, com resistência térmica mínima de 0,67  $\text{m}^2.\text{K/W}$  na zona bioclimática Z8.

A CEF e a CDHU indicam a utilização de concretos leves na execução de habitações de interesse social utilizando sistema construtivo de parede moldada in loco, com a intenção de melhorar o desempenho térmico das edificações, sendo o concreto leve celular o mais utilizado (SACHT, 2008).

De acordo com Lamberts *et al.* (2014), materiais que possuem baixa densidade e que são porosos como a cortiça, o EPS, a lã de vidro e a borracha são isolantes térmicos. A capacidade de reduzir a transferência de calor se dá ao fato de o ar contido nesses poros ter baixa condutividade térmica.

Shadnia *et al.* (2015) propôs em sua pesquisa, um ensaio térmico utilizando placas de concreto apoiadas sobre um compartimento cúbico de madeira isolada termicamente. Foram analisados três tipos de concretos, o de referência, e os outros dois continham teores de 10% e 20% de geopolímero em substituição ao volume de agregado miúdo. Para analisar o fluxo de calor, foram instalados três termopares em cada um dos compartimentos, sendo um na face externa da placa, um na face interna da placa e o último no interior do compartimento de madeira. As temperaturas foram registradas durante 24 horas (das 6:00 até as 6:00). Os resultados mostraram que além do concreto com 20% de geopolímero apresentar menores temperaturas na placa e no interior do compartimento, a temperatura levou mais tempo para chegar a seu máximo no interior da caixa.

Carvalho (2017) reproduziu em sua pesquisa, o ensaio proposto por Shadnia *et al.* (2015), comprovando a eficácia do mesmo para analisar o comportamento térmico de concretos, servindo como referência para adoção do método no presente trabalho.

## 2.4. Borracha de pneu

Segundo a ANIP (2007), a produção de pneus de borracha no Brasil iniciou-se na década de 1930, quando foi implantado o Plano Geral de Viação Nacional. A concretização desse plano aconteceu com a instalação da CBAB, em 1936 no Rio de Janeiro, que em seu primeiro ano de atividades, fabricou mais de 29 mil pneus.

Na década de 1940, a produção nacional era de 441 mil unidades e no final da década de 1980, o Brasil produzia mais de 29 milhões de pneus. No ano de 2016, as dez empresas associadas à ANIP, produziram 67,9 milhões de unidades (ANIP, 2016) e isto tem preocupado tanto os fabricantes quanto os ambientalistas.

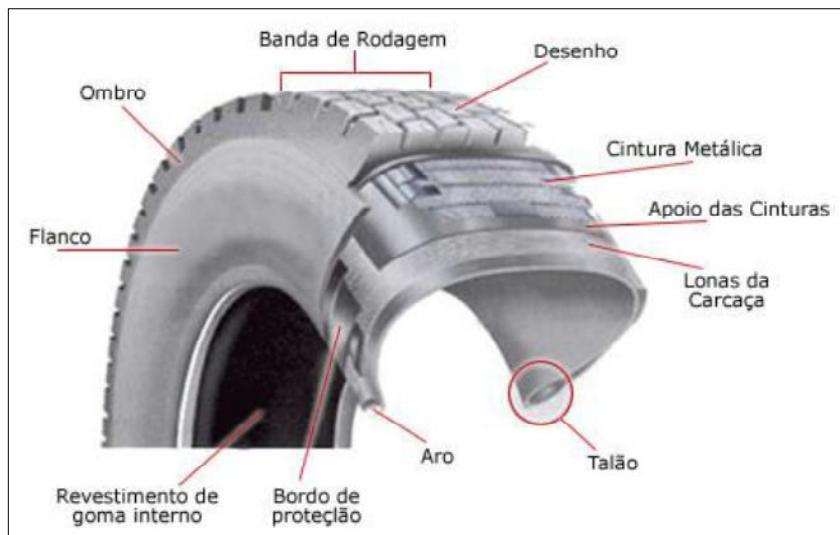
A primeira alternativa para a destinação do pneu usado é a recauchutagem, mas quando isto não é mais possível, então é feito a remoldagem. Contudo, se as condições do pneu utilizado não permitirem nenhuma das alternativas anteriores, ele passa a ser considerado inservível (RIBEIRO, 2005).

A Resolução do CONAMA Nº 416 (2009, p. 2) define os seguintes termos

- a) Recauchutagem: processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem;
- b) Remoldagem: processo pelo qual um pneu usado é reformado pela substituição de sua banda de rodagem, ombros e toda a superfície de seus flancos.

Na Figura 2.7 é apresenta a seção transversal do pneu, onde se observam as partes constituintes de sua estrutura.

Figura 2.7: Partes constituintes do pneu.



Fonte: INGO Pneus.

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 53,2% dos pneus consumidos anualmente no Brasil são considerados pneus inservíveis. Do total destes, apenas 26,5% são destinados de forma ambientalmente correta e regulamentada (TRIGO *et al.*, 2008).

De acordo com Giacobbe *et al.* (2008), quando os pneus são compactados sem serem fragmentados, há uma tendência de eles voltarem à sua forma original regressando à superfície, e esse resultado é responsável por uma possível deformação no solo. Ainda de acordo com os autores, a queima indiscriminada dos resíduos de pneus, polui o ar devido à variedade de compostos liberados na combustão.

Outro ponto negativo a ser considerado é quando os pneus são dispostos em lixões a céu aberto, pois torna-se locais ideais para proliferação de mosquitos transmissores de doenças como a dengue, febre amarela, zika e chikungunya.

Na tentativa de sanar os problemas sociais, ambientais e de saúde pública ocasionados pelo descarte irregular dos pneus, em 1999 foi aprovada a Resolução do CONAMA Nº 258/99 que instituiu a responsabilidade do produtor e do importador pelo ciclo total do produto, ou seja, a coleta, o transporte e a disposição final. No ano de 2009, entrou em vigor a Resolução do CONAMA Nº 416/09, que dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, substituindo a Resolução do CONAMA Nº 258/99.

Essa Resolução tem como base a anterior, porém com algumas alterações e acréscimos, dentre as quais destacam-se os seguintes artigos e parágrafos:

Art. 1º - Os fabricantes e os importadores de pneus novos, [...], ficam obrigados a coletar e dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional [...];

Art. 3º - [...] para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível;

Parágrafo único – Fica vedado o armazenamento de pneus a céu aberto;

Art. 15º - É vedada a disposição de pneus no meio ambiente, tais como o abandono ou lançamento em corpos de água, terrenos baldios ou alagadiços, a disposição em aterros sanitários e a queima a céu aberto.

Os pneus inservíveis são reaproveitados em diversas atividades comerciais e industriais em todo o mundo. No Brasil, as formas de destinação são regulamentadas pelo IBAMA e normalmente são utilizados como combustível em fornos das fábricas de cimento, fabricação de artefatos de borracha como solas de sapatos e tapetes, pisos industriais e produção de asfalto-borracha (RECICLANIP, 2011).

De acordo com Boaventura (2011, p. 23), os segmentos industriais estão sendo estimulados a desenvolverem materiais alternativos e que são produzidos através de métodos ambientalmente corretos. O aproveitamento dos resíduos na composição de novos materiais é uma tendência mundial e vem crescendo em todos os ramos das atividades econômicas.

Diversas pesquisas, as quais são referências fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho e que são apresentadas no item a seguir, confirmam a viabilidade da substituição parcial ou total dos agregados naturais, por resíduo de borracha de pneus para produção de concretos.

## 2.5. Concreto com borracha

Com o desenvolvimento da tecnologia do concreto, sua produção e composição vêm se transformando significativamente. De acordo com Segantini (2014, p. 13), com o intuito de colaborar com o desenvolvimento social e sustentável, há uma tendência mundial entre pesquisadores e cientistas dos materiais, em analisar o comportamento do concreto ao adicionar minerais e resíduos que são gerados e descartados no meio ambiente (resíduos de construção civil, cinzas de bagaço de cana e casca de arroz, dentre outros).

Conforme mencionado no item anterior, estudos realizados desde a década de 1990, abordam o emprego e viabilidade técnica de adição de resíduo de borracha de pneus em substituição aos agregados naturais para a produção de concreto.

Eldin e Senouci (1992) relataram que, em geral, os lotes de concretos produzidos com a substituição dos agregados em volume por borracha, apresentaram desempenho aceitável em termos de facilidade de manuseio, colocação e acabamento. No entanto, os autores perceberam que quanto maior a dimensão dos agregados de borracha e o aumento da percentagem substituída em massa, diminuíram a trabalhabilidade da mistura.

Khatib e Bayomy (1999) investigaram a trabalhabilidade do concreto produzido com a substituição do agregado em massa pelo agregado de borracha. Os pesquisadores observaram uma menor trabalhabilidade quanto maior o teor de borracha utilizado na substituição do agregado em massa. Ainda foi percebido pelos autores, que concretos produzidos com um teor igual ou superior a 40% de borracha em massa do total de agregado, não apresentam nenhuma trabalhabilidade.

Martins *et al.* (2005), observaram a consistência dos concretos produzidos com adição de fibras de pneus através do ensaio de abatimento do tronco-de-cone e a fixação da relação água/cimento. Os autores concluíram que a adição de fibras de borracha ao concreto, causou redução da trabalhabilidade em relação ao concreto sem fibras.

Bauer *et al.* (2001), verificou redução da resistência à tração em concretos confeccionados com adição de borracha de pneus. Contudo, os autores observaram uma menor queda que a ocorrida com a resistência à compressão.

Topçu (1995) constatou maior perda de resistência à compressão nos concretos que utilizaram a borracha de pneus como agregado graúdo. Concluiu também, por meio do ensaio de tração por compressão diametral, que o concreto apresentou alta capacidade de absorção de energia.

Granzotto e Souza (2013) analisaram concretos com substituição de agregado miúdo por resíduo de borracha de pneus, nas proporções de 5%, 10% e 15% em relação ao volume. Os pesquisadores concluíram que após a incorporação da borracha de pneu ao concreto, a resistência à compressão diminuiu nas proporções de 13%, 39% e 46%, respectivamente. Constataram também um decréscimo na massa específica de 8% para o concreto com 15% de adição de borracha.

Selung *et al.* (2013), observaram uma redução significativa da resistência nos concretos com até 25% de incorporação de resíduo de borracha e, posteriormente, mantendo-se praticamente constante até 35%. A queda de resistência à compressão média dos traços com 15%, 25% e 35% de incorporação de resíduo de borracha, em relação ao traço sem resíduo foi de 51%, 88% e 89%, respectivamente. Os autores observaram ainda que existe uma tendência de aumento da absorção com o acréscimo da proporção de borracha nos concretos, apresentando valores médios de absorção de 4,7%, 6,1% e 6,4%.

Fazzan (2011) utilizou resíduo de borracha de pneus em concreto para capreamento de lajes pré-moldadas do tipo treliçadas. Constatou-se que o concreto produzido com 10% de resíduo de borracha de pneu promoveu redução de 19% na massa específica em relação ao traço de controle em concreto convencional. Verificou-se também um aumento no teor de ar incorporado para os concretos com adição de borracha, se comparado aos traços sem resíduo. Ainda de acordo com o autor, houve redução da absorção e afirmou que em função da borracha atuar como poros fechados no interior dos concretos, já que sua taxa de absorção é nula, a durabilidade dos concretos pode aumentar.

Fioritti *et al.* (2010), constataram que o uso de resíduos de borracha de pneus não altera de forma significativa a propriedade de absorção de água no concreto. Concluíram ainda que em alguns casos, os resultados da absorção dos traços com resíduo foram menores que o traço de referência, indicando que não se pode afirmar piora dessa propriedade, mas confirmar controvérsias das literaturas, em que alguns

pesquisadores afirmam que essa propriedade não é influenciada e outros afirmam que ocorre maior absorção em função da incorporação dos resíduos de borracha.

De acordo com França *et al.* (2004), a borracha atua como se fosse um empecilho impedindo a manifestação de fissuras. Ainda de acordo com o autor, quando interceptarem as microfissuras que passam a existir na fase de endurecimento da pasta, as borrachas evitam o seu crescimento e impedem o aparecimento prematura dessas microfissuras.

Campos e Jacintho (2010), avaliaram as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com adição de 5% e 10% de fibras de pneus. Entre os ensaios realizados, os autores constataram que apesar da diminuição das propriedades mecânicas, a adição de fibras de borracha ao concreto não reduz sua capacidade de absorção de energia.

Segundo Martins *et al.* (2005), os concretos produzidos com adição de resíduo de borracha apresentam um comportamento mais dúctil do que o concreto convencional, diferenciando-os quanto ao tipo de ruptura.

A grande vantagem da adição de resíduos de pneus nas misturas de concretos, quando comparada com os concretos comuns, está na melhor condição de deformabilidade, pela redução do módulo de elasticidade longitudinal. Essa redução proporciona uma melhor redistribuição de esforços e consequentemente um comportamento mais dúctil para a configuração de ruína (SANTOS *et al.*, 2004).

Para Romualdo *et al.* (2011), as características químicas do pneu que o faz ser tão durável, são conduzidas para o concreto, tornando-o mais resistente às intempéries, ao envelhecimento e mais elástico.

Macedo *et al.* (2005), estudaram o comportamento térmico e acústico em placas pré-moldadas produzidas a partir da substituição em volume do agregado miúdo por resíduo de pneus inservíveis em quatro teores diferentes (0%, 5%, 10% e 15%). Os autores perceberam uma substancial melhora do isolamento acústico à medida que as porcentagens de borracha foram aumentadas.

De acordo com Boaventura (2011, p. 28), apesar das pesquisas mostrarem que a utilização dos resíduos de pneus na produção de concretos apresenta bons resultados, foi constatado na literatura que há uma tendência de variação de algumas

propriedades dos mesmos no estado fresco e no estado endurecido. A partir dessa variante, faz-se necessário o estudo do comportamento dos concretos produzidos com resíduos de pneus.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Metodologia aplicada

Em conformidade com os objetivos propostos para o presente trabalho, implementou-se metodologia baseada em programa experimental, em laboratório, para análise das propriedades do concreto, com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de borracha de pneus, para aplicação em paredes de concreto.

Foram utilizados duas granulometrias de resíduo de borracha de pneus, nomeadas de miúda e graúda, apresentadas no item 3.2.5.

Para todos os traços adotados, fixou-se em 10% a substituição do agregado miúdo em relação ao volume, por resíduo de borracha de pneus, variando somente a granulometria, descrito no item 3.3.1.

Utilizaram-se corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e placas quadradas de 30 cm e 5 cm de espessura. Foram ensaiadas, aos 28 dias, amostras no estado endurecido para determinação da resistência à compressão e à tração, determinação da absorção por capilaridade e imersão, índice de vazios e massa específica. Foram avaliadas também a consistência e massa específica no estado fresco. Todo o processo foi realizado de acordo com as normas pertinentes em vigor. As placas moldadas foram ensaiadas conforme Shadnia *et al.* (2015) para verificação do comportamento térmico dos concretos em estudo.

O programa experimental desenvolvido, foi dividido nas seguintes etapas: escolha e caracterização dos materiais constituintes das misturas, definição dos traços, moldagem e cura dos corpos-de-prova e de placas de concreto, ensaios de caracterização dos concretos nos estados fresco e endurecido e ensaio térmico.

### 3.2. Materiais utilizados

Os materiais que constituem os concretos, foram caracterizados através de ensaios de laboratório e os resultados são apresentados nos itens a seguir.

#### 3.2.1. Cimento

Foi utilizado o cimento ITAÚ, de alta resistência inicial (CP V ARI), muito aplicado na concepção de paredes de concreto, devido à necessidade de rápida desforma. As propriedades do mesmo são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Caracterização do cimento CP V ARI.

PROPRIEDADE	RESULTADO	NORMA (ABNT)
Área superficial (m <sup>2</sup> /kg)	497,67	NBR 11579:2012
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,06	NBR NM 23:2001
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	32,00	NBR 7215:1996
Tempo de pega inicial (min)	185,00	NBR NM 65:2003
Tempo de pega final (min)	205,00	NBR NM 65:2003

Fonte: Autor.

#### 3.2.2. Agregado miúdo

Foram utilizados como agregado miúdo, areia fina e média, da região do Triângulo Mineiro em Minas Gerais. As propriedades das mesmas são apresentadas nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2: Caracterização da areia fina.

PROPRIEDADE	RESULTADO	NORMA (ABNT)
Dimensão máxima característica (mm)	1,18	NBR NM 248:2003
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,69	NBR NM 52:2009
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,50	NBR NM 45:2006
Módulo de finura	1,67	NBR NM 248:2003

Fonte: Autor.

Tabela 3.3: Caracterização da areia média.

PROPRIEDADE	RESULTADO	NORMA (ABNT)
Dimensão máxima característica (mm)	4,75	NBR NM 248:2003
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,69	NBR NM 52:2009
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,52	NBR NM 45:2006
Módulo de finura	2,06	NBR NM 248:2003

Fonte: Autor.

### 3.2.3. Agregado graúdo

Como agregado graúdo, foi utilizado pedra britada de rocha basalto (Brita 0), que segundo QUARESMA (2009), situa-se na zona granulométrica de 4,8 a 12,5 mm. As propriedades da mesma são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Caracterização da Brita 0.

PROPRIEDADE	RESULTADO	NORMA (ABNT)
Dimensão máxima característica (mm)	12,50	NBR NM 248:2003
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,87	NBR NM 53:2009
Massa unitária no estado compactado (g/cm <sup>3</sup> )	1,54	NBR NM 45:2006
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,40	NBR NM 45:2006
Módulo de finura	5,96	NBR NM 248:2003

Fonte: Autor.

### 3.2.4. Água e aditivo

A água utilizada na produção dos concretos foi proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Uberlândia-MG.

O aditivo utilizado foi o MasterGlenium 3400 NV da BASF, apresentado na Figura 3.1. De acordo com Manual Técnico – BASF (2016), este aditivo é denominado como superplastificante, que pode proporcionar um índice de redução de água maior que 20%. Algumas informações contidas no manual técnico do produto são apresentadas na Tabela 3.5.

Figura 3.1: Aditivo superplastificante MasterGlenium 3400 NV.



Fonte: Autor.

Tabela 3.5: Características do aditivo superplastificante MasterGlenium 3400 NV.

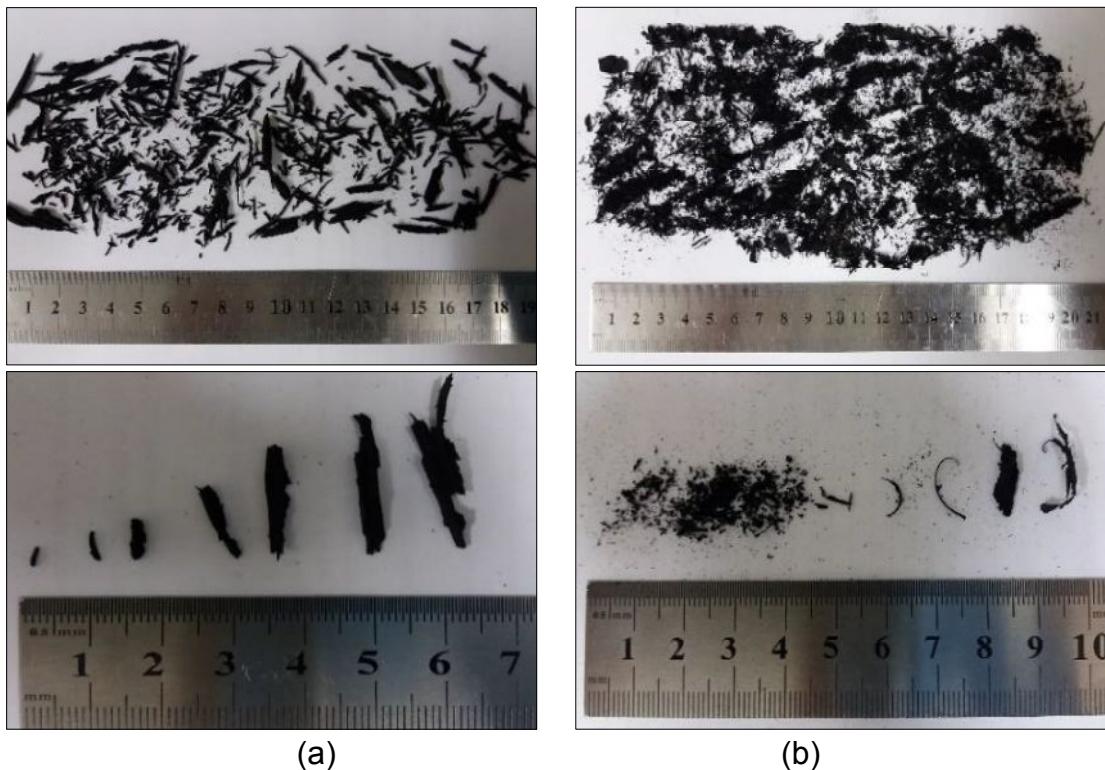
Aspecto	Líquido
Base química	Éter policarboxílico
Consumo sobre massa de cimento (%)	0,20 – 1,00
Cor	Castanho escuro
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,10
Odor	Leve
pH	7,80

Fonte: Manual Técnico – BASF (2016).

### 3.2.5. Borracha de pneu

A borracha de pneu foi utilizada em duas diferentes granulometrias, denominadas de graúda (Figura 3.2a) e miúda (Figura 3.2b). Ambos materiais são derivados da raspagem dos pneus, etapa do processo de recauchutagem dos mesmos.

Figura 3.2: a) Borracha graúda; b) Borracha miúda.



Fonte: Autor.

A borracha denominada graúda, foi adquirida na empresa Tyresoles Renovadora de Pneus e a denominada miúda, na empresa Fixtyre Pneus, ambas situadas na cidade de Uberlândia-MG. De acordo com as empresas nas quais os materiais foram adquiridos, são produzidos mensalmente 15 t e 3 t, respectivamente.

As propriedades dos materiais são apresentadas na Tabela 3.6. Para determinação das dimensões dos materiais, foi feito peneiramento e análise visual. Para massa

específica, adotaram-se os procedimentos descritos na ABNT NBR 9776 (1987), porém a água foi substituída por querosene, conforme Santos (2005).

Tabela 3.6: Características das borrachas de pneus.

PROPRIEDADE	BORRACHA GRAÚDA	BORRACHA MIÚDA	NORMA (ABNT)
Dimensões (mm)	3 até 35	Pó até 20	-
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,18	1,22	NBR 9776:1987
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	0,34	0,36	NBR NM 45:2006

Fonte: Autor.

### 3.3. Produção do concreto

Foram utilizados concretos com consistência mais fluida, semelhante ao recomendado pela ABCP *et al.* (2008) para produção de paredes de concreto, ou seja, com abatimento de aproximadamente 200 mm. A seguir, estão descritas as proporções dos materiais adotados na produção dos concretos, método de mistura, moldagem e cura dos corpos-de-prova.

#### 3.3.1. Traço dos concretos utilizados

O traço para o concreto referência, assim como os traços com substituição parcial dos agregados naturais por borracha de pneus, foram adotados com base em pesquisas desenvolvidas pela Professora Doutora Leila Aparecida de Castro Motta. Visando dosagens aplicáveis para paredes de concreto, foi fixado para todos os casos, abatimento de  $230 \pm 30$  mm e resistência à compressão mínima de 20 MPa aos 28 dias.

Estabeleceu-se também a relação água cimento de  $a/c = 0,6$  e uso de aditivo superplastificante para obtenção da trabalhabilidade adequada.

Na Tabela 3.7 são apresentados o consumo dos materiais para produção de 1 m<sup>3</sup> dos concretos analisados no presente trabalho.

Tabela 3.7: Consumo dos materiais para produção de 1 m<sup>3</sup> dos concretos.

Traço	Cimento (kg)	Areia fina (kg)	Areia média (kg)	Brita 0 (kg)	Borracha graúda (kg)	Borracha miúda (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)
CR	384,60	199,99	799,97	769,20	0,00	0,00	230,76	1,92
CBG	384,60	199,99	719,98	769,20	35,13	0,00	230,76	2,31
CBM	384,60	199,99	719,98	769,20	0,00	36,12	230,76	2,31
CBGM	384,60	199,99	719,98	769,20	17,57	18,06	230,76	1,92

Fonte: Autor.

A seguir apresenta-se a nomenclatura adotada para cada tipo de concreto:

- CR: Concreto referência;
- CBG: Concreto com substituição de 10% do volume de areia média por borracha graúda;
- CBM: Concreto com substituição de 10% do volume de areia média por borracha miúda;
- CBGM: Concreto com substituição de 10% do volume de areia média por 5% de borracha graúda e 5% de borracha miúda.

### 3.3.2. *Mistura dos materiais*

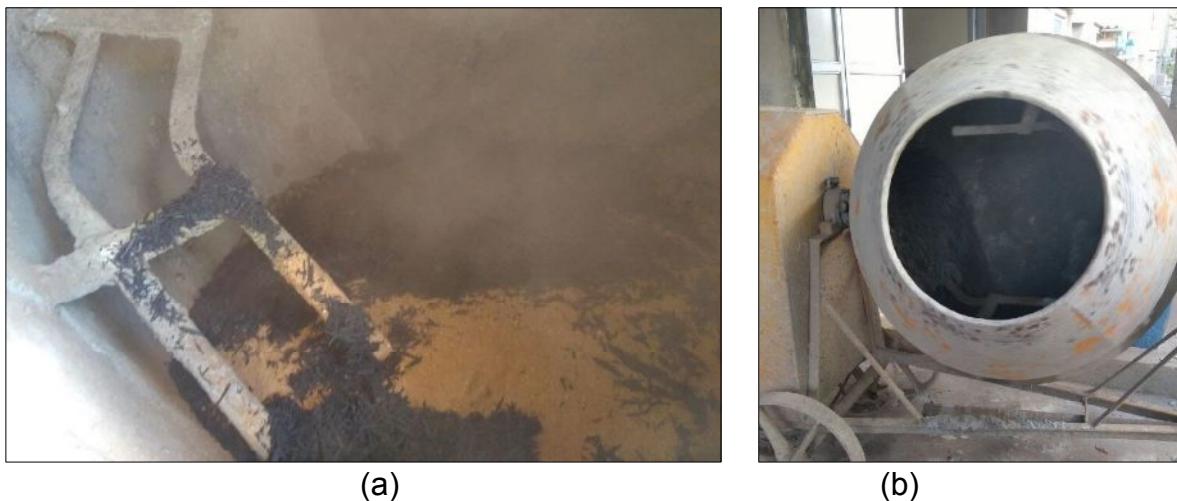
Na semana anterior à produção do concreto, o agregado miúdo foi separado e colocado em local coberto, onde permaneceu até completa secagem. Antes da etapa de produção do concreto, a betoneira foi imprimada com o traço 1:2:3 (cimento : areia média : brita).

A ordem de inserção dos materiais na betoneira e o tempo de mistura, foram definidos de modo a se obter maior dispersão dos mesmos e permitindo a completa ação do aditivo superplastificante. A sequência da adição está descrita a seguir:

1. Brita + metade da água e aditivo;
2. Cimento;
3. Areia + borracha (quando houve);
4. Metade da água e aditivo.

Os materiais foram misturados por cinco minutos, conforme Figura 3.3a e Figura 3.3b. Em seguida foi realizado o ensaio de consistência pelo abatimento tronco-de-cone, descrito no item 3.4.1. Caso o ensaio de consistência atingisse o valor especificado, era então realizado o ensaio de massa específica no estado fresco, descrito no item 3.4.2, e do contrário, o concreto era misturado por mais dois minutos com incremento de aditivo superplasticante.

Figura 3.3: a) Materiais na betoneira; b) Mistura dos materiais.



Fonte: Autor.

### 3.3.3. Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Após o preparo e realização dos ensaios do concreto no estado fresco, moldaram-se os corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura (Figura 3.4). Todos os procedimentos de moldagem e cura dos corpos-de-prova foram realizados conforme orientações da ABNT NBR 5738:2015 e acordo com esta, para concretos com abatimento superior a 160 mm, a quantidade de camadas deve ser reduzida pela

metade da estabelecida, ou seja, o preenchimento dos moldes foi feito em camada única e adensados com 12 golpes.

Esses corpos-de-prova foram moldados para realização dos ensaios do concreto no estado endurecido, descritos no item 3.5.

Figura 3.4: Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos.



Fonte: Autor.

Para realização do ensaio de desempenho térmico, descrito no item 3.5.5, foram moldadas placas de dimensões 30 x 30 x 5 cm e adensadas em mesa vibratória conforme Figura 3.5.

Figura 3.5: Moldagem de placa para ensaio de desempenho térmico.



Fonte: Autor.

Após a moldagem, os corpos-de-prova e as placas foram colocados em câmara úmida, conforme Figura 3.6a, onde permaneceram por um período aproximado de 24 horas para realização da cura inicial. Após esse período, foi feita a desmoldagem e cura submersa em água saturada com cal até a idade de 28 dias, conforme Figura 3.6b.

Figura 3.6: a) Cura inicial em câmara úmida; b) Cura em reservatório com água e cal.



Fonte: Autor.

### 3.4. Ensaios do concreto no estado fresco

#### 3.4.1. Consistência pelo abatimento do tronco-de-cone

Este ensaio foi executado conforme as orientações da ABNT NBR NM 67:1998, que de acordo com esta, o método busca avaliar a trabalhabilidade do concreto fresco, através da medida de seu assentamento.

Conforme já mencionado, após a mistura dos materiais, realizou-se o ensaio de consistência e caso o ensaio atingisse o valor especificado, era então realizado o ensaio de massa específica no estado fresco, descrito no item 3.4.2, e do contrário, o concreto era misturado por mais dois minutos com incremento de aditivo superplastificante (Figura 3.7).

Figura 3.7: Determinação consistência pelo abatimento do tronco-de-cone.



Fonte: Autor.

### 3.4.2. Massa específica

Após obtenção da consistência adequada, medida como descrito no item 3.4.1, realizou-se o ensaio para determinação da massa específica conforme as orientações da ABNT NBR 9833:2009 (Figura 3.8).

Figura 3.8: Determinação da massa específica do concreto no estado fresco.



Fonte: Autor.

### 3.5. Ensaios do concreto no estado endurecido

#### 3.5.1. Resistência à compressão

Foram ensaiados três corpos-de-prova cilíndricos à compressão para cada tipo de concreto, moldados e curados conforme descrito no item 3.3.3. Previamente a execução dos ensaios, foi realizada a regularização dos corpos-de-prova com retífica e depois rompidos na máquina universal de ensaios, marca INSTRON, 1000HDX-C4-G7C conforme Figura 3.9. A velocidade de carregamento do ensaio foi de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s, de acordo com as especificações da ABNT NBR 5739:2007.

Figura 3.9: Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autor.

#### 3.5.2. Resistência à tração por compressão diametral

Três corpos-de-prova cilíndricos, para cada tipo de concreto, moldados, curados e retificados da mesma maneira que a descrita nos itens anteriores, foram ensaiados à tração por compressão diametral na máquina universal de ensaios, marca INSTRON,

1000HDX-C4-G7C conforme Figura 3.10. A velocidade de carregamento do ensaio foi de  $0,05 \pm 0,02$  MPa/s, de acordo com as especificações da ABNT NBR 7222:2011.

Figura 3.10: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: Autor.

### 3.5.3. Absorção de água por capilaridade

O ensaio para a determinação da absorção por capilaridade foi realizado de acordo com a ABNT NBR 9779:2012. Foram ensaiados três corpos-de-prova, moldados e curados conforme descrito nos itens anteriores, para cada tipo de concreto.

Os corpos-de-prova foram mantidos em estufa à temperatura de  $105 \pm 5$  °C até a constância de massa. Em seguida, os mesmos foram resfriados até a temperatura ambiente e pesados. Após a pesagem, os corpos-de-prova ficaram dispostos sobre suportes em um recipiente preenchido com água até a altura de 5 mm medido da base inferior daquele, conforme Figura 3.11. O nível de água foi mantido constante durante todo o ensaio. Foi aferida a massa dos corpos-de-prova com intervalos de 3, 6, 12, 24, 48 e 72 horas contadas a partir do momento que aqueles entraram em contato com a água.

Após a última pesagem, a ABNT NBR 9779:2012 recomenda o rompimento das amostras ensaiadas por compressão diametral, de modo a permitir a observação da distribuição de água no interior das mesmas e que será ilustrado no item 4.2.

Figura 3.11: Disposição dos corpos-de-prova para ensaio de absorção por capilaridade.



Fonte: Autor.

### 3.5.4. Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

O ensaio para a determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, foi realizado de acordo com a ABNT NBR 9779:2012. Foram ensaiados três corpos-de-prova, moldados e curados conforme descrito nos itens anteriores, para cada tipo de concreto.

Primeiramente as amostras permaneceram em estufa à temperatura de  $105 \pm 5$  °C durante 72 horas e após esse período, foi aferida a massa seca das mesmas. Em seguida, os corpos-de-prova foram imersos em água por um período de 72 horas.

Completada a etapa anterior, aqueles foram dispostos em um recipiente com água, que progressivamente foi levada a ebulição e mantidos por um período de 5 horas, conforme Figura 3.12. Foi aguardado até que a água atingisse a temperatura de 23 °C para então retirar os corpos-de-prova e registrar a massa em balança hidrostática.

Posteriormente, os corpos de prova foram secos com um pano úmido e então foi registrada a massa saturada com superfície seca.

Figura 3.12: Forno autoclave.



Fonte: Autor.

### 3.5.5. Desempenho térmico

Para realizar o ensaio térmico, foram produzidos quatro moldes cúbicos de compensado de madeira, com dimensões de 30 x 30 x 5 cm. No topo de cada um dos compartimentos, foi colocada uma placa, descrita no item 3.1, para cada tipo de concreto, conforme Figura 3.13.

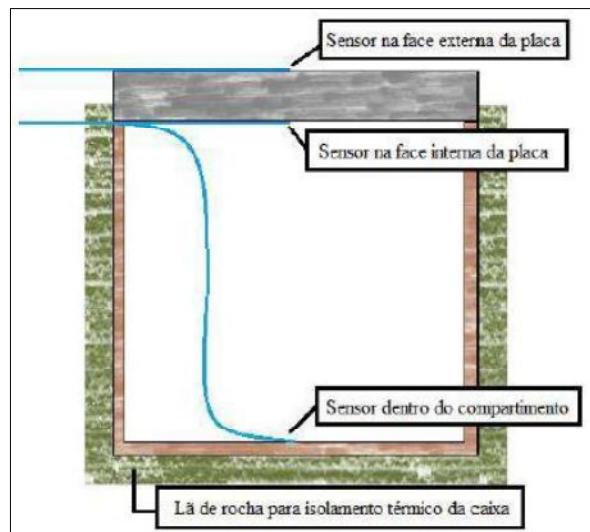
Figura 3.13: Moldes cúbicos com placas de concreto para ensaio térmico.



Fonte: Autor.

Os moldes cúbicos foram envolvidos com lã de rocha para isolamento térmico dos mesmos e três sensores de temperatura (termopares), foram instalados em cada um dos compartimentos, sendo um na face externa e outro na face interna da placa e no interior do molde, conforme Figura 3.14.

Figura 3.14: Seção transversal do esquema do ensaio térmico proposto.



Fonte: CARVALHO (2017).

As quatro amostras foram colocadas em um espaço sem sombras ou obstruções em um dia ensolarado. Após ligar todos os sensores a um sistema de aquisição de dados, as temperaturas foram registradas durante 24 horas (de 6h às 6h). As temperaturas foram imediatamente medidas e armazenadas.

Este procedimento teve como intuito analisar a diferença de temperatura entre os três termopares de cada amostra e avaliar se houve o efeito de redução daquela propriedade no interior das caixas com as placas de concreto com borracha.

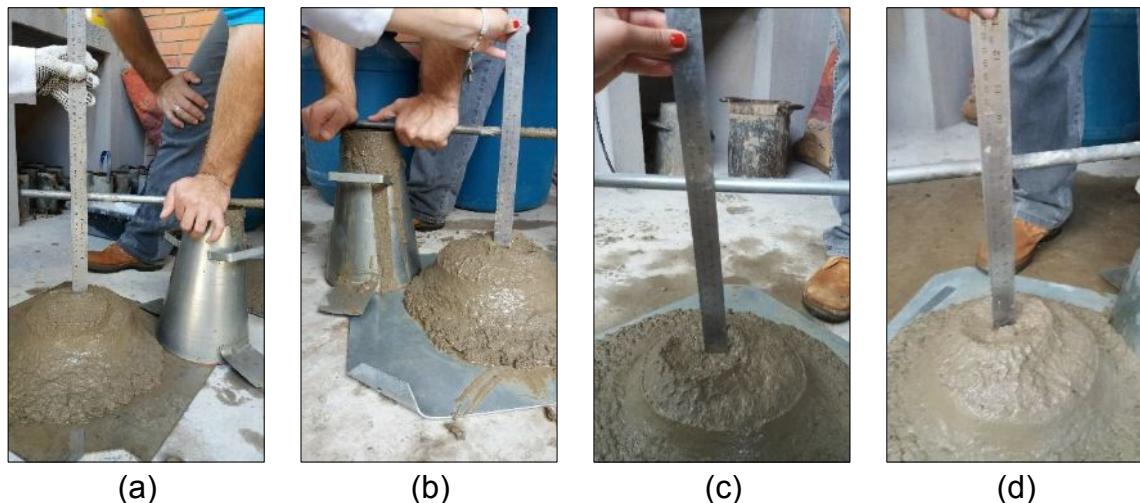
## 4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE

Neste capítulo, são analisados os resultados dos ensaios realizados. Os mesmos foram subdivididos em dois tópicos: Concreto no estado fresco - consistência pelo abatimento do tronco-de-cone e massa específica; Concreto no estado endurecido – resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica e desempenho térmico.

### 4.1. Concreto no estado fresco

No ensaio de consistência pelo abatimento do tronco-de-cone, foi possível observar para cada traço, conforme Figura 4.1, algumas características importantes, tais como: homogeneidade da mistura, ausência de segregação, ausência de exsudação na superfície e nas bordas da porção espalhada e boa trabalhabilidade, ou seja, facilidade no adensamento.

Figura 4.1: Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco-de-cone: (a) CR; (b) CBG; (c) CBM; (d) CBGM.



Fonte: Autor.

Dado que a relação água/cimento e percentual de substituição de agregado miúdo por borracha foram fixados, pôde-se observar, conforme Tabela 4.1, que para o mesmo teor de aditivo, a adição dos agregados de borracha reduziu o abatimento dos concretos produzidos.

Tabela 4.1: Resultados do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco-de-cone.

TEOR DE ADITIVO (%)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	TRAÇO
ABATIMENTO (mm)	90	100	-	200	-	CR
	-	95	120	155	200	CBG
	-	-	130	180	215	CBM
	-	-	190	205	-	CBGM

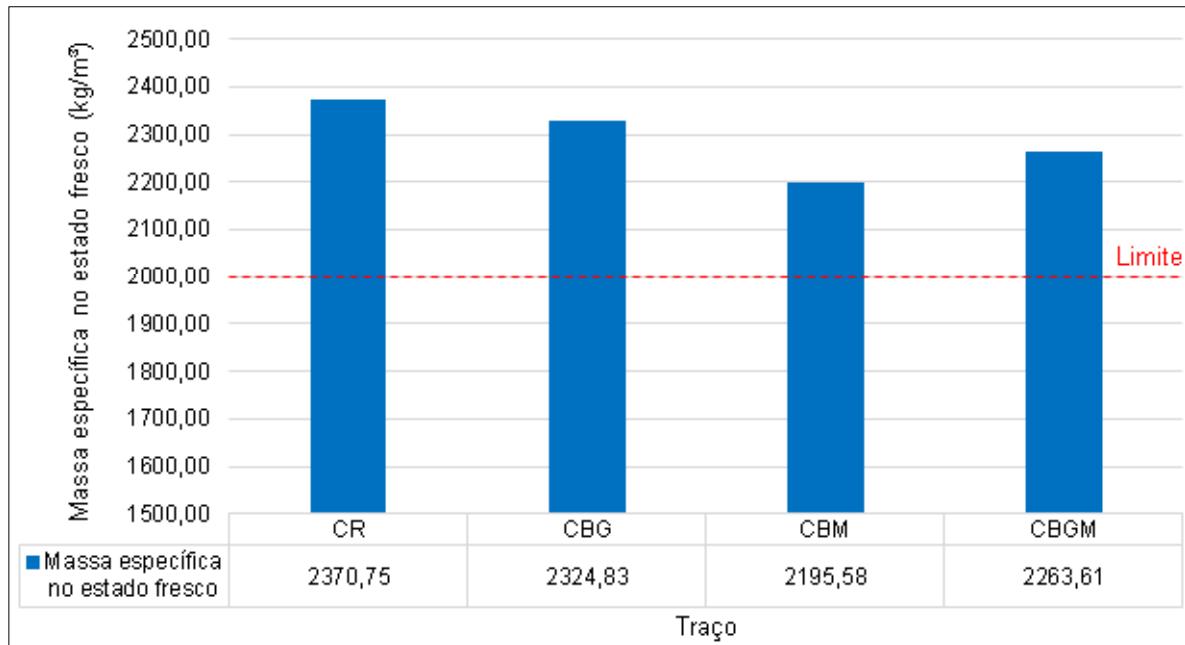
Fonte: Autor.

Estes resultados comprovam os relatos de Eldin e Senouci (1992) e Martins *et al.* (2005), citados no item 2.5

Ainda de acordo com Eldin e Senouci (1992), os resultados se justificam porque os agregados de borracha de formato alongado, apresentados no item 3.2.5, formam uma estrutura entrelaçada resistindo ao fluxo normal do concreto sob seu próprio peso, apresentando menos fluidez.

Outra propriedade avaliada dos concretos no estado fresco foi a massa específica. Constatou-se que a incorporação de resíduo de borracha acarretou em uma diminuição da massa específica dos concretos de 2%, 8% e 5%, para os traços CBG, CBM e CBGM respectivamente, em relação ao CR, conforme Figura 4.2.

Figura 4.2: Massa específica dos concretos no estado fresco.



Fonte: Autor.

De acordo com Freitas *et al.* (2009) essa redução ocorre pelo fato de que o agregado miúdo substituído, possui maior massa específica que o agregado de borracha, conforme Tabelas 3.3 e 3.6.

De acordo com Granzotto (2010), dentre os traços que possuem os agregados de borracha, a redução dos valores de massa específica ocorre com o aumento do teor de ar incorporado, ou seja, quanto maior for o índice de vazios, apresentado no item 4.2.

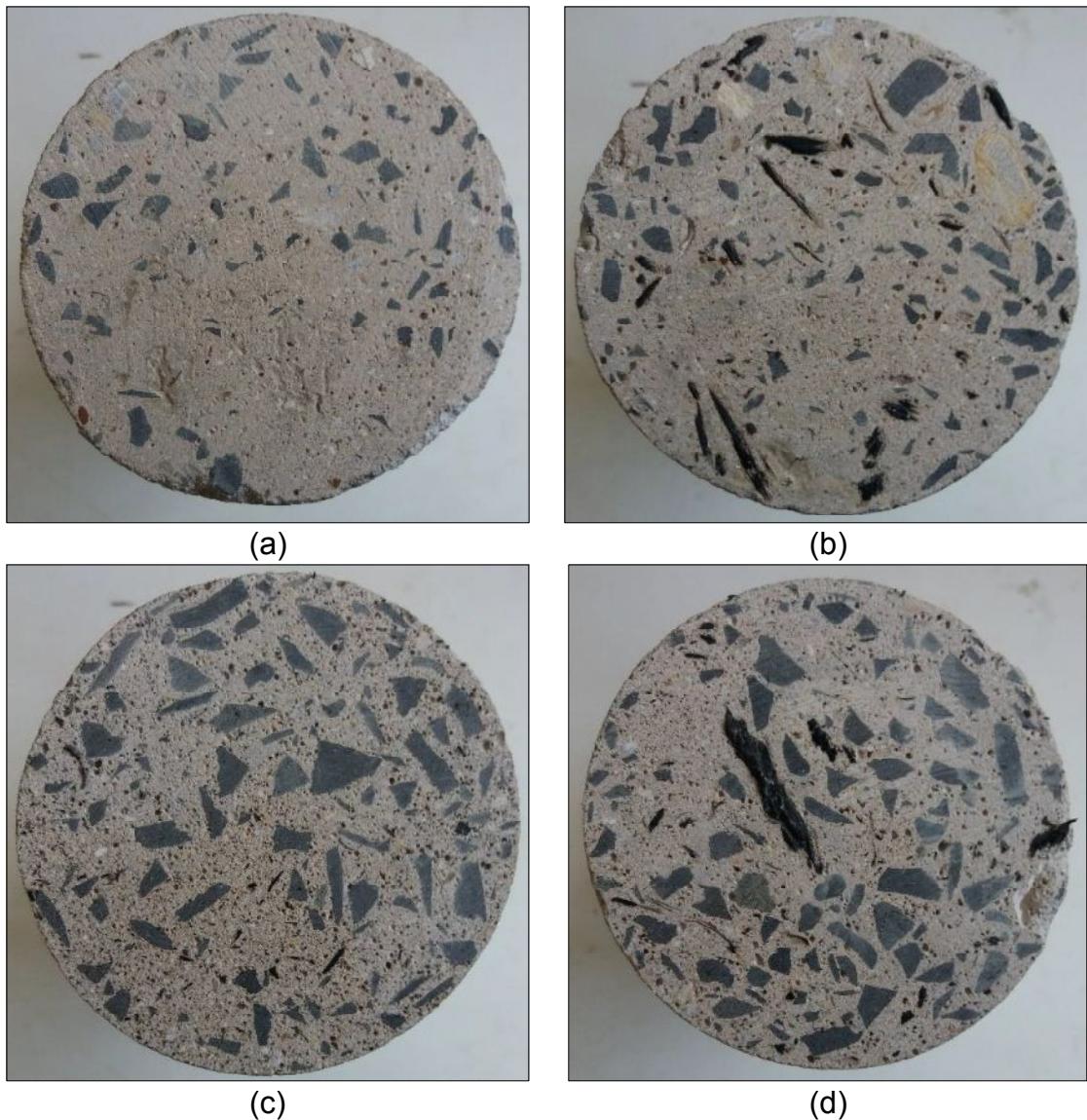
Apesar da queda nos valores de massa específica dos concretos no estado fresco, nenhum dos traços puderam ser classificados como concreto leve, pois os mesmos ultrapassaram o valor limitante de 2000 kg/m³, definido pela ABNT NBR 12644:2014.

#### 4.2. Concreto no estado endurecido

Após a cura dos corpos-de-prova, bem como da retificação dos mesmos para os ensaios mecânicos, observou-se que houve uma distribuição uniforme dos agregados

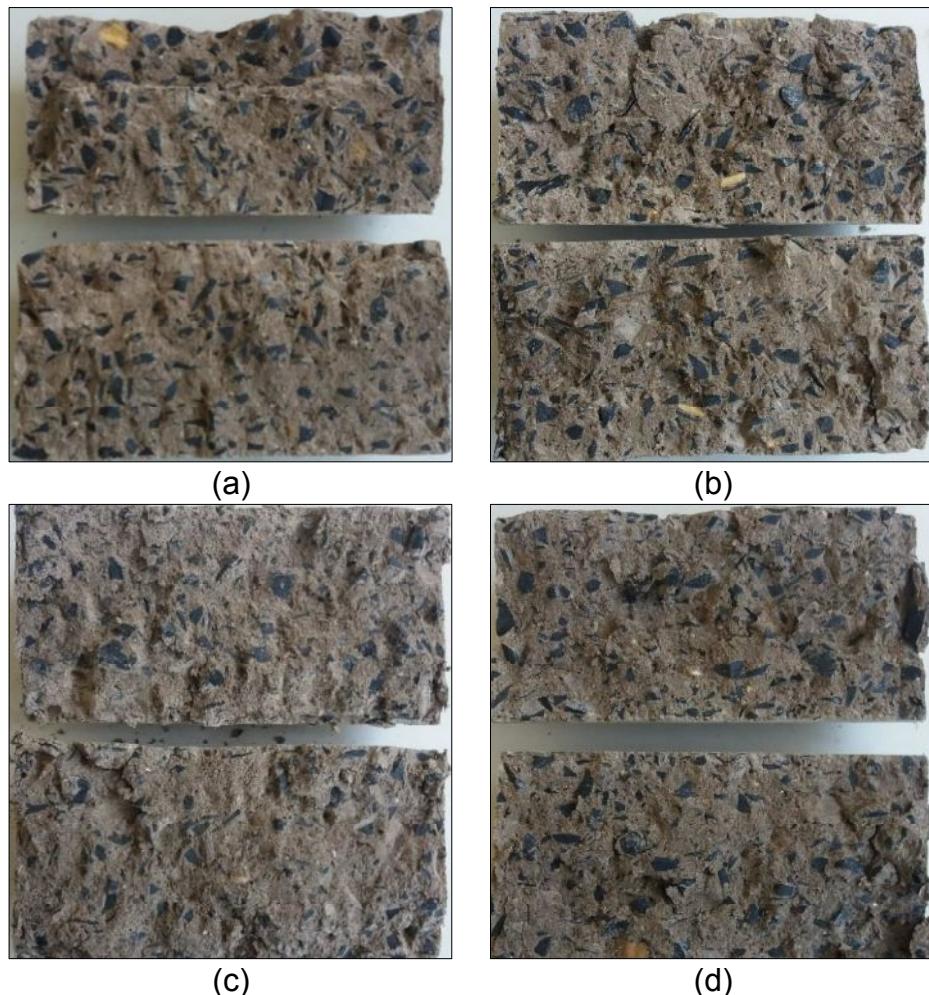
na mistura, conforme Figura 4.3 e que pôde ser confirmada após o ensaio de tração, conforme Figura 4.4.

Figura 4.3: Seção transversal dos corpos-de-prova: (a) CR; (b) CBG; (c) CBM; (d) CBGM.



Fonte: Autor.

Figura 4.4: Seção longitudinal dos corpos-de-prova: (a) CR; (b) CBG; (c) CBM; (d) CBGM.



Fonte: Autor.

Com relação às propriedades mecânicas, realizam-se aos 28 dias de cura dos corpos-de-prova, os ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral.

PROPRIEDADE TRAÇO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)
CR	38,83	3,95
CBG	33,87	3,35
CBM	25,17	2,97
CBGM	27,62	3,13

Fonte: Autor.

A incorporação de agregado de borracha nos concretos gerou um decréscimo nos valores de resistência, o que era esperado de acordo com as referências bibliográficas, no entanto, todos os traços analisados atingiram valores de resistência à compressão superiores à 20 MPa, mínima estabelecida pela ABNT NBR 6118:2014 para fins estruturais.

Para compressão, houve queda de 13%, 35% e 29% para os traços CBG, CBM e CBGM respectivamente, em relação ao CR. Para tração, a redução foi de 15%, 25% e 21% para os traços CBG, CBM e CBGM respectivamente, em relação ao CR. Dentre os concretos analisados, o CBG que possui borracha com granulometria graúda, apresentou os melhores resultados diante os ensaios mecânicos, enquanto o CBM que possui borracha com granulometria miúda, apresentou os piores resultados, ficando o CBGM que possui uma composição granulométrica graúda e miúda, com resultados intermediários entre os dois materiais anteriores.

Para Segre e Jokes (2000) a perda de resistência verificada, pode ser atribuída ao módulo de deformação elástica e à má aderência entre a pasta de cimento e a borracha.

Para Giacobbe *et al.* (2008) a redução na resistência nos concretos produzidos com resíduo de pneu, está ligada à ação da borracha não absorver todo o carregamento em relação aos outros componentes, agindo como um grande vazio na massa dos concretos e também admitir maior deformação lateral, induzindo à ruptura.

Para Segantini (2014) a incorporação do resíduo de borracha de pneu no concreto gera um aumento no índice de vazios, causando perda em suas propriedades mecânicas.

Das propriedades físicas analisadas dos traços em questão, observou-se que há uma tendência ao aumento dos valores de absorção por imersão e índice de vazios para os concretos com adição de borracha de pneu em relação ao de referência, confirmando a observação de Segantini (2014). Contudo, as variações de valores são pequenas e dentre os traços com agregado de borracha, constatou-se que aqueles que possuem o resíduo de granulometria miúda, apresenta maior índice de vazios, conforme Tabela 4.3.

Foi possível ainda verificar redução dos valores de massa específica no estado endurecido bem como da absorção por capilaridade para os concretos com incorporação de borracha, conforme Tabela 4.3 e 4.4, sendo que os menores valores apresentados foram para os traços com resíduo de granulometria miúda.

Como mencionado anteriormente, pode-se perceber a relação dos valores de índice de vazios e massa específica, em que o aumento do primeiro influencia diretamente na redução do segundo, conforme Granzotto (2010).

Tabela 4.3: Resultados dos ensaios de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos no estado endurecido.

<b>PROPRIEDADE TRAÇO</b>	<b>ABSORÇÃO (%)</b>	<b>ÍNDICE DE VAZIOS (%)</b>	<b>MASSA ESPECÍFICA (g/cm<sup>3</sup>)</b>
CR	6,70	15,08	2,65
CBG	7,44	15,99	2,56
CBM	8,32	16,50	2,38
CBGM	7,99	16,42	2,46

Fonte: Autor.

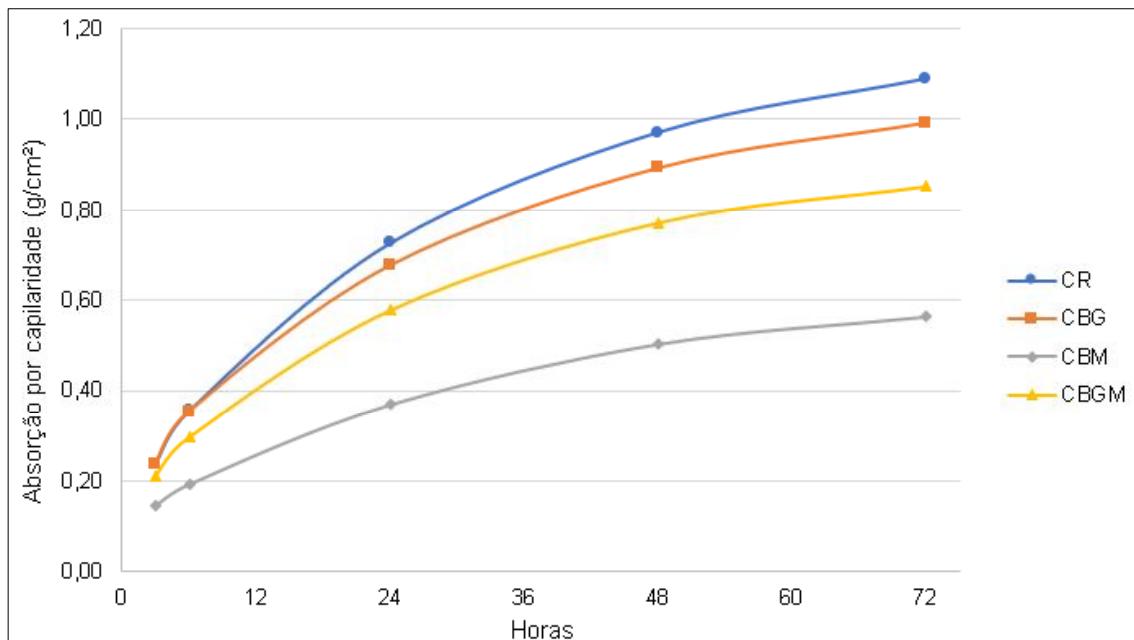
Ainda em relação a absorção por capilaridade, pode-se observar pela Figura 4.5 que representa os dados da Tabela 4.4, a variação dessa propriedade para cada traço analisado. Percebe-se que essa propriedade tende a obedecer a uma mesma tendência, com variações mais acentuadas nas primeiras 48 hr, amenizando-se após esse período, porém destacando-se uma diferença de 49% para o traço CBM em relação ao CR, ou seja, aquele com incorporação somente com borracha de granulometria miúda.

Tabela 4.4: Resultados do ensaio de absorção por capilaridade.

<b>TRAÇO</b>	<b>TEMPO (hr)</b>				
	3	6	24	48	72
	<b>ABSORÇÃO (g/cm<sup>2</sup>)</b>				
CR	0,24	0,35	0,73	0,97	1,09
CBG	0,24	0,35	0,68	0,89	0,99
CBM	0,14	0,19	0,37	0,50	0,56
CBGM	0,21	0,30	0,58	0,77	0,85

Fonte: Autor.

Figura 4.5: Absorção de água por capilaridade.



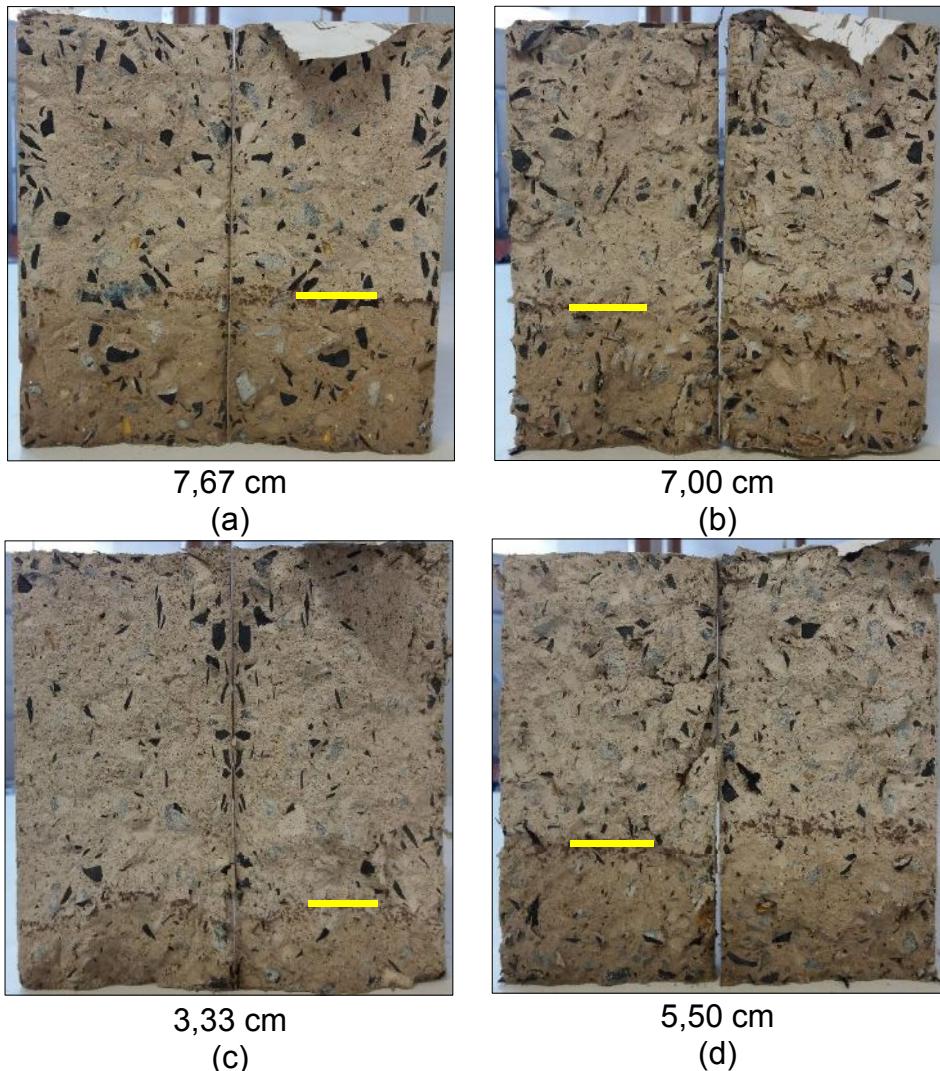
Fonte: Autor.

Conforme mencionado anteriormente no item 3.5.3, após pesagem dos corpos-de-prova no ensaio de absorção por capilaridade, os mesmos foram rompidos para análise da distribuição de água e altura de ascensão da mesma.

Constatou-se novamente uma tendência à queda dos valores dessa propriedade para os traços com resíduo de borracha em relação ao de referência. Contudo, foi expressivo o resultado para o traço CBM, que apresentou redução de 57%, conforme Figura 4.6.

De acordo com Santos (2012) quanto maior for a porosidade do material em questão, ou seja, o índice de vazios, menor será a pressão negativa ocasionada pela água e consequentemente, menores serão os valores de ascensão capilar.

Figura 4.6: Ascensão capilar: (a) CR; (b) CBG; (c) CBM; (d) CBGM.



Fonte: Autor.

Com relação ao ensaio de desempenho térmico e para facilitar a análise e compreensão dos resultados, o sensor da face externa da placa foi denominado (E), o sensor da face interna da placa denominada (I) e o sensor do interior do compartimento (F). Para exemplificar, o sensor da face externa da placa do concreto de referência será denominado CR-E, conforme apresentado na Tabela 4.5.

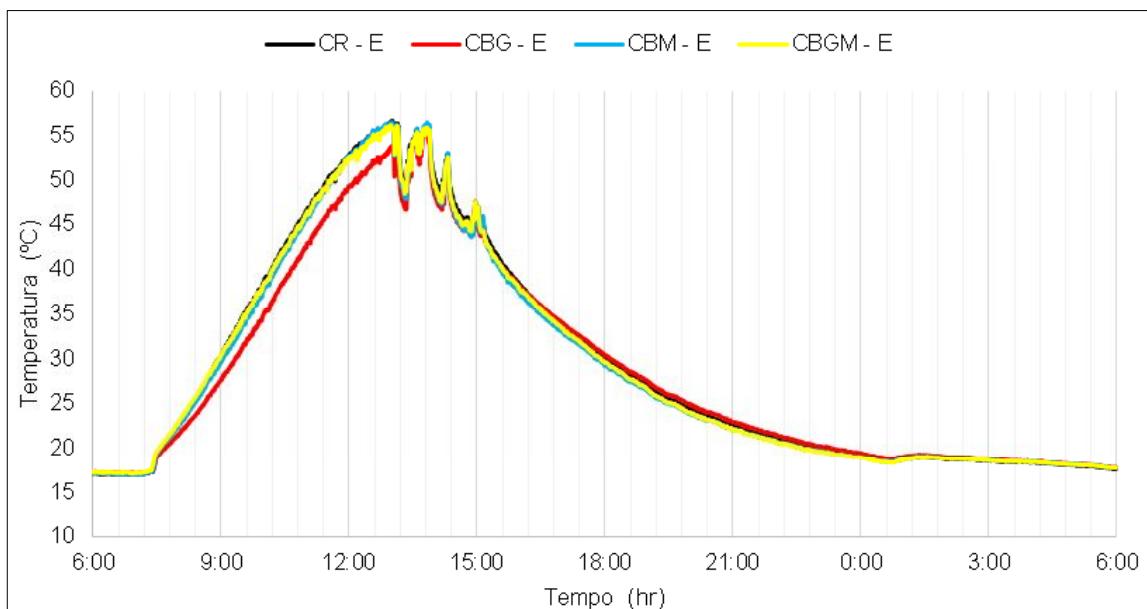
Tabela 4.5: Nomenclatura dos sensores para cada traço.

POSIÇÃO DO SENSOR	TRAÇO			
	CR	CBG	CBM	CBGM
Face externa	CR - E	CBG - E	CBM - E	CBGM - E
Face interna	CR - I	CBG - I	CBM - I	CBGM - I
Interior do compartimento	CR - F	CBG - F	CBM - F	CBGM - F

Fonte: Autor.

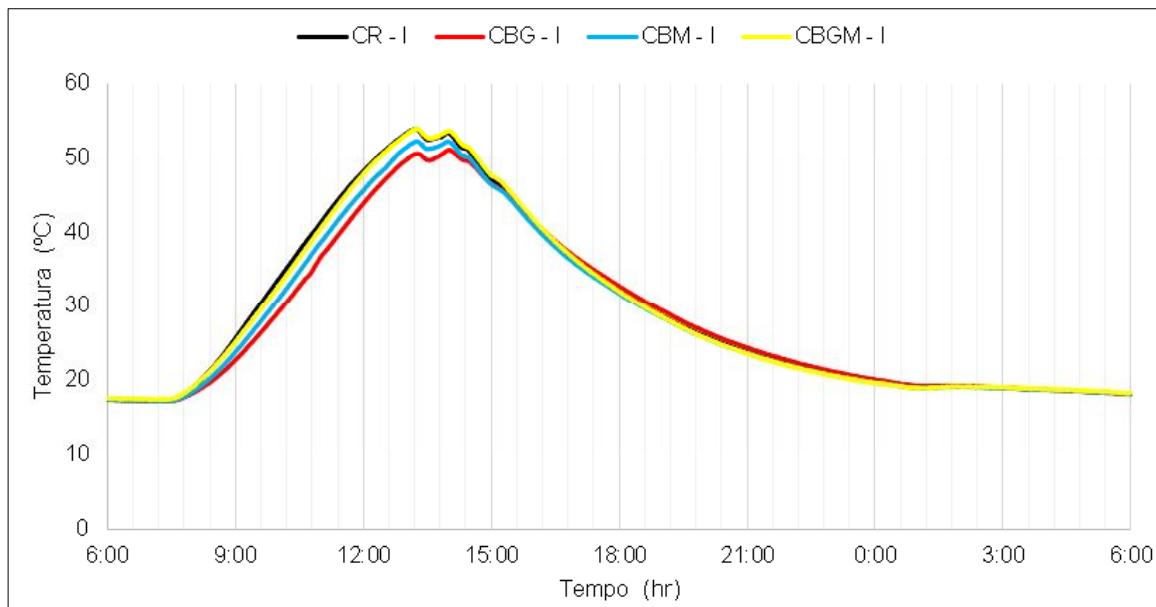
As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 mostram, respectivamente, as temperaturas na face externa da placa, na face interna da placa e do ar no interior do compartimento medidas durante 24 horas para os quatro tipos de concreto analisados.

Figura 4.7: Temperaturas na face externa das placas.



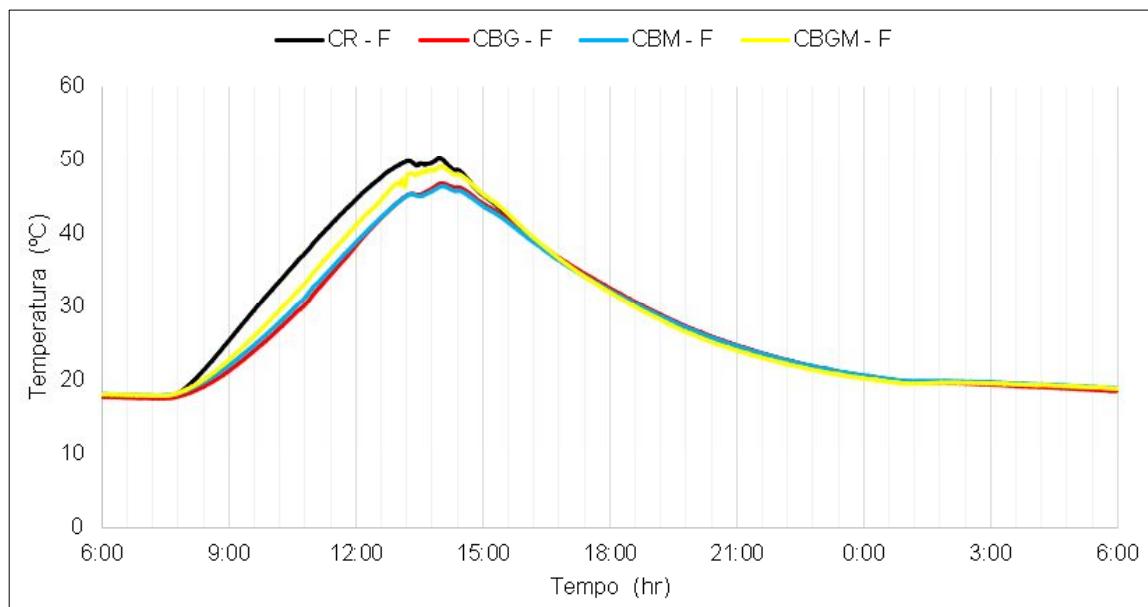
Fonte: Autor.

Figura 4.8: Temperaturas na face interna das placas.



Fonte: Autor.

Figura 4.9: Temperaturas no interior dos compartimentos.



Fonte: Autor.

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 indicam que para os quatro tipos de concretos analisados, o período de aumento da temperatura se inicia por volta das 7h 30 min e se estende até às 14h, variando tão somente a taxa da variação desta propriedade.

Para a face externa da placa, a variação de temperatura para o traço CBG, foi em média 4 °C abaixo dos demais. O mesmo ocorreu para a face interna da placa, contudo além do CBG, o CBM apresentou temperatura abaixo dos demais, sendo de 5 °C para o primeiro e de 3 °C para o segundo.

Em relação à temperatura do ar no interior do compartimento, os traços com incorporação de agregado de borracha apresentaram os menores valores, contudo os resultados mais expressivos ocorreram para o CBG e CBM, que variaram em média 6 °C a menos quando comparado ao CR.

Percebe-se que a maior diferença entre as temperaturas dos concretos analisados ocorre para o CBG quando comparado aos demais, ou seja, o CBG que possui apenas agregado de borracha com granulometria graúda, atua melhor como isolante térmico neste caso. Enquanto que o pico máximo de temperatura para o CR, CBM e CBGM ocorreu praticamente nos mesmos horários, para o CBG houve um retardo de cerca de 47min para a face externa da placa e de 45min para a face interna da placa, conforme pode ser melhor visualizado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Correlação entre a maior temperatura e seu respectivo horário.

SENSOR	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	HORÁRIO
CR – E	56,70	13:01
CR – I	53,90	13:15
CR – F	50,12	13:57
CBG – E	55,62	13:47
CBG – I	51,05	14:00
CBG – F	46,66	14:01
CBM – E	56,49	13:01
CBM – I	52,23	13:15
CBM – F	46,24	14:03
CBGM – E	56,28	13:00
CBGM – I	53,77	13:15
CBGM – F	48,96	14:00

Fonte: Autor.

Todos os traços analisados apresentaram temperaturas máximas semelhantes na face externa e interna da placa. Já no interior do compartimento, houve redução de até 4 °C para o CBM e CBG.

Acrescenta-se ainda, que dada a quantidade de resíduo de borracha gerada somente pelas empresas descritas neste trabalho e o consumo dos mesmos para produção de 1 m<sup>3</sup> dos traços estudados, seria possível produzir cerca de 427 m<sup>3</sup> do CBG, 83 m<sup>3</sup> do CBM e 166 m<sup>3</sup> do CBGM por mês.

De acordo com os fabricantes, o resíduo graúdo é comercializado por R\$ 150,00/t, enquanto que o preço do resíduo miúdo é de R\$ 70,00/t. Para os valores de massa unitária apresentados na Tabela 3.6, 1 t dos respectivos materiais equivale a 2,95 m<sup>3</sup> e 2,77 m<sup>3</sup>, respectivamente. Portanto, o custo por m<sup>3</sup> de cada resíduo é de R\$ 50,00 e R\$ 25,00, representando uma economia de aproximadamente 35% e 65% em relação a areia comercializada na cidade de Uberlândia-MG, nos valores da referida data de publicação do presente trabalho, em que a mesma custa R\$ 75,00 por m<sup>3</sup>. Além, é claro, de evitar o uso da areia, um recurso natural não renovável cada vez mais escasso, especialmente nos grandes centros urbanos.

## 5. CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos permite as seguintes considerações:

- A incorporação de agregado de borracha, independentemente da granulometria do mesmo, ocasionou a redução da massa específica no estado fresco e da trabalhabilidade dos concretos, contudo foi possível com o uso de aditivo superplastificante, obter misturas homogêneas, sem segregação, exsudação e trabalháveis, com abatimentos maiores ou iguais a 200 mm, recomendados para aplicação em paredes de concreto;
- Houve queda nas propriedades mecânicas nos traços com adição de borracha, sendo a mais expressiva para o CBM, ou seja, o concreto com resíduo de borracha miúda, que chegou a 25,17 MPa de resistência à compressão e 2,97 MPa à tração, 35% e 25% respectivamente, abaixo quando comparado ao CR. Apesar da redução dessas propriedades, todos os concretos apresentaram resistência à compressão superiores aos mínimos valores exigidos pela ABNT NBR 6118 (2014) para fins estruturais;
- Os concretos com adição de borracha apresentaram um pequeno aumento de absorção por imersão e índice de vazios, com consequente redução da massa específica no estado endurecido;
- Houve também redução da absorção por capilaridade para os traços com resíduo de borracha, sendo mais expressiva para o CBM, ou seja, com agregado de borracha de granulometria miúda. Sua ascensão capilar foi cerca de 50%, 44% e 35% inferior quando comparada ao CR, CBG e CBGM respectivamente, se mostrando potencialmente mais durável que os demais concretos;
- Em relação ao desempenho térmico, apesar dos traços apresentarem temperaturas máximas semelhantes, foi necessário cerca de 45 min a mais para que o CBG atingisse seu pico máximo de temperatura, sendo esta 4 °C inferior ao CR quando analisada no interior do compartimento;
- Economicamente, é viável a incorporação do resíduo de borracha de pneus em substituição do agregado miúdo natural em concretos.

De modo geral, o CBG apresentou os melhores resultados para fins de aplicação em paredes de concreto. Contudo, seria ainda possível analisar outras misturas com maiores teores de resíduo de borracha de pneu com a mesma granulometria que aquele, limitando os valores de resistência à compressão até 20 MPa, a fim de se obter um concreto mais leve e com melhor isolamento térmico.

É importante salientar que os resultados demonstrados aqui, apresentam apenas uma tendência das propriedades físicas e mecânicas do concreto com adição de resíduo de borracha de pneu. Para um estudo mais detalhado, faz-se necessário um maior número de repetições além da realização de outros ensaios a fim de complementar os resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Paredes de concreto: coletânea de ativos.** São Paulo, 2007/2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2008.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.** Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12645: Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local.** Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12646: Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local.** Rio de Janeiro, 1992.

- \_\_\_\_\_ . **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades.** Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_ . **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_ . **NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE.** Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_ . **NBR 16055: Parede de concreto moldada no local para construção de edificações – Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_ . **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_ . **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_\_ . **NBR NM 52: Agregado graúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_ . **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_ . **NBR NM 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_ . **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco-de-cone.** Rio de Janeiro, 1998.
- \_\_\_\_\_ . **NBR NM 76: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, 1998.
- \_\_\_\_\_ . **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO INDUSTRIAL DO POLIESTIRENO EXPANDIDO. **Caracterização do comportamento térmico dos edifícios.** Disponível em: <<http://www.acepe.pt/index.php/construcao/regulamento-termico/caracterizacao-do-comportamento-termico-dos-edificios>>. Acesso em: 03 mai. 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIP. **Produção**, 2016. Disponível em: <[http://www.anip.com.br/?cont=conteudo&area=32&título\\_página=Produ%E7%E3o](http://www.anip.com.br/?cont=conteudo&area=32&título_página=Produ%E7%E3o)>. Acesso em: 20 fev. 2018.

BAUER, R. J. F.; TOKUDOME, S.; GADRET, A. D. **Estudo de concreto com pneu moído**. Anais de Congresso, 43º Congresso Brasileiro do Concreto. Foz do Iguaçu, 2001.

BENIGNO, F. S. **Sistema Bairro Novo de paredes de concreto armado moldadas no local**, Téchne, São Paulo, dez. 2011. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/183/artigo287956-1.aspx>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

BOAVENTURA, M. C. **Avaliação da resistência à compressão de concretos produzidos com resíduos de pneus**. Feira de Santana, 2011.

CALLISTER, W. **Materials Science and Engineering**. 7 ed. York: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

CAMPOS, W. C.; JACINTO, A. E. **Concreto com adição de fibras de borracha: Um estudo frente às resistências mecânicas**. Campinas, São Paulo, 2010.

CARVALHO, C. H. R. **Estudo de concreto com poliestireno expandido reciclado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Civil. Uberlândia, 2017.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. 2 ed. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CHAPE, W. T. **Fôrmas de madeira – Norma geral**. Revista Téchne, n. 147, p. 30, jun. 2007.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA n. 416**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>>. Acesso em: 07 abr. 2018.

CURVELLO, P. C. N. **Avaliação do sistema construtivo paredes de concreto moldado no local a luz das normas técnicas vigentes**. 106 p. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Materiais e Construção, Belo Horizonte, 2016.

- ELDIN, N. N. SENOUCI, A. B. **Engineering properties of rubberized**. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 19, 1992.
- FAZZAN, J. V. **Comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduos de borracha de pneu**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2011.
- FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L. **Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos do processo de recauchutagem de pneus**. Acta Scientiarum – Technology. Maringá, 2010.
- FRANÇA, V. H.; BARBOSA, M. P.; AKASAKI, J. L. **Concreto com utilização de borracha residual de pneus: avaliação da aderência aço-concreto através de ensaios de tração direta**. São Paulo, 2004.
- GIACOBBE, S. **Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento Portland com adição de borracha de pneus**. 106p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- GRAF, H. F. **Transmitância térmica & Energia Incorporada na Arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a Norma NBR 12721**. 167 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- GRANZOTTO, L.; SOUZA, R. A. D. **Mechanical properties of structural concrete with partial replacement of fine aggregate by tire rubber**. Acta Scientiarum – Technology, Maringá, v. 35, p. 39-44, 2013.
- HSE – Thermal Confort. Disponível em: <http://www.hse.gov.uk/temperature/thermal/> Acesso em: 03 mai. 2018.
- JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 113 p. – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.
- KHATIB, Z. K; BAYOMY, F. M. **Rubberised Portland cement concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11, 1999.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. ELETROBRAS/PROCEL. Rio de Janeiro, 2014.

MACEDO, D. C. B.; TUBINO, R. M. C. **Comportamento térmico e acústico de placas pré-moldadas com borracha de pneu**. 1º Encontro Nacional de Pesquisa em Concreto Pré-Moldado. São Carlos, 2005.

MARTINS, I. R. F; AKASAI, J. L. **Avaliação da adição de fibras de borracha de pneus no comportamento do CAD**. Anais de Congresso, 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Recife, 2005.

MISSURELI, H.; MASSUDA, C. **Paredes de concreto**, Téchne, São Paulo, jun. 2009. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/147/paredes-de-concreto-285766-1.aspx>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

MOROSINI, F. **A guerra dos pneus**. Seminário de inauguração da casoteca latino-americana de direito e política pública. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 2006. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/257836347\\_A\\_Guerra\\_dos\\_Pneus](https://www.researchgate.net/publication/257836347_A_Guerra_dos_Pneus)>. Acesso em: 20 fev. 2018.

NEVILLE, A. M; BROCK, J. J; **Tecnologia do Concreto**. p. 467. Ad. Bookman, 2<sup>a</sup> Edição. São Paulo, 2013.

QUARESMA, L. P. **Relatório técnico 30 – Perfil de brita para construção civil**. p. 6-7, Ministério de Minas e Energia (MME) – Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, ago. 2009.

RECICLANIP. **Logística complexa**. Disponível em: <<http://www.reciclanip.com.br>> Acesso em: 07 abr. 2018.

RIBEIRO, C. M. C. **Gerenciamento de pneus inservíveis: Coleta e destinação final**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Universitário SENAC. São Paulo, 2005.

RISSIGNOLO, J. A. **Concreto estrutural leve**. In: ISAIA, G.C.(Org.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Vol. 2, p. 1331-1362.

RODRIGUES, J. P. C.; SANTOS, C. C. **Resistência à compressão a altas temperaturas do betão com agregados reciclados de borracha de pneu**. p. 1-10, Congresso Ibero Latino Americano Sobre Segurança Contra Incêndio, Coimbra, 2013.

- ROMUALDO, A. C.; SANTOS, D. E.; CASTRO, L. M. **Pneus inservíveis como agregados na composição de concreto para calçadas de borracha.** 3º International Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo, mai. 2011.
- SELUNG, C. S.; MENEGOTTO, M. L.; PAVAN, R. C. **Avaliação de blocos de concreto para alvenaria com adição de resíduos de borracha de pneus.** Holos Environment. Rio Claro, 2013.
- SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco: Avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos.** p. 286. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- SANTOS, A. C. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus com aplicação em placas pré-moldadas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – Maceió, 2005.
- SEGANTINI, R. B. **Análise de blocos de concreto com resíduo de borracha de pneu e metacaulim.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Ilha Solteira, 2014.
- SHADNIA, R. **Experimental study of geopolymers mortar with incorporated PCM.** Construction and Building Materials, v. 84, p. 95-102, 2015.
- SISTEMA NACIONAL DE AVALIAÇÕES TÉCNICAS. **Diretriz para avaliação técnica de sistemas construtivos em paredes de concreto armado moldadas no local.** Nº 001. Revisão 03. Brasília, 2017.
- TOPÇU, I. B. **Analysis of rubberized concrete as a composite material.** Cemente and Concrete Research. USA, 1997.
- TRIGO, A. P. M; AKASAKI, J. L; MELGES, J. L. P. **Avaliação do comportamento estrutural de protótipos de lajes pré-moldadas com concreto com resíduo de borracha de pneu.** Ambiente Construído, Porto Alegre, 2008.
- TURATSINZE, A.; GARROS, M. **On the modulus of elasticity and strain capacity of self compacting concrete incorporating rubber aggregates.** v. 52, p. 1209-1215, Resources, Conservation and Recycling, Amsterdam, 2008.

## **FOLHA DE ASSINATURAS**

Relatório final do Trabalho de Conclusão de Curso aceito pelos abaixo assinados:

---

Iago Camargos Cunha Queiroz – Discente

---

Leila Aparecida de Castro Motta – Professora orientadora

Uberlândia – MG

2018