



**CONTRIBUIÇÃO DO COBOGÓ DE TERRA CRUA NAS CONDIÇÕES
HIGROTÉRMICAS DOS AMBIENTES INTERNOS NA EDIFICAÇÃO**

Pablo Raphael de Lacerda Ferreira

JOÃO PESSOA - PB
DEZEMBRO DE 2017

Pablo Raphael de Lacerda Ferreira

**CONTRIBUIÇÃO DO COBOGÓ DE TERRA CRUA NAS CONDIÇÕES
HIGROTÉRMICAS DOS AMBIENTES INTERNOS NA EDIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Aluísio Braz de Melo
Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo
Linha de pesquisa: Qualidade do Ambiente Construído

JOÃO PESSOA – PB
DEZEMBRO DE 2017

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

Catálogo na publicação
Serviço de Biblioteca na Documentação
Universidade Federal da Paraíba

F383c Ferreira, Pablo Raphael de Lacerda.

Contribuição do cobogó de terra crua nas condições
higrotérmicas dos ambientes internos na edificação /
Pablo Raphael de Lacerda Ferreira. - João Pessoa, 2017.
128 f. : il.

Orientação: Aluísio Braz de Melo.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Cobogó. 2. Construção com terra. 3. BTC. 4. Umidade
relativa do ar. 5. Conforto higrotérmico. I. Melo,
Aluísio Braz de. II. Título.

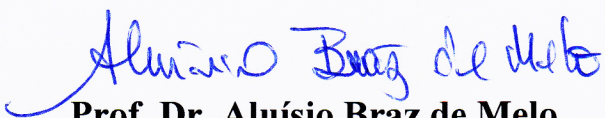
UFPB/BC

Contribuição do cobogó de terra crua nas condições higrotérmicas dos ambientes internos na edificação

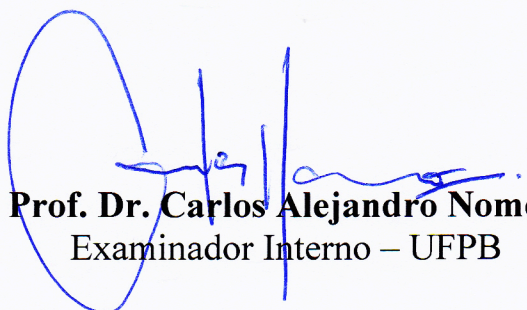
Por

Pablo Raphael de Lacerda Ferreira

Dissertação aprovada em 07 de Dezembro de 2017



Prof. Dr. Aluísio Braz de Melo
Orientador – UFPB



Prof. Dr. Carlos Alejandro Nome
Examinador Interno – UFPB



Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa
Examinador Externo – UFPB

João Pessoa-PB
2017

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível graças a associação de vários colaboradores que, com suas competências, proporcionaram um trabalho fluido e prazeroso.

À toda as Energias envolvidas no processo, conscientes ou não, pois Delas o universo é composto.

Aos meus pais e irmãos que, de qualquer lugar que estejam, sempre desejam e torcem pelo meu progresso.

Ao meu orientador Aluísio Braz de Melo que, com sua benevolência, amizade, paciência e espírito motivador, acolheu a mim e a esta pesquisa sempre com o olhar positivo e confiante elevando o potencial da proposta para algo acima do desejado.

Ao professor Carlos Alejandro Nome que com sua amizade e espírito questionador sempre apoiou a mim e este trabalho desde seu início.

Ao amigo Normando Perazzo Barbosa por estar sempre presente, incentivando e colaborando com seu conhecimento.

Aos funcionários do Labeme que se fizeram presente nesta pesquisa e não negaram auxílio, em especial aos amigos Sebastião e Delby, que estiveram envolvidos no processo desde o início, munidos de paciência e conhecimento.

Às amigas Amanda Queiroga e Clarissa Queiroz que acompanharam e participaram desta pesquisa transformando os momentos mais desafiadores em situações de mais leves exigências

Por fim à minha Bia (Beatriz Lemos) que participa ativamente da minha vida, com seu companheirismo e amor, jamais me deixando esmorecer por quaisquer que seja o obstáculo.

FERREIRA, Pablo Raphael de Lacerda. **Contribuição do cobogó de terra crua nas condições higrotérmicas dos ambientes internos na edificação.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB, 2017.

RESUMO

Com a intensificação da urbanização, a crescente demanda por materiais utilizados na construção das edificações nas cidades passou a ser atendida por processos de produção em larga escala, utilizando-se de alto consumo de energia. Além disso, as edificações, nem sempre com soluções adequadas para o conforto ambiental, passaram também a demandar mais energia para climatização dos espaços interiores. Portanto, o uso de materiais industrializados nas edificações não garante a qualidade no ambiente construído, mas certamente está relacionado a grandes impactos no meio ambiente. Nas construções com terra crua, além da possibilidade de minimização destes impactos ambientais, seja no processo de fabricação dos componentes com baixa energia incorporada, seja no descarte de seus resíduos facilmente reabsorvidos pela natureza, pode favorecer um melhor rendimento energético durante o uso da edificação. Neste contexto, esta pesquisa busca caracterizar o elemento vazado proposto com uso de terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland, quanto a sua capacidade higrotérmica, auxiliando no condicionamento do ar em ambientes internos da edificação. A ideia visa amenizar os efeitos do clima quente e seco, no qual existem notáveis amplitudes térmicas e higrométricas diariamente, como ocorre no semiárido do nordeste brasileiro. Por se tratar de um elemento vazado em terra crua a ser utilizado em fachadas das edificações e poder ser fabricado sem consumo de energia elétrica, explora-se o potencial higrométrico do material para o condicionamento do ar (umidade relativa e temperatura) nos espaços interiores. A pesquisa adotou como estratégia a utilização do elemento vazado produzido em miniatura (escala 1:4), para viabilizar a avaliação de pequenos painéis dentro de um túnel de vento, com controles higrotérmicos com variações da umidade relativa do ar, entre 30% e 80%, e temperatura do ar, entre 20 °C e 30 °C, em ciclos alternados de 12 horas. A capacidade e a velocidade de absorção e eliminação do vapor d'água do ar pelo material foram analisadas, em testes com painéis sobrepostos em até 4 camadas, com os espaços vazados dos cobogós propostos posicionados de maneira invertida por cada camada, criando-se desvios para o fluxo do ar que atravessa os painéis. Com isso, buscou-se avaliar a eficiência do sistema em camadas, na maior interação entre material / ar envolvente, e a consequente potencialidade de modificar a umidade relativa e a temperatura do ar no lado posterior ao painel. A partir dos resultados encontrados foi possível confirmar a propriedade higrométrica da terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland, presente nos elementos vazados propostos, e constatar que, ao utilizar o painel com 3 camadas de cobogós, com a geometria especialmente projetada e os elementos assentados diferentemente para cada camada, há potencial para melhorar a qualidade do ar depois que atravessa o sistema de camadas do painel.

Palavras-chave: cobogó, construção com terra, BTC, umidade relativa do ar, conforto higrotérmico

ABSTRACT

With the intensification of the urbanization, the crescent demand for materials used in the building of the cities' edifications passed to be attended by the process of production in wide scale, using a high energy consume. Besides that, the buildings, not always with proper solutions to environmental comfort, began to demand more energy for climatization of interior rooms. In buildings with raw earth, besides de possibility of decrease these environmental impacts, by the process of fabrication of components with low incorporated energy, or by the discard of theirs leavings easily reabsorbed by the nature, may act in favor of a better energetic output during the use of the building. In this context, this research looks for characterize the hollow element made with compressed raw earth stabilized with Portland cement, showing its hygrothermal capacity in to help in the conditioning of the air in internal rooms. The idea is decrease the effects of the dry and hot climate, in which there are a noteworthy daily thermal and hygrothermal amplitude, how happens in the northeast's semiarid of the Brazil. For being a hollow element made with raw earth to be used in buildings facades that may the produced without the use of electric energy, the potential hygrothermal of the material is explored for the air conditioning (relative humidity and temperature) in the interior rooms. The research adopted how strategy the use of the hollow element made in miniature (scale 1:4), to make feasibly the evaluation of the small panels inside of a wind tunnel with hygrothermal controls of relative humidity, varying from 30% to 80%, and temperature, from 20% to 30% in alternated 12 hours cycles. The capacity and speed of absorption and elimination of the air water's vapor by the material was analyzed. In tests with panels overlapped until 4 layers, with hollow spaces of the elements placed inverted in each layer, doing shunts for the air the cross the panels. Thereat, the research tried to evaluate the efficiency of the system in layers, in the larger interaction between the material and the air, and the consequent potentiality of change the relative humidity and temperature of the air on the opposed side of the panel. With the results was possible to confirm the hygrothermal property of the compressed raw earth stabilized with Portland cement, material of the hollow elements, and to verify that using the panel with three layers, intercalating the empties, there is potential to improve the air quality after crossing the layer system.

Key-words: cobogó, building with earth ,compressed stabilized earth brick, relative humidity, hygrothermal comfort

Lista de Figuras

Figura 1– Quantidade de energia incorporada na construção e na operação da edificação	16
Figura 2– Notícia da internet 1	17
Figura 3 – Notícia da internet 2	17
Figura 4 – Elemento vazado de terra comprimida executado em fôrma de madeira	20
Figura 5 – Corte de uma traqueia com a mucosa do epitélio normal (esq.) e uma ressecada (dir.)	22
Figura 6 – Zoneamento bioclimático brasileiro	23
Figura 7 – Espaço urbano e edificação típica do clima quente e seco	24
Figura 8 – Sombra ventilada: clima quente e úmido	24
Figura 9 – Exemplo de isolamento térmico por resistência, clima frio e úmido	24
Figura 10 – Exemplo de grupo de edificações em clima frio e seco	24
Figura 11 – Cobogós	26
Figura 12 – Muxarabiê/muxarabi	26
Figura 13- Produção de tijolos cerâmicos com queima	27
Figura 14 – Cidade de Shibam no Yemen. Edificações de terra de vários pavimentos	28
Figura 15 - Variação tonal do solo	29
Figura 16 – Distribuição granulométrica em diagrama trilinear	30
Figura 17 – Curvas de absorção em relação ao tempo, com amostras de materiais diferentes de 1,5cm de espessura, numa temperatura de 21 °C e aumento súbito de umidade de 50 a 80%	32
Figura 18- – Influência da espessura das camadas de barro em relação à absorção da umidade, a uma temperatura de 21 °C, a seguir ao aumento súbito da umidade do ambiente de 50% a 80%	33
Figura 19 – Interação da argila com a água e agregados	35
Figura 20 – Amostras de barro antes (esq) e depois (dir) de serem expostas às intempéries durante três anos	35
Figura 21 – Prensa CINVA-RAM de Raoul Ramires	37
Figura 22 – Prensa desenvolvida pela Associação Brasileira de Cimento Portland	38
Figura 23 – Prensa industrializada hidráulica de BTC	38
Figura 24 – Bloco de concreto: escala real e reduzida em 1:4	42
Figura 25 – Bloco, meio bloco e bloco canaleta em escala reduzida (1:3)	42
Figura 26 - Controlador de temperatura e umidade K103 Pid-u	44
Figura 27- Câmara climática 1 (C-CLIMÁTICA)	46
Figura 28 - Esquema do interior de C-CLIMÁTICA	46
Figura 29- Preenchimento do molde prismático	48
Figura 30- Compressão do material	48
Figura 31- Extração do corpo de prova	48
Figura 32- Amostra de terra comprimida	49
Figura 33- Amostra de terra comprimida estabilizada com cimento Portland	49
Figura 34- Amostra de terra comprimida estabilizada com cimento Portland pintada com tinta látex acrílica	49
Figura 35- Amostra de cerâmica vermelha, cozida a 900 °C	49
Figura 36- Amostra de argamassa de cimento Portland	49
Figura 37– Bandeja com tela de nylon com exemplificação da colocação das amostras	Erro! Indicador não definido.
Figura 38- Elemento vazado proposto e composição do painel (na direita)	53
Figura 39 – Ensaios de granulometria e sedimentação	54
Figura 40- Curva granulométrica da terra analisada	54
Figura 41- Elemento vazado reduzido – BTCobogó-miniatura	56
Figura 42– Partes do molde e sua relação com o elemento vazado	57
Figura 43– Molde metálico antes da soldagem da camisa de contenção	57
Figura 44– Preenchimento do molde	59

Figura 45– Fechamento do molde	59
Figura 46– Ajuste da face superior no interior do molde	59
Figura 47– Compressão do conteúdo pressionando a face superior	60
Figura 48– Molde virado com a face superior para baixo e extração do negativo do vazado	60
Figura 49– Extração da camisa de contenção.	60
Figura 50- Resultado da moldagem	61
Figura 51 - Ensaio de resistência à compressão	62
Figura 52 - Projeto do túnel de vento desenvolvido para estudos de tecnologia de aplicação de agrotóxicos por pulverização	64
Figura 53 – Vista lateral do túnel de vento com destaque para a seção adicional	65
Figura 54 – Modelo de umidificador de ar ultrassônico utilizado	65
Figura 55 - Painel de compensado cortado e posteriormente impermeabilizado com aplicação de <i>Stain</i> (imagem esquerda) e seções preparadas antes da montagem do túnel de vento (imagem direita).	66
Figura 56 - Sessões do túnel de vento finalizadas, instalado no interior de uma sala	67
Figura 57 - Dimensões externas do túnel de vento montado	67
Figura 58 – Painel com BTCobogós-miniaturas instalado na sessão do túnel	68
Figura 59 - Temporizador digital de tomada	70
Figura 60 - Painel de controle do túnel de vento	71
Figura 61 – Vista em 3D do túnel de vento, com as paredes laterais removidas para melhor visualização das partes internas	72
Figura 62 – Vista esquemática em corte do túnel de vento com a localização de todas as partes internas	73
Figura 63 - Planta baixa da sala onde ocorreu o experimento com túnel de vento	78
Figura 64 - Adição de camadas de painéis	81
Figura 65 - Elementos dos painéis invertidos em relação ao plano anterior	81
Figura 66 - Exemplo de gráfico com os dados da umidade relativa do ar registrados nos ensaios em túnel de vento com destaque para o recorte a ser analisado	82
Figura 67 - Trechos de valores de pico e valores de vale	83
Figura 68 – Ampliação do trecho de vale um gráfico com destaque para as pequenas oscilações nos registros	83
Figura 69 - Pré-moldado em escala reduzida	90

Lista de Tabelas

Tabela 1– Ciclo de vida e emissão de poluentes das edificações.....	16
Tabela 2 - Classificação das partículas do solo segundo normas de alguns países ...	30
Tabela 3 – Consumo de energia para a produção dos materiais	32
Tabela 4 – Resistência ao vapor de água em blocos de terra crua com e sem adição de cimento	40
Tabela 5- Composição granulométrica do solo	54
Tabela 6- Composição do material	58
Tabela 7 - Média horária da velocidade do ar em Sumé/PB para uma média diária ...	76

Lista de Quadros

Quadro 1 - Identificação da terra por inspeção tátil-visual	31
Quadro 2 - Algumas estabilizações aplicadas do barro e seus efeitos	36
Quadro 3 - Amostras e composições	48

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Percentual de absorção de vapor de água do ar em 12 horas ininterruptas (C-CLIMÁTICA a 80 % UR)	85
Gráfico 2 - Absorção de vapor de água do ar por hora por diferentes materiais (C-CIMÁTICA a 80% UR)	86
Gráfico 3 - Percentual de eliminação de vapor de água do ar em 12 horas ininterruptas (C-CLIMÁTICA a 30 %UR)	87
Gráfico 4 - Percentual de eliminação de vapor de água do ar em 12 horas ininterruptas (C-CLIMÁTICA a 30 %UR)	87
Gráfico 5 - Comparação entre resistência à compressão obtida por CTC (BTCobogó de terra crua) x CTCE (BTCobogó de terra crua estabilizada com cimento Portland)	89
Gráfico 6 – Variação da umidade relativa do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 1 camada de cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha.	92
Gráfico 7 - Variação da temperatura do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 1 camada de cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha	93
Gráfico 8 - Umidade relativa do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 1 camada de cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha	94
Gráfico 9 - Temperatura do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 1 camada de cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha	94
Gráfico 10 - Variação da umidade relativa do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 1 camada de BTCobogós-miniaturas	95
Gráfico 11 - Variação da temperatura do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 1 camada de BTCobogós-miniaturas	95
Gráfico 12 - Umidade relativa do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 1 camada com BTCobogós-miniaturas	96
Gráfico 13 - Temperatura do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 1 camada com BTCobogós-miniaturas	97
Gráfico 14 - Variação da umidade relativa do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 2 camadas de BTCobogós-miniaturas	98
Gráfico 15 - Variação da temperatura do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 2 camadas de BTCobogós-miniaturas	98
Gráfico 16 - Umidade relativa do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 2 camadas com BTCobogós-miniaturas	99
Gráfico 17 - Temperatura do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 2 camadas com BTCobogós-miniaturas	99
Gráfico 18 - Variação da umidade relativa do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 3 camadas de BTCobogós-miniaturas	100
Gráfico 19 - Variação da temperatura do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 3 camadas de BTCobogós-miniaturas	100
Gráfico 20 - Umidade relativa do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 3 camadas com BTCobogós-miniaturas	101
Gráfico 21 -Temperatura do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 3 camadas com BTCobogós-miniaturas	102
Gráfico 22 - Variação da umidade relativa do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 4 camadas de BTCobogós-miniaturas	102
Gráfico 23 - Variação da temperatura do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 4 camadas de BTCobogós-miniaturas	103
Gráfico 24 - Umidade relativa do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 4 camadas com BTCobogós-miniaturas	104
Gráfico 25 - Temperatura do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 4 camadas com BTCobogós-miniaturas	104
Gráfico 26 - Diferença entre amplitudes da temperatura do ar calculadas para registros antes e depois dos painéis	106

Gráfico 27 - Diferença entre amplitudes da umidade relativa do ar calculadas para registros antes e depois dos painéis	107
Gráfico 28 - Tempo de elevação da temperatura do ar - médias mínimas para médias máximas - após as amostras	108
Gráfico 29 - Tempo de redução da temperatura do ar - médias mínimas para médias máximas - após as amostras	108
Gráfico 30 - Tempo de elevação da umidade relativa do ar - médias mínimas para médias máximas - após as amostras	109
Gráfico 31 - Tempo de redução da umidade relativa do ar - médias mínimas para médias máximas - após as amostras	110
Gráfico 32 - Variação higrotérmica no período de 36 horas na cidade de Cajazeiras-PB	111

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	19
2.1 <i>Objetivo Geral</i>	19
2.2 <i>Objetivos específicos</i>	19
3 REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1 <i>Clima e conforto</i>	21
3.2 <i>Elemento vazado (Cobogó)</i>	25
3.3 <i>A terra como material construtivo</i>	27
3.3.1 <i>Estabilização da terra</i>	35
3.3.2 <i>Interação da terra crua com a umidade do ar: em busca da viabilidade</i>	41
4- Metodologia	43
4.1 <i>Teste do princípio da variação da absorção da umidade do ar por diferentes materiais</i>	43
4.1.1 <i>Simulação de uma câmara climática</i>	44
4.1.2 <i>Preparação das amostras prismáticas</i>	47
4.1.3 <i>Procedimento de ensaio em câmara climática</i>	50
4.2 <i>Projeto, produção e caracterização da resistência à compressão do BTCobogó-miniatura</i>	53
4.2.1 <i>Miniaturização e produção do molde</i>	55
4.2.2 <i>Manufatura do elemento vazado em miniatura</i>	57
4.3 <i>Confecção do túnel de vento para avaliação de painéis com elementos vazados</i>	63
4.4 <i>Capacidade de painéis com camadas de BTCobogós-miniaturas na modificação da umidade e temperatura do ar</i>	74
4.4.1- <i>Procedimento de ensaio em túnel de vento</i>	74
5 Resultados e discussões	85
5.1 <i>Variação da absorção de umidade do ar por diferentes materiais com amostras prismáticas</i>	85
5.2 <i>Caracterização da resistência à compressão dos BTCobogós-miniatura</i>	89
5.3 <i>Modificação da umidade e temperatura do ar pelos painéis com BTCobogós-miniaturas</i>	91
6 Conclusão	113
7 Referências	116

1 INTRODUÇÃO

Com a intensificação da produção industrial para a construção civil, vários materiais sintetizados e/ou processados são disponibilizados em alta escala para a produção do ambiente construído nas cidades. Esses materiais possuem agravantes tanto em sua produção, quanto em seu descarte, uma vez que demandam o consumo crescente de recursos naturais e desperdícios na sua aplicação, além da produção de gases tóxicos que intensificam o efeito estufa. Esse fenômeno, por si só, já configura um grande impacto dessa atividade no meio ambiente. Além disso, o uso de materiais industrializados nas edificações nem sempre garante a qualidade no ambiente construído.

Por outro lado, embora a terra crua como material construtivo não seja novidade para o homem, a técnica para o seu uso tem sido aprimorada nas últimas décadas, através de estudos (Barbosa e Mattone 1997, Barbosa e Ghavami 2003, Faria 2005, Minke 2015, etc.) que destacam a possibilidade de minimização do impacto causado na natureza, seja durante o processo de fabricação e aplicação na construção civil, seja no descarte de seus resíduos, que facilmente são absorvidos pelo meio ambiente.

Dentre estes estudos, destaca-se o bloco de terra crua comprimida e estabilizada com cimento Portland, proposto por Barbosa e Mattone (1997) (BARBOSA e GHAVAMI 2003), que pelo seu desempenho para executar alvenarias tem potencial para melhorar a qualidade do ambiente construído, por conseguinte a possibilidade de intensificação de seu uso em vários tipos de edificações.

O fato de se utilizar materiais e técnicas de baixa energia incorporada não obriga uma edificação a apresentar resultados positivos do ponto de vista de melhor rendimento energético, pois de acordo com um levantamento realizado na Europa (SARTORI & HESTNES, 2007), num período que compreende 50 anos, a energia operacional (de uso) de uma edificação é bem maior do que a energia incorporada em sua construção (Figura 1). Isto implica afirmar que o consumo proporcional de energia em um ambiente construído depende principalmente do rendimento e das propriedades dos elementos nele aplicados, além das estratégias de projeto utilizadas para mitigar as variáveis que fazem oscilar as condições de conforto ambiental, sendo comparativamente o consumo

de energia aplicado na fabricação dos materiais e na própria construção da edificação um aspecto secundário. Lourenço (2005) traz uma perspectiva semelhante na Tabela 1.

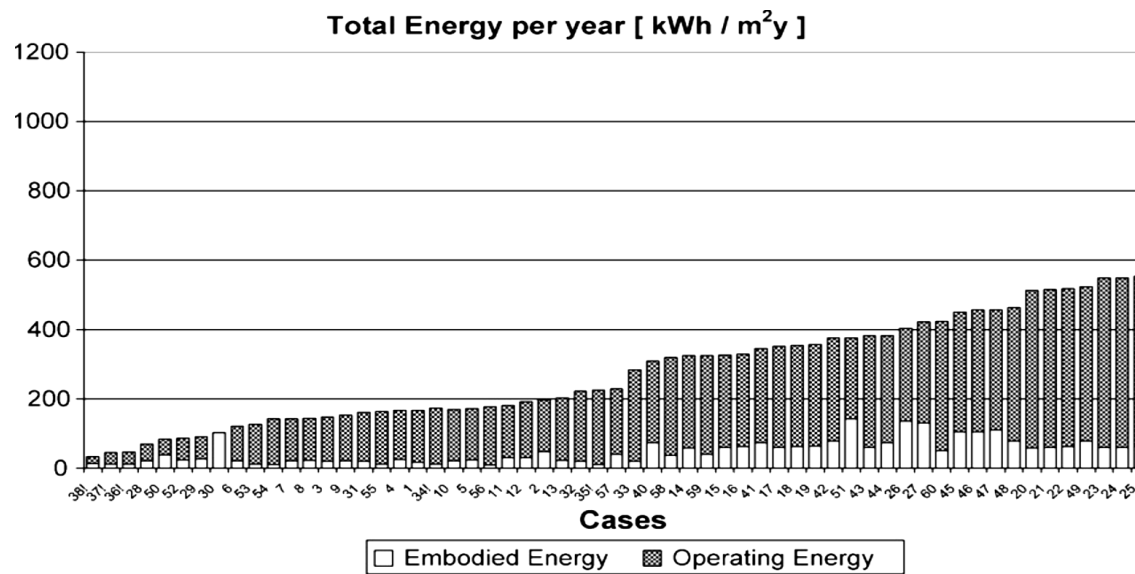


Figura 1– Quantidade de energia incorporada na construção e na operação da edificação
 Fonte: Sartori & Hestnes (2007)

Emissões/ Fases de uma edificação	Concepção	Construção	Utilização
Ciclo de vida	2% - 4%	20% - 30%	70% - 80%
Emissão de SO ₂ (dióxido de enxofre)	-	54%	56%
Emissão de CO ₂ (dióxido de carbono)	-	40%	60%

Tabela 1– Ciclo de vida e emissão de poluentes das edificações
 Fonte: Lourenço (IN JORGE 2005, p.199), adaptado pelo autor

Nessa discussão é importante levar em conta que climas locais possuem características próprias à sua posição geográfica (latitude, longitude, entorno, etc.), que demandam soluções específicas para cada realidade. Levando em consideração as dimensões continentais do Brasil é natural que se adotem soluções diferenciadas para os elementos verticais nas edificações (alvenarias), com base em diretrizes construtivas adequadas ao clima nas diversas regiões, como são propostas na norma brasileira que trata do zoneamento bioclimático (ABNT NBR 15.220, 2003).

Por exemplo, no sentido de proporcionar adequação às diretrizes construtivas indicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

para a maior parte do território, representado por três zonas bioclimáticas brasileiras - Z6, Z7 e Z8 da NBR 15.220-3 (ABNT, 2003) - que somam 78,9% do mapa do país, algumas soluções já são bastante difundidas, tais como o uso de elementos vazados (COBOGÓ), que permitem a circulação do ar (favorece a desejável ventilação) com aumento de iluminação natural e diminuição do aquecimento de ambientes internos nas edificações. Nesse caso, os painéis de elementos vazados são importantes para favorecer a qualidade desejada para o ambiente construído.

Além da necessidade natural de alguma ventilação nos ambientes, outro fator do qual depende o bem estar e saúde dos habitantes de um espaço é a quantidade de vapor d'água presente em sua atmosfera. Segundo o reconhecido médico oncologista e imunologista Dráuzio Varella¹, a umidade relativa do ar é uma variável meteorológica que afeta o organismo de qualquer ser vivo e, que segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), o organismo humano tem necessidade de que esta taxa de umidade esteja entre 40% e 70%.

Contudo, é de conhecimento comum que algumas regiões do Brasil apresentam grandes amplitudes térmicas e higrométricas. No sertão do nordeste brasileiro, por exemplo, é recorrente que a temperatura entre o dia e a noite varie bastante e que as taxas de umidade relativa do ar se configurem abaixo dos valores recomendados pela OMS nos períodos do dia, como podem ser vistos nas notícias veiculadas nos portais de notícias na internet.



Figura 2– Notícia da internet 1
Fonte: Portal G1 do Ceará²



Figura 3 – Notícia da internet 2
Fonte: Portal Correio³

¹ Disponível em: <http://drauziovarella.com.br/doencas-e-sintomas/umidade-do-ar-reflexos-na-saude/> Acesso em 19 de maio de 2016.

² Disponível em: <http://g1.globo.com/ceara/noticia/2015/11/64-cidades-do-ceara-estao-em-alerta-por-baixa-umidade-do-ar-diz-inmet.html> Acesso em 19 de maio de 2016

³ Disponível em: <http://portalcorreio.uol.com.br/noticias/cidades/tempo/2012/11/23/NWS,217012,4,64,NOTICIAS,2190-UMIDADE-RELATIVA-BAIXA-PATOS-ATINGE-NIVEIS-DESERTO-SAARA-AFRICA.aspx> Acesso em 19 de maio de 2016

Partindo da observação destas questões, esta pesquisa prossegue os estudos iniciados por Ferreira (2015) no Trabalho Final de Graduação do curso de Arquitetura e Urbanismo, que se baseou na proposição de um elemento vazado produzido com terra crua, que possui baixa energia incorporada e facilidade de absorção de seus rejeitos pela natureza, portanto de baixo impacto ambiental. Nesse caso, o desafio do estudo é desenvolver o processo de fabricação do elemento proposto, de modo que compatibilize a técnica da compactação de terra crua e estabilização com cimento Portland, com o seu projeto (que contempla uma geometria vazada semelhante ao cobogó) e averiguar a capacidade desse elemento de modificar a temperatura e umidade do ar que por ele permeia. A proposta é que este novo componente da família de blocos de terra crua contribua no condicionamento térmico, sem prejuízo do condicionamento lumínico de edificações localizadas em áreas de clima quente e úmido e, amenize a temperatura do ar interno (por meio de um sistema composto pelos próprios elementos emparelhados) em edificações localizadas em áreas de clima quente e seco, atendendo adequadamente às diretrizes construtivas das referidas zonas bioclimáticas do Brasil.

Justifica-se ainda esta pesquisa na expectativa da possibilidade de explorar uma ideia inovadora de desenvolvimento de um elemento vazado com uso de terra crua, que, além de oferecer uma solução para uma das inúmeras demandas de minimização de impacto ambiental na atualidade (tanto na sua produção, quanto no condicionamento passivo de edificações), tange o viés social inerente à tecnologia dos materiais não convencionais. De fato, espera-se que a produção do elemento proposto deva ser de baixo custo, considerando que a matéria prima utilizada é abundante, o seu processo de produção tende a ser de fácil operação, não exigindo mão de obra especializada. Além disso, espera-se que o elemento proposto tenha potencialmente características favoráveis ao condicionamento térmico de ambientes internos e, quando bem aplicado na edificação, possa ter durabilidade adequada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar o elemento vazado de terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland quanto a sua capacidade higrotérmica, de modo a potencializar os efeitos adequados nos ambientes internos e ampliar as possibilidades de aplicações dessa tecnologia na arquitetura, também em condições de clima quente e seco.

2.2 Objetivos específicos

- Comprovar a viabilidade técnica de produção do elemento vazado de terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland, a partir de testes de moldabilidade em escala reduzida com uso de molde metálico;
- Avaliar a capacidade da terra crua comprimida e suas derivações quanto à absorção/liberação da umidade do ar do/para um ambiente controlado;
- Caracterizar o potencial do elemento vazado proposto quanto a sua capacidade de influenciar no equilíbrio higrotérmico dos ambientes internos na edificação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este trabalho se inicia a partir de experiência anterior onde se verificou a possibilidade de se pré-fabricar um elemento de terra comprimida de geometria vazada (semelhante ao cobogó) de modo que esta seja estável e permita a elaboração de painéis verticais que possam ser utilizados na composição de vedações ventiladas na construção civil.

No referido trabalho (FERREIRA, 2015), foi possível compactar e extrair de um molde produzido em madeira (Figura 4), com alguma dificuldade, alguns elementos⁴ que, após cura, mostrou potencial de resistência até superior a alguns elementos construtivos, ou seja, com o cobogó produzido obteve-se aproximadamente 2 MPa.



Figura 4 – Elemento vazado de terra comprimida executado em fôrma de madeira
Fonte: Ferreira (2015)

A materialização deste elemento busca associar as características únicas da terra (BARBOSA e GHAVAMI, 2007; MINKE, 2015; etc.) como material construtivo ao elemento vazado (cobogó) com geometria específica para utilização em camadas sobrepostas na expectativa de condicionamento do ar que interage com suas superfícies. Esta proposta visa fazer frente aos rigores climáticos que afetam o bem estar da permanência das pessoas em ambientes construídos.

⁴ Em quantidade ínfima não sendo possível caracterização do desempenho mecânico (por se tratar de pequena amostragem que não representa a realidade).

3.1 Clima e conforto

Frota & Schiffer (2001) afirmam que as principais variáveis climáticas relacionadas ao conforto térmico são: radiação solar incidente, temperatura, umidade e velocidade do ar. Segundo as autoras, dessas variáveis advém uma série de outras características como o regime de chuvas, permeabilidade do solo, vegetação, etc.

As condições climáticas de um ambiente são de fundamental importância para a instalação e permanência dos seres vivos nos diversos sítios do planeta. As exigências de operação do organismo humano, assim como em outros animais, têm relação direta com o espaço ao qual ele se encontra, e no caso deste, há uma demanda de temperatura interna constante na ordem de 37 °C. Para que isso suceda, o corpo age no intento de autorregular-se liberando calor, o que se denomina homeotermia.

Quando essas trocas de calor acontecem sem maior esforço entre o organismo humano e o ambiente, têm-se uma condição de conforto térmico e a capacidade de trabalho deste indivíduo é tida como máxima, caso contrário, o indivíduo sentindo frio ou calor, fica evidenciado que o corpo está perdendo mais ou menos calor do que o necessário e, para que se mantenha a sua estabilidade térmica, é necessário que haja uma sobrecarga nas atividades de regulação do calor corporal, o que implica o desconforto (FROTA & SCHIFFER, 2001 p.15).

Para além do exposto, outra variável do clima que influencia na saúde e bem estar do ser humano em determinado ambiente é a umidade relativa do ar. Segundo investigações de Grandjean (1972 apud Minke, 2015) e Becker (1986 apud Minke, 2015), o teor de umidade relativa do ar abaixo de 40%, por um longo período de tempo, pode ressecar a mucosa (Figura 5) do ser humano, levando a diminuição da resistência a resfriados e outras enfermidades. Ainda segundo esses estudos, uma umidade relativa do ar entre 50% e 70% possui influências positivas, tais como: redução da poeira fina suspensa no ar; ativação dos mecanismos de defesa da pele contra micróbios; diminuição da vida de grande variedade de bactérias e vírus e; redução de odores corporais e ambientais e diminuição da eletricidade estática na superfície de objetos. Acima de 70%, a umidade relativa do ar na maioria dos casos, torna o ambiente desagradável devido as seguintes características observadas: diminuição da absorção do

oxigênio pelo sangue em condições quentes e úmidas; aumento de dores reumáticas em ambientes frios e úmidos e; desenvolvimento de fungos em espaços fechados onde os esporos soltos no ar podem resultar diferentes doenças e alergias.

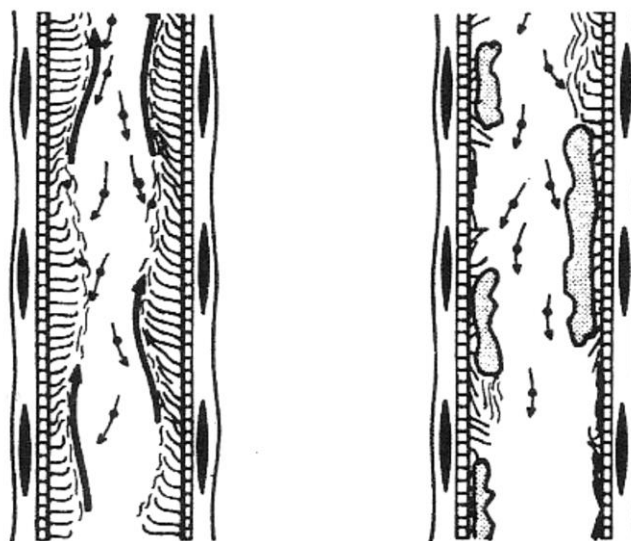


Figura 5 – Corte de uma traqueia com a mucosa do epitélio normal (esq.) e uma ressecada (dir.)

Fonte: Minke (2015, p.19)

Além da implicação da umidade relativa do ar diretamente na saúde do indivíduo, a presença de vapor d'água no ar condiciona a temperatura de um determinado local. É sabido que quanto maior a presença de vapor d'água no ar menor será a amplitude térmica registrada e, quanto menor sua presença, maior será essa amplitude. Além disso, as trocas térmicas oriundas da mudança de estado físico da água atuam absorvendo ou liberando energia por meio da evaporação e condensação respectivamente (FROTA & SCHIFFER, 2001).

Com base em características climáticas, como as citadas anteriormente dentre outras, a ABNT consolidou, em 2003, a NBR 15.200-3 sob o título Desempenho térmico de edificações - parte 3: Zoneamento Bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Esta norma não possui caráter impositivo, mas faz recomendações projetuais visando a adaptação dos projetos de habitação à realidade climática na qual serão inseridos.

Para tanto, o Brasil foi dividido em oito regiões bioclimáticas homogêneas (Figura 6) em seus climas, onde são recomendadas diretrizes construtivas de

acordo com as características climáticas às quais hão de se submeter as habitações.

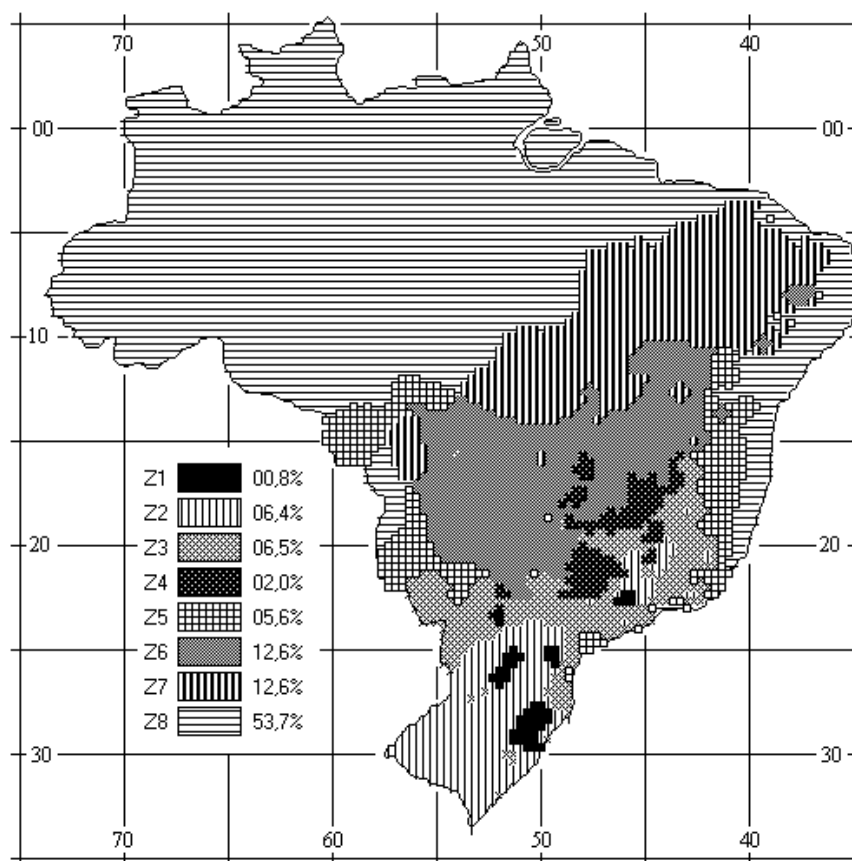


Figura 6 – Zoneamento bioclimático brasileiro

Fonte: NBR 15220-3. ABNT (2003)

Nesse contexto, de submeter-se ao clima local, Cunha (2006, p. 36) afirma: “que não existe ‘arquitetura bioclimática’ mas a arquitetura, simplesmente”. O local a ser ocupado, com o seu bioclima, oferecem dados condicionantes ou determinantes que devem ser observados no projeto arquitetônico e urbano, os quais demandarão soluções próprias na materialização do espaço. Sob o ponto de vista do bioclimatismo na arquitetura, o enfoque se dá de maneira mais relevante no tocante à economia de energia.

O fator mais importante que a arquitetura de baixo impacto leva em conta é o entorno como condicionante. Além dos fatores climáticos e microclimáticos, o entorno pode atuar também no fornecimento de matéria prima para construção além da disponibilização de sua paisagem e, em espaços urbanos, construções prévias. (CUNHA, 2006).

Nas figuras abaixo (Figura 7 a 10) tem-se a ilustração esquemática de algumas ocupações em variados climas onde a configuração técnica-espacial é dada conforme a necessidade de proteção contra as imposições da natureza e o material disponível no entorno.

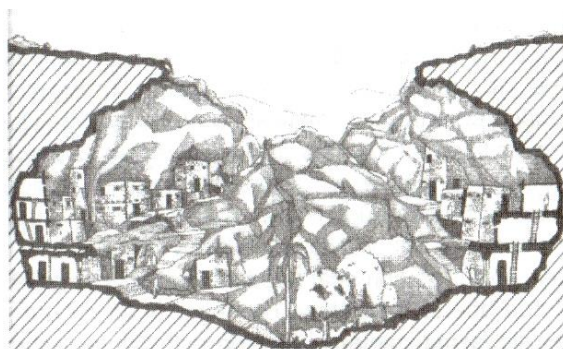


Figura 7 – Espaço urbano e edificação típica do clima quente e seco

Fonte: Cunha (2006, p. 24)



Figura 8 – Sombra ventilada: clima quente e úmido

Fonte: Cunha (2006, p. 25)

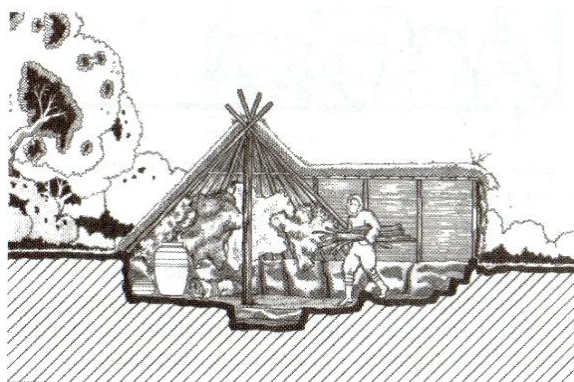


Figura 9 – Exemplo de isolamento térmico por resistência, clima frio e úmido

Fonte: Cunha (2006, p. 26)

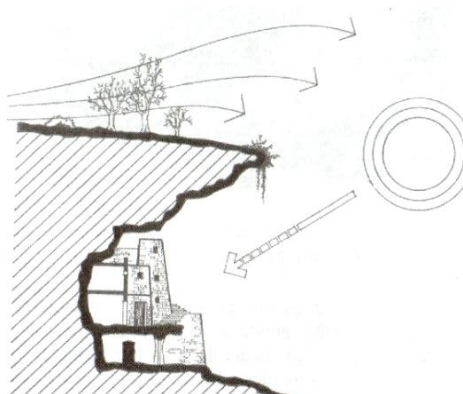


Figura 10 – Exemplo de grupo de edificações em clima frio e seco

Fonte: Cunha (2006, p. 26)

Dentre as variáveis climáticas que concorrem para o condicionamento das edificações a ventilação é tida como uma das fundamentais (NEVES, 2012). Por meio dos ventos é possível melhorar ou agravar o estado de desconforto em ambientes internos de um espaço ocupado (FROTA & SCHIFFER, 2001 P.124).

Em regiões de clima quente e úmido como as localizadas na Zona 8 da NBR 15520-3 (ABNT, 2003), a ventilação proporcionada por grandes aberturas e vazão de ar constante favorece o condicionamento térmico do ambiente. Lamberts et al (2014) e Frota & Schiffer (2001) afirmam que neste clima a ventilação cruzada é a estratégia mais simples a ser adotada. O fato de haver troca constante de ar condiciona o ambiente interno à mesma temperatura de ar

do ambiente externo, o que não implica em grandes mudanças, uma vez que a amplitude térmica diária⁵ nesse tipo de clima é pequena. Contudo, a troca de ar promove a renovação do ar enclausurado, dissipando o calor e a concentração de umidade e quaisquer outros poluentes suspensos presentes no fluido.

Por outro lado, em regiões de clima quente e seco, a amplitude térmica diária é elevada. Devido à baixa presença de vapor de água no ar, este fica suscetível a variação de sua temperatura sem maior resistência⁶, o que implica maior influência da incidência dos raios solares. Tanto Frota & Schiffer (2001) quanto Lamberts et al (2014) indicam que neste tipo de clima é desejável regular a entrada de vento, minimizando sua entrada durante o dia, quando o ar externo a edificação está mais quente e, durante o período noturno, quando o ar externo se torna mais fresco, facilitar sua entrada. Estas estratégias são recomendadas também pela NBR 15220-3 (ABNT, 2003) para as Zonas 6 e 7 do zoneamento bioclimático brasileiro.

3.2 Elemento vazado (Cobogó)

No sentido de proporcionar ventilação ao ambiente construído, várias estratégias foram desenvolvidas para mitigar as condições que tornam difíceis a permanência nesses espaços. Dentre essas estratégias está o uso do elemento vazado pré-fabricado, conhecido no Brasil como Cobogó (Figura 11). Este nome popular foi criado pela associação da primeira sílaba dos sobrenomes de seus propositores: Amadeu Oliveira **C**oimbra, Ernest August **B**oeckmann e Antônio de **G**óes no estado de Pernambuco. Vieira et al (2012) afirmam que o cobogó foi concebido baseando-se em elementos da arquitetura mourisca portuguesa, os muxarabiês (Figura 12) e as gelosias (treliçado de madeira) e adaptados para serem produzidos em série, baseando-se no vazamento reticulado de prismas de concreto.

⁵ Diferença entre máxima e mínima temperatura diária.

⁶ No clima quente e úmido, o vapor de água presente no ar é que estabiliza a temperatura do fluido, pois a água leva mais tempo para ganhar e/ou perder calor do que o ar.

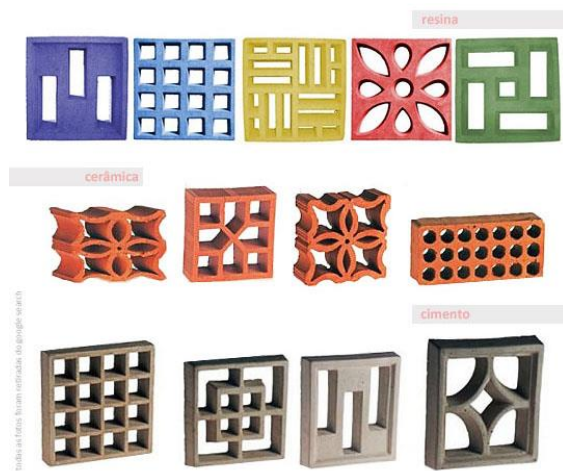


Figura 11 – Cobogós
Fonte: Studio Novaretti⁷

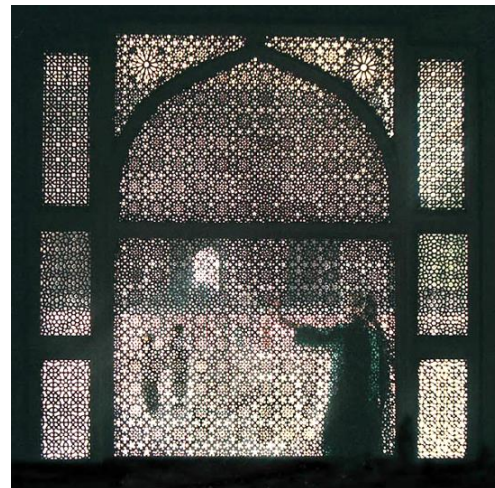


Figura 12 – Muxarabiê/muxarabi
Fonte: Kevin Lang⁸

Segundo Albernaz & Lima (1998) têm-se a seguinte definição para o objeto:

Peça padronizada, em geral feita de CERÂMICA, CIMENTO-AMIANTO, CONCRETO PRÉ- MOLDADO ou louça, usada na confecção de paredes ou muros ou de parte destes. Tem como principal função melhorar a ventilação e iluminação interna, permitindo apenas visão parcial. Possibilita freqüentemente um efeito decorativo. Comumente é empregado em jardins, ÁREAS DE SERVIÇO e VARANDAS. Foi muito usado, nas primeiras construções MODERNAS. E também chamado combogó ou cobogó. [...]. (ALBERNAZ & LIMA, 1998, p. 210)

Por meio da definição acima tem-se que os materiais utilizados para produção, em grande escala, de elementos vazados são basicamente a base de argila (cerâmica e louça) ou cimento Portland (concreto pré-moldado e o cimento-amianto⁹). Esses materiais são conhecidos como convencionais na construção civil.

⁷ Disponível em: <http://studionovaretti.com/wp-content/uploads/2015/07/cobog%C3%B3-1.jpg>
Acesso 20 maio de 2016.

⁸ Disponível em:
http://www.trekearth.com/gallery/Asia/India/North/Uttar_Pradesh/Fatehpur_Sikri/photo115493.htm
Acesso em 20 maio de 2016.

⁹ O cimento-amianto vêm sendo substituído em todo o mundo por outros materiais como o fibrocimento. Em muitos países seu uso é proibido por ele configurar como um dos materiais mais cancerígenos que existe segundo a OMS.

3.3 A terra como material construtivo

O material chamado convencional, proveniente das indústrias, incorpora em produção, bastante energia para sua transformação. Um exemplo disso é a produção do cimento, que lança na atmosfera a mesma quantidade de dióxido de carbono (CO_2) que é transformado em produto (MEHTA, 1999 apud BARBOSA, 2003).

Por outro lado, segundo Bustamante e Bressiani (2000), naquele ano o Brasil tinha na produção de cerâmica 1% de seu PIB. Nessa época, a produção de cerâmica estrutural (tijolos furados, tijolos maciços, telhas ou lajes, blocos de vedação e estruturais, telhas, manilhas, pisos rústicos, etc.) alcançava a ordem de 60.000.000 (sessenta milhões) de toneladas de matéria prima, que era processada em 11.000 unidades produtivas, servindo geralmente a mercados próximos a sua instalação. Na produção desses artefatos no nordeste brasileiro é constatado que a retirada da mata para utilização como combustível nas olarias (Figura 13) está contribuindo para a aceleração da desertificação em muitos cenários deste frágil ecossistema (BARBOSA, 2003).



Figura 13- Produção de tijolos cerâmicos com queima

Fonte: Os impactos de Belo Monte¹⁰

¹⁰ Disponível em: <http://www.osimpactosdebelomonte.com.br/fotos/> Acesso: 09 de junho de 2016

Visando mitigar os efeitos nocivos constatados da ação do ser humano sobre a natureza vários materiais e técnicas, utilizados em abundância no passado, voltam a ser estudados e aplicados com base no seu potencial de baixa incorporação de energia e reduzida produção de resíduos que agridam o meio ambiente.

Dentre os materiais não convencionais¹¹ mais utilizados e estudados está a terra. Segundo Barbosa e Ghavami (2007) a terra é um dos materiais mais abundantes do planeta, portanto seu uso é bastante vantajoso economicamente, uma vez que não dependem de jazidas específicas podendo ser retirada até mesmo das escavações das fundações das construções. Minke (2015) diz que a terra prevaleceu como material construtivo em quase todos os climas quentes, áridos ou temperados e que cerca de um terço da população mundial habita edificações ou espaços constituídos desse material (Figura 14).



Figura 14 – Cidade de Shibam no Yemen. Edificações de terra de vários pavimentos

Fonte: Recriar com você¹²

Apesar da grande utilização desse material e sua oferta em abundância na natureza, têm-se a terra como um material não standardizado, ou seja, ela possui características diferentes dependendo do local de onde a extraia (MINKE, 2015). Isso ocorre pois, segundo Barbosa e Ghavami (2007), a crosta terrestre

¹¹ Materiais que não possuem normas técnicas específicas que regulamentam sua aplicação (FREIRE, 2003).

¹² Disponível em: http://www.recriarcomvoce.com.br/blog_recriar/arquitetura-de-terra-ii/ Acesso em maio de 2016.

possui em abundância oxigênio, silício, alumínio e ferro, seguido em menor parte de cálcio, sódio, potássio, magnésio, etc. Combinados esses elementos, formam-se normalmente os óxidos, sendo esta a forma mais estável em que se apresentam na natureza, resultando nos principais componentes químicos que compõem a terra: sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e hematita (Fe_2O_3). Esses compostos apresentam-se em percentuais diferentes de um lugar para outro, o que implica na variação das características dos solos. A coloração final do material cru (Figura 15) também dependerá da composição mineral do solo utilizado em sua manufatura. Solos com tons avermelhados provavelmente possuem presença de óxidos de ferro, assim como os acinzentados indicam em seu conteúdo carbonato de cálcio e os solos de tons amarelo ocre, hidratos de carbono (BARBOSA E GHAVAMI, 2007).



Figura 15 - Variação tonal do solo
Fonte: Ferreira (2015)

Outra característica da terra que muda conforme sua localização é sua granulometria¹³. O conhecimento da composição dos grãos que formam o solo é importante para definição de algumas de suas propriedades, incluindo a sua resistência mecânica (BARBOSA e GHAVAMI 2007).

A terra é basicamente uma mistura de argila, silte e areia. É comum encontrar em sua composição pedras e cascalho. Minke (2015) afirma que a argila funciona na composição tal qual o cimento no concreto. Sendo o

¹³ Verificação das dimensões das partículas que compõem um material.

componente reativo do solo, a argila é responsável pela união das demais partículas (pedregulho, areia e silte) que atuam como agregados. A quantidade de cada um desses componentes varia conforme o solo utilizado, dessa forma pode-se ter em mãos, dependendo do componente dominante, um material predominantemente argiloso, siltoso (limoso) ou arenoso. Na Tabela 2 têm-se o dimensionamento dos grãos dos diversos componentes que compõem a terra segundo padrões de quatro países.

Partícula	Brasil (NBR7181)	USA (AASHO)	França	Inglaterra
Pedregulho	4,8 a 50 mm	2 a 50 mm	2 a 20 mm	2 a 60 mm
Areia	50 μ m a 4,8 mm	75 μ m a 2 mm	20 μ m a 2 mm	60 μ m a 2 mm
Silte	5 a 50 μ m	5 a 75 μ m	2 a 20 μ m	2 a 60 μ m
Argila	< 5 μ m	< 5 μ m	< 2 μ m	< 2 μ m

Tabela 2 - Classificação das partículas do solo segundo normas de alguns países
Fonte: Barbosa e Ghavami (2007, p. 6)

A Figura 16 apresenta um diagrama trilinear que, por meio de um triângulo onde cada aresta indica um material dominante, têm-se um tipo de solo conforme as características granulométricas variam. No Quadro 1 têm-se a identificação tátil-visual do solo.

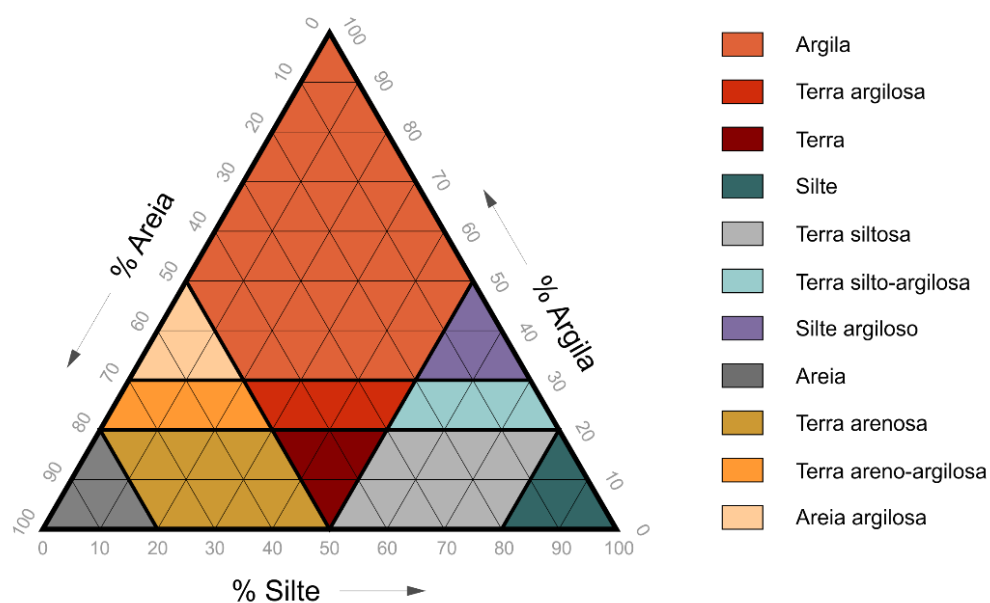


Figura 16 – Distribuição granulométrica em diagrama trilinear
Fonte: Faria (IN JORGE 2005, p. 182)

Classificação	Textura e aparência da terra
Areia	Textura granular. Pode-se visualizar o tamanho dos grãos. Flui livremente se está seca.
Terra arenosa	Textura granular, porém, com suficiente silte e argila para observar sua coesão. Predominam as características da areia.
Terra siltosa	Textura fina. Contém uma quantidade moderada de areia fina e uma pequena quantidade de argila. Suja os dedos como talco. Em estado seco, tem uma aparência compacta. Pulveriza com facilidade.
Terra argilosa	Textura fina. Quando está seca, fratura-se em torrões resistentes; em estado úmido, é plástica e agarra-se nos dedos. É difícil de pulverizar.
Terra orgânica	Textura esponjosa. Odor de matéria orgânica mais acentuado ao umedecer ou aquecer.

Quadro 1 - Identificação da terra por inspeção tátil-visual
Fonte: Faria (IN JORGE 2005, p. 181)

Como se nota até aqui são muitas as variações do solo, contudo exceto os solos orgânicos e os que possuem presença de argila expansiva, todos são indicados para o uso na construção de edificações (Faria 2005, Neves 2005, Minke 2015, etc.) sendo, de maneira resumida, a terra mais argilosa indicada para misturas mais plásticas como taipas (pau-a-pique) e adobes, sendo possível sua modificação com acréscimo de areia, fibras, etc. para mudança de suas características. Por outro lado, as terras mais arenosas são mais indicadas para blocos compactados, como o bloco de terra comprimida (BTC) que será tratado mais à frente.

O uso de terra para construir edificação é indicado pelos estudos não apenas por sua grande disponibilidade e baixo custo, mas também pelo material possuir vantagens em várias situações, apontadas pelos estudos de muitos pesquisadores (Minke 2015; Barbosa e Ghavami 2007; Freire 2003, Cagnon et al 2014, etc.), tais como, a facilidade de trabalho, a inexistência de resíduo (quando utilizada em sua forma crua), a resistência ao fogo, a interação com o clima, o baixo consumo energético (Tabela 1 e Tabela 3), etc.

Material	Quantidade	Consumo de energia (kW/h)
Tijolo maciço cerâmico	1 Tijolo	3,98
Bloco de concreto	1 Tijolo	8,50
Adobe (moldagem mecanizada)	1 Tijolo	0,73
Adobe (moldagem manual)	1 Tijolo	0,00

Tabela 3 – Consumo de energia para a produção dos materiais
Fonte: Neves (IN JORGE 2005, p. 188)

Segundo o pesquisador alemão Minke (2015), a terra tem a capacidade de regular a umidade do ar como nenhum outro material natural. Por se tratar de um material poroso, este tem a capacidade de absorver e liberar a umidade do ar ambiente, causando assim um maior equilíbrio da umidade em ambientes internos. Em experimentos realizados pelo pesquisador, foi detectado que, no adobe, sua camada externa (1,5 cm de profundidade, a partir da superfície) é capaz de absorver 300 g por m² em 48 horas, quando a umidade do ar ambiente é aumentada de 50% para 80%. Na Figura 17, é comparada a capacidade de absorção de água em relação ao tempo de diferentes materiais, quando a umidade é elevada de 50% para 80% a 21 °C.

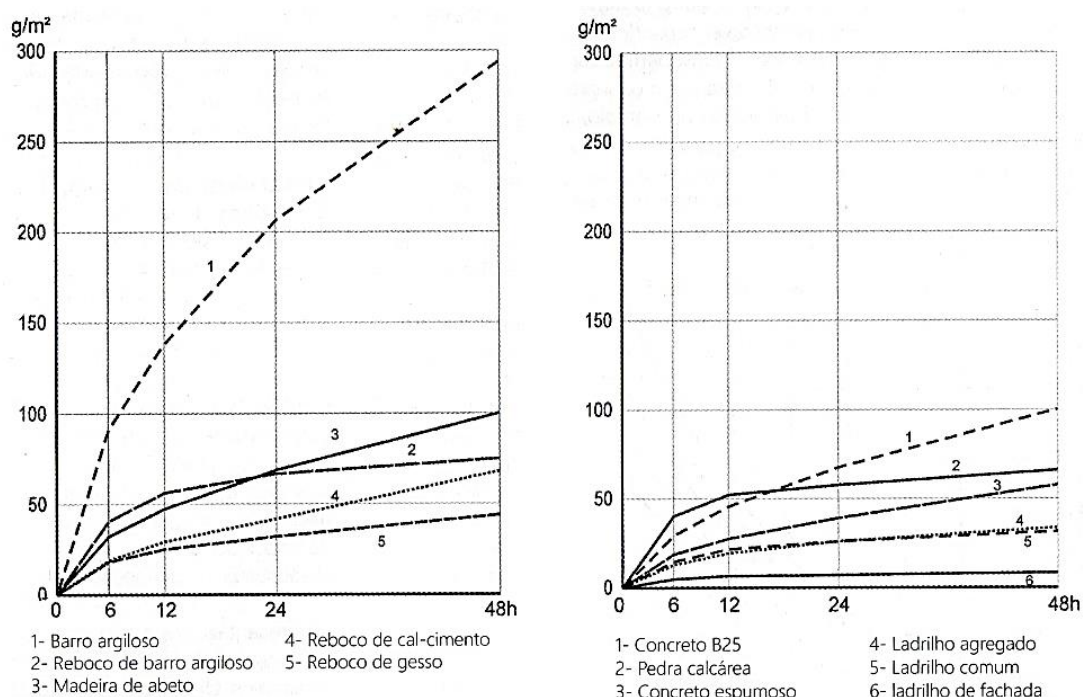


Figura 17 – Curvas de absorção em relação ao tempo, com amostras de materiais diferentes de 1,5cm de espessura, numa temperatura de 21 °C e aumento súbito de umidade de 50 a 80%

Fonte: Minke (2015, p. 20)

Com o aumento da espessura das paredes, a capacidade de absorção do barro (terra) também aumenta como Minke (2015) verificou na sua pesquisa. Na Figura 18, pode-se ver que conforme se dá o aumento na espessura do material, a absorção de água da umidade do ar também se eleva.

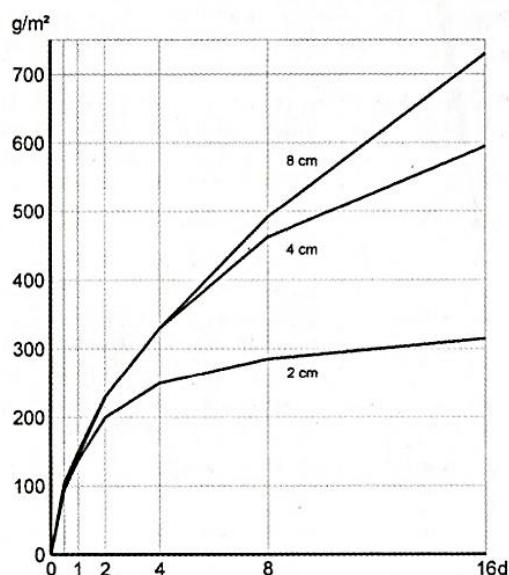


Figura 18- – Influência da espessura das camadas de barro em relação à absorção da umidade, a uma temperatura de 21 °C, a seguir ao aumento súbito da umidade do ambiente de 50% a 80%

Fonte: Minke (2015, p. 21)

Se comparado com, por exemplo, tijolos cerâmicos cozidos a altas temperaturas, a parede de terra crua tem capacidade de absorver 50 vezes mais água do ar.

Em conformidade com os resultados encontrados na Alemanha por Minke (2015), Cagnon et al (2014) chegaram a resultados que dão força a esta característica higrométrica. Segundo seus estudos, nos quais foram analisados blocos de terra extrudados em cinco fábricas de tijolos, que trabalham com blocos cozidos e crus em Toulouse na França, foi detectada, em todos eles com pequena margem de variação dos resultados, a capacidade de rápida absorção de valores significativos de água da umidade do ar, quando submetidos a variação desta variável climática por meio do método de solução de sais saturada. Os autores afirmam que a regulação de umidade dos materiais estudados se dá de forma muito rápida.

Para exemplificar a capacidade de troca de umidade do solo com o ar, veja o seguinte caso real aplicado. Uma habitação, possuindo suas paredes

internas e externas de barro, foi estudada por Minke¹⁴ na Alemanha durante oito anos. Ao fim do estudo o pesquisador chegou a constatação de que durante este período de tempo a umidade relativa do ar interno desta habitação ficou sempre próxima de 50% durante todo o ano, com oscilações de apenas 5% a 10%. Este comportamento verificado no caso aplicado é derivado de uma propriedade que caracteriza os materiais porosos, trata-se do equilíbrio do conteúdo de umidade.

Todo material poroso, mesmo que esteja seco, possui uma umidade característica denominada equilíbrio do conteúdo de umidade, que depende da umidade do ar ambiente. Quanto maior a umidade, maior a quantidade de água absorvida pelo material. Se a umidade do ar reduz, o material deixará de absorver água. [...]. (MINKE, 2015, p. 38)

Embora se saiba que a terra utilizada como material de construção apresenta de moderada a baixa resistência ao contato com água, isso não ocorre quando em contato com a umidade do ar. A água em forma de vapor não impõe nenhum desgaste ao material, como afirma Minke (2015). O pesquisador apresenta a seguinte experiência que comprova esta afirmação. Em um experimento, blocos de adobe ficaram submetidos a um ambiente confinado a 95% de umidade no ar durante seis meses onde ao término do experimento os blocos não se umidificaram e nem perderam estabilidade.

Em todo caso, torna-se importante mencionar que quanto maior a quantidade de argila em proporção em um solo, maior sua instabilidade dimensional em presença de água, ou seja, ela irá expandir-se quando úmida e retrair quando seca, e esse comportamento se dá pela presença da argila no composto. Devido sua organização lamelar, a argila permite que a água deslize e se acomode envolta de suas camadas (Figura 19), em forma de finas películas que, quando evaporado o fluido, se reorganizam paralelamente (devido às forças de atração elétricas – forças aglutinantes), acomodando-se em distâncias interlaminares reduzidas que, em macro escala desenvolve a retração do material (Figura 20), que o faz fissurar (MINKE, 2015).

¹⁴ Manual de construção com terra: uma arquitetura sustentável. Trad. Jorge Simões. 1ª Ed - São Paulo: B4, 2005.

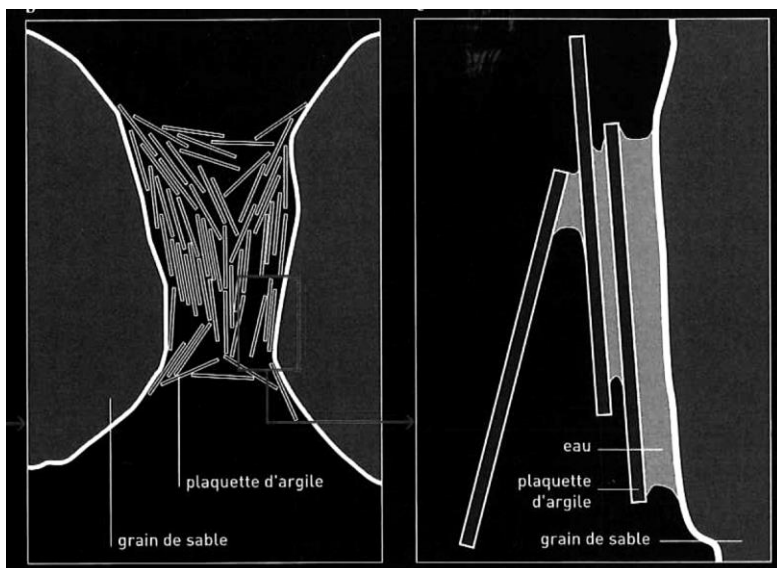


Figura 19 – Interação da argila com a água e agregados
Fonte: Ponte (2012, p. 32)

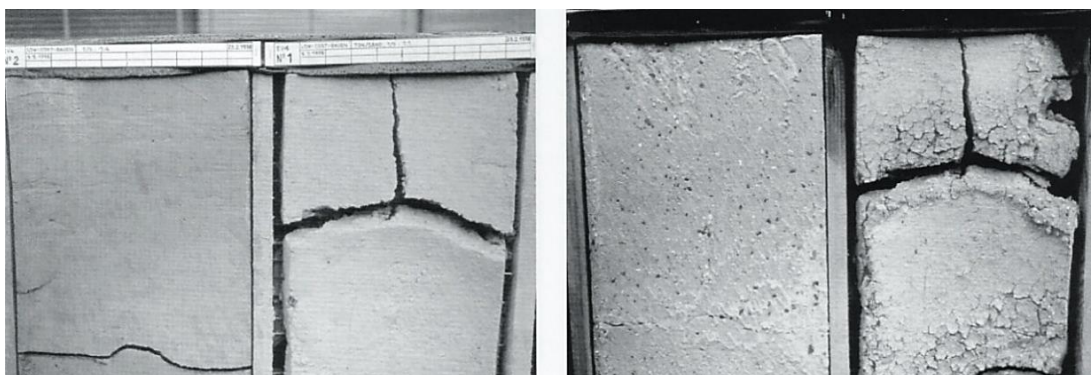


Figura 20 – Amostras de barro antes (esq) e depois (dir) de serem expostas às intempéries durante três anos
Fonte: Minke (2015, p. 34)

3.3.1 Estabilização da terra

Na expectativa de aumentar a resistência da terra como material construtivo é possível estabilizá-la conforme características desejadas para seu emprego. Contudo, o melhoramento de algumas características pode piorar outras, portanto este processo deve ser observado com cautela e utilizado somente em necessidades específicas como afirma Minke (2015). Em complemento, Barbosa e Ghavami (2007) dizem que a estabilização consiste em modificar propriedades do sistema terra-água-ar, na iminência de se obter qualidades perenes para uma aplicação particular. Dentre as características modificadas pela estabilização, os autores citam a resistência mecânica,

performance quanto à ação da água, trabalhabilidade e ductilidade. No Quadro 2 - Algumas estabilizações aplicadas do barro e seus efeitos estão dispostos alguns meios de estabilização do solo.

Estabilização	Efeito
Ação mecânica	Compressão/compactação da terra confinada em molde, a fim de densificar o material ao ponto de bloquear os poros e canais capilares.
Hidrorrepelente	Eliminação ao máximo da absorção e adsorção de água por parte dos grãos do solo, utilizando produtos água-repelentes.
Selagem	Envolvimento dos grãos de terra por fina camada de material impermeabilizante capaz de fechar poros e canais capilares. É o caso de emulsões betuminosas.
Estabilização química	Formação de ligações químicas estáveis entre os cristais de argila. Estabilizantes químicos que fazem papel de ligante ou catalisador utilizando as cargas negativas e positivas das lamelas da argila para uni-las entre si ou capaz de reagir diretamente com a argila formando um material insolúvel e inerte.
Estrutura inerte	Criação de esqueleto sólido inerte, que se opõe ao movimento dos grãos. Está entre os mais tradicionais utilizando-se o cimento como estabilizante.
Armadura difusa	Criação de uma armadura omnidirecional capaz de reduzir os movimentos dos grãos de solo entre si. Como exemplo para esta estabilização tem-se a fibra vegetal adicionada ao adobe.

Quadro 2 - Algumas estabilizações aplicadas do barro e seus efeitos
Fonte: Barbosa e Ghavami (2007, p. 13). Adaptado pelo autor

Por se encontrar em quase toda parte habitada do país, o cimento Portland hoje é o produto mais utilizado na construção civil. Na estabilização do solo, o uso do cimento é uma das mais simples de se fazer, uma vez que é necessária apenas sua adição e homogeneização ao solo. Sua inclusão na mistura da terra acarreta, em geral, maior estabilidade dimensional, maiores resistências mecânica e à água.

Conforme Barbosa e Ghavami (2007), o uso do cimento para estabilizar a terra depende de vários condicionantes, tais como o tipo de argila presente na

terra, a quantidade de cada elemento de composição do solo (areia, silte e argila) e o uso que se dará a mistura, se será utilizada no estado plástico ou compactado.

Quintino (2005) e Barbosa e Ghavami (2007) indicam ainda que valores na ordem de 3% a 6% de estabilizante (notadamente cimento Portland) é o suficiente para estabilizar solos com boas características para o uso em blocos de terra compactada. Em terras com maior predominância de argila, a inclusão de 3% a 5% de cimento Portland pode decrescer a taxa de resistência em relação ao material natural. Por outro lado, solos com percentual de areia que esteja em torno de 65%, têm sua resistência aumentada com a inclusão de até 2% de cimento Portland.

Este estabilizante tem como função essencial reagir com a água da mistura, criando cristais resistentes à própria água e estáveis no tempo. Com a cura do estabilizante criam-se ligações com os grãos de areia, consolidando uma estrutura sólida (esqueleto) mais resistente, que evita a movimentação dos grãos que compõem o material.

Ao adicionar compressão à terra em prensas próprias para este uso, tem-se uma técnica bastante recente de uso do solo como material construtivo, o bloco de terra comprimida (BTC). Nos anos 50 (século XX), o pesquisador colombiano Raoul Ramirez desenvolveu a primeira prensa manual que ficou conhecida como CINVA-RAM (Figura 21), nome referente ao organismo de habitação popular do Chile, ao qual o pesquisador era vinculado (BARBOSA E GHAVAMI, 2007).



Figura 21 – Prensa CINVA-RAM de Raoul Ramires
Fonte: Barbosa (2003, p. 19)

No Brasil, tal bloco recebeu o nome de tijolo de solo-cimento devido às pesquisas e trabalhos realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland com o bloco que culminou com o desenvolvimento de uma prensa própria (Figura 22), que compactava três elementos simultaneamente com uma pressão de compactação reduzida, portanto ineficaz. Nos dias atuais a indústria fabrica prensas padronizadas para a produção de blocos compactados com acionamento tanto manual quanto hidráulico (Figura 23), esta última podendo chegar a produzir blocos com 6 a 8 MPa de resistência (BARBOSA E GHAVAMI, 2007).

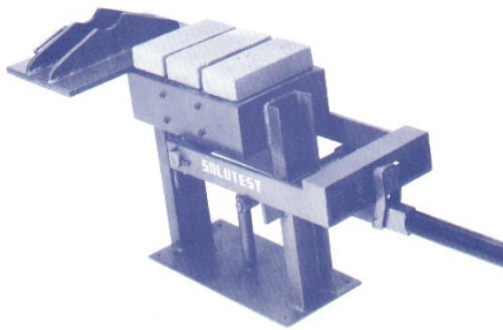


Figura 22 – Prensa desenvolvida pela Associação Brasileira de Cimento Portland
Fonte: Barbosa e Ghavami (2007, p. 25)



Figura 23 – Prensa industrializada hidráulica de BTC
Fonte: Glob Import¹⁵

Devido ao avanço nas prensas, a qualidade dos blocos evoluiu bastante. Porém não só delas depende o desempenho do BTC. Segundo Barbosa e Ghavami (2007) dentre as características que influenciam a fabricação de bons blocos têm-se: qualidade do solo, umidade de moldagem, tipo e percentual de estabilizante e cura.

O tipo de terra a ser empregado na confecção dos blocos deve conter entre 10 a 20% de argila, 10 a 20% de silte e de 50 a 70% de areia. A umidade de moldagem é variável conforme o tipo de solo utilizado, logo a quantidade de água é confirmada através de ensaios laboratoriais. Porém, no método de

¹⁵ Disponível em: [http://globimport.ru/katalog/stroitelnoe-oborudovanie/stanok-dlya-proizvodstva-lego-kirpichej-\(eco-brava\).html](http://globimport.ru/katalog/stroitelnoe-oborudovanie/stanok-dlya-proizvodstva-lego-kirpichej-(eco-brava).html) Acesso em 08 de junho 2016.

composição da mistura em campo descrito por Barbosa e Mattone (1997 apud BARBOSA e GHAVAMI, 2007) o composto deve ter consistência aproximada de uma farofa úmida. A prensa utilizada no processo também define a resistência (e acabamento) do bloco, sendo que quanto maior a pressão de compactação do material, maior resistência à compressão ele terá.

O estabilizante utilizado na composição da mistura pode resultar num bloco de maior resistência mecânica e a intempéries. No processo descrito por Barbosa e Ghavami (2007), a utilização de cimento Portland incrementa boas características ao produto final, mas sua quantidade não deve ser mais do que uma pequena fração de toda a mistura. Segundo os autores, se o solo possuir muita argila vai exigir no mínimo 6% de cimento Portland. Se a terra for arenosa em excesso podem ser requeridas taxas maiores e se o solo for bem graduado em sua composição, 4% de cimento Portland é suficiente, em alguns casos podendo chegar até a apenas 2% de acréscimo do estabilizante.

A cura, no caso do bloco estabilizado com cimento, deve ser através de processo que evite a saída rápida da água, pois o estabilizante, por ser um aglomerante hidráulico, precisa dela para reagir e estabilizar todos os grãos dispostos no bloco, o que leva aproximadamente 28 dias. Caso o processo não seja respeitado, o bloco perde em qualidade. Os autores citam que é desejável que o bloco tenha resistência à compressão de pelo menos 2 MPa.

No tocante ao seu uso, os blocos de terra apresentam excelente viabilidade técnica para uso na construção civil, conforme os estudos mostrados, porém seu uso é sempre questionado do ponto de vista financeiro. Na direção de desmistificar este preconceito, Lourenço (2005) afirma que mesmo pré-fabricando o BTC e o adobe industrialmente por meio de processo mecanizado, os custos de consumo energético são cerca de metade se comparados, por exemplo, com a produção de tijolos cerâmicos cozidos.

Se faz necessário ainda evidenciar que, segundo McGregor et al (2014), o acréscimo de estabilizantes na terra resulta em modificação de suas propriedades, não apenas mecânicas. Como se observa na Tabela 4 a utilização de agentes estabilizantes na terra fazem variar suas características higroscópicas, alterando a capacidade de interação das amostras utilizadas no experimento com o vapor de água no ar.

<i>Sample</i>	<i>Sample properties</i>		<i>Measured steady-state properties</i>
	<i>Stabilisation</i>	<i>Density (Kg/m³)</i>	<i>Vapour resistance factor, μ</i>
US1	<i>None</i>	1758	5.5
US2	<i>None</i>	1777	5.8
US3	<i>None</i>	1815	5.8
C41	<i>4% cement</i>	1769	6.8
C42	<i>4% cement</i>	1760	7.0
C43	<i>4% cement</i>	1683	6.5
C81	<i>8% cement</i>	1797	7.7
C82	<i>8% cement</i>	1731	7.0
C83	<i>8% cement</i>	1779	7.4

Tabela 4 – Resistência ao vapor de água em blocos de terra crua com e sem adição de cimento

Fonte: McGregor et al (2014, p. 14) adaptado pelo autor

3.3.2 Interação da terra crua com a umidade do ar: em busca da viabilidade

Na expectativa de buscar resultados que apontem o comportamento do material aqui estudado, pesquisas como as de Liao e Chiu (2002), Vigoderis et al (2007) e Moreira Júnior (2009), que recorrem ao uso de túneis de vento com adição de vapor d'água no ar, são levadas em consideração.

Liao e Chiu (2002) verificam em sua pesquisa que é possível a determinação precisa do desempenho em termos de eficiência do resfriamento evaporativo e queda de pressão estática do ar. Vigoderis et al (2007) afirmam que o túnel de vento reduzido, desenvolvido por sua pesquisa para avaliação de materiais porosos utilizados em sistemas de resfriamento adiabático evaporativo, também mostrou-se eficiente na caracterização da argila expandida como material poroso de placas para resfriamento do ar. Por fim Moreira Júnior (2009) também obteve êxito na construção de seu túnel de dimensões reduzidas e baixo custo para realização de estimativas de deriva em pulverização agrícola.

Por fim, os estudos laboratoriais utilizados para verificação do comportamento de materiais de construção envolvem em grande parte custos elevados para o desenvolvimento de suas atividades. Além disso, o alto peso (em massa) e, por vezes, o tamanho avantajado dos elementos avaliados incorre em grande dificuldade para a realização de seus ensaios.

No sentido de minimizar os entraves supracitados e de dimensionar a proposta desta pesquisa, para a verificação em túnel de vento, opta-se aqui pela realização de ensaios em amostras reduzidas a fim de verificar suas propriedades.

Maurício (2005), Neto e Corrêa (2006) e Moreira (2007) desenvolveram estudos nos quais foram analisados blocos de cerâmica e concreto, nas escalas de 1:3, 1:4 e 1:5, que mostram comportamento similar às suas amostras em escala real (muito embora se reconheça que pode haver diferenças entre valores de resistência à compressão). Isto aponta para o potencial de se utilizar modelos reduzidos, para facilitar operações de ensaio e reduzir custos na investigação de fenômenos, aos quais estão sujeitos.



Figura 24 – Bloco de concreto: escala real e reduzida em 1:4
 Fonte: Maurício (2005, p. 45)

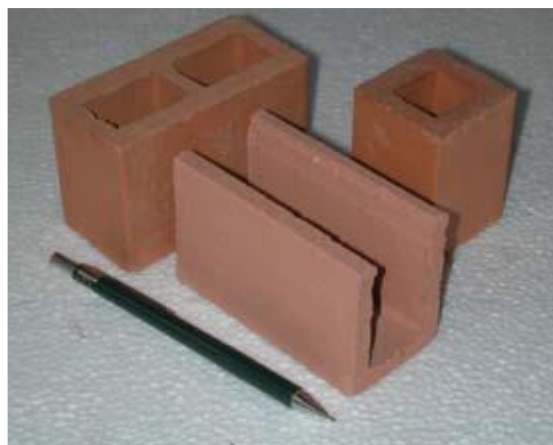


Figura 25 – Bloco, meio bloco e bloco canaleta em escala reduzida (1:3)
 Fonte: Neto e Corrêa (2006, p. 79)

4- Metodologia

Neste capítulo serão tratados os procedimentos adotados e/ou elaborados para a investigação do elemento vazado de terra comprimida e estabilizada com cimento Portland proposto por Ferreira (2015), a fim de verificar sua viabilidade técnica e sua possível contribuição no condicionamento interno das edificações.

Por se tratar de um elemento ainda em desenvolvimento se fez necessária a adaptação e/ou a criação de dispositivos e procedimentos de avaliação do material terra crua comparando-o com outros materiais, no intuito de se verificar o potencial de influência do elemento construtivo proposto na edificação em que estará inserido. Neste trabalho, o elemento proposto, bloco de terra crua estabilizado com cimento Portland, será identificado por BTCobogó.

Os procedimentos experimentais foram divididos em quatro etapas, que procuram encaminhar o processo de avaliação, dentro das limitações e possibilidades nas quais a pesquisa está inserida. As etapas foram: 1 – teste do princípio da absorção da umidade do ar variável por diferentes materiais; 2 – projeto, produção e caracterização da resistência à compressão do BTCobogó-miniatura; 3 – confecção do túnel de vento para avaliação de painéis com elementos vazados; 4 - capacidade de painéis com camadas de BTCobogó-miniatura na modificação da umidade e temperatura do ar.

4.1 Teste do princípio da variação da absorção da umidade do ar por diferentes materiais

Como ponto de partida, buscou-se realizar o teste de princípio da capacidade variável da absorção da umidade do ar por diferentes materiais, inclusive daquele utilizado na produção do BTCobogó. Para isso, procurou-se criar as condições adequadas para realização do teste, em ambiente que permitisse o controle interno da umidade do ar e, ao mesmo tempo, pudesse acomodar as amostras confeccionadas com materiais diferentes. Então, a ideia foi criar um aparato simplificado para simular as condições de uma câmara climática e adotou-se o padrão das amostras prismáticas em pequenas dimensões. O indicador adotado para verificação da absorção de umidade do ar pelas amostras é a variação média das suas massas.

4.1.1 Simulação de uma câmara climática

O procedimento parte da preparação de um aparato, que simula uma câmara climática (C-CLIMÁTICA), o qual se utiliza de uma caixa térmica de poliestireno expandido (isopor), com dimensões internas iguais a 69 cm x 47 cm x 32 cm (largura x profundidade x altura), resultando no volume igual a 103.776 cm³ (≈100 litros).

Para controlar a umidade do ar no interior da C-CLIMÁTICA, ela foi conectada a um equipamento doméstico do tipo umidificador de ar ultrassônico com capacidade de 3 litros de água. Durante os testes, ele foi suficiente para manter a umidade do ar internamente estável em 80 % UR, como foi desejável em uma das etapas do ensaio, aquele quando as amostras são expostas a alta umidade do ar. Este monitoramento interno da câmara foi realizado por meio de uma unidade controladora de temperatura e umidade, Modelo Ageon, K103 Pid-u (Figura 26), com visor digital.



Figura 26 - Controlador de temperatura e umidade K103 Pid-u

Fonte: Controle e Automação¹⁶

Através de um dreno, a água que se condensa na base da câmara foi eliminada, minimizando a possibilidade de saturação da umidade do ar no ambiente interno.

Para reverter o ciclo de análise, a partir da necessidade de expor as amostras ao ambiente com baixa umidade do ar, portanto para eliminar a umidade do ar no interior de C-CLIMÁTICA foi instalado uma resistência elétrica em barra, do tipo U, com potência de 300 W, controlada por um dimerizador (potenciômetro). O uso da resistência para o aquecimento do ar interno aumenta

¹⁶ Disponível em: <https://www.controleeautomacao.net/Controlador-de-temperatura-e-Umididade-Digital-Ageon-C--Temporizador-K103-PID-U-110-220V/prod-3356496/> Acesso em 29 de setembro de 2017

a capacidade desse ar em receber vapor d'água pelo aumento dos espaços entre as partículas no fluido, porém como é impedida a entrada de ar externo no sistema (C-CLIMÁTICA), a quantidade de suas partículas de água no ar interno tende a baixar diminuindo sua concentração; daí tem-se uma baixa umidade relativa do ar.

Neste processo, fez-se necessário também acrescentar uma tela metálica em volta desta resistência elétrica, no intuito de aumentar a superfície de calor em contato com o ar, aumentando assim sua eficiência, mesmo com reduzida potência da resistência.

Para acompanhar as leituras e a configuração desejada das condições internas da C-CLIMÁTICA durante os ensaios foram utilizados:

- um termohigrômetro digital, com faixa de medição de temperatura entre -50° C e 70 °C, resolução de 0,1 °C, precisão de ± 1 °C na temperatura, e, faixa de medição de umidade entre 15 %UR e 95 %UR, resolução de 1 %UR, precisão ± 5 %UR;
- um termômetro digital de agulha com faixa de medição entre -50 °C e 300 °C, resolução de 1°C e precisão de 1 °C;
- um controlador K103 Pid-u, com faixa de medição de temperatura de -20 °C a 80 °C e precisão de 0,4 °C e faixa de medição de umidade entre 10 %UR e 90 %UR, com precisão de 3 %UR.

Com o objetivo de controlar melhor as condições internas de C-CLIMÁTICA, foi instalado ainda, nas laterais do isopor, duas ventoinhas de 100 mm (12V) para retirar o excesso de umidade ou de calor que possam desestabilizar a configuração simulada no interior da câmara, além de outras duas no interior para circulação e homogeneização do ar. Nas figuras a seguir, pode-se observar o aspecto final da C-CLIMÁTICA e um esquema gráfico interno da mesma.



Figura 27- Câmara climática 1 (C-CLIMÁTICA)
Fonte: Elaborado pelo autor

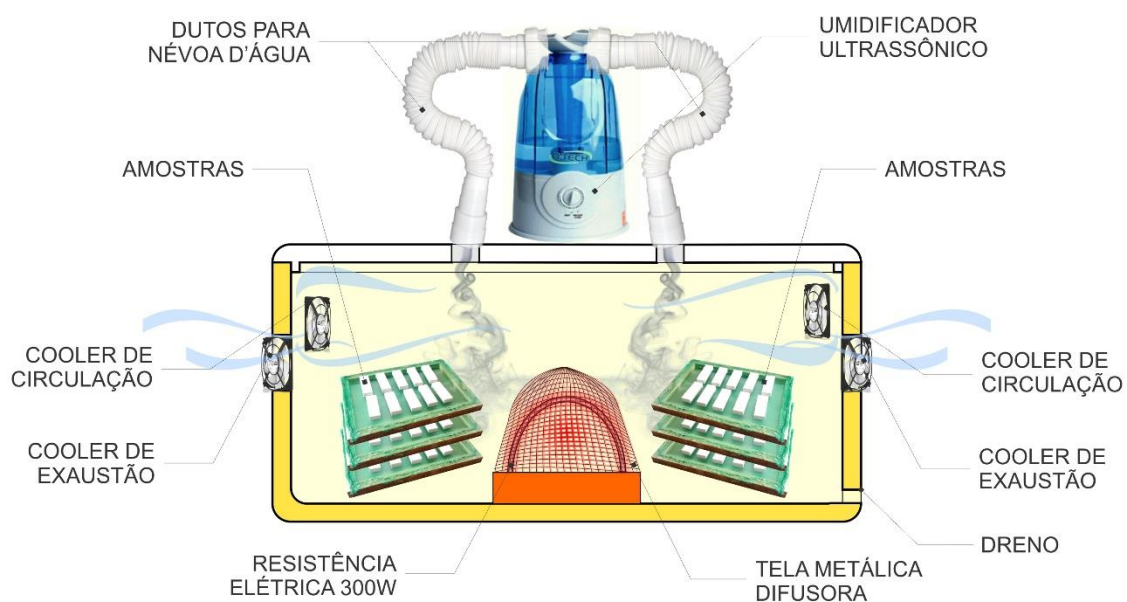


Figura 28 - Esquema do interior de C-CLIMÁTICA
Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Preparação das amostras prismáticas

Para verificar a capacidade de absorção de água retirada do ar e posterior eliminação da mesma, foram confeccionadas amostras com materiais distintos, em formato prismático com dimensões de 2 cm x 10 cm (largura x comprimento) e altura aproximada de 1cm. A imprecisão na altura dos prismas das amostras comparadas é devida ao processo de moldagem ser por compressão¹⁷, uma vez que os materiais apresentam distintas resistências à compactação, o que torna um pouco variável esta dimensão para a mesma carga de compactação.

O tamanho adotado nas amostras dá-se pelo aproveitamento de um molde metálico existente no Laboratório de Ensaaios de Materiais e Estruturas da Universidade Federal da Paraíba (LABEME), que é utilizado para moldagem de corpos de prova prismáticos de argila através de compressão, seguindo o método de ensaios tecnológicos preconizados por Santos (1989, p.176).

Como os materiais se comportam de maneira diferente à compressão, decidiu-se por preencher o molde na sua totalidade (2 cm x 10 cm x 2 cm, largura x comprimento x profundidade) para que todas as amostras tenham um ponto de partida idêntico (Figura 29 a 31). Então, entre todos os materiais utilizados apenas os corpos de prova com terra crua sem adição de cimento Portland se conformaram com maior diferença dimensional.

Antes de iniciar o processo de moldagem, todos os materiais foram misturados e manualmente com espátula em recipiente plástico.

¹⁷ Exceto gesso que foi moldado por preenchimento em estado líquido.



Figura 29- Preenchimento do molde prismático

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 30- Compressão do material

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 31- Extração do corpo de prova

Fonte: Elaborado pelo autor

Vale ainda ressaltar que todas as amostras tiveram registradas individualmente suas respectivas massas, que foram feitas em balança com precisão de duas casas decimais. Este controle foi importante, tendo em vista que se adotou como indicador para avaliar a capacidade de absorção da umidade do ar pelos diferentes materiais a variação das respectivas massas. O percentual da variação da massa das amostras de mesmo material durante os testes foi calculado considerando uma média de seis resultados. A seguir é apresentado um quadro com a identificação das amostras utilizadas neste ensaio e suas respectivas imagens (Figuras 32 a 36).

	Material	Composição	Cura
1	Terra comprimida (TC)	Terra + água (9%)	Em condições naturais, ao ar em Laboratório
2	Terra comprimida estabilizada com cimento (TCEC)	Terra + cimento (10%) + água (11%)	7 dias em câmara úmida
3	Terra comprimida estabilizada com cimento mais pintura (TCEC+P)	Terra + cimento (10%) + água (11%) + pintura com tinta látex acrílica	7 dias em câmara úmida
4	Cerâmica Vermelha (CV)	Argila cozida	Cozida em estufa a 900 °C
5	Argamassa de cimento Portland (ACP)	Areia + cimento (20%) + água (12%)	14 dias em câmara úmida

Quadro 3 - Amostras e composições

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 32- Amostra de terra comprimida

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 33- Amostra de terra comprimida estabilizada com cimento Portland

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 34- Amostra de terra comprimida estabilizada com cimento Portland pintada com tinta látex acrílica

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 35- Amostra de cerâmica vermelha, cozida a 900 °C

Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 36- Amostra de argamassa de cimento Portland

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.3 Procedimento de ensaio em câmara climática

Ciclo 1 – as primeiras 12 horas a 80 % UR

Para iniciar o ensaio, 12 amostras de cada grupo de material foram secas em estufa a 105 °C, por 24 horas. Após secagem, estas amostras foram pesadas para o registro da massa seca inicial de cada corpo de prova e, novamente, recolocadas em estufa para mais 24 horas de secagem à mesma temperatura¹⁸. Ao fim da etapa de secagem, as amostras foram colocadas sobre bandejas (consiste em um quadro de madeira selada, de aproximadamente 18 cm x 27 cm, utilizada como moldura para a tela de nylon, com malha de 2 mm – Figura 37), que têm a finalidade de permitir o contato direto de todas as faces das amostras com as condições de umidade do ar, no interior da C-CLIMÁTICA.

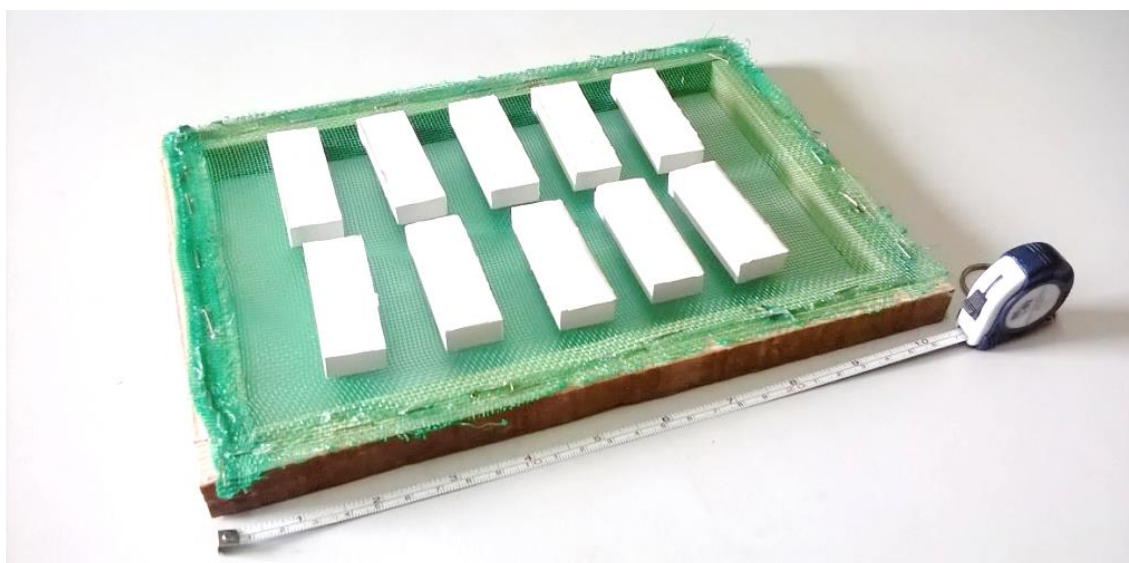


Figura 37 - Bandeja com tela de nylon com exemplificação da acomodação das amostras
Fonte: Elaborado pelo autor

As bandejas com as amostras foram inseridas na C-CLIMÁTICA, já estabilizada em 80 % UR, sendo iniciado o processo de medições (pesagem) por grupos de corpos de prova com materiais diferentes, a cada hora (intervalo de uma hora entre pesagens), fazendo-se os registros do incremento de suas massas. Este procedimento procurou verificar a variação da absorção de água pelas diferentes amostras.

¹⁸ Este procedimento se faz necessário, pois durante a pesagem de massa seca, as amostras podem absorver a umidade presente no ar alterando seus registros iniciais.

A verificação da massa das amostras foi feita após a remoção, ao mesmo tempo, de seis corpos de prova de cada material analisado (30 pesagens por cada horário) do interior da C-CLIMÁTICA com, imediata, colocação dos mesmos numa caixa de isopor de 22 litros mantida fechada (recipiente de transporte até a balança), até que cada um fosse pesado. Este procedimento teve por finalidade manter as mesmas condições de interação com o meio ambiente, durante o processo de pesagem para todas as amostras.

A pesagem de cada grupo de amostras foi feita, no máximo, em um minuto. O grupo de amostras a ser pesado foi colocado sobre papel toalha e coberto pelo mesmo para a remoção daquela água na superfície¹⁹. Após medição (registro da variação de massa para todos os materiais), com todos os corpos de prova recolocados na caixa de isopor de 22 litros (recipiente de transporte) todos eles retornaram para a C-CLIMÁTICA para a continuação do processo de absorção de água do ambiente com 80 % UR.

A cada procedimento de retirada e inserção das amostras na C-CLIMÁTICA, que foi de hora em hora, sua tampa foi sempre fechada imediatamente. As verificações do incremento das massas dos grupos de corpos de prova foram feitas até que se completasse um ciclo de 12 (doze) horas. Ao final deste procedimento, os outros seis corpos de prova, de cada material que permaneceram o tempo todo (12 horas) no interior da C-CLIMÁTICA, foram também retirados e feitos os registros de suas massas.

Ciclo 2 – as seguintes 12 horas a 30 % UR

De maneira inversa, para verificação da eliminação da água dos corpos de prova, quando os mesmos foram submetidos ao ambiente com baixa umidade relativa do ar, a C-CLIMÁTICA foi reconfigurada para manter constante em seu interior 30 % UR, imediatamente, após terminar o ciclo com umidade elevada (80 % UR).

Os corpos de prova (os mesmos doze de cada material, utilizados no ciclo anterior) foram mantidos dentro de C-CLIMÁTICA e, novamente, pesados (seis de cada grupo de corpo de prova com material diferente) a cada intervalo de uma

¹⁹ O procedimento de secagem foi feito com o máximo de cuidado para que o corpo de prova não perca material. Por ser de tamanho e massa muito baixos, qualquer desagregação de partículas pode alterar o valor da massa medida, comprometendo o registro da massa correta.

hora, para registro de suas massas nas 12 (doze) horas seguintes. Os mesmos controles adotados no ciclo anterior foram praticados nesta etapa, no que se refere ao transporte e às manipulações dos corpos de prova, durante o processo de pesagem e retorno à C-CLIMÁTICA. No final, mais uma vez, os seis corpos de prova de cada material que permaneceram o tempo todo (12 horas) no interior da C-CLIMÁTICA, foram também retirados e feitos os registros de suas massas.

A seleção das umidades relativas, 80 % UR e 30 % UR, utilizadas nos ensaios na C-CLIMÁTICA estão relacionadas ao conforto do ser humano conforme indicam Grandjean (1972 apud Minke, 2015) e Becker (1986 apud Minke, 2015). Segundo estes autores, a faixa de conforto e segurança para o ser humano em relação à umidade relativa do ar, está compreendida entre 40 % UR e 70 % UR. Portanto, no ensaio realizado em C-CLIMÁTICA, adotou-se uma faixa maior, +/- 10 % UR em relação aos dois limites, superior e inferior, para verificação do comportamento das amostras, uma vez que se pretende identificar como os materiais diferentes interagem com a umidade do ar do ambiente e qual o potencial dos mesmos na absorção/eliminação do vapor de água do/para o ar.

4.2 Projeto, produção e caracterização da resistência à compressão do BTCobogó-miniatura

O modelo utilizado nesta pesquisa foi proposto e desenvolvido por Ferreira (2015). Trata-se de um bloco com dimensões iguais a 25 cm x 25 cm x 9 cm (largura x comprimento x espessura), com todos os cantos chanfrados em 45°, vazado em seu centro na forma de um triângulo retângulo (vazio que corresponde a 13,52 % da área da superfície). Na Figura 3, pode-se ver o aspecto do elemento vazado (BTCobogó) e da composição de um pequeno de painel.

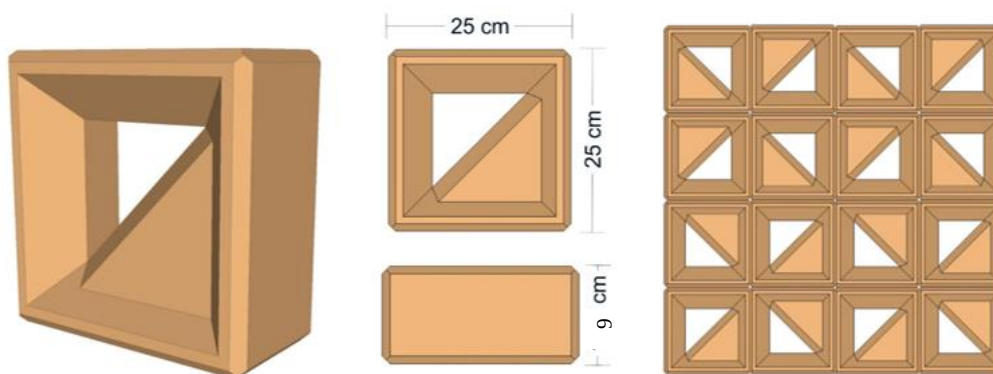


Figura 38- Elemento vazado proposto e composição do painel (na direita)
Fonte: Ferreira, 2015

Como matéria prima para manufatura deste elemento vazado em miniatura foi utilizada a mesma amostra de solo, livre de matéria orgânica, utilizada por Ferreira (2015). Na composição deste solo tem-se em torno de 60% de areia, 40 % de silte + argila. A verificação destas quantidades se deu por meio de ensaio de granulometria e sedimentação, de acordo com a norma DNER-ME (DNER, 1994), realizado no Laboratório de Solos do LABEME (Laboratório de Ensaio em Materiais e Estruturas – Figura 39).



Figura 39 – Ensaio de granulometria e sedimentação
Fonte: Ferreira, 2015

Resumo da Granulometria	
Pedregulho ($d > 2,00 \text{ mm}$)	0
Areia Grossa ($0,42 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$)	21
Areia Fina ($0,074 \text{ mm} < d \leq 0,42 \text{ mm}$)	39
Silte + Argila ($d \leq 0,074 \text{ mm}$)	40
Total	100
Areia Total (entre a Pen N° 10 e a N° 200)	60

Tabela 5- Composição granulométrica do solo
Fonte: Laboratório de solos – LABEME - UFPB

Para determinação das quantidades de argila e silte no solo utilizado, foi realizado o ensaio de sedimentação, também indicado na DNER-ME (DNER, 1994), no mesmo laboratório. Por meio deste, a amostra testada apresentou um teor de 14% de argila e 26% de silte, conforme indica-se no Gráfico.

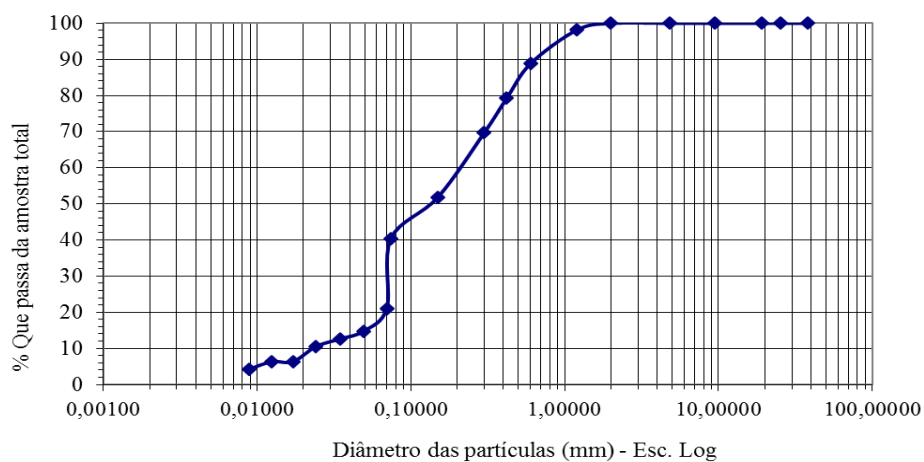


Figura 40- Curva granulométrica da terra analisada
Fonte: Ferreira (2015)

4.2.1 Miniaturização e produção do molde

Na pesquisa que precede a esta, Ferreira (2015) produziu o elemento vazado num molde de madeira colada e aparafusada em escala 1:1. Durante o levantamento orçamentário para a confecção deste molde em aço, verificou-se que seria necessário um alto consumo de material e recursos financeiros. Além disso, no programa experimental também há a necessidade da realização de ensaios em ambiente controlado, neste caso, dentro de um túnel de vento, para verificação das características higrotérmicas do ar, antes e depois de atravessar os painéis executados com BTCobogó. Estas duas constatações, certamente elevariam bastante os custos para viabilizar a pesquisa, caso se continuasse a pensar em fazer os ensaios em escala real.

A partir deste momento, tomou-se a decisão de trabalhar nesta pesquisa com a miniaturização do elemento vazado (BTCobogó). Como exposto anteriormente, Maurício (2005), Neto e Corrêa (2006), Moreira (2007), dentre outros, realizaram a redução de seus objetos de pesquisa (bloco cerâmico, canaleta cerâmica, bloco de concreto) a escalas de 1:3, 1:4 e 1:5, sem perda da correlação dos dados coletados com aqueles que os objetos apresentavam em suas escalas reais (1:1). Estas referências bibliográficas deram segurança na tomada de decisão para viabilizar a fabricação do BTCobogó com molde em aço, o que garantiu uma produção de elementos vazados na quantidade suficiente para executar os painéis a serem testados no túnel de vento.

Na intenção de se trabalhar com uma dimensão precisa (sem valores arredondados) do BTCobogó-miniatura decidiu-se reduzir a escala para 1:4. Esta escala permitiu a melhor precisão para as medidas do BTCobogó-miniatura (Figura 42), uma vez que todas as dimensões do mesmo elemento vazado, na escala 1:1, são divisíveis por 4.

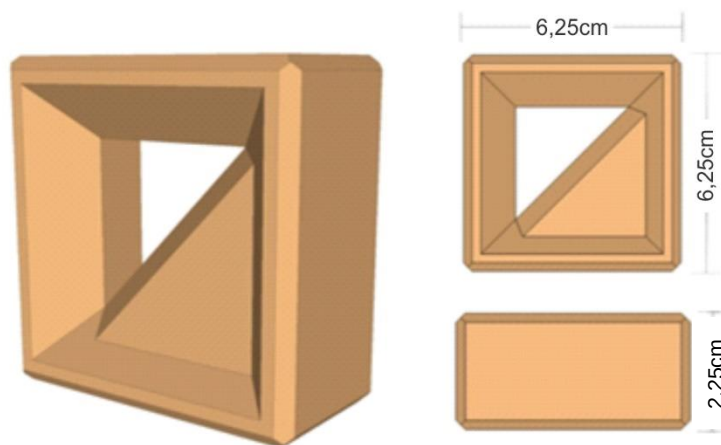


Figura 41- Elemento vazado reduzido – BTCobogó-miniatura
 Fonte: Ferreira, 2015. Adaptado pelo autor

Para a confecção do molde com capacidade de suportar o nível de compressão durante a moldagem, utilizou-se uma chapa de aço com 10 mm de espessura, a partir de aproveitamento de material proveniente de sucata.

O projeto do molde em aço para fabricação do BTCobogó-miniatura teve que ser ajustado para um processo que utiliza compressão simples para prensagem do material e auxílio na etapa de desmoldagem. A configuração do molde em aço, diferentemente da necessidade de cinco partes do modelo precursor em madeira (FERREIRA, 2015), passou a ser composto pelas seguintes partes: face superior, face inferior, negativo do vazado e camisa de contenção (Figuras 42 e 43). O trabalho de usinagem das 4 partes do molde em aço foi realizado na oficina mecânica do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba.

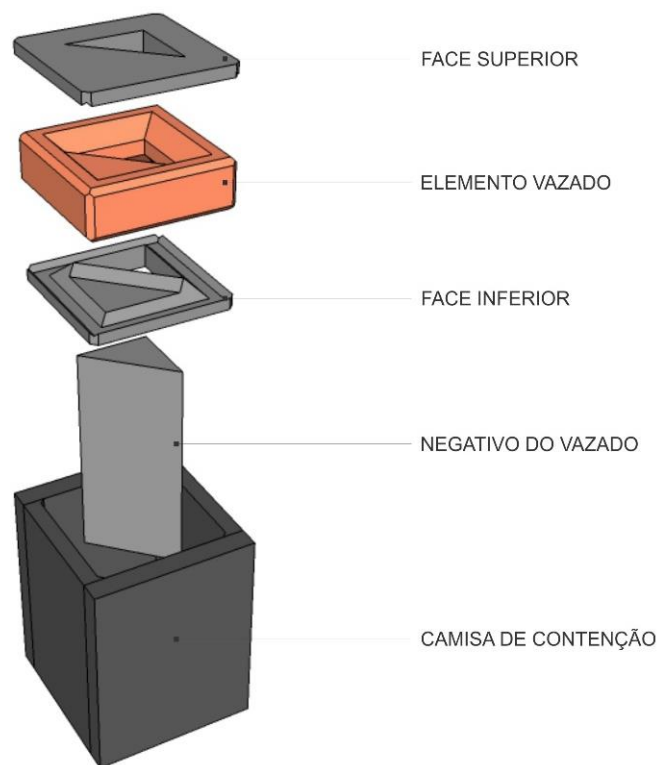


Figura 42– Partes do molde e sua relação com o elemento vazado
 Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 4338– Molde metálico antes da soldagem da camisa de contenção
 Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Manufatura do elemento vazado em miniatura

Para a realização dos ensaios de resistência a compressão e dos painéis para verificação da interação da umidade do ar com os painéis executados com

o material aplicado no elemento vazado, foram necessárias duzentas e setenta unidades de BTCobogó-miniaturas.

Os procedimentos de mistura dos materiais (solo, cimento Portland e água – Tabela 7) foram os mesmos adotados por Ferreira (2015). Como se trata do mesmo solo utilizado anteriormente, a estabilização com cimento Portland foi na mesma proporção em massa (10 %) acrescida à terra, porém a água necessária teve que ser ajustada para 11%, contra 10% do estudo de Ferreira (2015).

MATERIAL	PROPORÇÃO	PERCENTUAL
SOLO (amostra 3)	10 PARTES	100%
CIMENTO (Portland CII-Z32)	1 PARTE	10%
ÁGUA	1 PARTE	11%

Tabela 6- Composição do material

Fonte: Elaborado pelo autor

A boa homogeneização entre os materiais, antes de iniciar o processo de moldagem por prensagem do material no molde, seguiu a indicação da literatura consultada (AMORÓS ALBERO, 2000). O autor afirma que, para que a prensagem seja realizada de maneira ideal, duas características são necessárias: alta fluidez do material, para o preenchimento de todas as cavidades do molde e; elevada densidade de preenchimento, para que a quantidade de ar expelida na compactação seja reduzida.

No preparo da mistura, todos os torrões de terra foram desfeitos antes do acréscimo do estabilizante (cimento Portland). Em seguida, a mistura foi homogeneizada a seco, para que todas as partículas do cimento Portland se misturem bem com matriz de terra (sempre eliminando quaisquer torrões, que eventualmente apareçam).

Na sequência, inseriu-se o ativador, a água, que tem presença mínima na mistura, sendo necessária apenas para hidratar as partículas do cimento Portland e reativar as forças de ligação da argila. Como resultado, a mistura se apresentou visualmente e tátil como uma farofa úmida.

A compactação do material foi realizada por compressão uniaxial simples, ou seja, uma força foi aplicada num único sentido contra o material. Esta moldagem foi realizada numa prensa manual hidráulica com capacidade para 15

toneladas, com manômetro analógico que apresenta variação de escala de 0,5 toneladas.

O processo de moldagem consistiu no preenchimento do molde de aço, com a face inferior e o negativo do vazado dentro da camisa de contenção e, pela parte superior ainda aberta, foi colocado o material (terra crua, cimento Portland e água) previamente preparado. Após o preenchimento do molde foi colocada a face superior, encaixando-a entre a camisa de contenção e o negativo do vazado, conforme a sequência das imagens nas Figuras 44, 45 e 46.



Figura 44– Preenchimento do molde

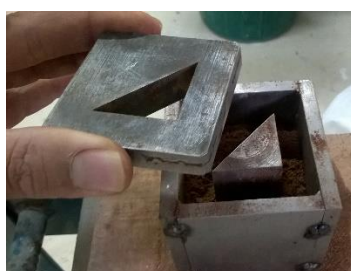


Figura 45– Fechamento do molde



Figura 4639– Ajuste da face superior no interior do molde

Fonte: Elaborado pelo autor

A quantidade de material a preencher o vazio do molde foi definida por tentativas e experimentação. Por exemplo, parte-se de uma quantidade de material que é pesada e inserida no molde e, posteriormente, se faz a prensagem com a força predefinida no cálculo (ver a seguir). Ao retirar a peça do molde verifica-se sua espessura e, caso seja superior ao desejado, na próxima moldagem utiliza-se menos material. Caso contrário, quando a espessura é inferior à desejada, acrescenta-se material na próxima moldagem. A partir das tentativas iniciais, determinou-se que aproximadamente 115 g da mistura homogeneizada (terra + cimento Portland + água) era suficiente para resultar BTCobogó-miniatura com 2,25 cm de espessura, que é o valor desejado.

Para prensar o material, foi necessário fazer uma verificação da força a ser imposta ao molde para a compactação desejada. Assim como no trabalho que antecede a este (FERREIRA, 2015), a força de compressão utilizada é a mesma imposta nos blocos de terra crua comprimida e estabilizada com cimento Portland do tipo Mattone, 20 kgf/cm². Dessa forma, a partir dos cálculos a seguir, aplicados para as dimensões do BTCobogó-miniatura foi estabelecida a força de prensagem igual a 700 kg:

$AL = \text{área líquida}^{20}$

Pressão adotada (prensa Mattone) = 2 MPa $\approx$ 20 kgf/cm²

$AL = \text{área superficial do elemento} - \text{área do vazio do elemento}$

$AL = (6,25 \text{ cm} \times 6,25 \text{ cm}) - [(3,125 \text{ cm} \times 3,125 \text{ cm})/2] \approx 34,18 \text{ cm}^2$

Força = $34,18 \text{ cm}^2 \times 20 = 683,60 \text{ kg}$

Força utilizada na prensa $\approx$ 700 kg

O processo de moldagem do BTCobogó-miniatura com o molde de aço é semelhante ao descrito em Ferreira (2015), porém dada as dimensões reduzidas, o trabalho realizado se tornou muito mais simples, menos custoso e com menos esforço físico, ou seja, viabilizou a moldagem da quantidade de BTCobogó-miniatura, inclusive com outro material, a cerâmica vermelha que posteriormente foi cozida em mufla a 900 °C. Nas Figuras 48 a 51, são mostradas as imagens das etapas de aplicação da prensagem do material no interior do molde de aço até a extração do elemento moldado, neste caso o BTCobogó-miniatura com terra crua comprimida e estabilizada com cimento Portland.



Figura 47– Compressão do conteúdo pressionando a face superior



Figura 48– Molde virado com a face superior para baixo e extração do negativo do vazado



Figura 49– Extração da camisa de contenção.

Fonte: Elaborado pelo autor

²⁰ Área da superfície do bloco que receberá compressão direta na compactação.

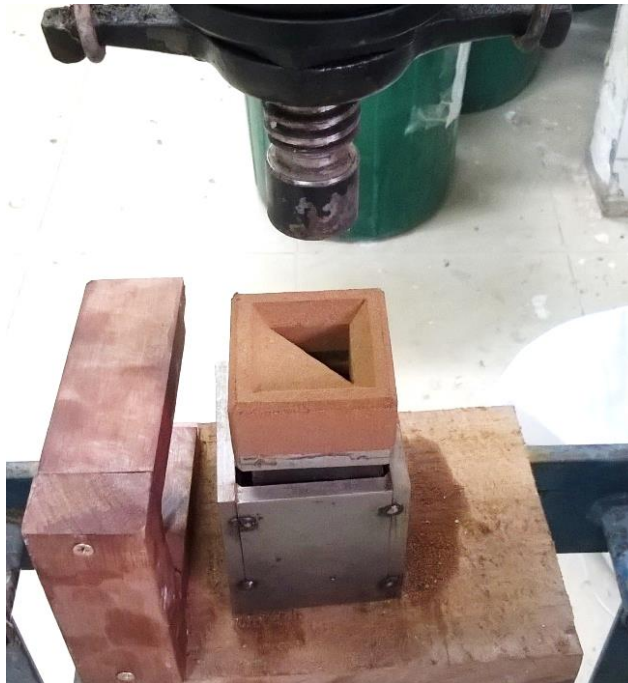


Figura 50- Resultado da moldagem
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.3 Ensaio para avaliação de resistência à compressão

Para avaliar a resistência à compressão dos BTCobogó-miniatura com terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland foi utilizada como referência a NBR 12118 (ABNT, 2013). O resultado das moldagens destes BTCobogós-miniaturas foram elementos com faces paralelas e perfeitamente acabadas, o que eliminou a necessidade de se realizar o capeamento de regularização das superfícies em contato com as placas da prensa hidráulica, conforme recomendado por esta norma.

Para avaliar o ganho de resistência à compressão que o BTCobogó-miniatura a partir da estabilização com cimento Portland, decidiu-se moldar, ensaiar e comparar os resultados com os mesmos elementos vazados moldados com duas composições diferentes: alguns blocos apenas com terra comprimida e outros com terra crua comprimida e estabilizada com cimento Portland. Para tais amostras consideram-se também dois processos de cura diferentes: para os BTCobogós-miniaturas que possuem cimento Portland como estabilizante, a cura foi em câmara úmida por 28 dias e; para aqueles que não possuem estabilizante, a cura foi ao ar por 7 dias. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados sempre após cada período de cura (Figura 51)



Figura 51 - Ensaio de resistência à compressão
Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Confeção do túnel de vento para avaliação de painéis com elementos vazados

A partir do ensaio realizado em C-CLIMÁTICA, conforme descrito anteriormente, foi possível verificar comparativamente a absorção/eliminação da umidade do ar pelos seis diferentes materiais testados. Contudo, naquele ensaio realizado, os corpos de prova absorveram ou eliminaram vapor d'água do ou para o ambiente onde estavam inseridos de forma “passiva”, ou seja, as amostras estavam em ambiente controlado, onde a percepção da água absorvida/eliminada pelos/dos corpos de prova estava, praticamente, sob efeito exclusivo do vapor de água no ambiente interno C-CLIMÁTICA, que foi controlado para ciclos com umidades constantes (ora com 80% UR, ora com 30 % UR).

No ensaio que se descreve a seguir, a ideia foi utilizar um túnel de vento, tendo como referência aquele proposto por Moreira Júnior (2009), no qual algumas de suas características são: circuito aberto, baixo custo e dimensões reduzidas. A estratégia adotada para se trabalhar com dimensões reduzidas para o BTCobogó-miniatura combina-se perfeitamente com a utilização deste túnel de vento, no sentido de viabilizar a realização dos ensaios com painéis executados com os BTCobogós-miniaturas. O autor supracitado utilizou o túnel de vento desenvolvido (Figura 52) para estudar a tecnologia de aplicação de agrotóxicos por pulverização.

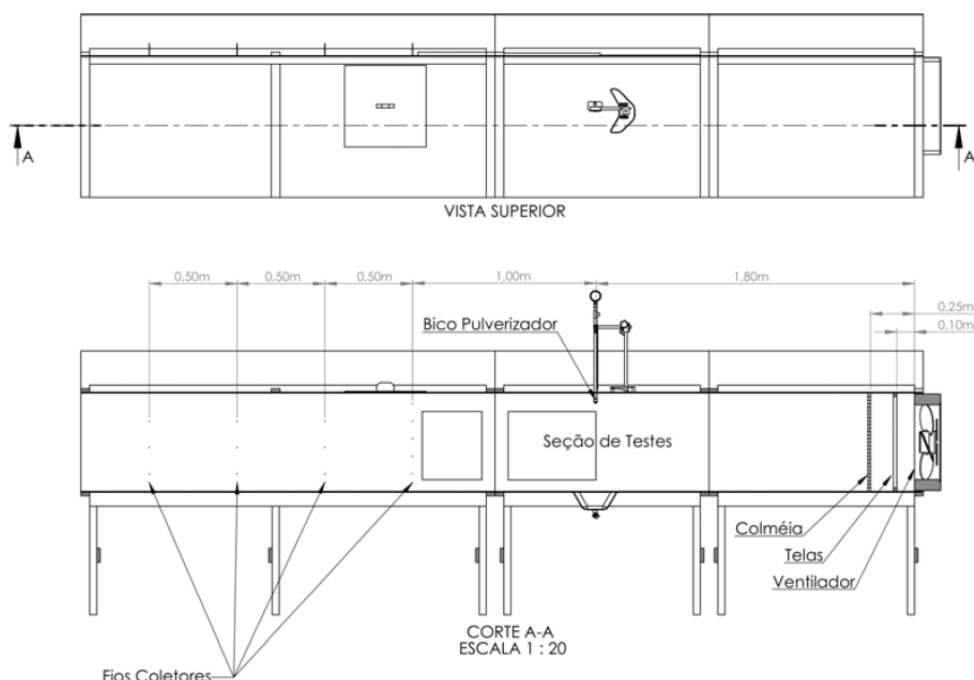


Figura 402 - Projeto do túnel de vento desenvolvido para estudos de tecnologia de aplicação de agrotóxicos por pulverização
 Fonte: Moreira Júnior, 2009 p.50

Na presente pesquisa, o aparato proposto por Moreira Júnior (2009) foi confeccionado e adaptado para ser utilizado na verificação da contribuição dos painéis de BTCobogó-miniatura, manufaturados com dois tipos de materiais (BTCEC e CV), no condicionamento do ar do espaço posterior aos mesmos, o que representa, em hipótese dos painéis aplicados na fachada, o ambiente interior de uma edificação.

A proposta deste procedimento foi aplicar sobre os painéis duas correntes de ar condicionadas de forma distintas, a saber: uma delas com a umidade relativa do ar elevada e menor temperatura do ar e; outra com a umidade relativa do ar reduzida e maior temperatura do mesmo. Para as medições, foram instalados dois hobs com *data logger* (termohigrômetros com capacidade de armazenar as leituras realizadas – Mod Onset UX100-003), um antes e outro depois da posição dos painéis ensaiados.

Para tanto, o projeto proposto por Moreira Júnior (2009) recebeu a adição de uma seção na tomada de ar do túnel de vento (Figura 53) onde, além do ventilador, foi instalada uma tela metálica que é aquecida por lâmpadas e resistências (seis lâmpadas incandescentes de 100 W cada, uma lâmpada halógena palito de 500 W, uma resistência elétrica do tipo U de 300 W e duas resistências do tipo mola de 200 W cada), para a diminuição da umidade relativa

do ar interno. Nesta mesma seção, foram instalados dois umidificadores de ar ultrassônicos (Figura 54), do tipo doméstico, com capacidade para 3 litros de água cada, que foi utilizado para os momentos dos ciclos, nos quais havia necessidade de aumentar a quantidade de partículas de água da corrente de ar na entrada no túnel de vento.

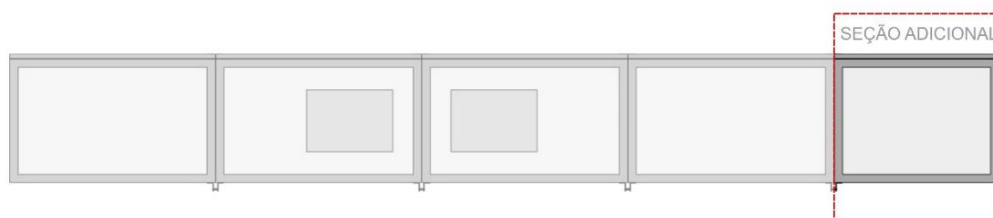


Figura 53 – Vista lateral do túnel de vento com destaque para a seção adicional
Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 54 – Modelo de umidificador de ar ultrassônico utilizado
Fonte: Glicomed²¹

Vale ressaltar que, apesar do aparato utilizado (túnel de vento) ter sido aferido por seu proponente e constatada sua eficiência, a proposta da pesquisa que se apresenta aqui não é verificar o comportamento dinâmico do fluido nem as implicações disso sobre os painéis. O uso do túnel de vento nesta pesquisa se limita a controlar o ar que chega às amostras de forma que todas recebam o fluido com as características mais parecidas possíveis, o que seria praticamente

²¹ Disponível em: <http://www.glicomed.com.br/?product=umidificador-ultrasonico-allergy-free-dual-g-tech>. Acesso em 20 de dezembro de 2016

inviável controlar em condições naturais, a partir da captação dos ventos em ambiente externo.

Confecção do túnel de vento

Assim como Moreira Júnior (2009), foram utilizados para confecção do túnel de vento desta pesquisa painéis de compensado apoiados numa armação estrutural com sarrafos de madeira. Os painéis de compensado utilizados foram com quatro milímetros de espessura, facilmente encontrados no comércio local, os quais foram impermeabilizados com aplicação de *Stain*, um tipo de selador para madeira. A área de seção interna do túnel de vento manteve-se com dimensões iguais a 56 cm x 56 cm (Figura 55).



Figura 55 - Painel de compensado cortado e posteriormente impermeabilizado com aplicação de *Stain* (imagem esquerda) e seções preparadas antes da montagem do túnel de vento (imagem direita).

Fonte: Elaborado pelo autor

Outra característica peculiar ao túnel de vento confeccionado é devida à adição de uma camada isolante de ar, confinada entre dois painéis de compensado na montagem das seções. Isto foi feito, por meio da instalação de uma segunda camada de painel de compensado (4 mm), deixando um colchão de ar interno entre elas, com o propósito de dificultar a influência do clima externo no interior do túnel vento. O túnel de vento, depois de finalizado, foi instalado no interior de uma sala, como se ver na Figura 56.

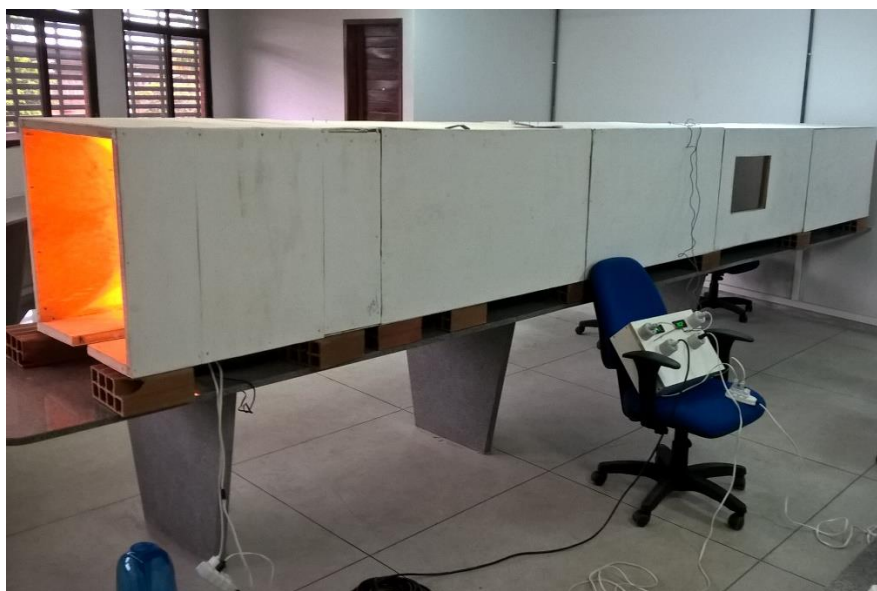


Figura 56 - Sessões do túnel de vento finalizadas, instalado no interior de uma sala
Fonte: Elaborado pelo autor

O túnel de vento é composto por cinco seções pré-fabricadas, o que torna o aparato facilmente remanejado e transportado para lugares diferentes, além de simplificar o acesso ao seu interior. Das cinco sessões, quatro possuem o mesmo comprimento (100 cm) e uma (aquela adicional) tem o comprimento menor (0,80 cm), mas todas têm a mesma área de secção interna, 56 cm x 56 cm (Figura 57).

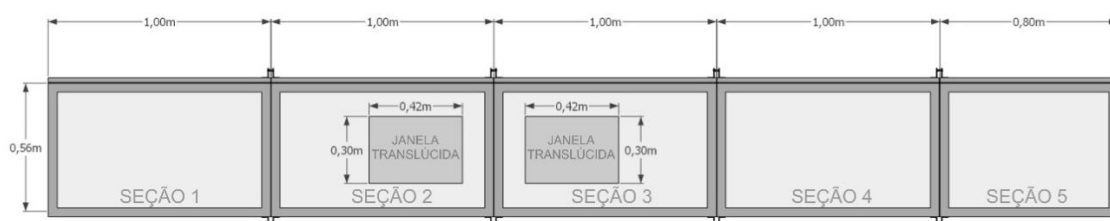


Figura 57 - Dimensões externas do túnel de vento montado
Fonte: Elaborado pelo autor

Neste túnel, em duas de suas seções (seções 2 e 3) foram abertas pequenas janelas, nas quais foram instaladas placas de policarbonato translúcido, que servem para a visualização do interior do túnel, durante o ensaio. Tais janelas possibilitam a visualização do painel executado com BTCobogó-miniatura, que fica sempre posicionado entre as seções 2 e 3. Nas seções 2 e 3 estão também instalados os Hobos para registros, em tempo real do ensaio, da umidade relativa e temperatura do ar, sendo cada um deles

distando trinta centímetros das faces dos painéis, um antes (na seção 3) e o outro depois (na seção 2), tomando como referência a direção que o ar flui pelo túnel.

Os painéis vazados, executados com BTCobogós-miniaturas apenas encaixados entre eles, foram sempre instalados numa moldura de madeira impermeabilizada, de modo a completar totalmente a área da seção do túnel de vento (Figura 58). Uma tela de nylon com grande abertura foi utilizada para garantir o posicionamento e equilíbrio entre os BTCobogós-miniaturas na montagem do painel. Durante cada ensaio, o painel foi posicionado a uma distância igual a dois metros (entre as sessões 2 e 3) do plano da hélice do ventilador, que foi instalado entre as seções quatro e cinco. A união apenas por encaixe entre os BTCobogós-miniaturas na montagem dos painéis, no presente estudo elimina da análise a participação de qualquer outro material, que seria utilizado como junta entre os elementos (por exemplo, a argamassa colante) e que poderia interferir no condicionamento do ar que atravessasse o painel.



Figura 418 – Painel com BTCobogós-miniaturas instalado na sessão do túnel

Fonte: Elaborado pelo autor

O ventilador (diâmetro de hélice igual a 40 cm) utilizado no experimento possui potência igual a 126 W e vazão, declarada pelo fabricante, igual a 1.160 m³/h. No ato da aquisição, o ventilador teve sua velocidade de vento propulsado verificada por um anemômetro de fio quente, o que foi determinante na escolha

do modelo, entre os disponíveis no mercado, uma vez que foi necessário verificar qual o modelo conseguiria fornecer o vento necessário para simular uma corrente de ar natural. Durante o experimento no túnel de vento, o ventilador foi plugado em um potenciômetro de 500 W (do tipo *dimmer*) para permitir um ajuste mais preciso da velocidade do vento desejada.

Para vedar melhor as junções entre as sessões do túnel, foi colada na borda contornando cada sessão uma faixa (3 cm) de material flexível, do tipo de borracha (manta de EVA). Tal material colocado nas juntas, além de vedar diminui a vibração do ventilador na estrutura do túnel de vento.

Logo após o ventilador, no sentido do percurso do vento captado, foi instalada uma moldura de madeira, medindo 56 cm x 56 cm x 3 cm (largura x comprimento e espessura), sendo um dos seus lados com tela de nylon de malha 2 mm e, no outro, com tela metálica de malha 5 mm, distando 10 cm do plano da hélice do ventilador. Segundo Moreira Júnior (2009) estas telas tem por finalidade quebrar os vórtices no vento formados pelas pás da hélice do ventilador.

Na sequência, é instalada uma colmeia correspondente à seção do túnel (56 cm X 56 cm), composta por tubos metálicos (metalon) com seção quadrada de 2 cm de aresta por 10 cm de profundidade, soldados uns aos outros. Esta colmeia foi posicionada a 15 cm da moldura descrita anteriormente (telas de nylon e metálica), no sentido ventilador-amostra e sua função (MOREIRA JÚNIOR, 2009) é direcionar o escoamento do ar deixando-o laminar. O interesse na laminação do ar está atrelado ao fornecimento de ar uniforme sobre a amostra-painel a ser analisada.

Na entrada do túnel de vento, foram instaladas lâmpadas (halógenas e incandescentes) e resistências elétricas, cuja função é fornecer calor para a moldura de madeira com tela metálica e, por meio deste mecanismo, tem-se a redução da umidade relativa do ar e elevação de sua temperatura. O controle do fornecimento de calor através deste mecanismo foi feito por uma unidade controladora de temperatura e umidade (Ageon K103 Pid-u) ligada a um temporizador eletrônico digital de tomada (capacidade 2000 W / 220V), conforme visto na Figura 59.



Figura 59 - Temporizador digital de tomada
Fonte: Elaborado pelo autor

De maneira inversa, pode-se aumentar a umidade relativa do ar no interior do túnel de vento, inserindo-se vapor de água. Para isso, foram utilizados no experimento dois umidificadores de ar ultrassônicos, do tipo doméstico, com capacidade para 3 litros de água armazenada para cada um deles. O ajuste da intensidade de névoa fornecida pelo aparelho é feito por um botão de giro com gradação fina, sem intervalo de valores pré-definidos. O controle dos umidificadores também foi realizado por um controlador Agen K103 Pid-u, conectado a um temporizador de tomada.

Na Figura 60, é mostrada a vista frontal, com a configuração do painel de controle do túnel de vento. Nele estão dispostos dois temporizadores de tomada, dois controladores de umidade do ar e suas respectivas tomadas para instalação de resistências e lâmpadas ou umidificadores.



Figura 60 - Painel de controle do túnel de vento
Fonte: Elaborado pelo autor

Os umidificadores foram colocados acima do túnel de vento e, por meio de um duto (sifão plástico), a névoa foi projetada para dentro do túnel de vento. A entrada das partículas de água no túnel se dá na seção 5 do mesmo, junto a hélice do ventilador. Nas Figuras 61 e 62, têm-se um desenho esquemático do túnel de vento com as paredes laterais removidas para facilitar a visualização da configuração interna do mesmo.

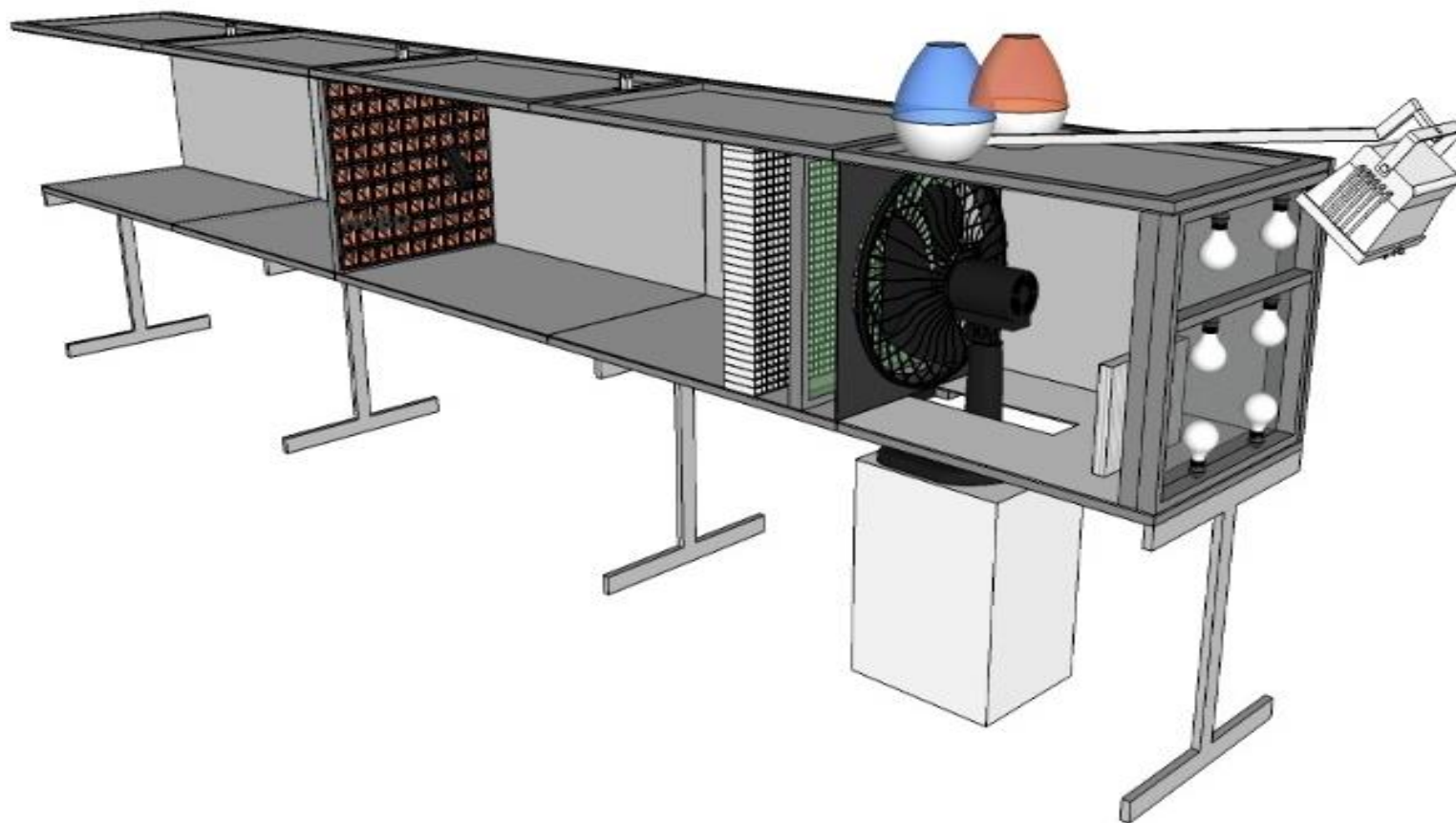


Figura 61 – Vista em 3D do túnel de vento, com as paredes laterais removidas para melhor visualização das partes internas
Fonte: Elaborado pelo autor

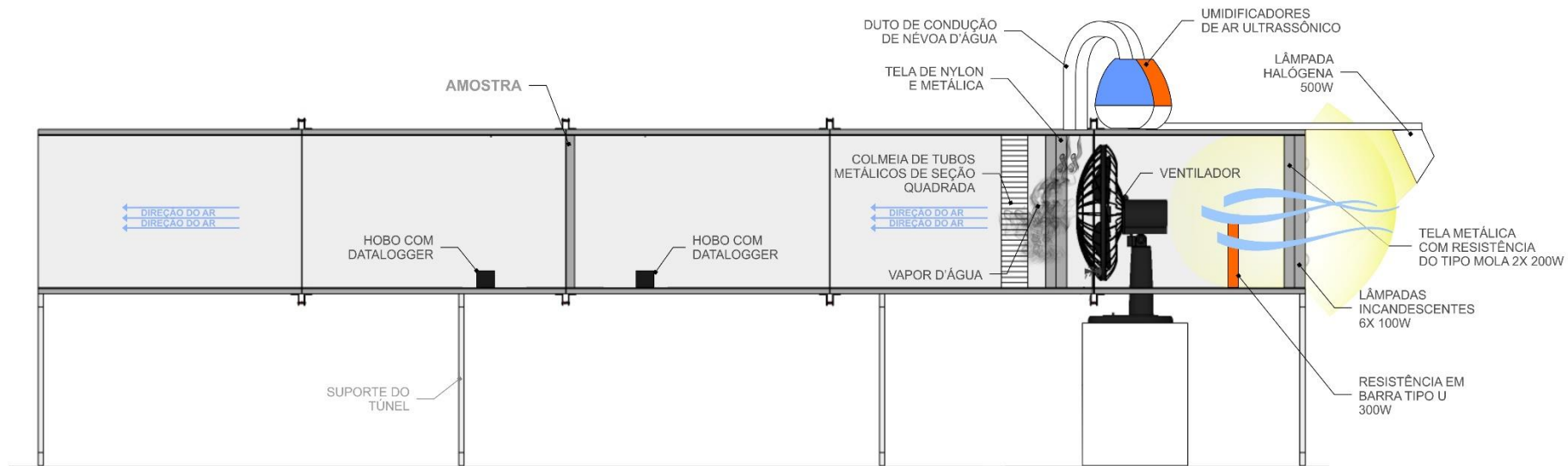


Figura 62 – Vista esquemática em corte do túnel de vento com a localização de todas as partes internas
 Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Capacidade de painéis com camadas de BTCobogós-miniaturas na modificação da umidade e temperatura do ar

Para o estudo comparativo da capacidade de condicionamento do ambiente interno de uma edificação por meio do elemento vazado proposto neste trabalho com terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland, optou-se pela medição da umidade (e consequente temperatura), antes e depois de painéis executados com BTCobogós-miniaturas (elementos vazados), manufaturados com dois diferentes materiais, dentro do túnel de vento confeccionado. Estes painéis, com dimensões correspondentes à seção do túnel de vento (56 cm x 56 cm), foram compostos por elementos vazados com geometria idêntica, visto que foi utilizado o mesmo molde metálico para a produção destes elementos, em escala 1:4, com materiais diferentes, a saber: terra crua comprimida e estabilizada com cimento Portland (BTCobogó) e cerâmica vermelha (CV), cozida a 900 °C. A composição entre os materiais para a produção dos elementos foram os mesmos utilizados na avaliação dos prismas em C-CLIMÁTICA.

O mesmo procedimento de moldagem descrito para a produção dos elementos com terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland se aplica aos elementos com cerâmica vermelha, porém com ajuste na etapa de compactação que foi com carga de cerca de 5 toneladas, o que significa uma pressão de aproximadamente 146 kg/cm². Tal carga mais elevada foi necessária para manter coeso o material (argila), que neste caso foi compactado em estado seco, com pouca água na mistura. Isto é bem diferente do processo de moldagem de elementos cerâmicos tradicionais por extrusão, que utiliza a argila em estado plástico.

4.4.1- Procedimento de ensaio em túnel de vento

Inicialmente, é importante lembrar que o estudo procura verificar a capacidade do elemento vazado de terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland (BTCobogó) em diminuir as amplitudes higrotérmicas no interior das edificações. No caso local (Estado da Paraíba), o problema das

grandes amplitudes de temperatura e umidade relativa do ar é frequentemente enfrentado em regiões de clima quente e seco, notadamente na região do Cariri e, principalmente, no Sertão que estão inseridas na região do Semiárido do Nordeste do Brasil.

A partir do contexto geográfico descrito, a configuração da velocidade do ar no túnel de vento durante os ensaios foi ajustada, tendo como referência os dados coletados na cidade de Sumé/PB, situada no Cariri paraibano, onde a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) possui uma estação meteorológica. Os dados utilizados para esta pesquisa correspondem a um período de tempo entre os dias 01 de maio de 2013 e 25 de janeiro de 2016.

Adicionalmente aos dados coletados em Sumé/PB (estação meteorológica da UFCG), foram pesquisados os mesmos dados para a cidade de Patos/PB, sertão da Paraíba, por consulta ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), inclusive para o mesmo período dos registros obtidos para Sumé/PB.

A variação entre as médias da velocidade do vento foi pequena entre os dados obtidos para Sumé/PB e Patos/PB, apenas 0,25 m/s. Então, pela maior precisão dos dados obtidos na cidade de Sumé/PB, cujos registros são feitos de hora em hora (Tabela 7), fez-se a opção por utilizar estes para configurar a velocidade do ventilador no túnel de vento. A média diária da velocidade do vento utilizada foi igual a 3,4 m/s.

Médias horárias	Temperatura (° C)	Umidade Relativa (%)	Velocidade do Vento (m/s)
0:00	24,90	68,35	4,18
1:00	23,92	72,31	4,10
2:00	23,16	75,04	3,51
3:00	22,52	77,43	3,21
4:00	21,97	79,47	2,86
5:00	21,51	81,18	2,56
6:00	21,12	82,64	2,33
7:00	20,77	84,04	2,10
8:00	20,46	85,27	1,94
9:00	20,30	84,69	1,79
10:00	21,48	77,30	2,43
11:00	23,26	68,47	3,56
12:00	25,02	60,65	3,89
13:00	26,64	54,34	3,95
14:00	28,13	49,03	3,93
15:00	29,40	44,79	3,80
16:00	30,38	41,89	3,68
17:00	31,03	39,96	3,67
18:00	31,27	39,75	4,04
19:00	30,63	42,62	3,74
20:00	30,26	44,44	3,60
21:00	28,80	50,24	3,96
22:00	27,44	56,57	4,91
23:00	26,12	63,05	4,87
média	25,4	63,5	3,44

Tabela 7 - Média horária da velocidade do ar em Sumé/PB para uma média diária
Fonte: Elaborado pelo autor

Para a escolha da faixa de umidade relativa do ar no interior do túnel de vento, este estudo adotou como ponto de partida os valores de conforto humano (entre 40 % e 70 %) preconizadas por Grandjean (1972 *apud* Minke, 2015) e Becker (1986 *apud* Minke, 2015). Visando uma maior amplitude para melhor observação dos resultados, foram configuradas as umidades relativa do ar igual a 30 % UR, para a simulação com baixa UR, aquela que deixa o ambiente extremamente seco e, igual a 80 % UR, para a simulação com alta UR, valor este que já se manifesta também como negativo caso a ventilação não seja adequada. Note-se que os valores para baixa e alta umidade relativa do ar, definidos para utilização nos experimentos, tanto na C-CLIMÁTICA descrito anteriormente quanto no túnel de vento, estão +/- 10 %, em relação aos limites superior e inferior dos valores de UR, definidos como sendo mínimo (40 % UR) e máximo (70 % UR) para o conforto humano.

Cabe destacar que como se trata de um experimento que utiliza um aparato de baixo custo para fazer as verificações, não é possível fazer o controle

separado das condições de temperatura. Sendo assim, os ensaios priorizam a umidade relativa do ar nas configurações dos procedimentos, deixando a temperatura como consequência do condicionamento higrométrico no interior do túnel de vento.

Cabe ainda ressaltar que o experimento com o túnel de vento foi realizado em ambiente fechado e controlado por ar condicionado, uma vez que o aparato confeccionado não conseguiu eliminar toda a umidade do ar presente em seu interior, quando foi tentado o ensaio em ambiente aberto, visto que a cidade na qual a pesquisa foi realizada (João Pessoa/PB) tem o clima quente e úmido. Por isso o túnel de vento foi instalado em uma sala fechada (Figura 63), com área e volume iguais a 58,63 m² e 140,71 m³, respectivamente, que foi climatizada por um aparelho de ar condicionado de 22.000 BTUs. Este aparelho de ar condicionado foi de extrema importância para o experimento, visto que só assim o ambiente perdeu o excesso de umidade, permitindo que os ensaios em túnel de vento, quando da simulação em baixa UR, pudessem ser viabilizados em conformidade com suas configurações.

posicionados, inicia-se o ensaio com o acionamento do ventilador (já regulado com a velocidade igual a 3,4 m/s) e com o controlador configurado para regular a umidade relativa do ar interna a 30 %. Conforme explicitado, a partir do controlador acionam-se as lâmpadas e resistências para o aquecimento da região da tomada de ar pelo túnel de vento, o qual se mantém nessas condições por doze horas (período configurado no temporizador conectado na tomada elétrica). Este procedimento simula a parte do ciclo com baixa umidade do ar (30 %) no interior do túnel de vento.

Ao se completar o ciclo inicial, com 12 horas, com baixa umidade do ar (30 %), um temporizador desliga o controlador de aquecimento do ar na entrada do túnel de vento e, instantaneamente, outro temporizador liga o outro controlador, o qual está configurado para manter a umidade do ar interna em aproximadamente 80 %, o que é conseguido pelo acionamento dos dois umidificadores de ar ultrassônicos. Esta configuração mantém o interior do túnel de vento com a umidade relativa do ar elevada (80 %) pelas 12 horas seguintes, completando o ciclo de 24 horas.

Em síntese, os ciclos completos são compostos por duas partes com 12 horas para cada, um com umidade do ar baixa (30 %) e outro com umidade do ar alta (80 %), simulando as oscilações que normalmente ocorrem ao longo do período de 24 horas nas situações reais nas edificações.

Durante os períodos com baixa e alta umidade do ar no interior do túnel de vento, os Hobos permanecem fazendo registros em intervalos de quinze minutos, ao longo de todos os ciclos de 24 horas, que se repetem por 4 dias seguidos. Esta continuidade do ensaio, com ciclos contínuos e sequenciados com baixa e alta umidade relativa do ar, é necessária para que os dois materiais presentes nas amostras possam ser testados nas suas interações com as condições micro climáticas impostas, simulando com mais realismo uma situação natural, quando os materiais utilizados nas edificações são expostos à influência das condições climáticas locais.

No intervalo entre o mesmo procedimento aplicado para as duas amostras de painéis vazados (cerâmica vermelha e terra crua comprimida e estabilizada com cimento Portland), os *Hobos* tem os dados coletados referentes ao registro de 4 dias de ensaios para limpar o espaço de armazenamento de dados,

evitando-se eventuais problemas de interrupção da coletas de dados por falta de espaço na memória.

Etapa 2 - comparação entre painéis com BTCobogós em camadas sobrepostas

Encerrados os ensaios no túnel de vento com as amostras em painéis vazados com os dois diferentes materiais, a amostra com painel composto apenas por elementos vazados de terra crua comprimida e estabilizada com cimento Portland (BTCobogós-miniaturas) passa a ser avaliado com a sobreposição de até 4 camadas. Inicialmente, um segundo painel com BTCobogós-miniaturas foi instalado na face posterior ao painel já avaliado anteriormente, de maneira a ficarem sem espaço entre eles (Figura 64). Os painéis adicionados sempre têm todos os seus elementos colocados na posição inversa aos que estão no painel imediatamente anterior (Figura 5). Com esta configuração cria-se uma pequena câmara entre os corpos dos elementos dos painéis, aumentando-se a superfície de material pela qual o ar terá que percorrer.

Os ciclos no túnel de ventos para esta nova etapa de análise foram configurados com os mesmos parâmetros anteriores. No final desta etapa de avaliação foi ensaiado um painel com quatro camadas de BTCobogós-miniaturas, cuja configuração em multicamadas teve por finalidade verificar o incremento que haveria no condicionamento do ar por meio do aumento do contato deste com a superfície do material utilizado no elemento vazado. A expectativa é aproveitar-se do conhecimento, consagrado na literatura, sobre o comportamento creditado às paredes com blocos de terra crua (paredes que respiram), quando elas interagem bem com os ambientes internos nas edificações, podendo auxiliar na regulação da temperatura e umidade relativa do ar ambiente.

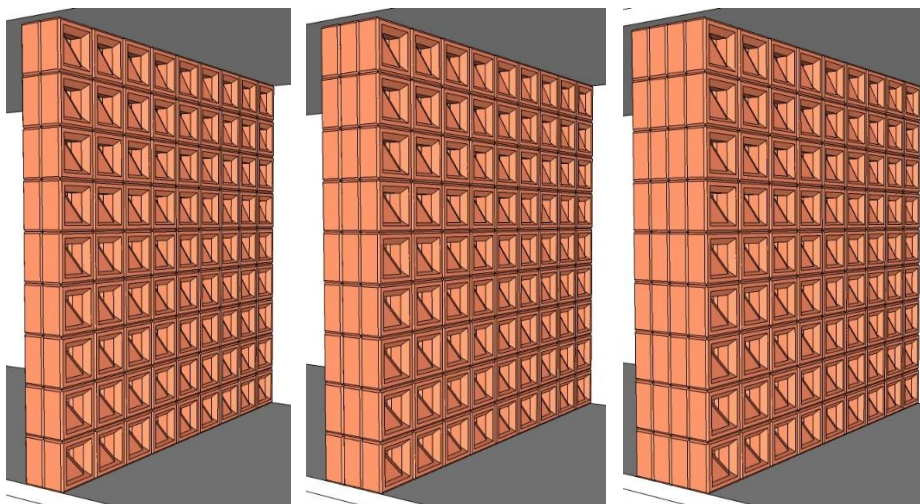


Figura 64 - Adição de camadas de painéis
Fonte: Elaborado pelo autor

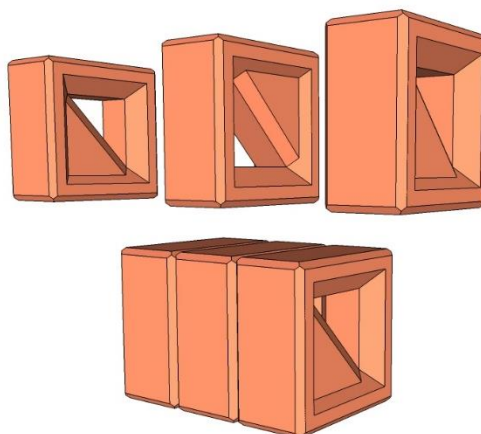


Figura 65 - Elementos dos painéis invertidos em relação ao plano anterior
Fonte: Elaborado pelo autor

As análises dos resultados dos ensaios realizados em túnel de vento foram realizadas individualmente com cada amostra de painel ensaiado. Contudo, para cada amostra ensaiada foram criados dados globais que, somente após suas consolidações, foram feitas comparações entre as diferentes amostras. A seguir, descreve-se como foram analisados os dados coletados.

Os gráficos gerados a partir do ensaio em túnel de vento correspondem a 4 dias ininterruptos de aquisição de dados, o que gerou cerca de 96 horas de registros. De posse desses dados, foi selecionado o segmento de ciclo mais próximo do final das leituras feitas para cada amostra, tomando como base a sequência das 12 horas com alta umidade do ar, seguida das 12 horas com baixa umidade do ar. Este passou a ser o ciclo de ensaio que foi o selecionado (Figura

66), considerando que para este período de experimento o material deve estar adaptado às condições do micro clima, controlado no interior do túnel de vento.

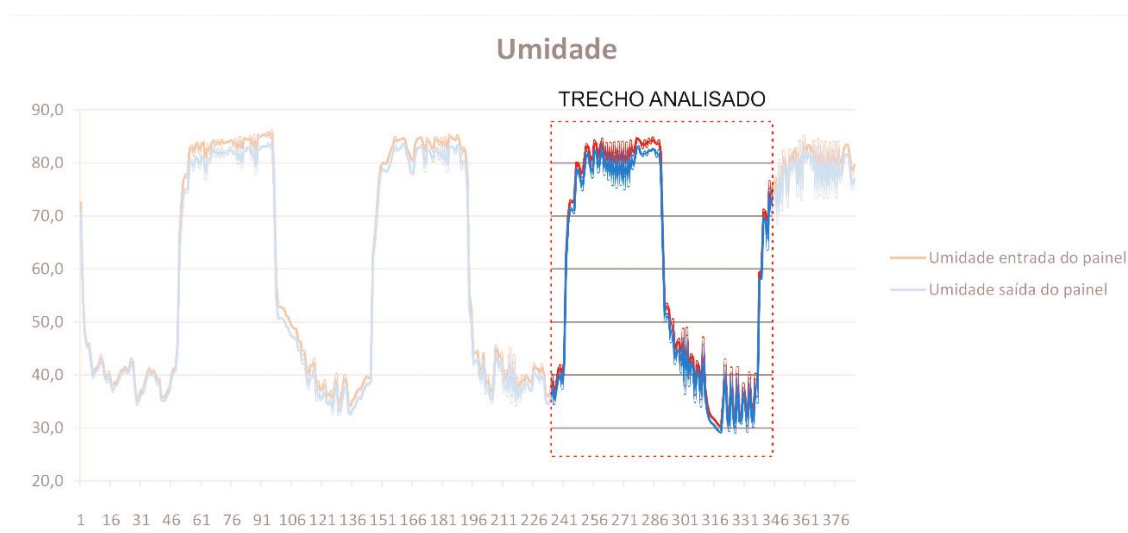


Figura 42 - Exemplo de gráfico com os dados da umidade relativa do ar registrados nos ensaios em túnel de vento com destaque para o recorte a ser analisado

Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo em vista a localização do painel no interior do túnel de vento, entre as seções 3 e 2, para melhor compreensão da legenda neste gráfico (Figura 66), as umidades de entrada e saída do painel correspondem aos registros feitos pelos Hobos posicionados nas seções 3 e 2, respectivamente, ou seja, os dados de entrada são aqueles obtidos no lado anterior ao painel (antes do painel) que recebe a ventilação a partir da entrada do túnel de vento, enquanto os dados de saída são aqueles coletados no lado posterior ao painel (depois do painel). Cabe esclarecer que aos dados de entrada e saída destes ciclos foi adicionado um período de registro de 4 horas, antes e depois, da sua demarcação no gráfico. Essa estratégia de acréscimo de registros fornece os pontos máximos e mínimos de umidade do ar de cada ciclo.

Para determinar os valores de amplitudes da temperatura e da umidade do ar, a partir dos dados coletados no experimento, optou-se por fazer médias aritméticas dos valores que configuram no gráfico os registros de pico e o mesmo para os valores que configuram os registros de vale (Figura 67).

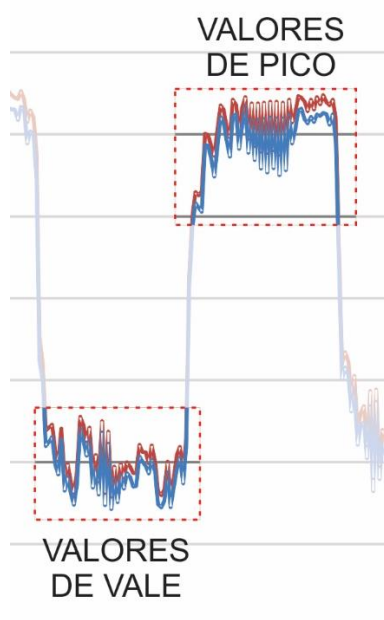


Figura 67 - Trechos de valores de pico e valores de vale
 Fonte: Elaborado pelo autor

Entende-se que as pequenas oscilações observadas nas regiões do gráfico identificadas como vale e pico (Figuras 67 e 68), representam o ponto de transição entre as duas condições climáticas (baixa e alta umidade do ar) impostas no interior do túnel de vento. Portanto, as médias aritméticas calculadas para cada região do gráfico traduzem um período considerado de estabilização entre as mudanças nas condições de ensaio.

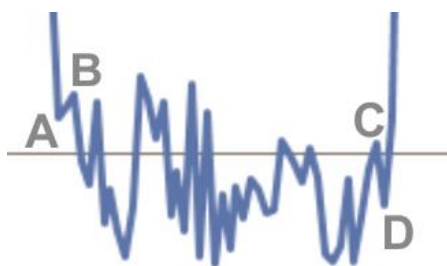


Figura 68 – Ampliação do trecho de vale um gráfico com destaque para as pequenas oscilações nos registros
 Fonte: Elaborado pelo autor

Com este tratamento dos dados, além de possibilitar a identificação, de forma criteriosa, dos vales e das cristas nas curvas dos gráficos, viabilizando a determinação das amplitudes térmicas e higrométricas, foram também

estabelecidos, mais precisamente, os pontos de início e fim da ascensão e declínio das curvas senoidais, bem como o tempo de ajuste das condições higrométricas do ar, antes e após sua passagem pelas amostras instaladas no túnel de vento.

5 Resultados e discussões

Neste capítulo são analisados os resultados dos experimentos, os quais estão organizados em três partes: variação da absorção de umidade do ar por diferentes materiais; caracterização da resistência à compressão dos BTCobogós-miniatura; e modificação da umidade e temperatura do ar pelos painéis com BTCobogós-miniaturas.

5.1 Variação da absorção de umidade do ar por diferentes materiais com amostras prismáticas

Nos Gráficos 1 e 2, são apresentadas as quantidades de água absorvida, em percentual com relação à massa, para cada um dos materiais analisados (terra comprimida – TERRA; terra comprimida estabilizada com cimento Portland – BTC; terra comprimida estabilizada com cimento Portland pintada com tinta látex PVA - BTC PINTADO; cerâmica vermelha – CERÂMICA; argamassa de cimento Portland – CIMENTO), quando expostos a um ambiente controlado, mantendo constante a umidade relativa do ar em 80 %.

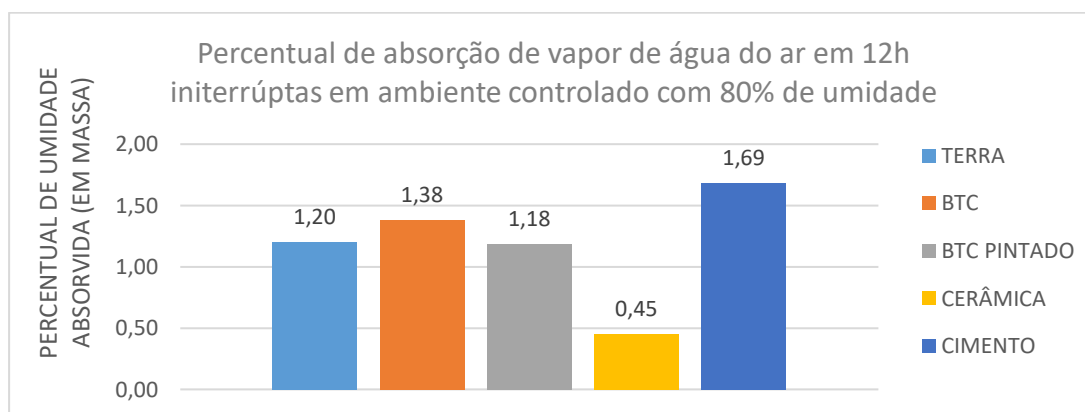


Gráfico 1 - Percentual de absorção de vapor de água do ar em 12 horas ininterruptas (C-CLIMÁTICA a 80 % UR)

Fonte: Elaborado pelo autor

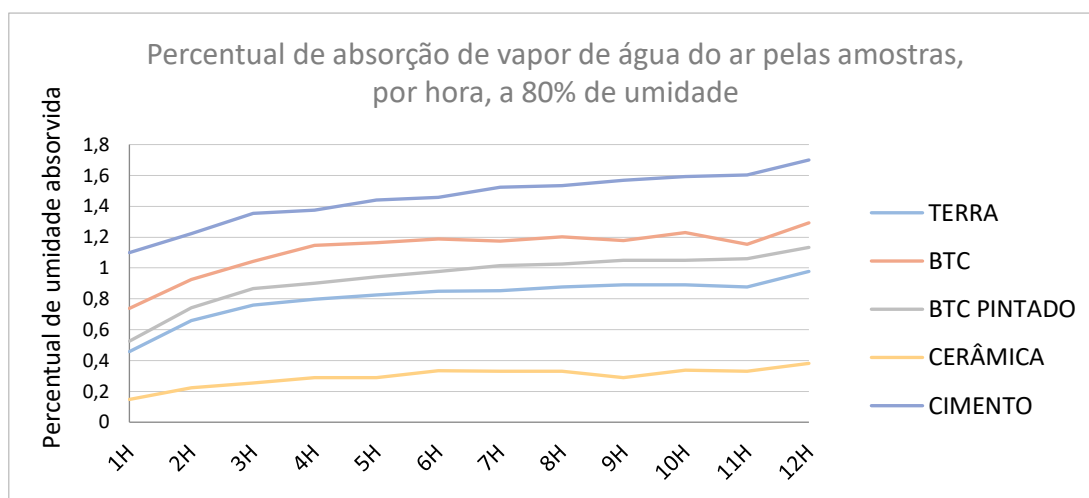


Gráfico 2 - Absorção de vapor de água do ar por hora por diferentes materiais (C-CIMÁTICA a 80% UR)

Fonte: Elaborado pelo autor

Quando as amostras foram submetidas à condição de 80 % UR é possível verificar que o CIMENTO é o mais hidrófilo dentre os demais materiais (Gráfico 1). Em doze horas, o cimento teve sua massa aumentada em aproximadamente 1,69%, devido à absorção de água, proveniente do vapor d'água presente na C-CLIMÁTICA. O comportamento oposto é constatado para a amostra de cerâmica, que absorveu menos água e teve o menor aumento de sua massa (apenas 0,45 %).

No Gráfico 1, pode-se ver também que a amostra BTC (terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland), que é o material de interesse nesta pesquisa, mostrou-se inferior à absorção de vapor de água (1,38 %) apenas quando comparada à argamassa de cimento (1,69 %).

Em relação à velocidade de absorção do vapor de água do ambiente a 80% % UR (Gráfico 2), considerando as 12 horas do ciclo e a maior parcela de água absorvida relativa ao total registrado, a argamassa de cimento faz isso em 3 horas (1,36 %) e o BTC em 4 horas (1,38 %), sendo nesta comparação o BTC o mais lento, mas o único a registrar a absorção total nas 4 horas iniciais.

No Gráfico 3, apresentam-se as quantidades de água perdida, também em percentual com relação à massa, por cada um dos materiais, quando expostos a um ambiente (C-CLIMÁTICA), no qual é mantida constante a umidade relativa do ar em 30%.

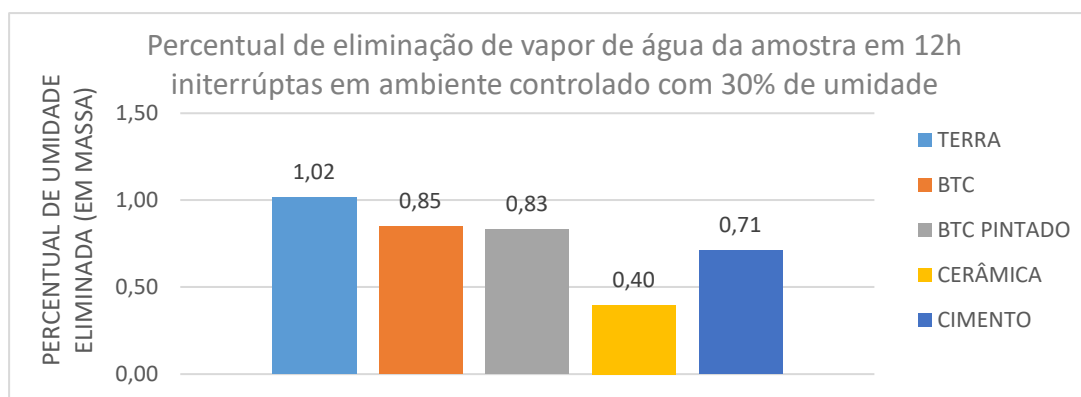


Gráfico 3 - Percentual de eliminação de vapor de água do ar em 12 horas ininterruptas (C-CLIMÁTICA a 30 %UR)

Fonte: Elaborado pelo autor

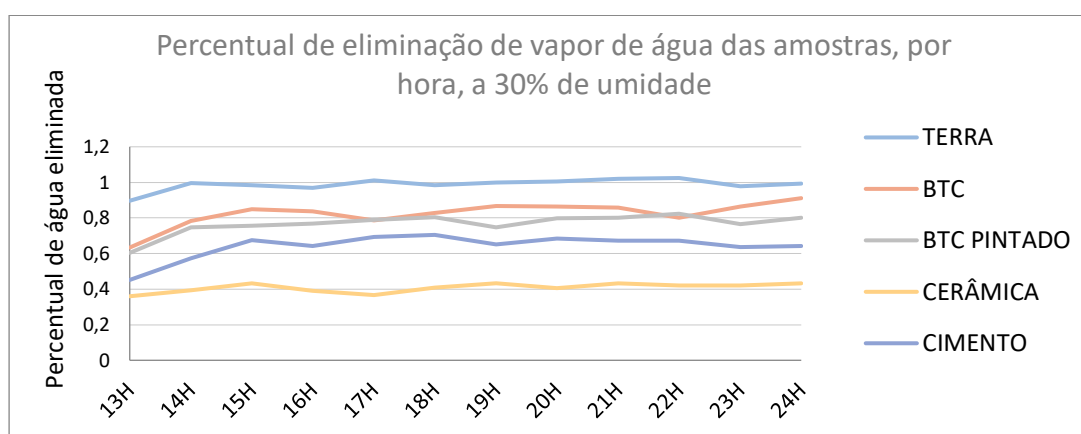


Gráfico 4 - Percentual de eliminação de vapor de água do ar em 12 horas ininterruptas (C-CLIMÁTICA a 30 %UR)

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao reduzir a umidade relativa do ar no interior da C-CLIMÁTICA para 30% as amostras passam a apresentar um comportamento mais aproximado entre si.

É interessante perceber a troca de posição entre os resultados para as amostras de terra e de argamassa de cimento (Gráficos 3 e 4). A partir da comparação entre os resultados obtidos com os dois ciclos (80% UR e 30 % UR) evidencia-se que nas condições a 80% UR, enquanto as amostras de terra compactada absorvem menos água (1,20 %), as amostras de argamassa de cimento absorvem em maior quantidade (1,69 %), porém quando a situação se inverte (condição a 30 % UR), a terra compactada (1,02 %) libera mais facilmente a água absorvida do que a argamassa de cimento (0,71 %).

Outra informação importante na comparação entre Gráficos 1 e 3 diz respeito a conservação da posição da amostra em BTC entre os resultados das amostras de argamassa de cimento Portland e de terra comprimida. Este material (BTC) parece se beneficiar dos comportamentos de ambos os materiais

na sua composição (terra e cimento), mantendo-se mais estável durante a variação da umidade relativa do ar na C-CLIMÁTICA. Portanto, a partir desta análise, pode-se afirmar que o BTC tem potencial para contribuir no condicionamento higrométrico de ambientes internos, cujo fenômeno é consolidado na literatura (Minke, 2015; Barbosa e Ghavami, 2007; Freire 2003, Cagnon et al, 2014)

As amostras de cerâmica novamente se mantiveram na mesma posição inferior dentre todas as outras amostras (Gráfico 3), indicando sua pouca interatividade com a variação da umidade relativa do ar presente na C-CLIMÁTICA.

Cabe ainda destacar, a reduzida perda de capacidade das amostras de BTC pintadas em interagir com a variação da umidade relativa do ar presente na C-CLIMÁTICA (Gráficos 1 e 3). O resultado indica que o BTC pintado com tinta látex acrílico (o caso avaliado) permanece com capacidade de absorver e eliminar água, conforme as condições higrométricas do ambiente no qual está inserido.

A partir dos resultados obtidos, associada à ideia da utilização do mesmo molde metálico para a produção de cobogós-miniaturas com material diferente, no objetivo de compará-lo com o BTCobogó-miniatura nas avaliações no túnel de vento, foi selecionado o material cerâmica vermelha, que obteve a menor interatividade com a variação da umidade relativa do ar. Vale ainda lembrar que elementos vazados em cerâmica vermelha são tradicionais e fabricados em larga escala no país.

5.2 Caracterização da resistência à compressão dos BTCobogós-miniatura

A estratégia de adotar a produção do elemento, BTCobogó, em escala reduzida (1:4), associada ao uso de molde metálico, o que ensejou um novo projeto e processo de moldagem, significou excelentes resultados no que concerne a estética do elemento e sua respectiva resistência à compressão (Gráfico 5), aferida nos ensaios.

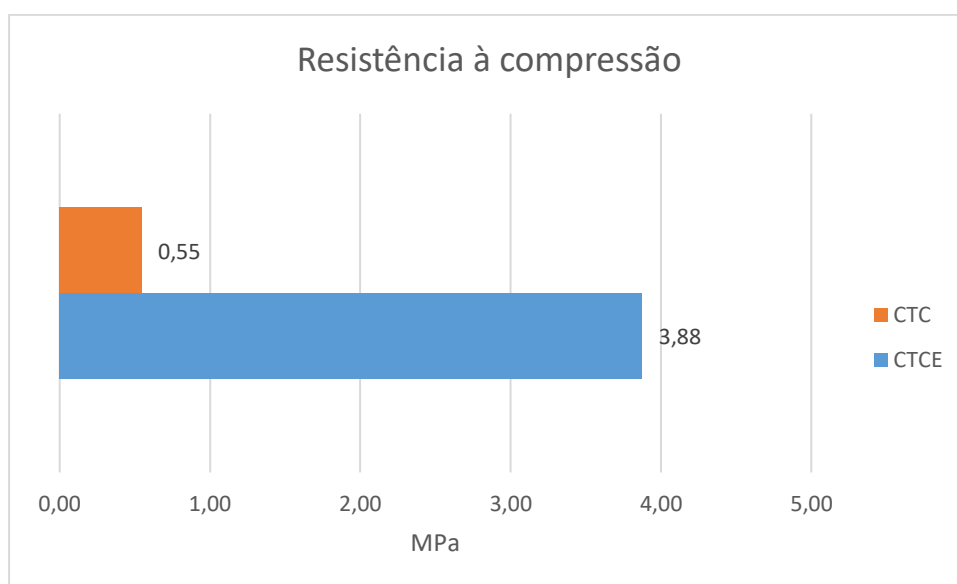


Gráfico 5 - Comparação entre resistência à compressão obtida por CTC (BTCobogó de terra crua) x CTCE (BTCobogó de terra crua estabilizada com cimento Portland)

Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 5, são apresentados os resultados da resistência à compressão média de 6 (seis) BTCobogós-miniaturas por amostras diferentes, CTC (BTCobogó de terra crua) e CTCE (BTCobogó de terra crua estabilizada com cimento Portland), no qual se destaca o efeito da estabilização feita pela cimento Portland. Além da estabilização mecânica realizada em ambos elementos, os corpos de prova, que são objeto neste trabalho, receberam também uma estabilização química, que é a estruturação das partículas de terra crua por meio de inserção (no preparo da massa) de cimento Portland, aglomerante hidráulico.

A participação do estabilizante químico no produto final (CTCE) aumentou bastante o valor da resistência à compressão, corroborando as afirmações de Barbosa e Ghavami (2007), quando dizem que é criada uma espécie de

esqueleto estrutural, que além de manter a coesão entre as partículas do solo (terra crua), evitando-se seus deslocamentos, acabam por influir no ganho de resistência mecânica dos elementos. Tal aumento da resistência mecânica pode ser de até sete vezes, quando comparado ao BTC apenas compactado, sem a adição do cimento Portland.

Vale ressaltar que, quando comparados os elementos vazados de terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland, moldados em molde metálico e na escala reduzida (BTCobogó-miniatura), com os mesmos elementos moldados na escala 1:1, com molde de madeira, que foi feito por Ferreira (2015), há claramente um ganho significativo de resistência à compressão, passando de 2 MPa para 3,88 MPa. Evidentemente, a diferença entre os tamanhos dos corpos de prova deve ser também considerada nesta análise, visando identificar justificativas, o que não é o caso, uma vez que foge ao objetivo do presente trabalho.

De qualquer modo, merece destaque para a qualidade resultante do BTCobogó-miniatura, que foi produzido com uso de molde metálico e com processo de moldagem em camada única de material no preenchimento do molde, o que favoreceu uma melhor compactação do material. A facilidade no processo de moldagem e desmoldagem dos BTCobogós-miniaturas resultou sempre em elementos com bom acabamento superficial (Figura 69).



Figura 69 - Pré-moldado em escala reduzida
Fonte: Elaborado pelo autor

A experiência com a moldagem dos cobogós em cerâmica vermelha, aproveitando o mesmo molde metálico para produzir elementos com a mesma geometria, não teve a mesma facilidade quando comparada à moldagem dos BTCobogós-miniaturas. A argila moída, utilizada na moldagem dos cobogós em cerâmica vermelha, foi inserida no molde no estado praticamente seco, uma vez que o tradicional material no estado plástico não foi compatível com o processo de moldagem por compactação adotada. Logo, para se conseguir um resultado satisfatório foi necessária uma alta força de compressão.

Além das dificuldades enfrentadas na moldagem, os cobogós em cerâmica vermelha recém-extraídos do molde metálico apresentaram-se extremamente frágeis (muitos foram perdidos durante as moldagens), até que se efetivasse sua queima em forno à 900 °C. Entretanto, após a queima alguns destes cobogós apresentaram rachaduras superficiais e outros se romperam ainda no interior do forno durante a queima. Com muito esforço, se conseguiu viabilizar a produção de quantidades de cobogós em cerâmica vermelha suficientes para executar um painel nas dimensões compatíveis com o túnel de vento.

5.3 Modificação da umidade e temperatura do ar pelos painéis com BTCobogós-miniaturas

Para uma verificação, em condições mais próximas da realidade, a cerca da possível interação que o elemento proposto nesta pesquisa, BTCobogó, ou melhor o painel executado com eles, possa ter com o ar que por ele permeia, foram simulados, como descrito nos procedimentos metodológicos, ciclos em túnel de vento, onde as condições higrométricas do ar foram controladas.

Após vários ensaios alterando-se a configuração dos painéis no interior do túnel de vento, ou seja, para os BTCobogós-miniaturas com camadas sobrepostas, os resultados confirmaram que para uma determinada configuração, este painel pode alterar a qualidade do ar interno de um ambiente construído, de maneira passiva, quando utilizados em fachadas direcionadas à ventilação predominante.

Na sequência são apresentados os resultados sistematizados através de gráficos que mostram a interação da umidade do ar no interior do túnel de vento

com os painéis (amostras) ensaiados. Inicialmente, são apresentados os resultados para o painel, com apenas uma camada, executado com os Cobogós-miniaturas em cerâmicas vermelhas (Gráficos 6 a 9), que têm a mesma geometria dos BTCobogós-miniaturas. Posteriormente, são apresentados os resultados individualmente para os painéis, com 1 até 4 camadas sobrepostas, executados com os BTCobogós-miniaturas (Gráficos 10 a 25, cada gráfico individualmente por camada de painel).

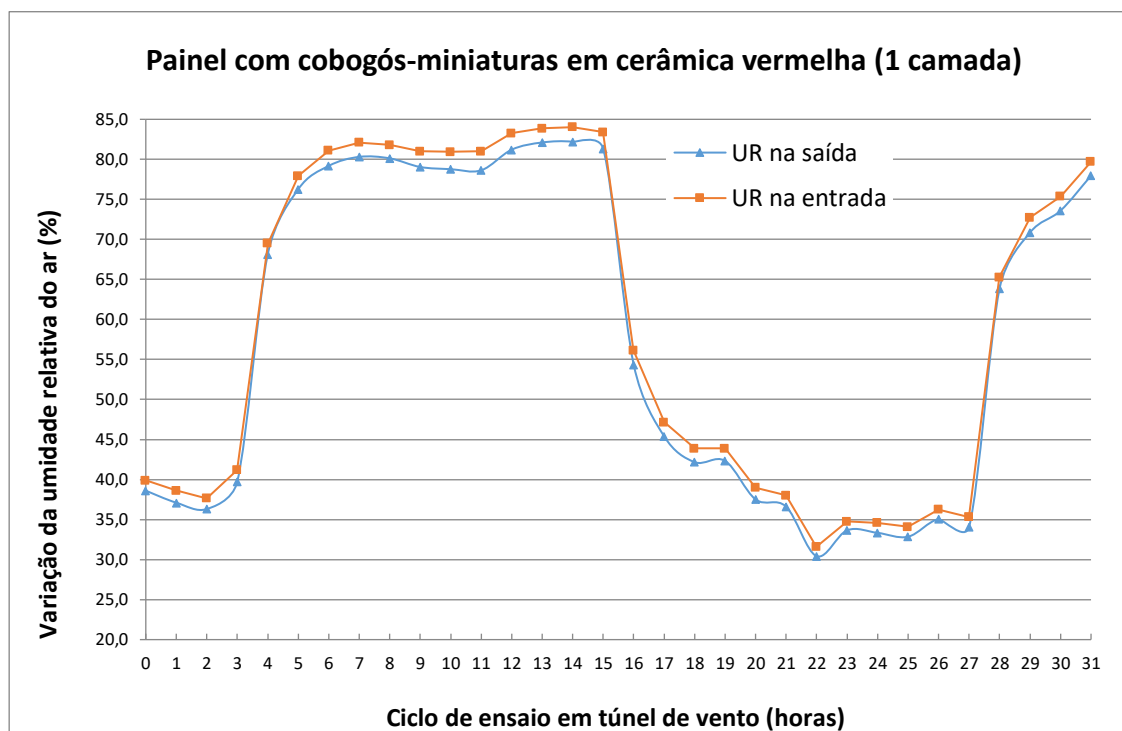


Gráfico 6 – Variação da umidade relativa do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 1 camada de cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha.

Fonte: Elaborado pelo autor

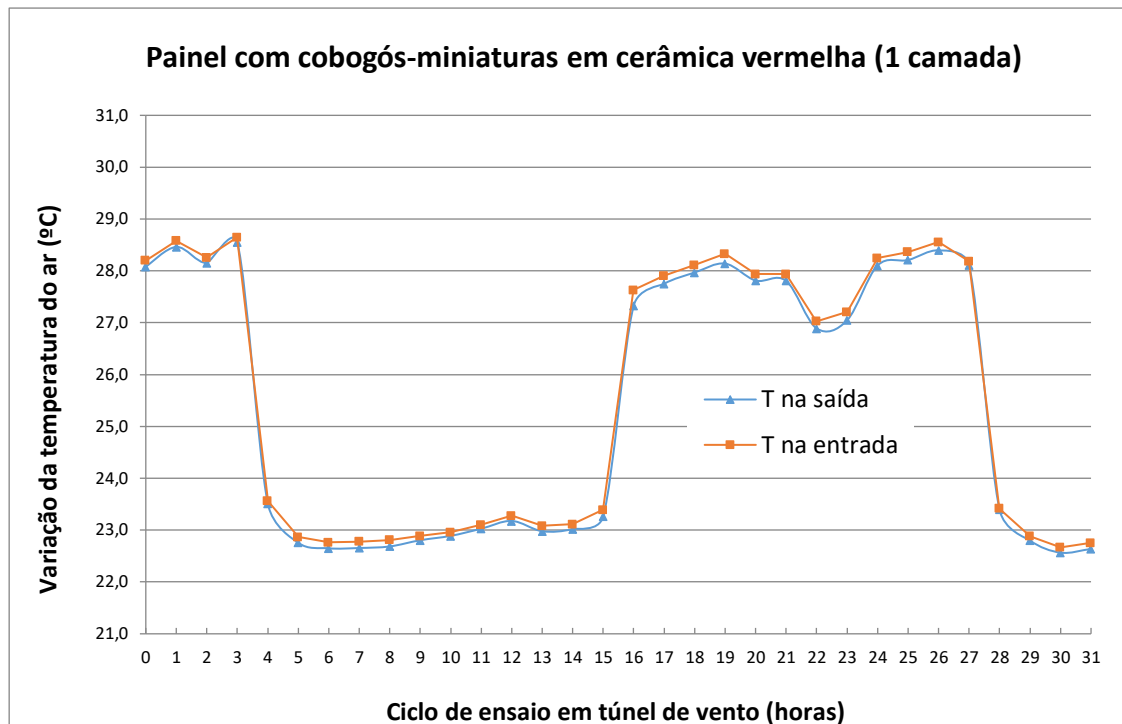


Gráfico 7 - Variação da temperatura do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 1 camada de cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha
Fonte: Elaborado pelo autor

Nos Gráficos 6 e 7 é nítida a pouca influência do painel com cobogó-miniatura em cerâmica vermelha (camada única) na interação com a umidade e temperatura do ar que por ele atravessa. Nota-se apenas um comportamento como se fosse um reduzido efeito de um filtro, uma vez que se percebe uma pequena redução na umidade relativa do ar (Gráfico 6) e na temperatura do ar (Gráfico 7), após sua passagem por este painel. Destaca-se que as reduções são praticamente iguais nas duas condições de controle do ciclo, com baixa e com alta umidade relativa do ar no ambiente interno ao túnel de vento.

A seguir são apresentadas as médias máximas e mínimas para as umidades relativas do ar (Gráfico 8) e as temperaturas do ar (Gráfico 9), antes (entrada) e depois (saída) da passagem do vento pelo painel de cobogós-miniatura em cerâmica vermelha. Confirma-se que as reduções são diretas na mesma direção, sem variações quando a amostra fica submetida a condições diferentes de umidade e temperatura do ar no túnel de vento. As mínimas e máximas na saída (depois) deste painel são sempre mais baixas do que as correspondentes na entrada (antes).

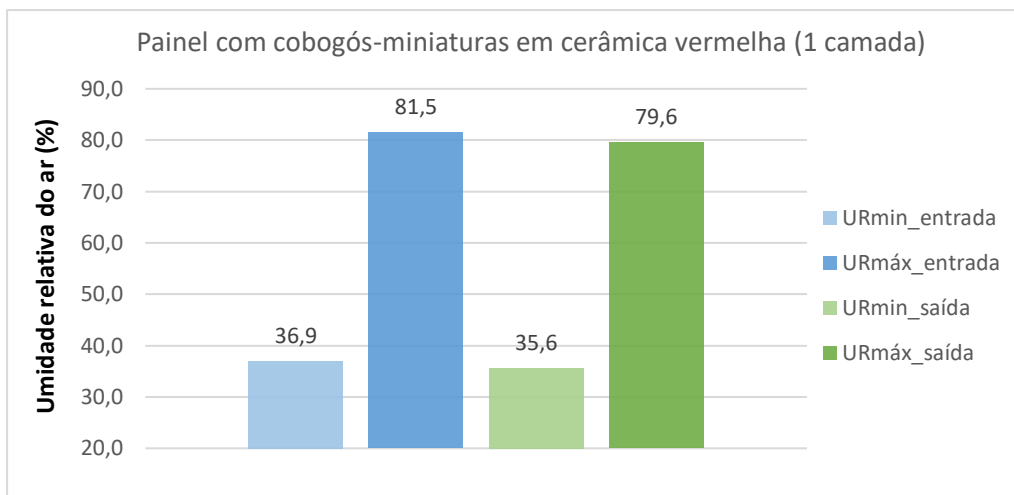


Gráfico 8 - Umidade relativa do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 1 camada de cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha
Fonte: Elaborado pelo autor

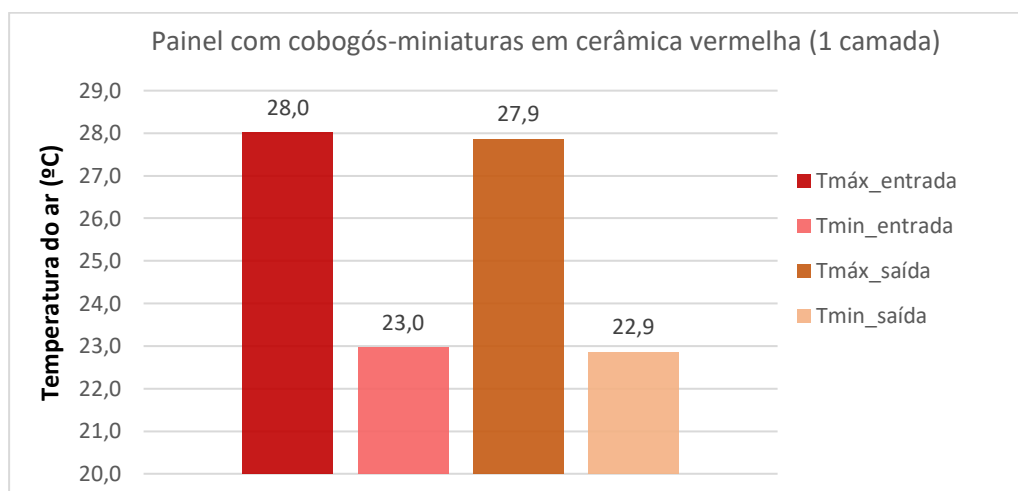


Gráfico 9 - Temperatura do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 1 camada de cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha
Fonte: Elaborado pelo autor

Os registros obtidos quando foi utilizado o painel executados com 1 camada de BTCobogós-miniaturas são apresentados no Gráfico 10, para a variação da umidade relativa do ar e, no Gráfico 11, para a variação da temperatura do ar, dentro do túnel de vento.

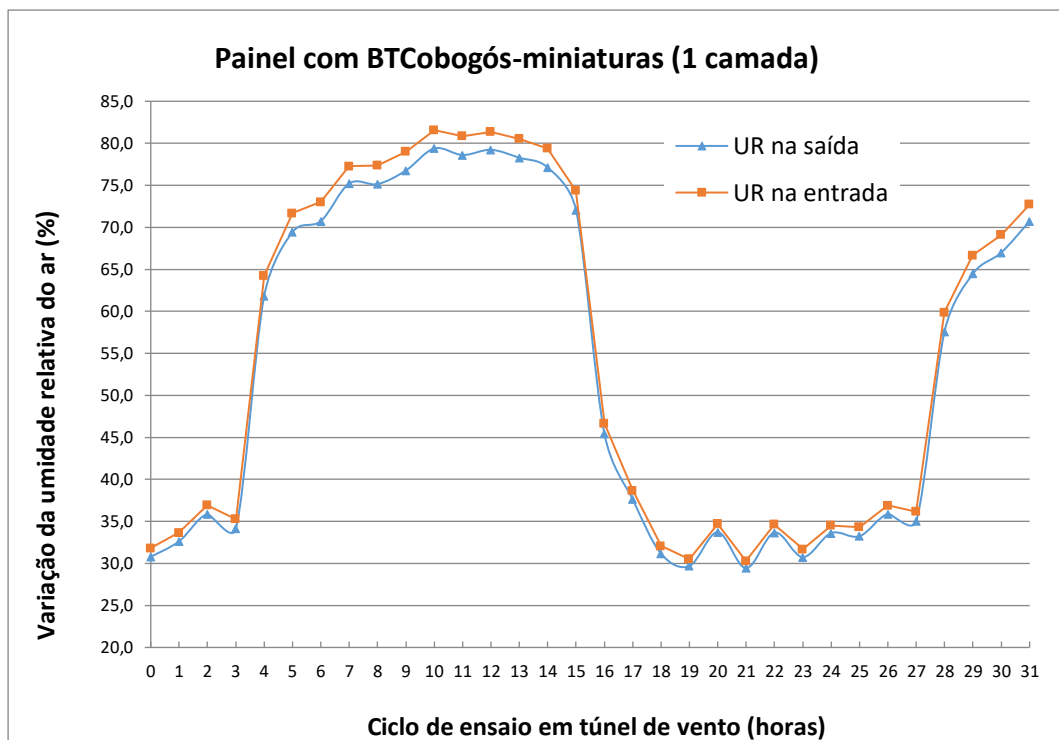


Gráfico 10 - Variação da umidade relativa do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 1 camada de BTCobogós-miniaturas
Fonte: Elaborado pelo autor

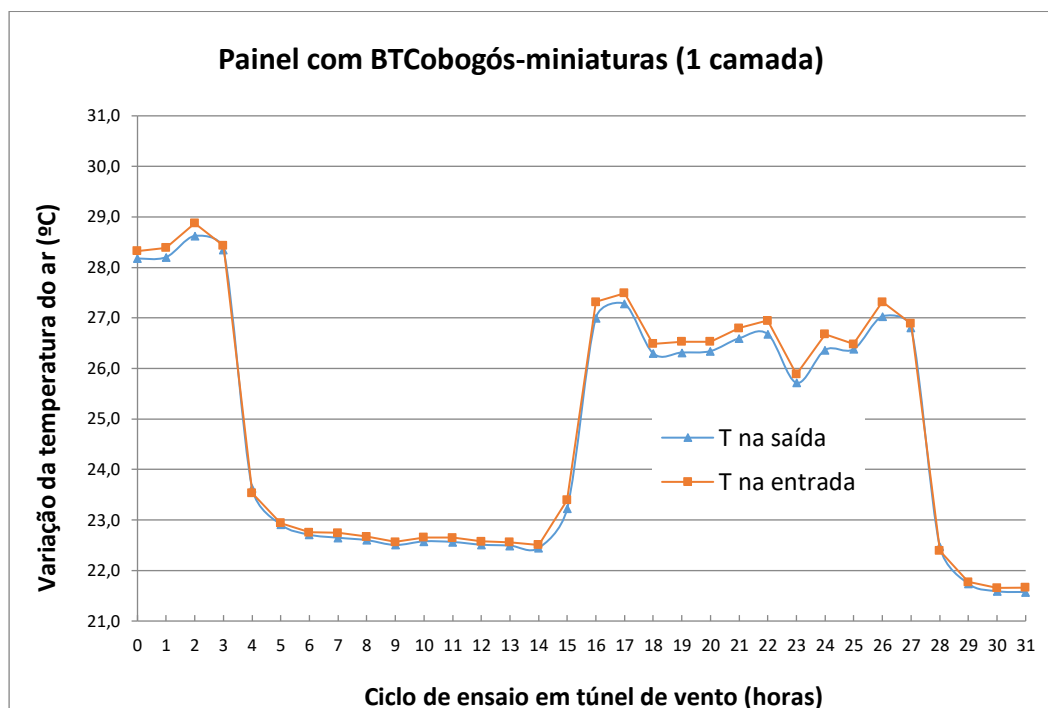


Gráfico 11 - Variação da temperatura do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 1 camada de BTCobogós-miniaturas
Fonte: Elaborado pelo autor

O comportamento padrão observado para o painel executado com uma camada com cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha é praticamente o mesmo quando executado com apenas uma camada com BTCobogós-

miniaturas, tanto em relação à variação da umidade relativa do ar (Gráfico 10) quanto para a temperatura do ar (Gráfico 11). Nesta comparação, considerando-se que há apenas materiais diferentes (cerâmica vermelha x terra crua comprimida estabilizada com cimento), mas se trata de ensaio com a mesma condição em camada única de painéis, executados com elementos vazados (cobogós) com mesma geometria, cujos ciclos de variação da umidade relativa e temperatura do ar no túnel de vento foram os mesmos, é possível perceber que houve um maior resfriamento do ar após sua passagem pelo painel com BTCobogós-miniaturas.

A análise para as médias máximas e mínimas da umidade relativa do ar (Gráfico 12) e da temperatura do ar (Gráfico 13), relativamente ao comportamento do painel executado com uma camada de BTCobogós-miniaturas, também confirma a semelhança com as pequenas variações verificadas para o painel com cobogós-miniatura em cerâmica vermelha. Embora os resultados indiquem que, pelo menos em situação de ventilação contínua e forçada como a realizada neste experimento, o comportamento para estes dois materiais comparados pareçam ser equivalentes, quando utilizados nas mesmas condições (cobogós em camada única no painel), merece destacar que ocorreram reduções relativas às médias máximas da umidade relativa e da temperatura do ar para o painel com BTCobogós-miniaturas.

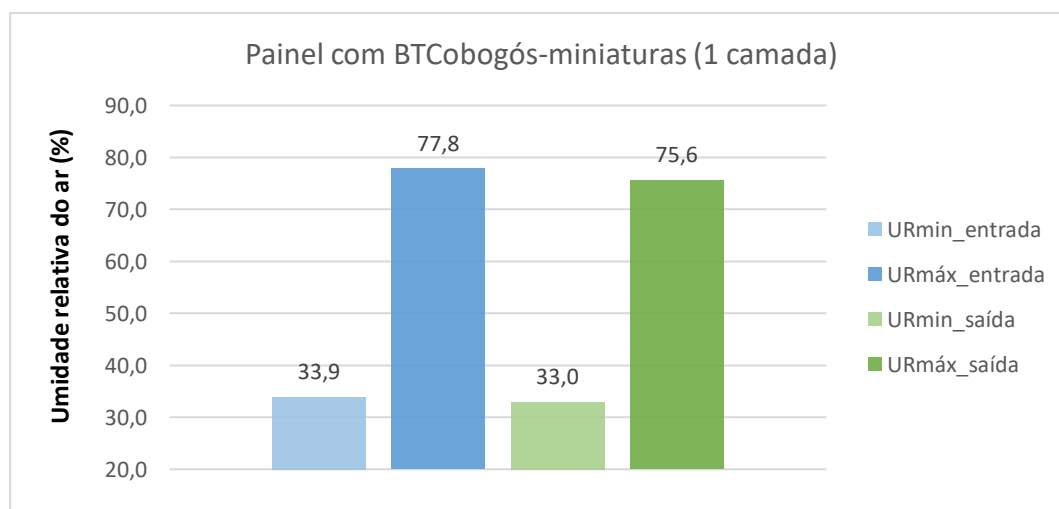


Gráfico 12 - Umidade relativa do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 1 camada com BTCobogós-miniaturas

Fonte: Elaborado pelo autor

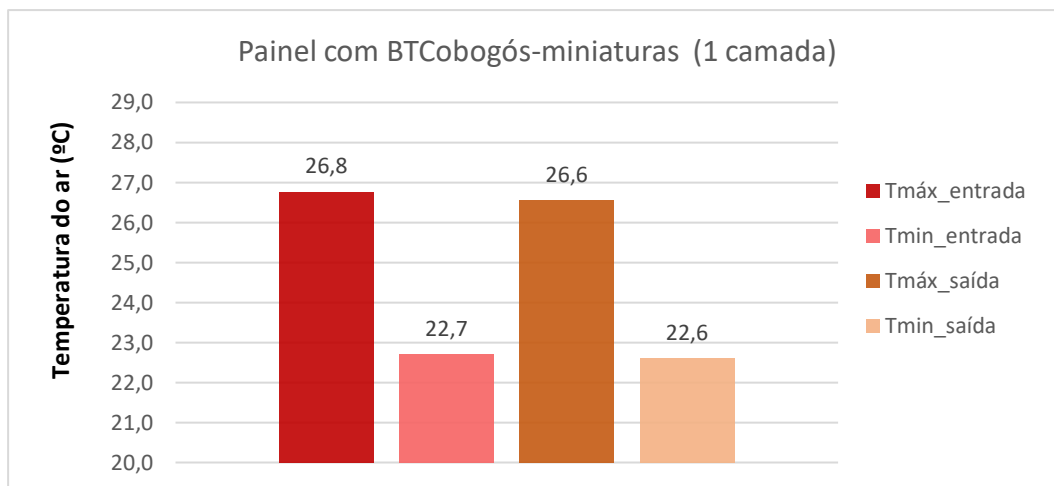


Gráfico 13 - Temperatura do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 1 camada com BTCobogós-miniaturas
Fonte: Elaborado pelo autor

Ao adicionar uma camada de BTCobogós-miniaturas, subsequente à já existente no painel, com todos os elementos vazados inseridos em posição invertida em relação à camada anterior, as mudanças no comportamento deste painel com maior espessura foram muito pequenas. Deve-se lembrar de que, a partir desta configuração do painel com BTCobogós-miniaturas em duas camadas, criou-se um percurso maior para o contato do vento com as faces do elemento vazado, uma vez que a adição da segunda camada de BTCobogós neste painel se fez com os elementos em posição invertida (rotação de 180° relativo ao eixo ortogonal à face do elemento) com relação aos existentes na camada anterior. Apesar desta configuração do painel com duas camadas de BTCobogós-miniaturas, as variações da umidade relativa do ar (Gráfico 14) e da temperatura do ar (Gráfico 15) ao comparar os dados, antes e depois, deste painel indicam que houve pouca alteração, sem muita mudança em relação ao mesmo painel com apenas uma camada de BTCobogós-miniaturas.

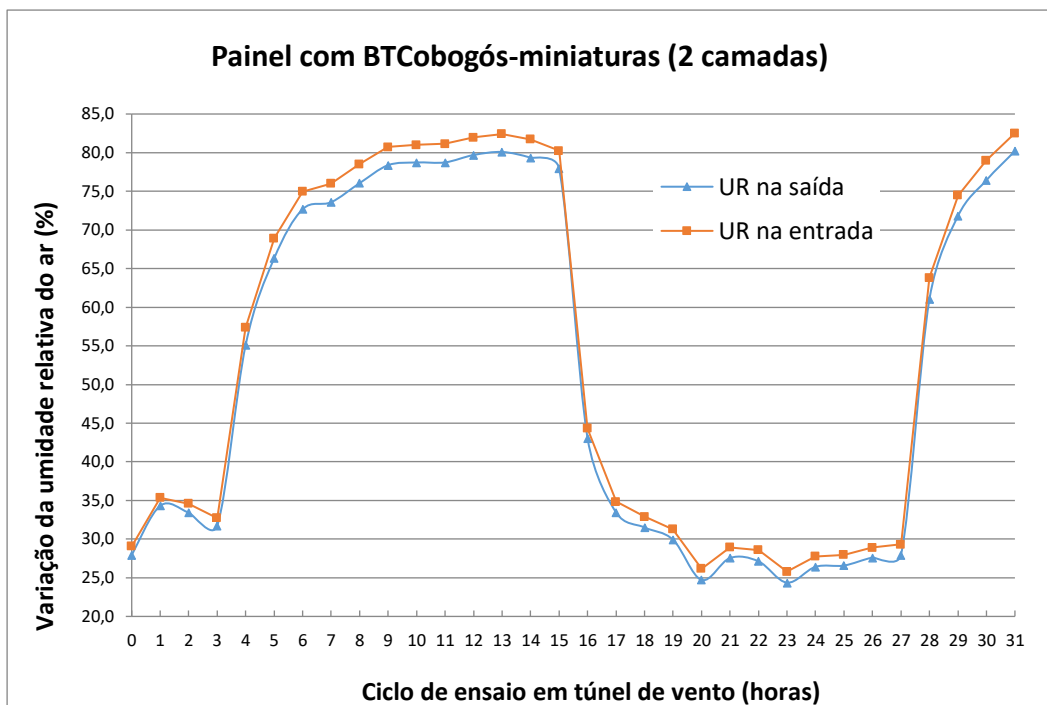


Gráfico 14 - Variação da umidade relativa do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 2 camadas de BTCobogós-miniaturas
 Fonte: Elaborado pelo autor

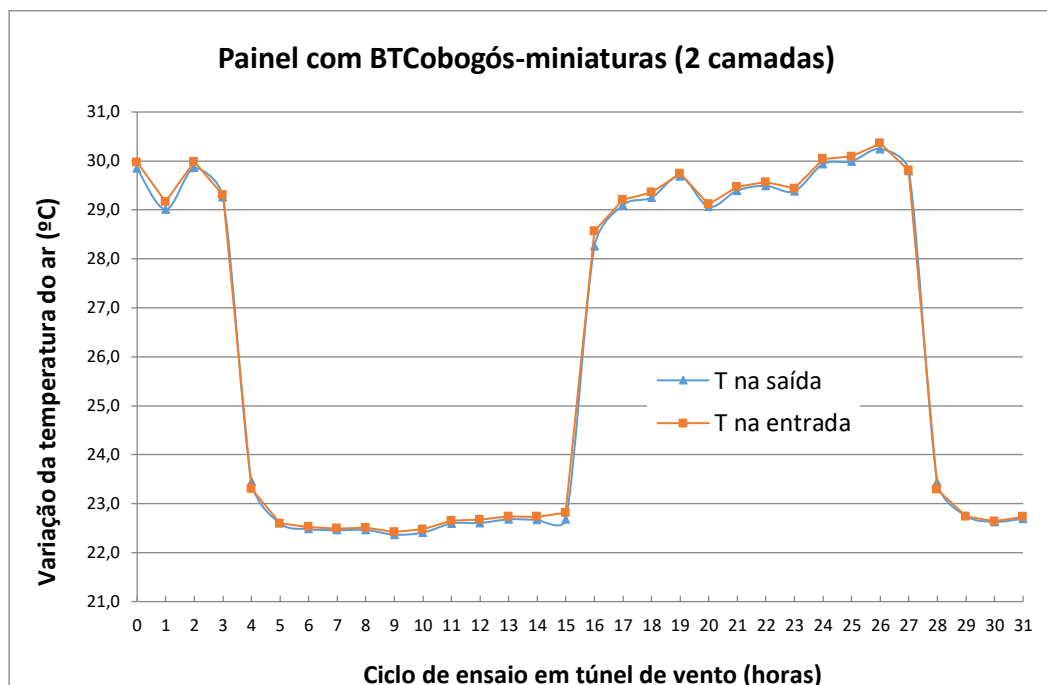


Gráfico 15 - Variação da temperatura do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 2 camadas de BTCobogós-miniaturas
 Fonte: Elaborado pelo autor

As médias máximas e mínimas para a umidade relativa do ar e para a temperatura do ar, antes e depois, do painel com duas camadas de BTCobogós-miniaturas indicam que a diferença no condicionamento do ar é mínima ao

acrescentar-se a segunda camada de elementos vazados invertidos. Contudo, observa-se que ocorre o mesmo comportamento padrão, no qual há sempre reduções nas médias máximas e mínimas da umidade relativa do ar e da temperatura do ar, praticamente não alterando muito as respectivas amplitudes.

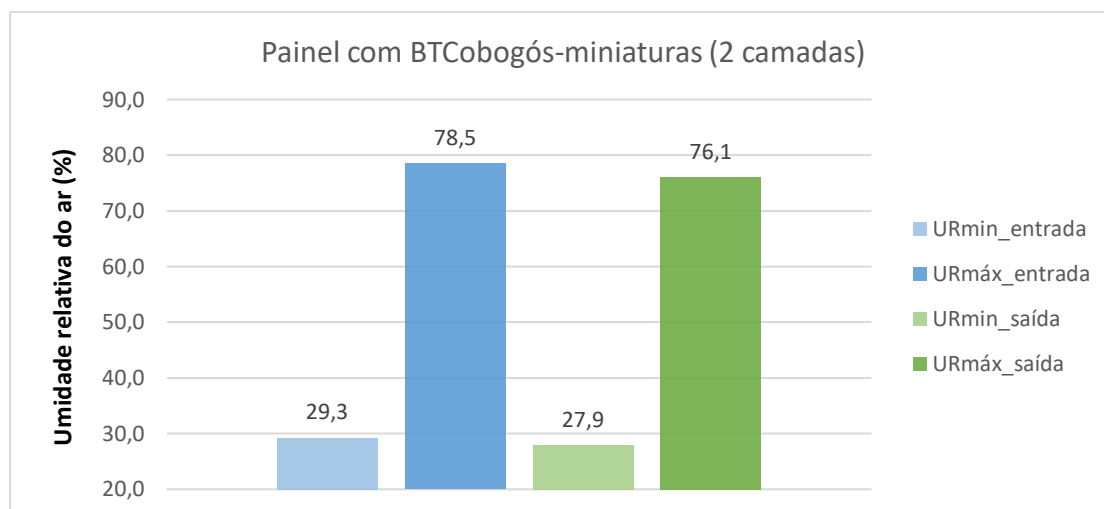


Gráfico 16 - Umidade relativa do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 2 camadas com BTCobogós-miniaturas

Fonte: Elaborado pelo autor

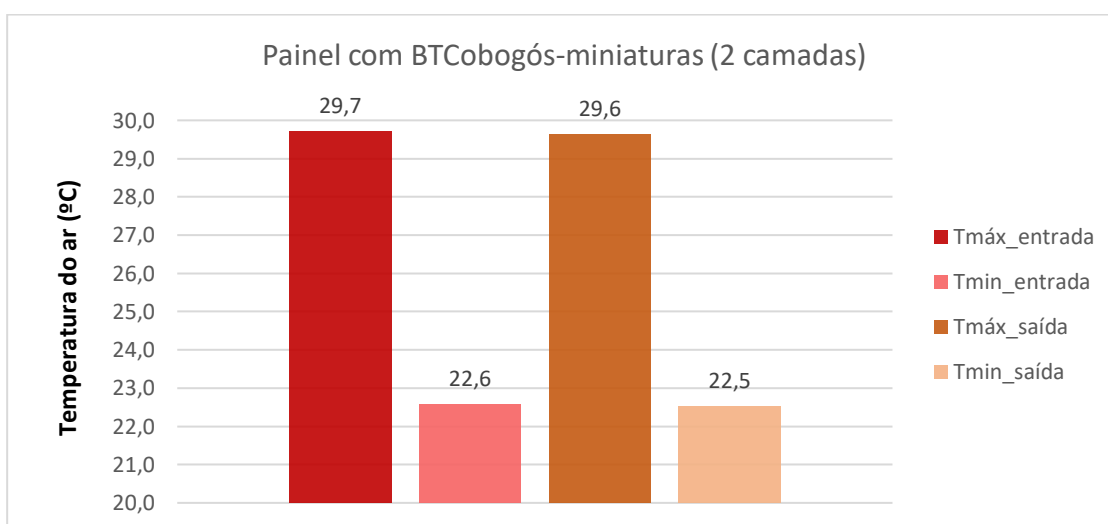


Gráfico 17 - Temperatura do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 2 camadas com BTCobogós-miniaturas

Fonte: Elaborado pelo autor

Os registros para a variação da umidade relativa e da temperatura do ar dentro do túnel de vento com o uso do painel com três camadas executadas com BTCobogós-miniaturas podem ser vistos nos Gráficos 18 e 19, apresentados em sequência.

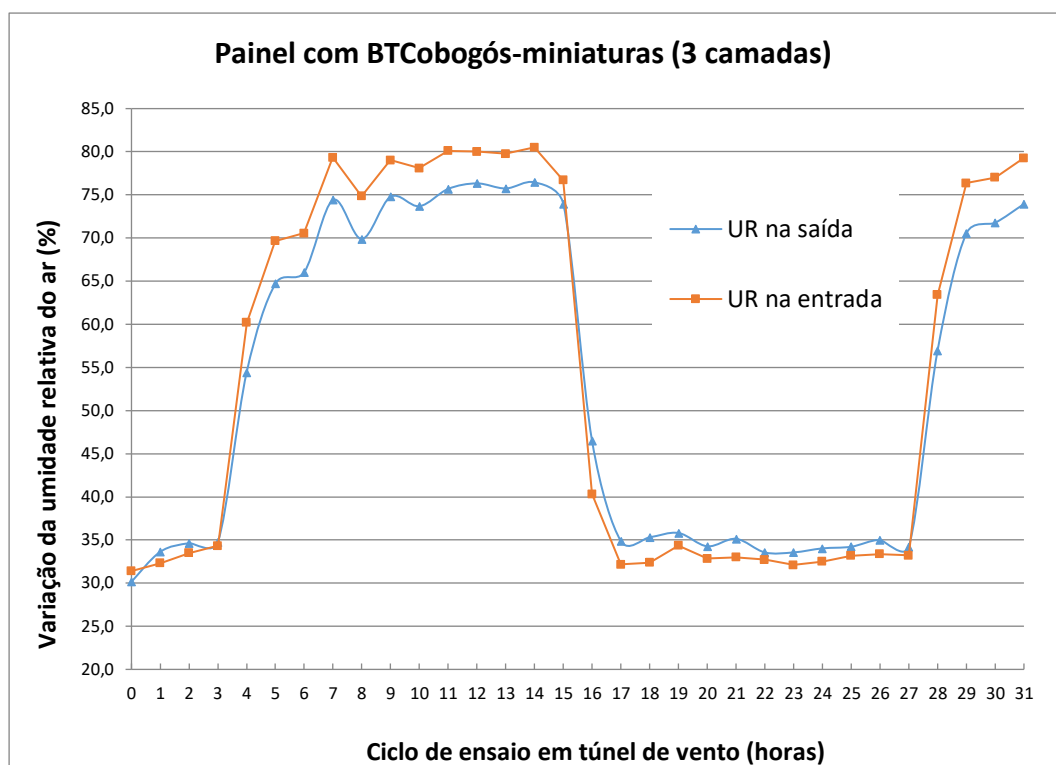


Gráfico 18 - Variação da umidade relativa do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 3 camadas de BTCobogós-miniaturas

Fonte: Elaborado pelo autor

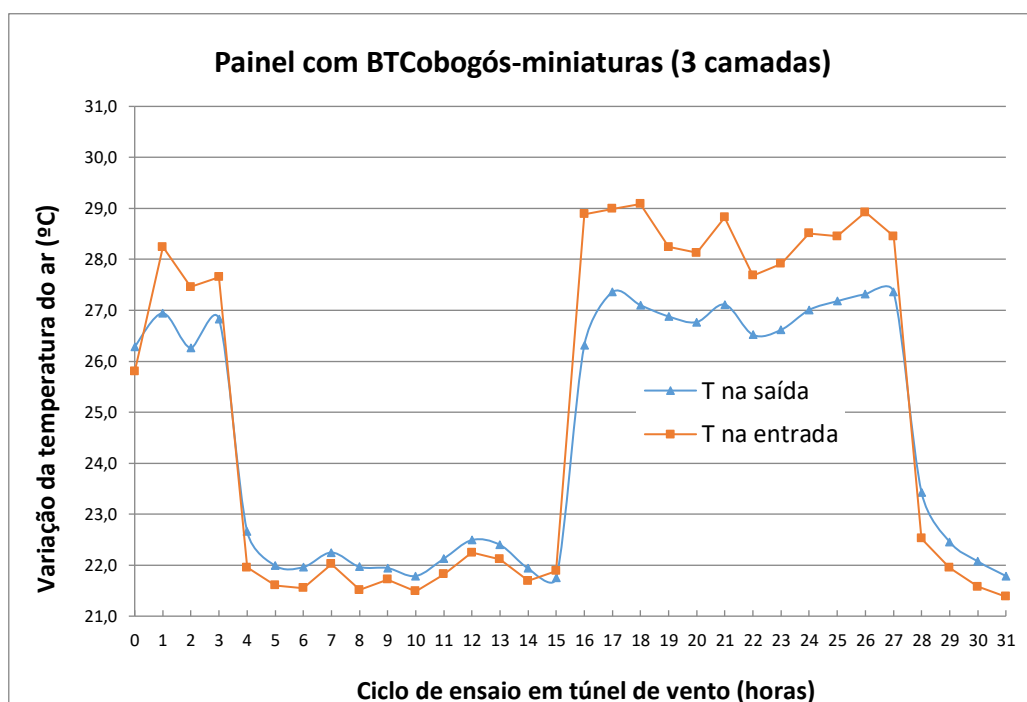


Gráfico 19 - Variação da temperatura do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 3 camadas de BTCobogós-miniaturas

Fonte: Elaborado pelo autor

Com o acréscimo da terceira camada de BTCobogós-miniaturas há alteração importante no comportamento padrão nas variações da umidade

relativa e temperatura do ar, conforme as condições impostas túnel de vento com ciclos com baixa e alta umidade relativa do ar. Neste caso, houve mudanças significativas nos dados registrados na saída dos painéis dentro do túnel de vento, ou seja, a umidade relativa do ar e a temperatura do ar tiveram as respectivas amplitudes reduzidas. O resultado indica que a geometria dos vazios em posições alternadas, entre as três camadas de BTCobogós-miniatura, criou as condições necessárias para a alteração da qualidade do ar que percorreu seu interior, tornando assim o painel numa espécie de filtro condicionador.

Nos Gráficos 20 e 21, a seguir, são apresentadas as médias máximas e mínimas para os registros da umidade relativa do ar e da temperatura do ar, para as duas condições impostas no túnel de vento (baixa e alta umidade relativa do ar), nos quais se pode notar com clareza a mudança das características do ar, conforme o mesmo atravessa este painel. Observe que depois do vento passar pelas camadas do painel, tanto a umidade relativa do ar quanto a temperatura do ar têm reduzidas as médias máximas, por outro lado, têm aumentadas as médias mínimas, reduzindo-se as respectivas amplitudes, o que é desejável na medida em que se aproxima dos dois limites (inferior e superior) da faixa de conforto para o ser humano (UR entre 40 % e 70 %).

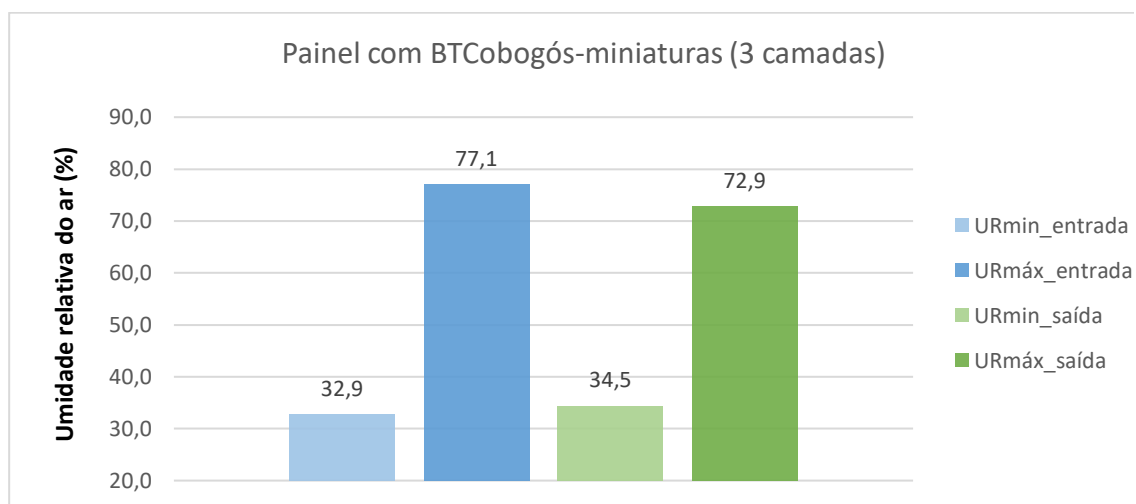


Gráfico 20 - Umidade relativa do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 3 camadas com BTCobogós-miniaturas

Fonte: Elaborado pelo autor

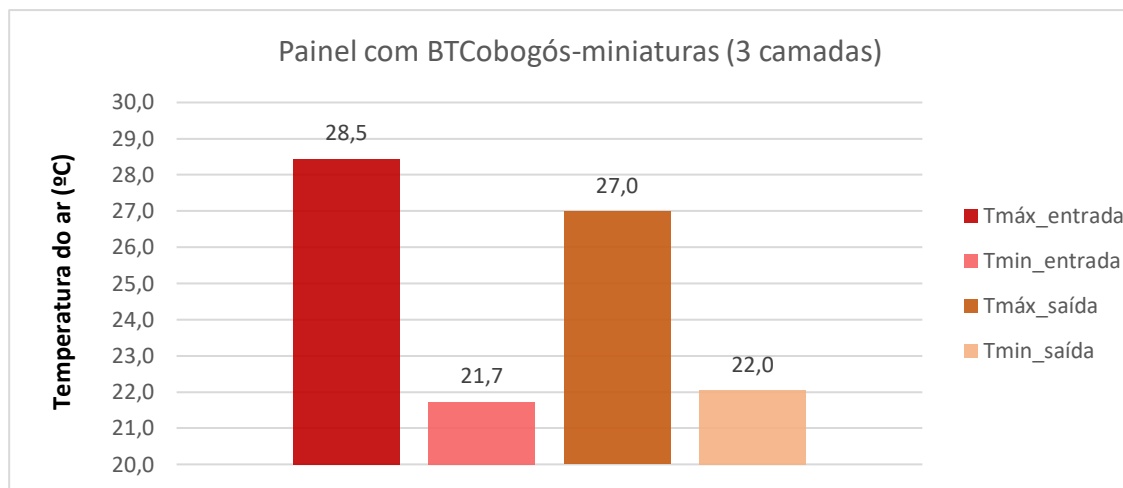


Gráfico 21 - Temperatura do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 3 camadas com BTCobogós-miniaturas

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados da variação da umidade relativa e da temperatura do ar no túnel de vento, antes e depois, nas condições controladas no túnel de vento com baixa e alta umidade relativa do ar, para o painel configurado com 4 camadas executadas com BTCobogós-miniaturas são apresentados nos Gráficos 22 e 23.

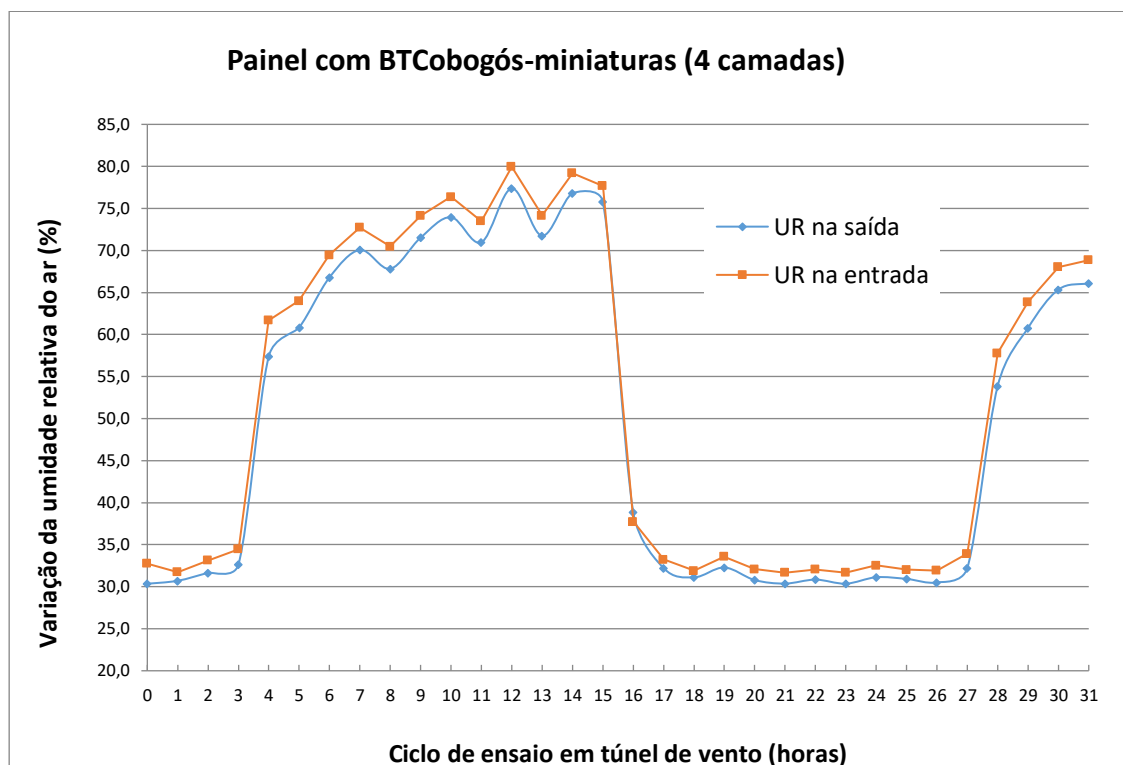


Gráfico 22 - Variação da umidade relativa do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 4 camadas de BTCobogós-miniaturas

Fonte: Elaborado pelo autor

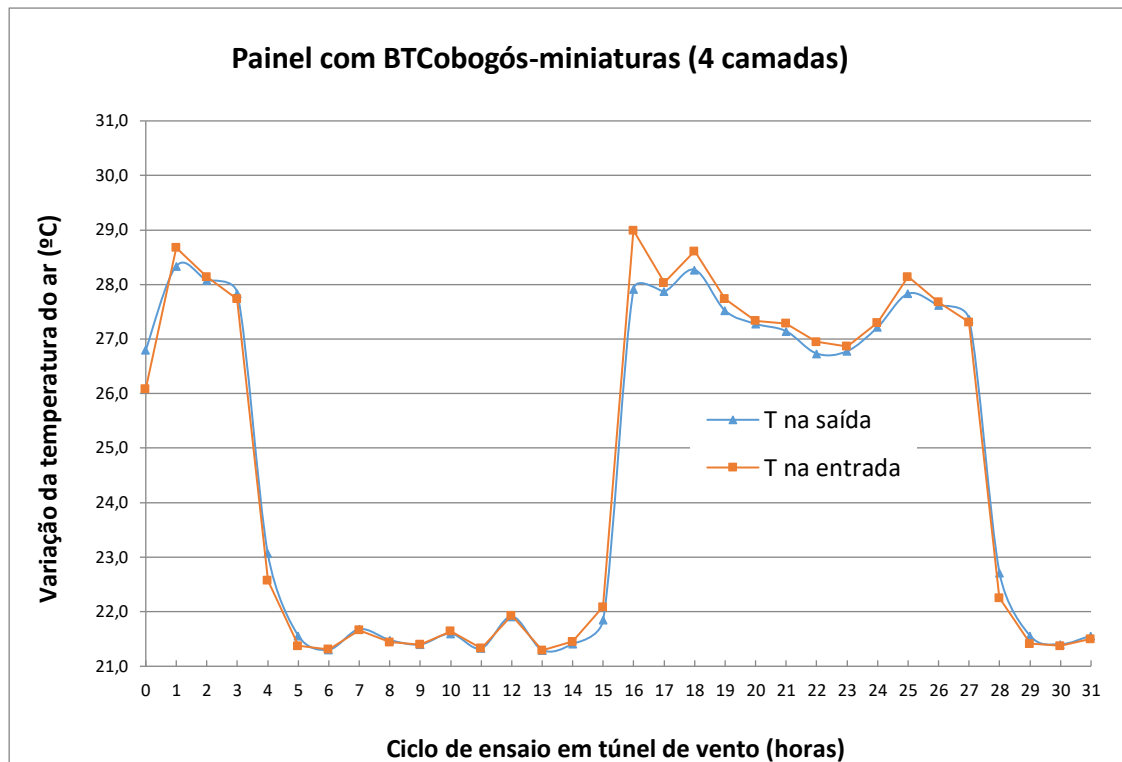


Gráfico 23 - Variação da temperatura do ar antes (entrada) e depois (saída) do painel executado com 4 camadas de BTCobogós-miniaturas

Fonte: Elaborado pelo autor

Nesta configuração de painel (4 camadas com BTCobogós-miniaturas) o padrão de comportamento verificado anteriormente voltou a ocorrer, como foi nos painéis com uma e duas camadas de BTCobogós-miniaturas. Nota-se que as reduções voltam a ser para ambas as medidas da umidade relativa do ar e da temperatura do ar, nas duas condições de ensaio impostas (com baixa e com alta umidade relativa do ar no túnel de vento), o que foi bem diferente do caso com 3 camadas de BTCobogós-miniaturas. Diante desse comportamento verifica-se que este painel, com 4 camadas, voltou a apresentar apenas o papel de barreira para o vento que o atravessa.

Nos Gráficos 24 e 25 são apresentadas as médias máxima e mínimas para a umidade relativa e temperatura do ar, antes e depois, deste painel (4 camadas).

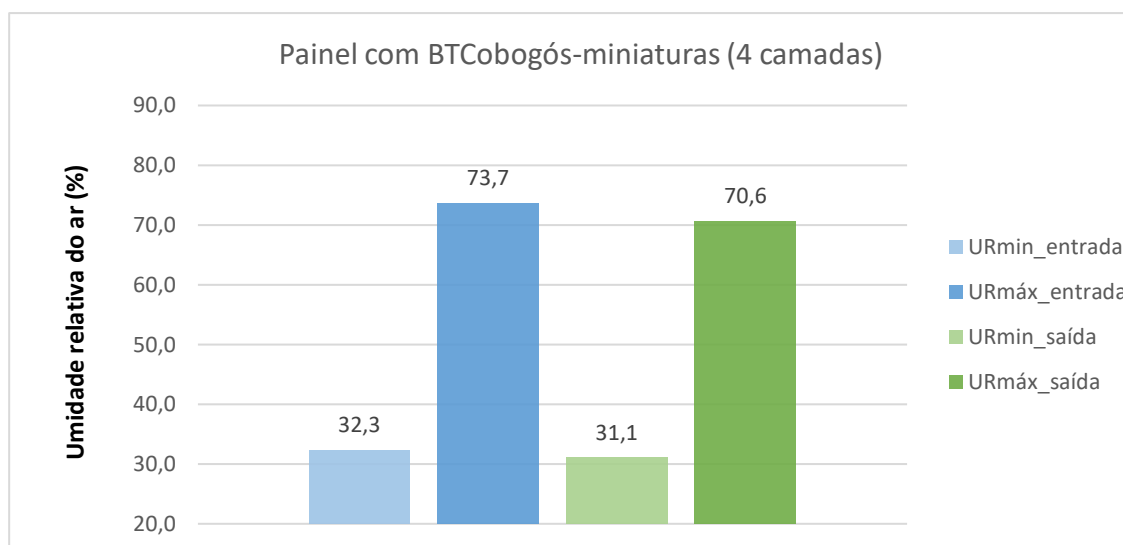


Gráfico 24 - Umidade relativa do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 4 camadas com BTCobogós-miniaturas
Fonte: Elaborado pelo autor

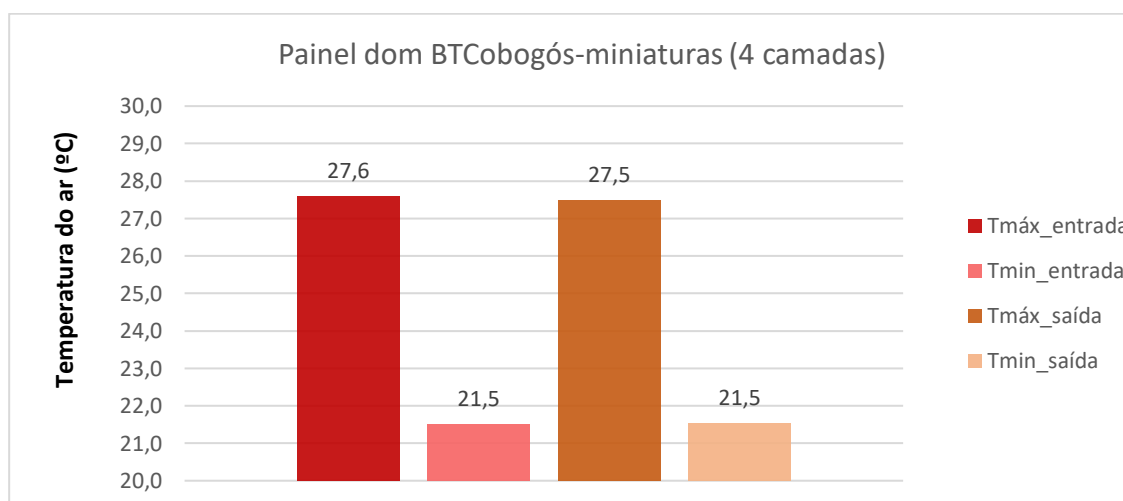


Gráfico 25 - Temperatura do ar, médias mínima e máxima, antes e depois, do painel executado com 4 camadas com BTCobogós-miniaturas
Fonte: Elaborado pelo autor

Diante dos ensaios em túnel de vento apresentados, constatou-se que a maior interação com o vento que atravessa os painéis vazados, dentre todas as amostras comparadas, ocorreu com aquele com tripla camada executada com BTCobogós-miniaturas. Tal fenômeno pode estar associado às características do material (terra crua comprimida estabilizada com cimento) utilizado para o qual, segundo o experimento em C-CLIMÁTICA, bem como nos estudos desenvolvidos por vários autores (Minke 2015; Barbosa e Ghavami 2007; Freire 2003, Cagnon et al 2014, etc.), é esperado comportamento com capacidade de

reter e eliminar com facilidade o vapor de água, presente no ar nos ambientes construídos.

O fato curioso nos resultados obtidos nos experimentos é que tal fenômeno se mostrou com potencial evidenciado, apenas quando se fez a inclusão até a terceira camada dos BTCobogós-miniaturas no painel. Isto pode ser indicativo de que só com três camadas de elementos vazados a contínua passagem de ar pelos seus espaços vazados invertidos foi capaz de interagir com o ar em contato e com as superfícies do material por tempo suficiente, a ponto de estabelecer o equilíbrio desejado entre a água presente no ar e nos BTCobogós-miniaturas. A ideia das camadas de assentamento dos elementos vazados em posição invertida acabou funcionando conforme a expectativa da proposta, que foi esta configuração atuar como freio aerodinâmico para a passagem do ar, seja ele úmido ($UR = 80\%$) ou seco ($UR = 30\%$). Isto é, pode-se ter encontrado a situação, potencialmente mais adequada, para aumentar a superfície de contato do material do painel com o fluido que o atravessou durante os ensaios, tendo em vista a redução das escalas adotadas no experimento (BTCobogós-miniaturas e túnel de vento).

Como a adição da quarta camada de BTCobogós-miniaturas no painel não confirmou uma linearidade em relação aos resultados obtidos com o painel com apenas três camadas, destes mesmos elementos vazados, foi necessária a repetição do ensaio para nova verificação do comportamento do painel composto por três camadas com BTCobogós-miniaturas. O resultado confirmou o comportamento já percebido no ensaio anterior, reforçando a atuação como filtro condicionador do ar (umidade relativa e temperatura do ar) que atravessou o referido painel. No APÊNDICE D está disponível o ensaio refeito para o painel com três camadas com BTCobogós-miniaturas.

Considerando as amplitudes térmicas e higrométricas do ar, antes e depois de cada painel analisado, foram calculadas as diferenças entre tais valores, buscando destacar os comportamentos distintos entre os painéis ensaiados. Os valores negativos se justificam por ter sido feita sempre a subtração do menor valor pelo maior. No Gráfico 26, apresenta-se a análise para a diferença entre as amplitudes térmicas do ar, calculadas tendo em conta os registros para os lados opostos dos painéis.

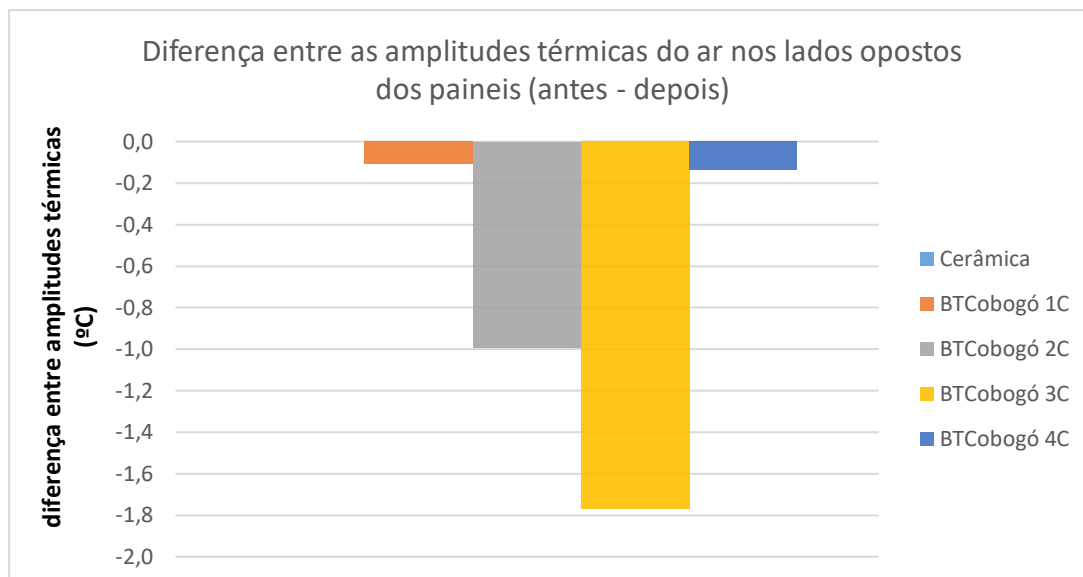


Gráfico 26 - Diferença entre amplitudes da temperatura do ar calculadas para registros antes e depois dos painéis

Fonte: Elaborado pelo autor

Constata-se que o painel executado com cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha (uma camada) não interfere na diferença entre as amplitudes térmicas calculadas para cada lado do painel (Gráfico 26), ou seja, elas são iguais, o que sugere pouca interação do ar com este painel. A partir deste, em todas as outras amostras são percebidas diferenças, com o destaque para o painel com BTCobogós-miniaturas com 3 camadas, que apresenta maior diferença. Mais uma vez, o comportamento diferencial para este painel se confirma nesta análise.

O Gráfico 27 traz a mesma comparação, desta vez relativamente às diferenças entre as amplitudes higrométricas do ar, calculadas tendo em conta os registros para os lados opostos dos painéis ensaiados.

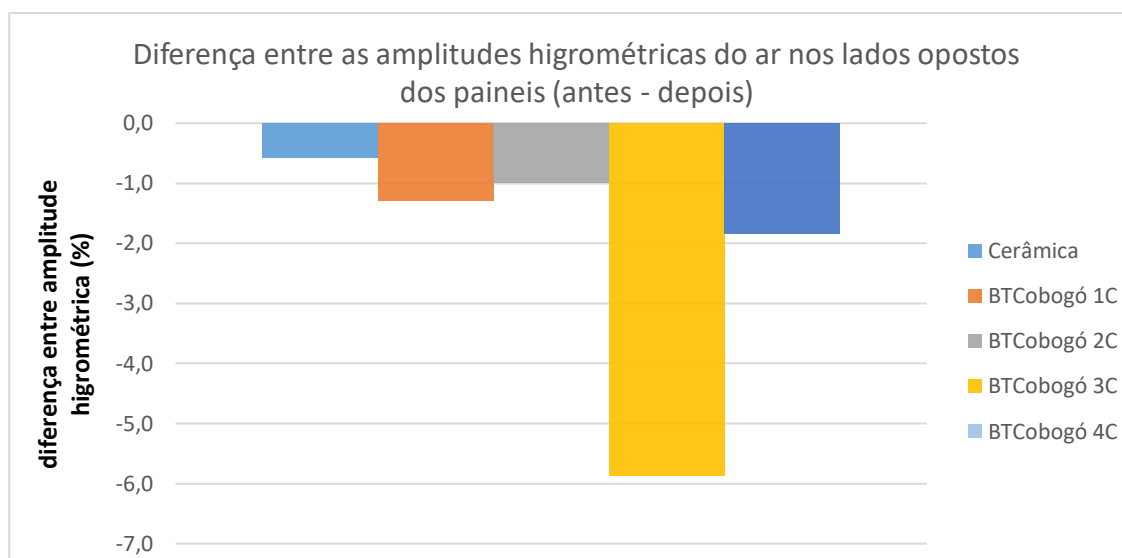


Gráfico 27 - Diferença entre amplitudes da umidade relativa do ar calculadas para registros antes e depois dos painéis
Fonte: Elaborado pelo autor

Novamente, tem-se que a diferença entre as amplitudes higrométricas (Gráfico 27), antes e depois dos painéis, é quase nenhuma quando se utiliza cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha (uma camada), enquanto que é no caso do painel com BTCobogós-miniaturas, com 3 camadas, é quase de 6%. Destaca-se, mais uma vez, o efeito esperado da terra crua comprimida estabilizada com cimento nos BTCobogós-miniaturas, interagindo com a umidade relativa do ar. Com respeito ao número de camadas com assentamento dos BTCobogós-miniaturas nos painéis, também fica evidenciada a melhor configuração com três camadas para a melhor condição higrométrica do ar depois que atravessa o painel. O painel com cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha é, entre as amostras, aquele que menos influencia nas características de umidade do ar.

Outro dado interessante que é possível explorar, a partir dos dados registrados nos ensaios realizados em túnel de vento, diz respeito ao tempo para as alterações da umidade relativa e da temperatura do ar no lado posterior aos painéis, em função das condições impostas com ar úmido e ar seco sobre a face anterior destes painéis. Neste sentido, os Gráficos 28 e 29 apresentam os tempos de elevação e redução da temperatura do ar.

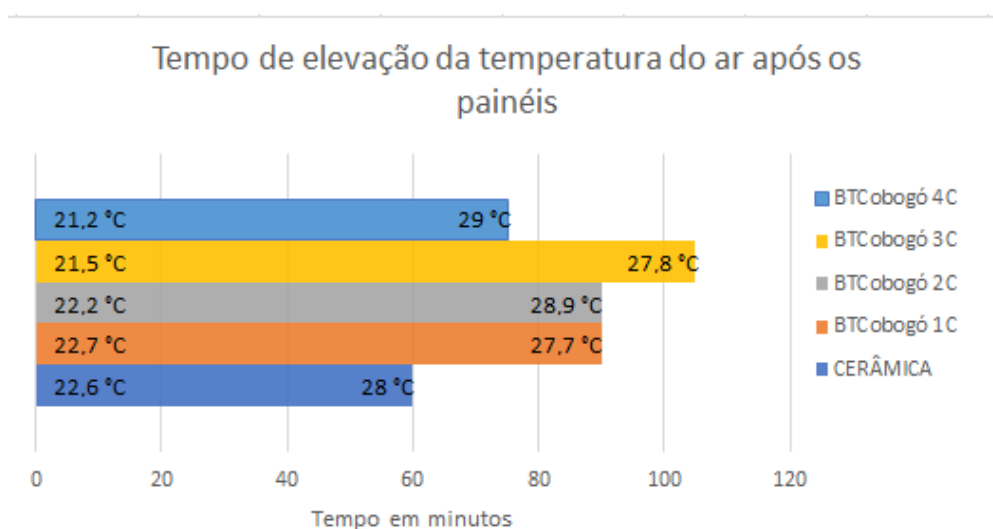


Gráfico 28 - Tempo de elevação da temperatura do ar - médias mínimas para médias máximas - após as amostras
Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 28, ver-se que, dentre as amostras, a que possui os cobogós-miniaturas em CERÂMICA oferece a menor resistência para a elevação da temperatura do ar no lado posterior ao painel, sendo em menor tempo (60 minutos). Em oposição, é nítida a maior resistência a esta elevação por parte do painel com BTCobogós-miniaturas (3 camadas), quando tem-se o tempo para elevação da temperatura do ar maior do que 100 minutos.

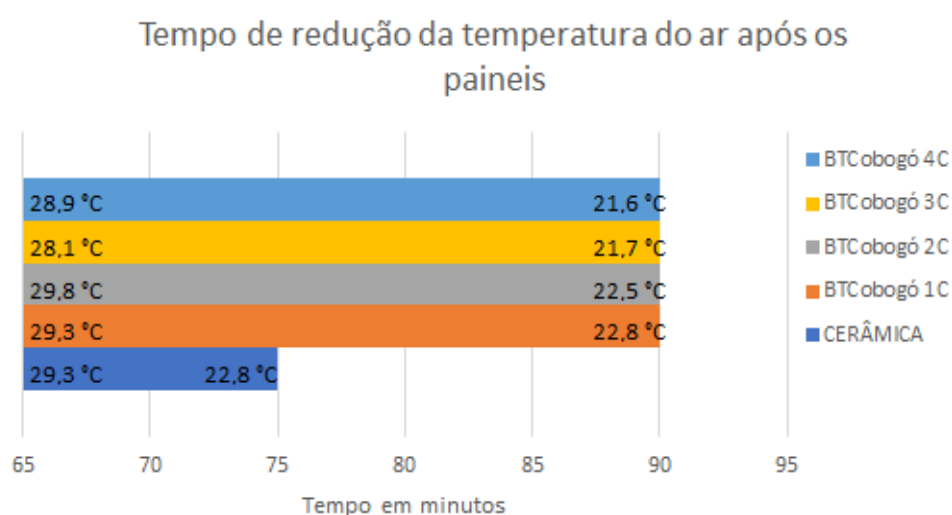


Gráfico 29 - Tempo de redução da temperatura do ar - médias mínimas para médias máximas - após as amostras
Fonte: Elaborado pelo autor

O **Erro! Fonte de referência não encontrada.**29 mostra os tempos de decaimento das temperaturas do ar em cada ensaio (para cada painel diferente).

Neste caso, nota-se que, independentemente da quantidade de camadas de BTCobogós-miniaturas inseridas (até quatro como foram ensaiadas) no painel o comportamento é idêntico com 90 minutos para a redução máxima da temperatura do ar no lado posterior ao painel. O painel com cobogós-miniaturas em cerâmica apresenta redução de temperatura do ar em apenas 75 minutos. Porém, em todos os casos a temperatura do ar é reduzida para 21,6 °C a 22,8 °C.

Nos Gráficos 30 e 31, pode-se ver a variação da umidade relativa do ar no lado posterior dos painéis, bem como os intervalos de tempo para que ocorra a elevação (Gráfico 30) e a redução (Gráfico 31), respectivamente.

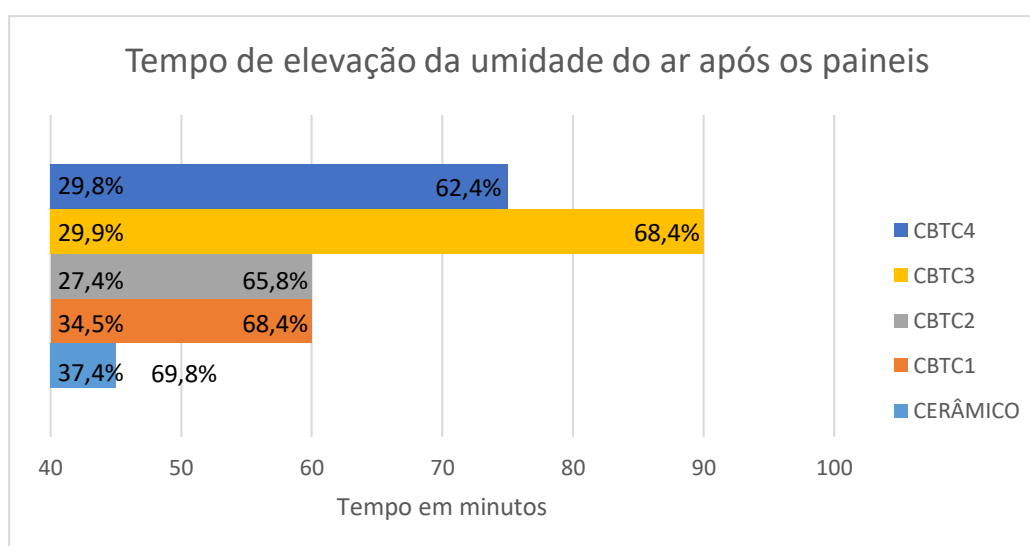


Gráfico 30 - Tempo de elevação da umidade relativa do ar - médias mínimas para médias máximas - após as amostras
Fonte: Elaborado pelo autor

Mais uma vez, nota-se que (Gráfico 30), enquanto o painel de cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha leva menos tempo (45 minutos) para elevar a umidade relativa do ar no lado posterior ao painel, aquele composto por três camadas de BTCobogós-miniaturas demorou mais tempo (90 minutos) para o mesmo efeito, considerando as condições impostas durante os ensaios em túnel de vento.

Ao modificar a condição do ciclo (Gráfico 31), quando a umidade relativa do ar no interior do túnel de vento é reduzida, o comportamento comparativo entre as amostras se mantém, com o tempo para a redução dos registros no lado posterior do painel com cobogós-miniaturas em cerâmica vermelha muito menor

(40 minutos), do que aquele registro verificado para o painel com BTCobogós-miniaturas com 3 camadas (120 minutos).

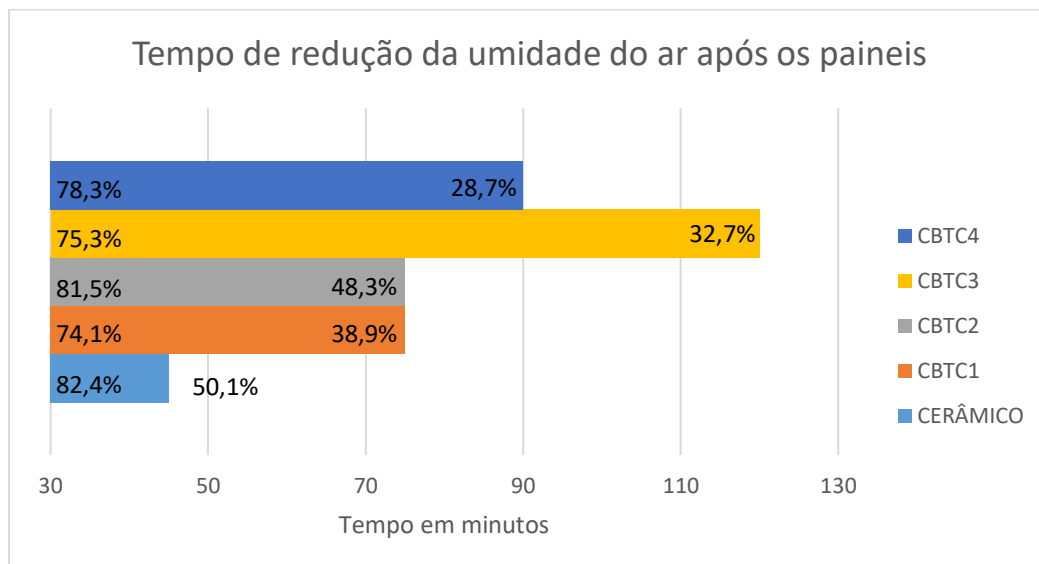


Gráfico 31 - Tempo de redução da umidade relativa do ar - médias mínimas para médias máximas - após as amostras
Fonte: Elaborado pelo autor

Nos ensaios realizados em túnel de vento, as características higrotérmicas do ar simuladas extrapolaram (UR de 30% a 80%) os limites de conforto humano (UR de 40% a 70%), mas não fogem à realidade, considerando que podem ocorrer em regiões com clima quente e seco, como no semiárido paraibano. De fato, no Gráfico 32, pode-se observar as leituras de temperatura e umidade relativa do ar registradas no município de Cajazeiras-PB, localizado no extremo oeste do estado da Paraíba, região caracterizada principalmente por suas altas amplitudes higrotérmicas.

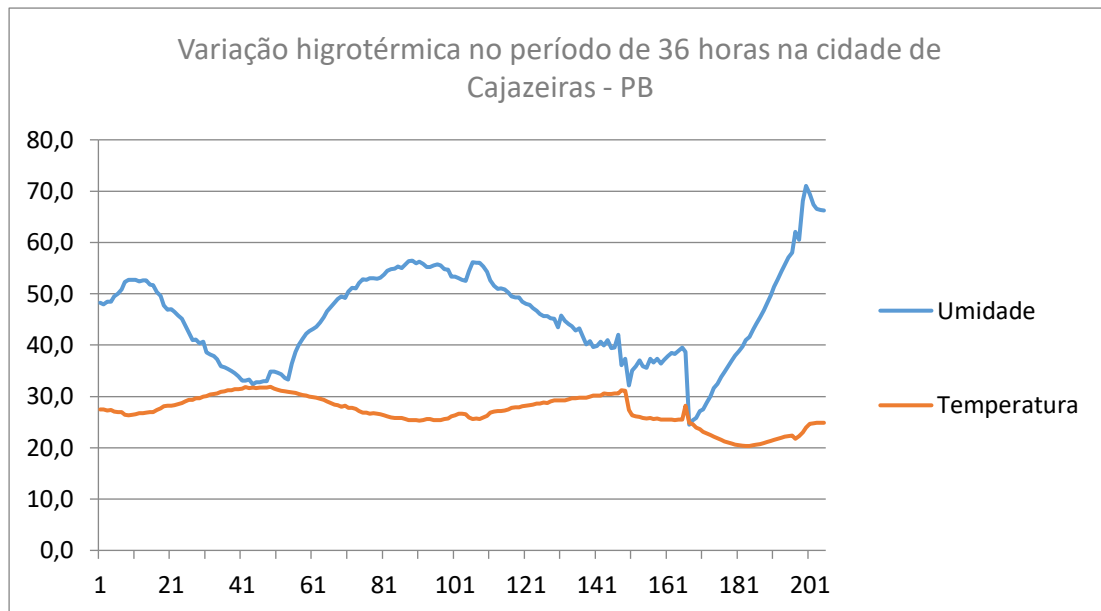


Gráfico 32 - Variação higrotérmica no período de 36 horas na cidade de Cajazeiras-PB
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos dados coletados, por meio de um Hobo (com *datalogger*) instalado em ambiente protegido naquela cidade, a umidade relativa do ar (linha azul – Gráfico 32) atingiu o valor mais baixo igual a 24,5 % às 22:30 h do dia 12/09/2017 (leitura nº 167), enquanto que o valor mais alto foi igual a 71 %, às 06:45 h do dia 13/09/2017 (leitura 200). Trata-se de uma amplitude higrométrica de 46,5 % para a umidade relativa do ar, durante o período dos registros. Outra questão interessante é a confirmação de que a temperatura do ar mais alta corresponde à umidade relativa do ar mais baixa e vice-versa, a cada 12 horas, de forma semelhante como a que foi estabelecida para a mudança dos ciclos utilizados no túnel de vento.

Contudo, é preciso relativizar os resultados obtidos no túnel de vento que, de certa forma, nos seus procedimentos simulados traduzem uma situação ainda abstrata, dada a velocidade nas inversões dos ciclos higrotérmicos, o que não acontece exatamente nas variações de temperatura e umidade relativa do ar na condição real. Enquanto nos experimentos simulados a mudança da umidade relativa do ar passa de 30 % para 80 % de maneira abrupta em pouco tempo, em condições naturais, o incremento de vapor de água no ar ocorre de forma lenta e gradativa, levando até doze horas para atingir o valor máximo. A situação inversa também é lenta e gradativa.

De todo modo, a partir da confirmação de que o BTCobogó tem potencial para alterar as qualidades do ar, no lado interno do ambiente controlado, como

foi testado, pode-se imaginar que num caso real, a ser ensaiado na condição de clima com grande amplitude higrotérmica (como a constatada na região do semiárido paraibano), poderiam ser alcançados resultados ainda mais positivos.

As variações lentas nos parâmetros do ar (temperatura e umidade relativa do ar) nas condições naturais do clima onde o teste esteja sendo realizado pode possibilitar que o material, a terra crua comprimida estabilizada com cimento, interaja de maneira mais eficiente com o ar em seu entorno e tenha maior tempo para condicionar adequadamente o volume de ar interno da edificação, ou mesmo do protótipo de um ambiente construído, cujas fachadas tenham painéis com os BTCobogós.

6 Conclusão

Com a presente pesquisa buscou-se caracterizar o elemento vazado proposto com terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland, denominado BTCobogó, quanto a capacidade de modificar a qualidade do ar no interior de ambientes construídos. A ideia de que este elemento vazado proposto, quando instalado em fachadas de uma edificação possa propiciar, nos ambientes internos, condições mais adequadas de conforto para os usuários foi simulada através de teste em túnel de vento, cujos resultados foram encorajadores.

Com base na análise dos resultados obtidos ficou evidenciada a potencialidade que o BTCobogó tem para regular as condições de temperatura e umidade relativa do ar, de modo a atender valores dentro da faixa adequada para o conforto higrotérmico (especialmente a UR entre 40 % e 70 %). Isto foi confirmado nos experimentos realizados, quando se evidenciou o fenômeno da alteração das condições ambientais (temperatura e umidade do ar), logo após a passagem do ar pelas aberturas do BTCobogós presentes no painel, principalmente ao associar a execução em camadas de painéis justapostas, como foi sugerido nesta pesquisa. Neste sentido, cabe destacar a indicação de melhor comportamento na regulação da temperatura e umidade relativa do ar para o caso testado com 3 camadas de BTCobogós justapostas no painel, executado com 27 cm de espessura total (correspondente às espessuras de três BTCobogós).

Outra questão interessante é sobre a posição invertida dos espaços vazados dos elementos em relação à camada imediatamente anterior, durante o assentamento, que se mostrou eficiente para criar maior percurso do ar e maior superfície de contato entre ele e o material do BTCobogó, durante os fluxos através do painel, no interior do túnel de vento. Com esta estratégia, verificou-se que foi muito bem aproveitada a interação existente entre o material utilizado no BTCobogó e as variações de umidade relativa do ar, impostas durante os ciclos testados.

A adoção da miniaturização do elemento vazado estudado, na escala 1:4, foi importante para viabilizar, a baixo custo, os ensaios em túnel de vento, permitindo analisar o comportamento comparativo entre dois materiais, terra

crua comprimida estabilizada com cimento Portland e cerâmica vermelha cozida a 900 °C, utilizados na confecção de cobogós-miniaturas e nos respectivos painéis vazados. Os resultados indicam que estes procedimentos experimentais adotados foram adequados para atender os objetivos da pesquisa, permitindo verificar os fenômenos de forma confiável, como foi realizado em outros estudos, que utilizaram também amostras em escala reduzida.

O teste de princípio do comportamento diferenciado pelos vários materiais testados, quanto à absorção de vapor de água do ar, em ambiente fechado, foi comprovado nas análises iniciais, através da verificação por ensaios no interior de uma câmara climática (C-CLIMÁTICA) simples, que foi projetada e executada como parte importante do desenvolvimento desta pesquisa. O baixo custo na confecção da C-CLIMÁTICA e o sucesso na obtenção do resultado, através de seu uso, devem ser pontos destacados nesta pesquisa, considerando a iniciativa para a superação das dificuldades enfrentadas em laboratório, cujo equipamento previsto inicialmente esteve avariado e sem perspectiva de conserto.

Da mesma forma, o projeto e a construção do túnel de vento, bem como a utilização de todos os dispositivos para o efetivo controle da temperatura e da umidade relativa do ar no seu interior, foi fundamental para atender os objetivos da presente pesquisa. As simulações dos ciclos propostos foram viabilizadas de maneira segura para os testes realizados, com a inserção adequada dos painéis de elementos vazados no interior do túnel de vento. O aparato funcionou de maneira condizente à necessidade da realização dos testes programados, cujo mecanismo de funcionamento, ainda que simples, ofereceu as condições necessárias para a avaliação do comportamento dos painéis vazados, frente às condições do ar, impostas pelos ciclos adotados.

A partir dos dados obtidos e dos procedimentos adotados, que se mostraram confiáveis, pode-se concluir que a terra crua comprimida e estabilizada com cimento Portland, associada a um elemento vazado com a geometria proposta, além de permitir a execução de vedação externa permeável ao ar, pode cumprir com outra função, quando se trata de painéis em fachadas, que recebem a ventilação predominante. Isto é, esta vedação pode ser configurada, de tal forma, a reduzir a vazão do fluido (ar) e aumentar a superfície de contato do material com o ar, podendo melhorar as condições de conforto na parte interna de uma edificação, em função do clima onde ela esteja inserida.

Com vista nas possibilidades que o elemento proposto apresenta, esta pesquisa sugere uma continuidade no tocante as suas avaliações para aplicações em contexto real. Além disso, ainda restam questões a serem respondidas, dentre as quais, aquela referente ao fato de que o acréscimo da quarta camada de BTCobogós-miniaturas não correspondeu à continuidade do desejável condicionamento do ar no lado posterior ao painel, no interior do túnel de vento. Tal fenômeno parece sugerir que naquela situação houve um excesso de percurso e superfície de material do BTCobogó-miniatura, interagindo com o vapor d'água presente no ar que atravessava o painel multicamadas. Pelo visto, a quarta camada de BTCobogós-miniaturas parece atuar de forma independente sobre o ar, que havia atravessado as três camadas anteriores, retirando ou lançando umidade no fluído tardiamente, o que pode justificar a diminuição dos efeitos após o painel com 4 camadas de elementos vazados propostos.

Diante do exposto, fica como sugestão para a continuidade desta pesquisa:

- Análise do efeito de condicionamento do ar que atravessa painéis com multicamadas de elementos vazados com diferentes materiais, cobogós em cerâmica vermelha (cozida a 900 °C) e BTCobogós (com terra crua comprimida e estabilizada com cimento Portland);
- Estudo da influência do acréscimo do número de camadas, para além de 4, de BTCobogós aplicados em painel vazado, quanto à capacidade de alterar a umidade relativa do ar que o atravessa;
- Avaliação da capacidade dos BTCobogós, aplicados em painéis, para regular a temperatura e a umidade relativa do ar que o atravessa, quando submetidos às condições naturais de clima quente e seco, em distintas estações do ano;

7 Referências

ALBERNAZ, M. P.; LIMA, C. M. **Dicionário Ilustrado de Arquitetura**. São Paulo – SP: ProEditores, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2003.

BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. Cap. 45: **Terra Crua para Edificações**. In: ISAIA, G. E. (Editor). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais** - São Paulo, SP: IBRACON, 2007.

BARBOSA, N. P. **Transferência e aperfeiçoamento da tecnologia construtiva com tijolos prensados de terra crua em comunidades carentes**. In: FORMOSO, C. T. (Editor); INO, A. (Editor) - **Inovação, Gestão da Qualidade e Produtividade e Disseminação do Conhecimento na Construção Habitacional** - Porto Alegre, RS: ANTAC, 2003. (Coletânea Habitare).

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **ME51: Solos – Análise Granulométrica. Método de Ensaio**. 1994. 12p.

BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. **A indústria cerâmica brasileira. Cerâmica Industrial**. Disponível em: <<http://www.ceramicaindustrial.org.br>>. Acesso em: 20 abr. 2015.

CAGNON, H.; AUBERT, J. E.; COUTAND, M.; MAGNIONT, C. **Hygrothermal properties of earth bricks**. *Energy and Buildings* 80, p.208-217, 2014.

CUNHA, E. G.; **Elementos de arquitetura de climatização natural: método projetual buscando a eficiência energética nas edificações**. 2ª Ed. – Porto Alegre. Masquatro Editora, 2006.

FARIA, O. **Caracterização de solos para uso na arquitetura e construção com terra**. In: JORGE, F. (Editor). **Arquitetura de terra em Portugal** – 1ª Ed. – Lisboa. Argumentum, 2005.

FREIRE, W. J. (Coord.); BERALDO, A. L. (Coord.) - **Tecnologias e Materiais Alternativos de Construção** – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 5ª Ed - São Paulo. Studio Nobel, 2001.

LACERDA, P. **Itavotu: Elemento Vazado de Terra Crua Comprimida e Estabilizada com Cimento**. Trabalho final e graduação do curso de Arquitetura e Urbanismo. João Pessoa - PB: UFPB, Julho de 2015.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. - **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª Ed. - São Paulo: Eletrocel/Procel, 2014.

LIAO, C.; CHIU, K. **Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative coolings pads in Taiwan Region**. Building and Environment. v 37. p. 177-187. 2002.

LOURENÇO, P. **Construção com terra – viabilidade econômica**. In: JORGE, F. (Editor). **Arquitetura de terra em Portugal** – 1ª Ed. – Lisboa. Argumentum, 2005.

MAURÍCIO, R. M.; **Estudo teórico e experimental das ligações diretas contra-fiadas entre paredes de blocos de concreto em escala real e reduzida 1:4**. 2005. 224p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, Ilha Solteira, 2005.

MCGREGOR, F.; HEATH, A.; FODDE, E.; SHEA, A.; **Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks**. Building and Environment. v 75. p. 11-18. 2014.

MINKE, G – **Manual de construção com terra: uma arquitetura sustentável**. Trad. Jorge Simões. 1ª Ed - São Paulo: B4, 2005.

MOREIRA, E. M. S.; **Análise experimental em escala reduzida de ligações entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos submetidas a ações verticais**. 2007. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2007.

MOREIRA JÚNIOR, O.; **Construção e validação de um túnel de vento para ensaios de estimativa da deriva em pulverizações agrícolas.** 2009. 79p. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Botucatu, 2009.

NEVES, C. **O desempenho térmico da edificação de terra.** In: JORGE, F. (Editor). *Arquitectura de terra em Portugal – 1ª Ed. – Lisboa.* Argumentum, 2005.

NEVES, L. P.; **Adoção do partido na arquitetura.** 3ª Ed. – Salvador. EDUFBA, 2012

NETO, J. A. N.; CORRÊA, M. R. S., **Emprego de modelos reduzidos no estudo da alvenaria estrutural de blocos.** *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, V.8, N°31, p. 77-91, 2006.

PONTE, M. M. C. C. **Arquitetura de terra: o desenho para a durabilidade das construções.** 2012. 298p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012

QUINTINO, G. **Blocos de terra compacta (BTC).** In: JORGE, F. (Editor). *Arquitectura de terra em Portugal – 1ª Ed. – Lisboa.* Argumentum, 2005.

SARTORI, I.; HESTNES A. G. **Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article.** *Energy and Buildings*, p. 249-257, 2007.

SILVA, A. S.; MILANI, A. P. S.; BERTOCINI, S. R. **Avaliação preliminar de métodos de ensaio para caracterização mecânica de blocos de terra comprimida.** Ecomáquinas. Disponível em: <<http://ecomaquinas.com.br/produtos/74>>. Acesso em: 26 nov. 2014.

VIEIRA, A; BORBA, C; RODRIGUES, J. **COBOGÓ DE PERNAMBUCO.** 1ª Ed. – Pernambuco. Josivan Rodrigues dos Santos, 2012.

VIGODERIS, R. B.; TINOCO, I. F. F.; LACERDA FILHO, A. F.; SILVA, J. N.; GATES, R. S.; PAULI, D. G.; SILVA, C. E.; GUIMARÃES, M. C. C.; **Construção de túnel de vento reduzido, visando a avaliação de argila expandida em**

sistemas de resfriamento adiabático evaporativo para arrefecimento térmico em galpões de produção animal. Engenharia na Agricultura, v.15, nº3, p. 191-199. Jul/Set. Viçosa, 2007.

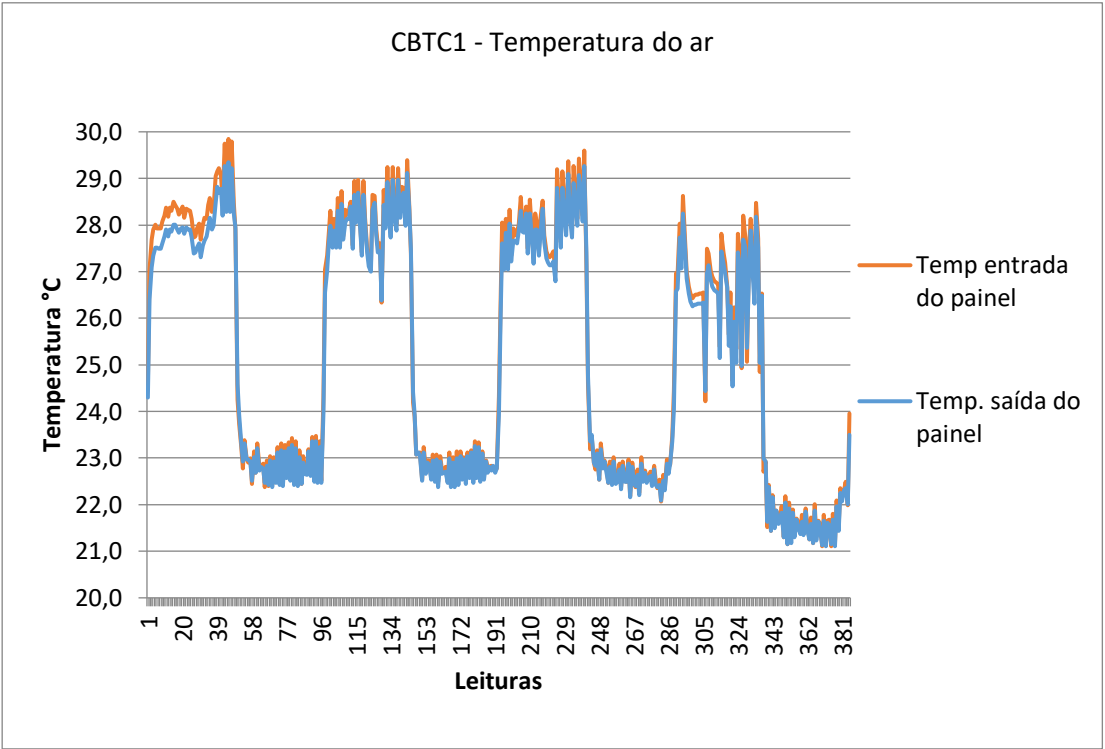
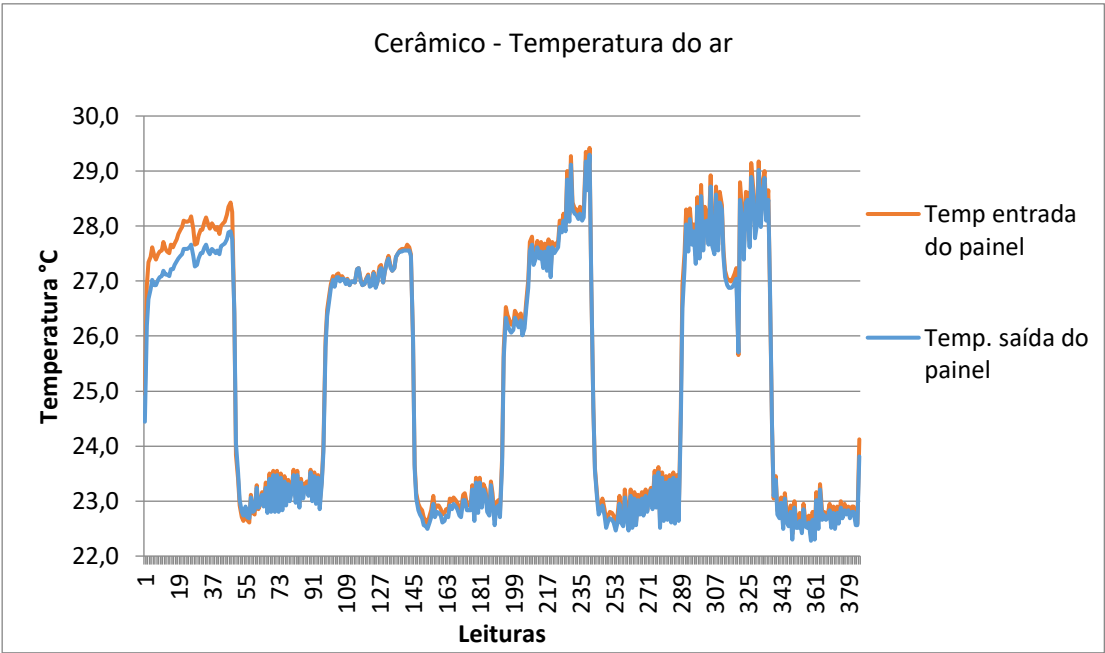
APÊNDICES

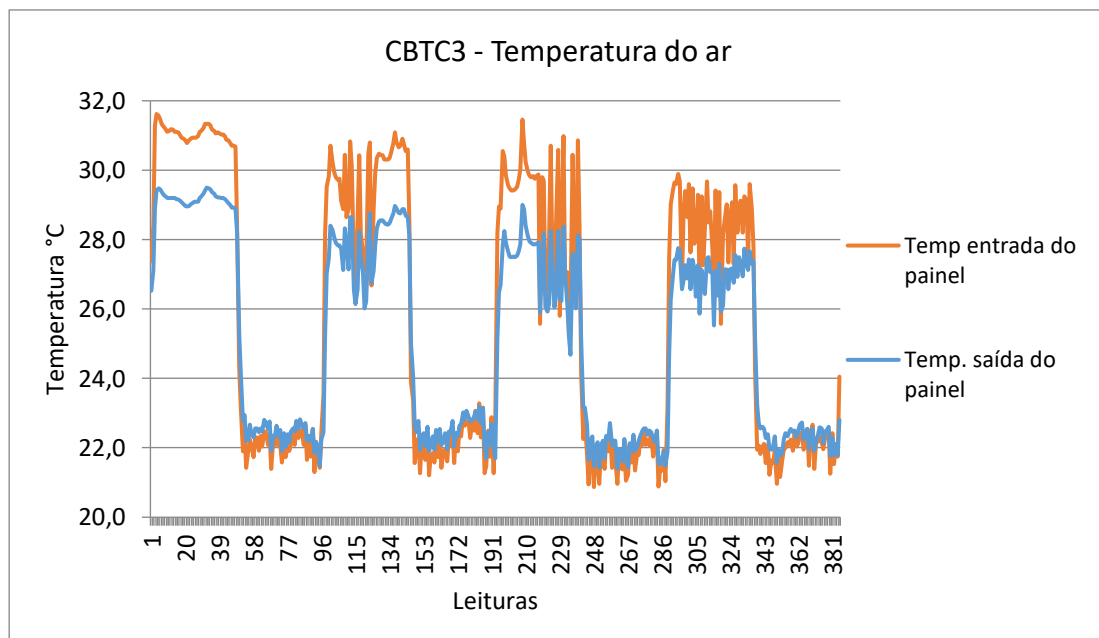
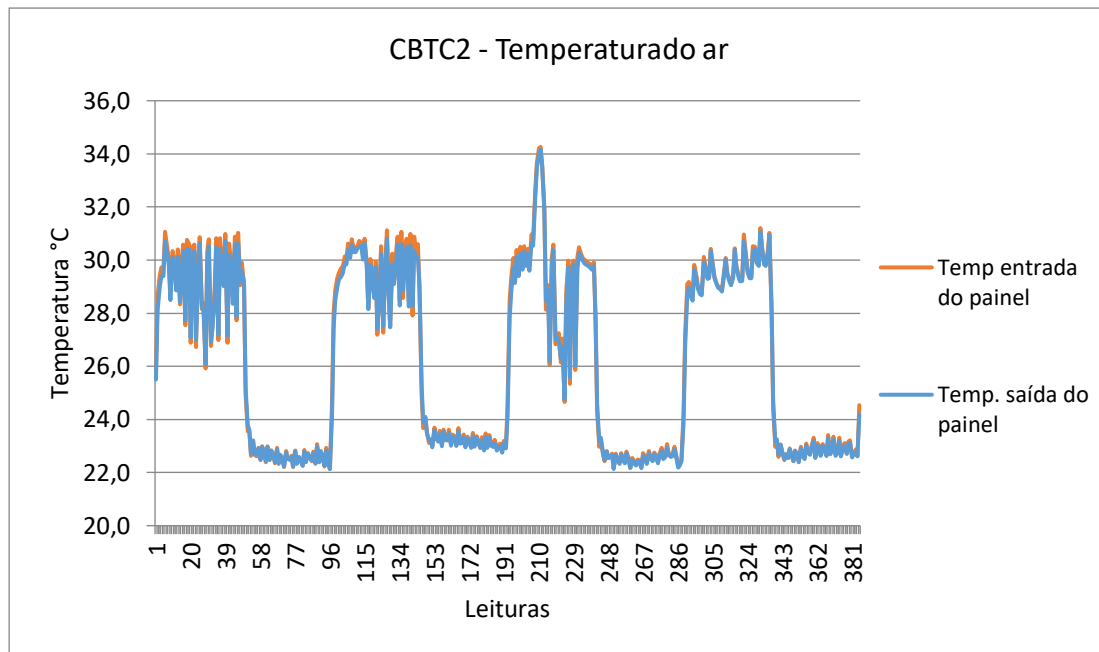
APÊNDICE A – Planilha de ensaio de resistência à compressão dos elementos vazados de terra crua comprimida estabilizada com cimento Portland (A) e elementos vazados de terra crua comprimida (B)

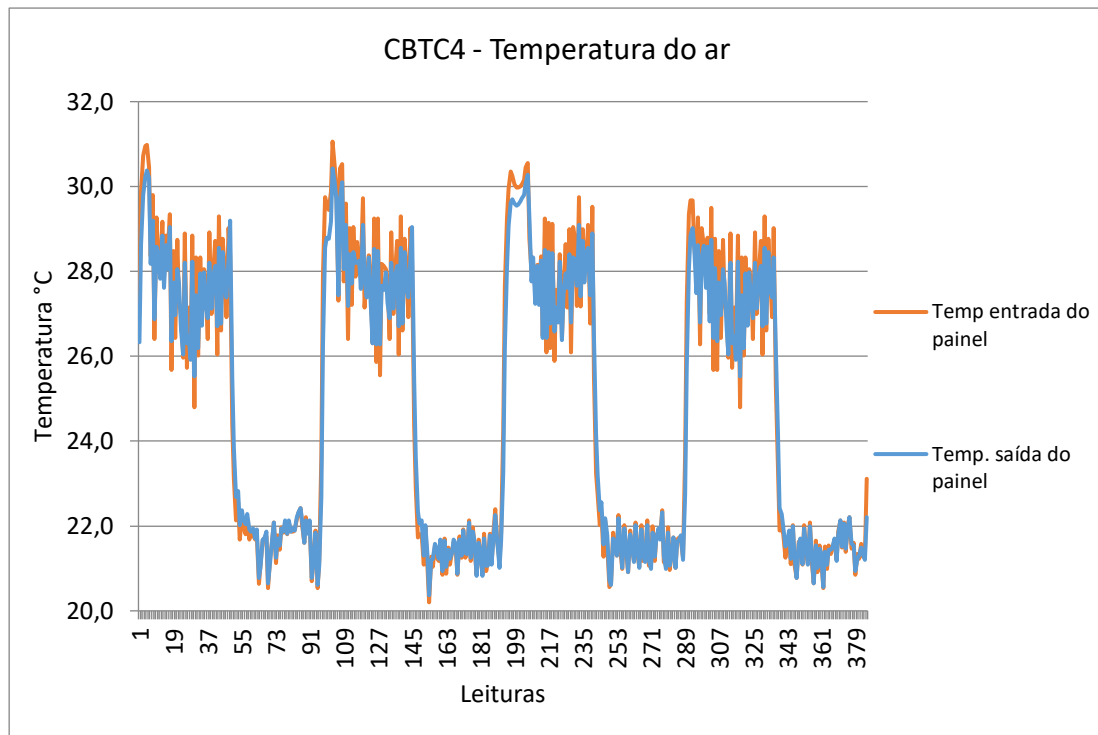
AMOSTRA	LARGURA	COMPRIMENTO	ÁREA	MASSA AMB	MASSA SECA	UMIDADE	FORÇA P/ ROMPER	Kgf/cm²	RC (MPa)	Média (Mpa)
A1	2,68	5,85	15,68	166	164,2	1,08%	589	37,57	3,68	3,88
A2	2,65	5,85	15,50	163,4	161,8	0,98%	357	23,03	2,26	
A3	2,55	5,85	14,92	159,1	157,4	1,07%	891	59,73	5,86	
A4	2,64	5,85	15,44	168,4	166,6	1,07%	701	45,39	4,45	
A5	2,57	5,85	15,03	163,3	161,5	1,10%	671	44,63	4,38	
A6	2,59	5,85	15,15	160,8	158,8	1,24%	463	30,56	3,00	
B1	2,75	5,84	16,06	177,7	176,1	0,90%	87	5,42	0,53	0,55
B2	2,62	5,84	15,30	174,1	173,1	0,57%	90	5,88	0,58	
B3	2,68	5,84	15,65	175,9	175,0	0,51%	85	5,43	0,53	
B4	2,62	5,84	15,30	175,3	174,4	0,51%	78	5,10	0,50	
B5	2,63	5,84	15,36	175,2	174,3	0,51%	88	5,73	0,56	
B6	2,64	5,84	15,42	171,1	170,1	0,58%	89	5,77	0,57	

APÊNDICE B – Gráficos das amostras ensaiadas em túnel de vento

Temperatura do ar antes e depois dos painéis

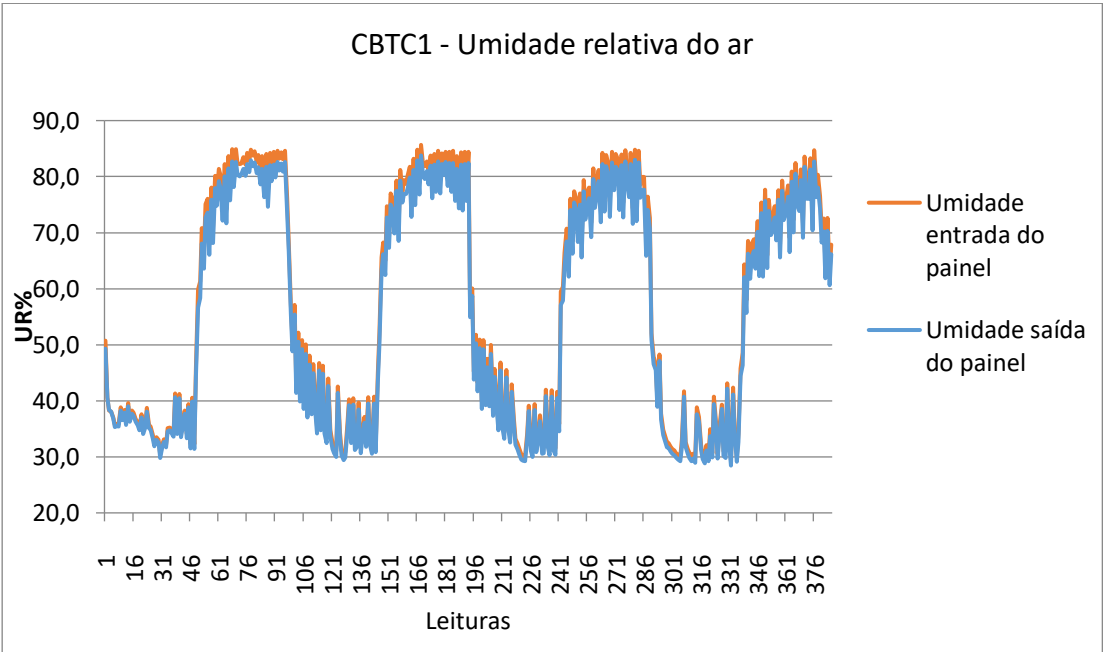
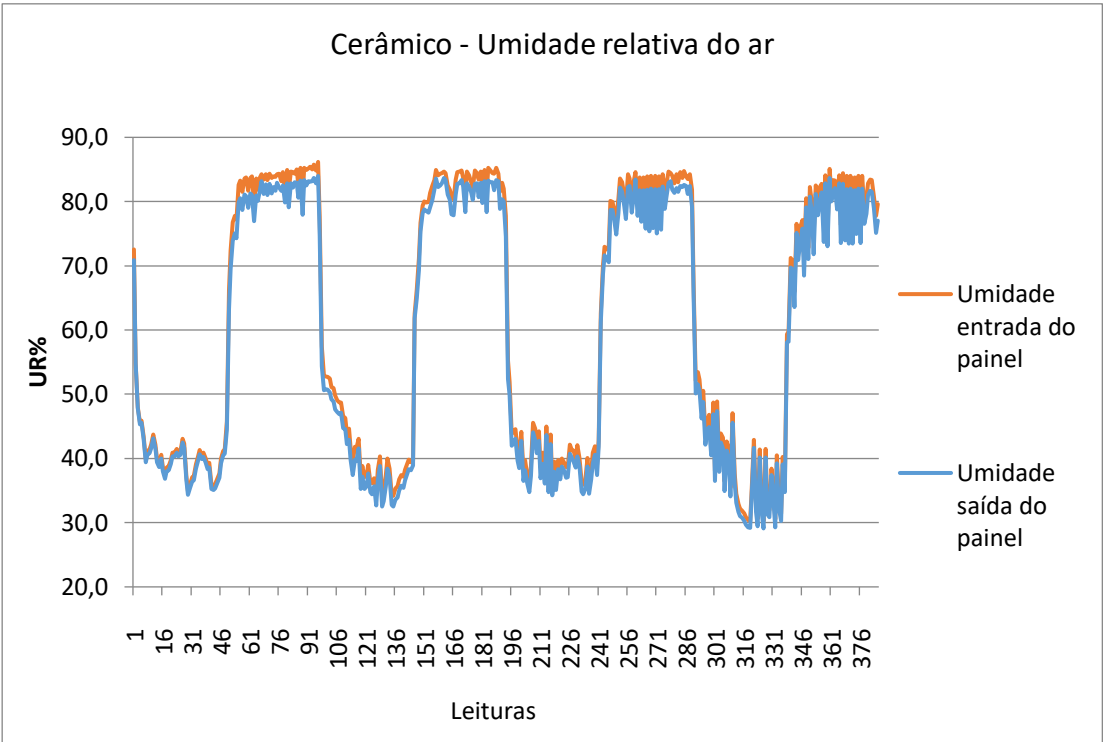


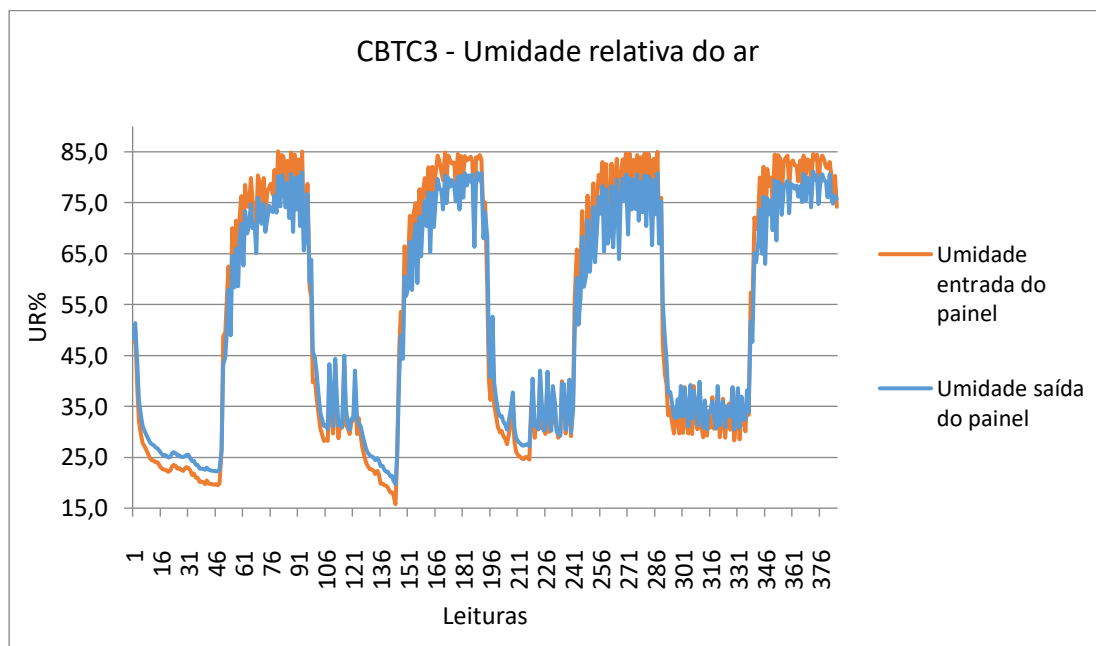
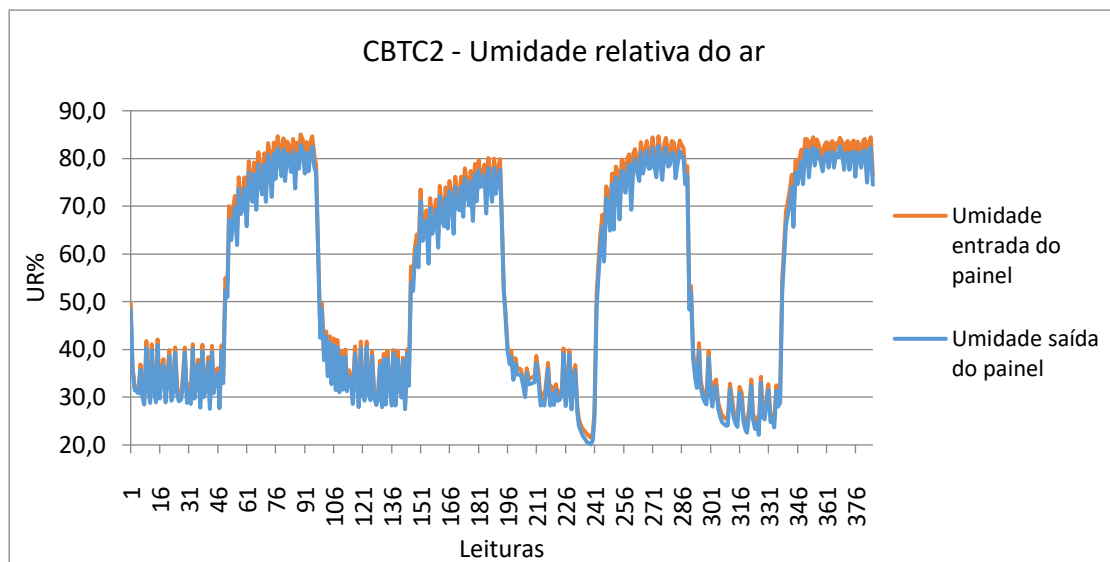


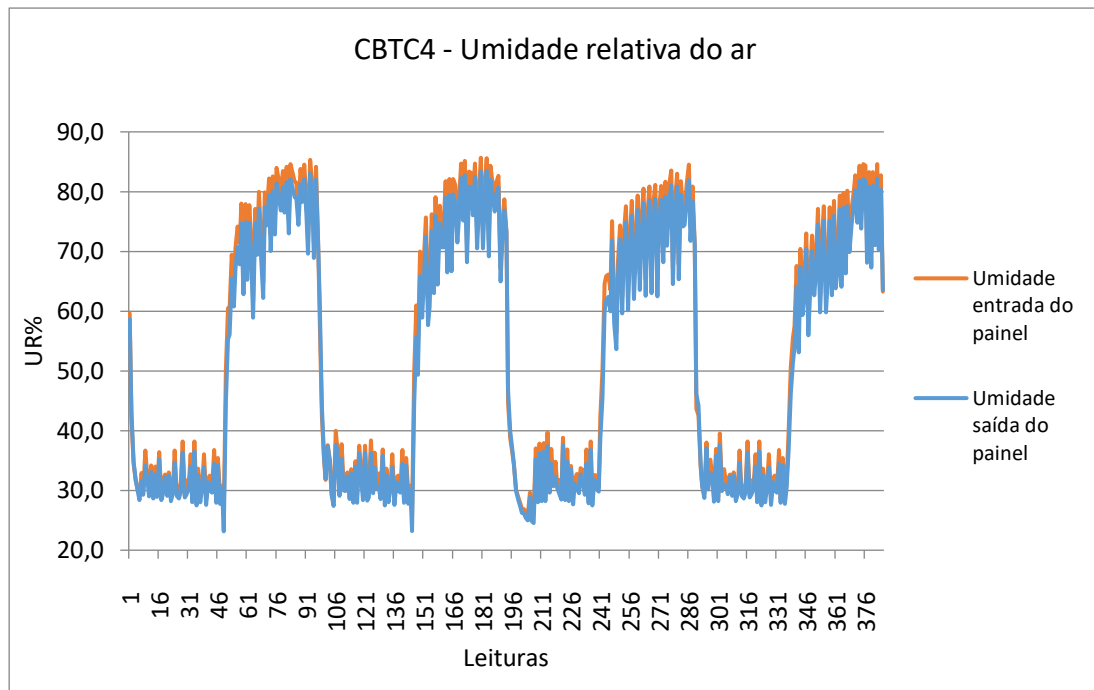


APÊNDICE C – Gráficos das amostras ensaiadas em túnel de vento

Umidade relativa do ar antes e depois dos painéis







APÊNDICE D – Gráficos de temperatura e umidade relativa do ar antes e depois do painel CBTC3 (contraprova)

