

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE VEDAÇÕES EM BLOCOS DE
CONCRETO PRODUZIDOS COM LÃ DE ROCHA**

CAMILA ROCHA DE SOUZA

Salvador

2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE VEDAÇÕES EM BLOCOS DE
CONCRETO PRODUZIDOS COM LÃ DE ROCHA

Camila Rocha de Souza

Dissertação apresentada ao mestrado em
Engenharia Ambiental Urbana como requisito
parcial à obtenção do título de **Mestre em
Engenharia Ambiental Urbana.**

Orientador: Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves

Agência Financiadora: CNPq

Salvador

2017

*LOCAL A SER INSERIDA A FICHA CATALOGRÁFICA, APÓS DEFESA E CORREÇÕES
FINAIS*

Os alunos dos Programas de Pós-graduação de Mestrado e Doutorado ao defenderem suas dissertações e teses, respectivamente, têm necessidade de solicitar a Biblioteca da Escola Politécnica a confecção da ficha catalográfica para constar na versão final dos seus trabalhos.

Visando atender com mais comodidade e rapidez, o Sistema de Bibliotecas da UFBA está oferecendo a comunidade acadêmica o serviço de geração automática de ficha catalográfica *online*. Desse modo, a partir de agora os nossos usuários poderão confeccionar sua própria ficha e imprimi-la.

Para ter acesso a este serviço basta acessar: www.sibi.ufba.br e clicar no campo “Faça sua ficha catalográfica”.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pela vida, dedicação e por todo amor.

FORMAÇÃO DO CANDIDATO

Arquiteta e Urbanista, formada pela Universidade Federal da Bahia, UFBA (2011).

“Aqui mora a fé, a sublime qualidade dos que jamais deixarão de acreditar na força superior do bem.”

Joanna de Ângelis

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE CAMILA
ROCHA DE SOUZA APRESENTADA AO Mestrado EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, EM 11 DE AGOSTO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jardel Pereira Gonçalves
Orientador
PPEC - UFBA

Prof. Dr. Francisco Gabriel Santos Silva
Co-Orientador
PPEC - UFBA

Prof^a Dr^a Márcia Rebouças Freire
FAUFBA- UFBA

Prof. Dr. Sandro Fábio César
PPEC – UFBA

Prof^a. Dr^a. Janaíde Cavalcante Rocha
PPGEC- UFSC

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus, razão de todas as coisas, o meu muito obrigada por me dar a vida, a força e o otimismo para encarar os desafios da vida da maneira mais leve. Sem esta grande ajuda, eu não teria aqui chegado.

Aos meus pais, meus exemplos, pela amizade, companheirismo, dedicação, palavras de incentivo, pelo amor inabalável, melhores não haveria de existir, eternamente grata por tudo, estamos juntos. Aos meus queridos irmãos, cunhadas, pela força e incentivo e aos meus amados sobrinhos, razões de tantas alegrias, melhores presentes da minha vida.

À toda minha grande família Avós, Avôs, tios, tias, primos, primas, que mesmo de longe emanaram energias positivas e palavras de torcida.

A todos os meus amigos, não tenho como citar todos os nomes, o meu obrigada por me proporcionarem em meio a tanta luta, momentos de descontração e alegria, acho que agora poderei estar mais presente, risos. À Lili e a Hugo, a força que vocês me deram foi essencial, obrigada pela amizade. A Débora, pelo companheirismo, e palavras de incentivo, foi muito importante ter você ao meu lado. A dona Liu, pelo cuidado e palavras de otimismo. Todos vocês fazem parte desta vitória.

A minha amiga querida Sandra, como é importante a sua amizade, obrigada por partilhar comigo exaustivamente todos os seus conhecimentos relacionados à minha pesquisa, e pelas milhares de dúvidas que me ajudou a sanar. Obrigada pela força!

Ao professor Jardel, orientador, por me auxiliar nesta caminhada, pelos conselhos, apoio, força e ideias, o meu muito obrigada.

Ao professor, coorientador Francisco Gabriel, obrigada por todo o incentivo, pelas palavras de entusiasmo, e por conseguir o empréstimo dos dataloggers utilizados nesta pesquisa, grandioso apoio.

Aos amigos do timoshenko e do mcs, que luta a nossa! Muito obrigada pelos momentos de suor, mas também de alegrias, pelo companheirismo. A Otacisio, João, Moises, Gabriel, Marcos por terem me ajudado a deslocar por diversas vezes os meus painéis de alvenaria tão pesados, sem vocês não seria possível a realização desta pesquisa. Aos acima citados e à Daniela, Milena, e Samile, pelos momentos de amizade e união, vamos conquistar tudo que sonhamos e merecemos! A Nicolas, meu IC, grande companheiro, grata pela enorme ajuda e dedicação!

Aos meus colegas da turma do mestrado, vencemos!

A professora Angela Borges Masuero, da UFRGS, por me receber tão bem no período que fiz intercâmbio, e também aos professores Miguel Aloysio Sattler, Paulo Smith Schneider e Carlos Torres Formoso, pela gentileza e disponibilidade em discutir as possibilidades da minha pesquisa, no período em que estive na UFRGS.

A professora Márcia Rebouças, por repartir seu conhecimento e por me ajudar a direcionar a minha pesquisa.

A Dona Rô, obrigada pelo cuidado com todos nós, pelo cuidado e pelo sorriso que nunca deixou de nos oferecer mesmo em meio a tanto trabalho.

A Paulo, do CETA, agradecida pelo incentivo e por sempre me dar apoio nos ensaios em que precisei da sua ajuda.

À toda a equipe da empresa Civil, em especial a Alessandro, pelo grande apoio na produção dos blocos de concreto e pela disposição em esclarecer quaisquer dúvida, grata pela força. Ao apoio da empresa Concremassa, pelo fornecimento das argamassas utilizadas nesta pesquisa.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos, o que promoveu dedicação exclusiva ao desenvolvimento desta pesquisa.

A todos, que direta ou indiretamente, me incentivaram e torceram por mim, meu sincero agradecimento, vamos em frente!

RESUMO

Diretamente relacionado à eficiência energética de uma edificação e à promoção do conforto aos seus usuários, o desempenho térmico do edifício é uma das exigências relativas à habitabilidade, presente no conjunto normativo NBR 15575(ABNT,2013) – Edificações Habitacionais – Desempenho. Acrescido a esta questão, o fato de que a alvenaria estrutural em blocos de concreto torna-se cada vez mais um sistema construtivo de larga utilização em todo o território brasileiro, porém pesquisas o apontam como um material que apresenta índices elevados de ganhos de calor, diante deste contexto faz-se necessário melhor investigação e propostas para à otimização do seu desempenho térmico. A presente pesquisa desenvolveu blocos de concreto com diferentes teores de lã de rocha 0%, 10%, 20% e 30% em substituição parcial à areia (agregado miúdo). Para a avaliação do desempenho térmico de alvenarias em blocos de concreto produzidos com lã de rocha, para a ZB-8, a pesquisa foi dividida em três etapas, de forma a investigar a influência da lã de rocha incorporada ao bloco de concreto, bem como analisar a influência da argamassa de revestimento (reboco) e da pintura externa com cor de baixa absorvância no comportamento térmico das alvenarias. Os resultados indicam que conforme o aumento do teor de lã de rocha incorporado ao concreto que compõe o bloco de concreto, quanto às suas propriedades físicas e mecânicas, houve significativa redução da resistência à compressão dos blocos de concreto, bem como houve aumento do índice de vazios e dos valores de absorção de água dos blocos, redução da densidade de massa aparente, e a condutividade térmica teve seus valores reduzidos. Quanto às propriedades térmicas do componente notou-se a tendência a ter seus valores otimizados quando incorporada a lã de rocha, o pode também ser refletido ao observar a alteração ocorrida nos valores de amortecimento e atraso térmico referentes ao comportamento térmico das alvenarias. Quanto à influência do acréscimo da argamassa de revestimento e da pintura externa com cor clara, nota-se que houve significativa melhoria do desempenho térmico das alvenarias. Portanto para melhor conforto térmico dos usuários das edificações da ZB-8, é indicado que a vedação composta por blocos de concreto seja rebocada e tenha a sua fachada pintada com cores claras.

Palavras Chaves: Bloco de concreto; Lã de rocha; Desempenho térmico;

EVALUATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF SEALS IN CONCRETE BLOCKS PRODUCED WITH ROCK WOOL

ABSTRACT

Directly related to the energy efficiency of a building and the promotion of comfort to its users, the thermal performance of the building is one of the requirements related to habitability, present in the normative set NBR 15575(ABNT,2013) - Edificações Habitacionais – Desempenho. In addition to this question, the fact that structural masonry in concrete blocks becomes increasingly a constructive system of wide use throughout the Brazilian territory, but research indicates it as a material that presents high rates of heat gains, In this context, better research and proposals are needed to optimize its thermal performance. The present research developed concrete blocks with different contents of rock wool 0%, 10%, 20% and 30% in partial replacement to the sand (small aggregate). For the evaluation of the thermal performance of masonry in concrete blocks produced with rock wool, for the ZB-8, the research was divided in three stages in order to investigate the influence of the rock wool incorporated to the concrete block, as well as to analyze The influence of the coating mortar (plaster) and the external paint with color of low absorption in the thermal behavior of the masonry. The results indicate that, according to the increase of the rock wool content incorporated to the concrete that composes the concrete block, as well as its physical and mechanical properties, there was a significant reduction of the compressive strength of the concrete blocks, as well as an increase in the values of Total water absorption of the blocks, reduction of apparent mass density, while the voids index increased and the thermal conductivity had their values reduced. As for the thermal properties of the component, the tendency to have its values optimized when incorporating the rock wool, can also be reflected when observing the alteration occurred in the values of damping and thermal delay referring to the thermal behavior of the masonry. As for the influence of the addition of the coating mortar and the external paint with light color, it was observed that there was a significant improvement in the thermal performance of the masonry. Therefore, for better thermal comfort of the users of the ZB-8 buildings, it is indicated that the fence composed of concrete blocks is plastered and has its facade painted with light colors.

Keywords: Concrete block; Rock wool; Thermal performance;

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA.....	vi
AGRADECIMENTOS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
SUMÁRIO.....	xi
ÍNDICE DE TABELAS.....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xx
1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1 Justificativa.....	22
1.2 Objetivos.....	24
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	24
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	24
1.3 Hipóteses do trabalho.....	24
1.4 Estrutura do trabalho.....	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 Sistema construtivo racionalizado: Alvenaria em Blocos de Concreto.....	26
2.1.1 <i>Caracterização dos Blocos de Concreto</i>	27
2.1.2 <i>Classificação dos Blocos de Concreto</i>	28
2.2. Propriedades termofísicas da envoltória da edificação.....	29
2.2.1 <i>Materiais opacos e a transferência de calor</i>	30
2.2.2 <i>Propriedades termofísicas da envoltória</i>	32
2.3. Desempenho térmico de edificações.....	38
2.3.1 <i>Desempenho térmico de vedações em blocos de concreto</i>	38
2.3.1.1 <i>Adição de materiais isolantes à matriz cimentícia</i>	39
2.3.1.2 <i>Influência do acréscimo da argamassa de revestimento e da pintura externa no desempenho térmico da vedação</i>	40
2.3.2 <i>Normas técnicas de desempenho térmico</i>	41
2.3.2.1 <i>NBR 15220: Desempenho térmico de edificações</i>	42
2.3.2.1.1 <i>Zoneamento Bioclimático</i>	43
2.3.2.1.2 <i>Diretrizes construtivas estabelecidas para vedações localizadas na ZB-8</i>	44

2.3.2.2	<i>NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho</i>	44
2.3.2.2.1	<i>Avaliação do desempenho térmico</i>	46
2.3.3	<i>Características do clima da cidade de Salvador/Bahia</i>	49
2.4	<i>Lã de Rocha</i>	51
3.	METODOLOGIA	56
3.1	<i>Descrição das Etapas do Programa Experimental</i>	56
3.2	<i>Simulações Térmicas</i>	58
3.2.1	<i>Simulação térmica Etapa A</i>	59
3.2.1.1	<i>Objetivos</i>	59
3.2.1.2	<i>Método</i>	59
3.2.1.2.1	<i>Definição de parâmetros</i>	60
3.2.2	<i>Simulação térmica Etapa B</i>	65
3.2.2.1	<i>Objetivos</i>	65
3.2.2.2	<i>Método</i>	65
3.2.2.2.1	<i>Definição de parâmetros</i>	66
3.3	<i>Desenvolvimento de blocos de concreto contendo lã de rocha</i>	70
3.3.1	<i>Caracterização dos materiais</i>	70
3.3.2	<i>Dosagem</i>	72
3.3.3	<i>Produção e Cura dos blocos de concreto contendo lã de rocha</i>	73
3.4	<i>Avaliação dos blocos: Propriedades físicas e mecânicas</i>	74
3.4.1	<i>Ensaio de resistência à compressão</i>	75
3.4.2	<i>Ensaio de absorção total de água nos blocos</i>	76
3.4.3	<i>Índice de Absorção Inicial de Água (AAI)</i>	77
3.4.4	<i>Determinação da densidade de massa aparente e do índice de vazios</i>	78
3.4.5	<i>Ensaio para determinação da condutividade térmica</i>	80
3.4.5.1	<i>Projeto e execução de câmara térmica</i>	80
3.4.4.2	<i>Determinação da Condutividade Térmica do concreto dos blocos</i>	87
3.4.4.2.1	<i>Metodologia</i>	87
3.5	<i>Avaliação das alvenarias em blocos de concreto: desempenho térmico</i>	91
3.5.1	<i>Cálculo das Propriedades térmicas</i>	91
3.5.2	<i>Ensaio de Fluxo Térmico das alvenarias</i>	91
3.5.2.1	<i>Determinação do amortecimento (μ) e atraso térmico (ϕ)</i>	92
3.5.2.2	<i>Metodologia do ensaio</i>	92
3.5.2.3	<i>Etapas do ensaio de fluxo térmico</i>	98

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	100
4.1. Resultados e análises das Simulações térmicas: Etapa A e Etapa B.....	100
4.1.1 <i>Simulação térmicas Etapa A</i>	100
4.1.1.1 <i>Considerações finais</i>	107
4.1.2 <i>Simulação térmicas Etapa B</i>	108
4.1.2.1 <i>Considerações finais</i>	113
4.2. Avaliação dos blocos: propriedades físicas e mecânicas.....	115
4.2.1 <i>Ensaio de resistência à compressão</i>	115
4.2.1.1 <i>Conclusões</i>	117
4.2.2 <i>Densidade de massa aparente e índice de vazios</i>	117
4.2.3. <i>Ensaio de absorção total de água dos blocos</i>	120
4.2.4. <i>Ensaio de absorção inicial de água dos blocos</i>	121
4.2.5 <i>Determinação da condutividade térmica</i>	122
4.3. Avaliação das alvenarias em blocos de concreto: desempenho térmico.....	126
4.3.1 <i>Análise das Propriedades térmicas das alvenarias</i>	126
4.3.1.1 <i>Análise quanto à influência da lã de rocha</i>	130
4.3.1.2 <i>Análise quanto à influência da argamassa de revestimento</i>	131
4.3.1.3 <i>Análise quanto à influência da pintura externa</i>	132
4.3.1.4 <i>Avaliação do desempenho térmico das vedações segundo as</i> <i>recomendações e requisitos das normas NBR 15220 e NBR 15575</i>	132
4.3.2. <i>Ensaio de Fluxo Térmico</i>	135
4.3.2.1 <i>Considerações finais</i>	151
5. CONCLUSÕES	152
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	154
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	155
ANEXO	161

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Descritivo partes da NBR 15220.....	42
Tabela 2: Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para parede leve refletora.....	44
Tabela 3: Descritivo partes da NBR 15575.....	45
Tabela 4: Transmitância térmica de paredes externas.....	48
Tabela 5: Capacidade térmica de paredes externas.....	48
Tabela 6: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.....	49
Tabela 7: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno.....	49
Tabela 8: Composição nominal, em óxidos, do resíduo de lã de rocha.....	55
Tabela 9 : Etapas da Simulação.	60
Tabela 10: Especificações componentes construtivos.....	62
Tabela 11: Valores adotados argamassa de revestimento.....	63
Tabela 12: Valores adotados propriedades termofísicas do bloco de concreto.....	64
Tabela 13: Simulações: cidades e análises do dia típico verão e inverno.....	66
Tabela 14: Unidade habitacional com condições críticas térmicas para as simulações, para cada estação, segundo NBR 15575 (ABNT,2013).....	68
Tabela 15: Especificações componentes construtivos.....	69
Tabela 16: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.....	70
Tabela 17: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno.....	70
Tabela 18: Caracterização física e química do cimento.....	71
Tabela 19: Caracterização da areia e brita utilizados nos blocos de concreto.....	71
Tabela 20: Composição unitária dos materiais utilizados para fabricação dos blocos de concreto.....	73
Tabela 21: Valores de ψ em função da quantidade de blocos.....	76
Tabela 22: Calibração dataloggers, câmara térmica e termo-higrômetro.....	86
Tabela 23: Resultados das Simulações Computacionais para o Verão.....	111
Tabela 24: Resultados das Simulações Computacionais para o Inverno.....	112
Tabela 25: Dados individuais da resistência à compressão dos blocos.....	115
Tabela 26: Densidade de massa aparente (ρ) e índice de vazios.....	118
Tabela 27: Variação densidade de massa aparente (ρ) e teor de ar incorporado dos concretos dos blocos.....	118
Tabela 28: Valores individuais de absorção de água dos blocos de concreto.....	120

Tabela 29: Valores individuais do Índice de absorção inicial de água (AAI) dos blocos de concreto.....	121
Tabela 30: Planilha de cálculo do coeficiente de condutividade térmica do concreto 0Lã.....	122
Tabela 31: Planilha de cálculo do coeficiente de condutividade térmica do concreto 10Lã....	123
Tabela 32: Planilha de cálculo do coeficiente de condutividade térmica do concreto 20Lã..	124
Tabela 33: Planilha de cálculo do coeficiente de condutividade térmica do concreto 30Lã..	125
Tabela 34: Valores médios da condutividade térmica do concreto dos blocos.....	125
Tabela 35: Propriedades térmicas calculadas.....	126
Tabela 36: Valores calculados transmitância térmica, atraso térmico e fator solar e as recomendações das normas 155575 e 15220.....	132
Tabela 37: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, amortecimento e atraso térmico referente as alvenarias 0Lã rebocadas e não rebocadas.....	138
Tabela 38: Amortecimento e atraso térmico do bloco de concreto, encontrados através de medição in loco.....	139
Tabela 39: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, amortecimento e atraso térmico referente às alvenarias 10Lã rebocadas e não rebocadas.....	140
Tabela 40: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, amortecimento e atraso térmico referente às alvenarias 20Lã rebocadas e não rebocadas.....	142
Tabela 41: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, amortecimento e atraso térmico referente às alvenarias 30Lã rebocadas e não rebocadas.....	145
Tabela 42: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, amortecimento e atraso térmico referente às alvenarias 30Lã rebocadas e não rebocadas.....	146
Tabela 43: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, e amortecimento térmico referente às alvenarias rebocadas e não rebocadas.....	150
Tabela 44: Dados dos componentes construtivos para simulação – 0Lã.....	162
Tabela 45: Dados dos componentes construtivos para simulação – 10Lã.....	164
Tabela 46: Dados dos componentes construtivos para simulação – 20Lã.....	176
Tabela 47: Dados dos componentes construtivos para simulação – 30Lã.....	179
Tabela 48: Registros temperaturas ensaio de fluxo térmico 0Lã.....	185
Tabela 49: Registros temperaturas ensaio de fluxo térmico 20Lã.....	186

Tabela 50: Registros temperaturas ensaio de fluxo térmico 10Lã.....	187
Tabela 51: Registros temperaturas ensaio de fluxo térmico 20Lã.....	188
Tabela 52: Registros temperaturas ensaio de fluxo térmico 30Lã.....	189

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Famílias modulares e Dimensões nominais dos blocos (ABNT NBR 6136).....	27
Figura 2: Espessura mínima da parede dos blocos (ABNT NBR 6136).....	28
Figura 3: Requisitos para resistência característica à compressão, Absorção e Retração.....	28
Figura 4: Transmissão de calor.....	30
Figura 5: Fluxo de calor em paredes.....	31
Figura 6: Correlação entre as propriedades termofísicas.....	38
Figura 7: Zoneamento Bioclimático Brasileiro.	43
Figura 8: Métodos alternativos de avaliação do desempenho térmico.....	47
Figura 9: As três fachadas continentais de Salvador.....	50
Figura 10: Normais Climatológicas - temperatura média do ar (°C).....	51
Figura 11: Lã de Rocha Super-Flocos.....	52
Figura 12: Resíduo de Lã de Rocha após moagem.....	53
Figura 13: Etapas do Programa Experimental.....	56
Figura 14: Perspectivas da edificação.....	61
Figura 15: Planta baixa edificação.....	61
Figura 16: Fachadas edificação.....	62
Figura 17: Componentes construtivos da edificação.....	63
Figura 18: Planta baixa pavimento.....	67
Figura 19: Maquete virtual.....	67
Figura 20: Fachadas da edificação.	68
Figura 21: Unidades habitacionais – orientações.....	69
Figura 22: Curva granulométrica da areia utilizada nos blocos de concreto.....	71
Figura 23: Curva granulométrica da brita utilizada nos blocos de concreto.....	71
Figura 24: Produção dos blocos.....	73
Figura 25: Adição da lã de rocha durante a produção dos blocos.....	74
Figura 26: Blocos produzidos.....	74
Figura 27: Prensa hidráulica utilizada na compressão dos blocos de concreto.....	75
Figura 28: Ensaio de absorção total de água dos blocos.....	77
Figura 29: Esquema do ensaio de AAI.....	78
Figura 30: Parte das amostras utilizadas no ensaio de densidade.	79
Figura 31: Ensaio densidade.....	80

Figura 32: Câmara térmica.....	80
Figura 33: Carrinho para deslocamento das alvenarias.	83
Figura 34: Fonte de calor.....	83
Figura 35: Equipamentos utilizados para aferição de temperaturas.....	85
Figura 36: Setores da câmara térmica.....	86
Figura 37: Amostra para ensaio condutividade térmica em câmara térmica.....	89
Figura 38: Sistema de obtenção de dados na câmara térmica.....	90
Figura 39: Ensaio Condutividade – aferição de temperatura superficial.....	91
Figura 40: Modelo de gráfico obtido através do ensaio de fluxo térmico.....	93
Figura 41: Painéis de alvenaria.....	94
Figura 42: Esquemático de condição simulada para ensaio fluxo térmico.....	95
Figura 43: Câmara térmica durante a realização do ensaio.....	95
Figura 44: Componentes – Setores da Câmara térmica.....	96
Figura 45: Vista frontal e Perspectiva da Câmara térmica.....	97
Figura 46: Painel de alvenaria no interior da câmara térmica.....	98
Figura 47: Etapas dos ensaio de fluxo térmico.....	98
Figura 48: Painéis rebocados.....	99
Figura 49: Painel 0%Lã pintado com a cor branca.....	99
Figura 50: Gráfico 1 – Variação da Espessura.....	101
Figura 51: Gráfico 2 – Variação da Condutividade térmica.....	102
Figura 52: Gráfico 3 – Variação da Densidade.....	103
Figura 53: Gráfico 4 – Variação do Calor específico.....	104
Figura 54: Gráfico 5 – Variação da Rugosidade.....	105
Figura 55: Gráfico 6 – Variação da Emissividade.....	106
Figura 56: Gráfico 7 – Variação da Absortância.....	107
Figura 57: Gráfico 1 - Temperaturas máximas externas e temperaturas máximas internas...	109
Figura 58: Gráfico 2- Temperaturas mínimas externas e temperaturas mínimas internas.....	110
Figura 59: Valores da resistência à compressão dos blocos de concreto.....	115
Figura 60: Aumento/redução percentual dos valores médios de resistência à compressão dos blocos em relação ao critério de fbk da NBR 6136.....	117
Figura 61: Densidade de massa aparente e teor de ar incorporado dos concretos dos blocos.....	118
Figura 62: Valores de absorção total de água dos blocos de concreto.....	120
Figura 63: Índice de absorção inicial de água (AAI) dos blocos de concreto.....	121

Figura 64: Resistência térmica alvenarias.	127
Figura 65: Transmitância térmica alvenarias.	128
Figura 66: Capacidade térmica alvenarias.	128
Figura 67: Fator solar alvenarias.	129
Figura 68: Atraso térmico alvenarias.....	129
Figura 69: Gráfico do ensaio de fluxo térmico da alvenaria 0Lã	136
Figura 70: Fluxo de calor em câmara vertical não ventilada.	137
Figura 71: Gráfico do ensaio de fluxo térmico da alvenaria 10Lã	141
Figura 72: Gráfico do ensaio de fluxo térmico da alvenaria 20Lã	144
Figura 73: Gráfico do ensaio de fluxo térmico da alvenaria 30Lã.....	147
Figura 74: Gráfico do ensaio de fluxo térmico da alvenaria 0Lã pintura externa.....	149
Figura 75: Características físicas do bloco de concreto – rebocado e não rebocado.....	162
Figura 76: Alternativa de solução para um componente equivalente.....	182
Figura 77: Bloco de concreto 14 cm.....	183

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a	Difusividade térmica
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
a/c	Relação água/cimento
e	Efusividade térmica
c	Calor específico
Q	Fluxo de calor
CETA	Centro Tecnológico das Argamassas - UFBA
CT	Capacidade térmica
FS	Fator Solar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISO	International Organization for Standardization
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
MPa	Megapascal
MEAU	Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana
NBR	Norma Brasileira
Pint	Pintura externa
Reb	Alvenaria rebocada
SI	Sistema Internacional
U	Transmitância térmica
UFBA	Universidade Federal da Bahia
ZB	Zona Bioclimática brasileira
α	Absortância
ω	Atraso térmico
λ	Condutividade térmica W/m ²
μ	Amortecimento térmico
ρ	Densidade do material
Δt	Diferença entre as temperaturas exterior e interior
ε	Emissividade
°C	Graus Celsius

- 0Lã** Blocos de concreto referência – sem lã de rocha
- 10Lã** Blocos de concreto com teor de 10% de lã de rocha incorporado em substituição a areia
- 20Lã** Blocos de concreto com teor de 20% de lã de rocha incorporado em substituição a areia
- 30Lã** Blocos de concreto com teor de 30% de lã de rocha incorporado em substituição a areia

1. INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa do trabalho

O sistema construtivo racionalizado alvenaria estrutural em blocos de concreto vem sendo amplamente adotado em construções de todo o território brasileiro. Ramalho e Corrêa (2003) destacam que este sistema construtivo parece ser um dos mais promissores, tanto pela economia proporcionada, como pelo número de fornecedores já existentes. Dentre as diversas vantagens oferecidas, Salvador Filho (2007) resalta o fato de que o material é fabricado a partir de matérias-primas facilmente encontradas em qualquer região do país, o que torna os artefatos pré-moldados à base de cimento produtos competitivos, justificando investimentos econômicos e científicos nestes componentes e respectivos processos construtivos. Trata-se de uma tecnologia promotora do processo de racionalização da obra, e também da industrialização da construção civil no Brasil.

No entanto, nota-se que a alvenaria em blocos de concreto tem sido utilizada de forma semelhante em todo Brasil, desconsiderando as diversidades climáticas apresentadas pelas regiões brasileiras, e, portanto, sem a atenção necessária quanto ao desempenho térmico da envoltória das edificações, e conseqüentemente ao conforto dos seus usuários.

Avaliar o desempenho dos sistemas construtivos é um avanço para o setor e constitui o caminho para a evolução de todos que compõem a cadeia da construção civil (CBIC,2013). Nas últimas décadas, além da racionalização, o setor da construção civil vem procurando aprimorar os sistemas construtivos sob a lógica da eficiência energética através do universo de soluções arquitetônicas e tecnológicas, de forma a garantir melhor desempenho às edificações, propiciando maior conforto aos seus usuários.

O desempenho térmico do edifício é uma das exigências relativas à habitabilidade, presente no conjunto normativo NBR 15575 (ABNT,2013) – Edificações Habitacionais – Desempenho. O mesmo é definido, principalmente, pelas trocas térmicas resultantes da interação entre a radiação solar incidente e os materiais construtivos que compõem a envoltória da edificação, regidos por suas propriedades termofísicas. Em conjunto com o partido arquitetônico adotado, conforme elucida Bittencourt (2015), a obtenção de ambientes confortáveis depende fundamentalmente de edificações bem adaptadas às características climáticas locais.

Pesquisas realizadas através de simulações térmicas computacionais, medições in loco, bem como através de metodologias adaptadas, apontam o bloco de concreto como um componente construtivo que apresenta índices elevados de ganhos de calor; em alguns

estudos, ao ser avaliado o desempenho térmico de vedações compostas por blocos de concreto, com base nas recomendações técnico-construtivas, critérios e requisitos estabelecidos pelas normas de desempenho térmico vigentes no Brasil – a NBR 15220(ABNT, 2005) e a NBR 15575 (ABNT,2013), constatou-se que as mesmas não atenderam ao nível mínimo de desempenho para diversas cidades situadas no território brasileiro, demonstrando que os blocos de concreto não seriam adequados para algumas das zonas bioclimáticas brasileiras analisadas.

Acredita-se, portanto, que este sistema construtivo necessita de modificações para melhoria do desempenho térmico das edificações que o empregam em suas vedações externas. Frente à literatura pesquisada, podem ser destacadas alternativas para otimização do desempenho térmico, seja do componente construtivo (bloco), onde pode se explorar a adição de materiais isolantes a sua composição, de forma a modificar a matriz cimentícia e suas propriedades termofísicas, seja no âmbito da vedação (alvenaria), onde destaca-se o acréscimo da argamassa de revestimento (reboco) de forma a aumentar a massa térmica da envoltória, influenciando em seu ganho térmico, bem como o acréscimo de pintura externa com cores claras, que conforme esclarece Dornelles (2008) por absorver grande parte da energia solar, as cores contribuem para o aumento da temperatura da parede, transmitindo, assim, mais calor para o interior dos ambientes. Sendo que cores claras de baixa absorvância podem ser utilizadas como forma de reduzir o ganho de calor pelas envolventes.

Dentre os materiais isolantes disponíveis, a lã de rocha tem sido alvo de pesquisas quanto a adição de seu resíduo à matrizes cimentícias. A Lã de rocha é um material especialmente desenvolvido para o setor da construção civil, sendo utilizado tanto para o isolamento térmico, quanto acústico. É produzida a partir de matérias-primas abundantes na natureza (rocha basáltica e outros minerais) e recicladas (escória metalúrgica). Após sua fusão a 1500°C, estes minerais são transformados em finas fibras por centrifugação (THERMAX, 2015).

Quanto à utilização da lã de rocha em compósitos à base de cimento, foi encontrado maior número de pesquisas no qual eram utilizados os resíduos de lã de rocha, os quais sofriam processamento, geralmente moagem, e posteriormente eram adicionados em substituição parcial ao cimento. Estudos comprovam que resíduos de lã de rocha podem ser usados em compósitos à base de cimento, como substituto adequado para agregados grosseiros e finos, economizando no custo de agregados naturais, minimizando o impacto ambiental da disposição de resíduos sólidos. Além disso, como a composição de resíduos de lã de rocha é semelhante a outros materiais pozolanos, pode ser considerada como material

cimentício suplementar (CHENG; LIN, 2010). Porém, na referida literatura, não foi encontrada abordagem quanto à análise do desempenho térmico de compósitos a base de cimento com adição de lã de rocha, para avaliar se esta incorporação favorece as propriedades termofísicas do compósito cimentício. Também não foram encontradas pesquisas em que a lã de rocha tenha sido incorporada em seu estado natural, sem passar por processamentos, à matrizes cimentícias.

Diante deste contexto, a presente pesquisa tem por objetivo realizar avaliação do desempenho térmico de alvenarias em blocos de concreto produzidos com lã de rocha em seu estado natural, bem como à análise da influência da argamassa de revestimento (reboco) e da pintura externa com cores claras no desempenho térmico das vedações. A abordagem foi estabelecida através das recomendações presentes na NBR 15220 (ABNT, 2005) e dos requisitos e critérios presentes na NBR 15575 (ABNT, 2013) aplicáveis às condições climáticas específicas da maior zona bioclimática brasileira, a ZB-8, e especialmente para a cidade de Salvador (Bahia) onde predomina o clima quente e úmido; Foi também realizada avaliação através de dois significativos fenômenos correlacionados ao comportamento térmico: o amortecimento e o atraso térmico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho térmico de vedações em blocos de concreto produzidos com lã de rocha.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Desenvolver e avaliar o bloco de concreto contendo lã de rocha.
- b) Avaliar a influência da argamassa de revestimento no desempenho térmico da vedação em blocos de concreto.
- c) Avaliar a influência da pintura externa, com cor de baixa absorvância, no desempenho térmico da vedação em blocos de concreto.

1.3 Hipóteses do trabalho

- A adição da lã de rocha ao bloco de concreto irá otimizar as suas propriedades físicas e mecânicas.
- O acréscimo da argamassa de revestimento à vedação irá proporcionar melhorias no desempenho térmico do sistema construtivo.

- O acréscimo da pintura externa à vedação, com cor de baixa absorvância, influenciará positivamente no comportamento térmico da mesma.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Apresentação e discussão dos Resultados, Conclusões, Sugestões para trabalhos futuros, Referências Bibliográficas.

Este primeiro capítulo introdutório apresenta o objeto de estudo, o tema a ser desenvolvido, abordando as principais questões referentes ao tema, as justificativas, e os objetivos norteadores da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta através de referencial teórico os principais assuntos relacionados ao tema, que por sua vez estruturam a pesquisa, tais como: Alvenaria em Blocos de Concreto, Propriedades termofísicas da envoltória da edificação, Desempenho Térmico de Edificações e Lã de rocha.

O terceiro capítulo apresenta a Metodologia, o programa experimental, onde as etapas da pesquisa são detalhadas em sequência de execução, para o atendimento ao objetivo geral.

O quarto capítulo apresenta os Resultados e a discussões sobre os mesmos, com base na literatura estudada, e normas técnicas vigentes de desempenho térmico de edificações.

O quinto capítulo apresenta as Conclusões referentes aos resultados obtidos e em referência aos objetivos estabelecidos.

O sexto capítulo apresenta Sugestões para trabalhos futuros.

O sétimo capítulo apresenta a literatura pesquisada e referenciada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema construtivo racionalizado: Alvenaria em Blocos de Concreto

A alvenaria em blocos de concreto conquistou grande parte das construções em todo o território brasileiro por apresentar inúmeras vantagens, dentre elas, conforme Salvador (2007) é o fato de que o material é fabricado a partir de matérias-primas facilmente encontradas em qualquer região do país, o que torna os artefatos pré-moldados à base de cimento produtos competitivos, justificando investimentos econômicos e científicos nestes componentes e respectivos processos construtivos. Trata-se, portanto, no tocante a sua função, de uma tecnologia promotora do processo de racionalização da obra, e também da industrialização da construção civil no Brasil.

Ramalho e Corrêa (2003) destacam que o sistema construtivo em alvenaria estrutural não armada de blocos vazados de concreto “parece ser um dos mais promissores, tanto pela economia proporcionada como pelo número de fornecedores já existentes”. Destaca-se também como vantagem, abordando a logística de produção da obra e o projeto de instalações elétricas e hidrossanitárias, o fato de que os blocos de concreto utilizados na alvenaria estrutural permitem a passagem das tubulações através das câmaras de ar presentes no bloco, eliminando assim a necessidade de corte da alvenaria; o que representa grande benefício tanto em relação à redução da geração de resíduos no canteiro de obras, quanto a redução dos custos da obra, pois de fato haverá redução no tempo de obra, da mão de obra, e no uso de materiais construtivos.

Com o aumento da utilização da alvenaria estrutural em empreendimentos imobiliários, o setor de blocos de concreto tem apresentado grande crescimento, tal fato é marcado pela criação, em 2003, da Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto – BlocoBrasil, que conta com o apoio da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. O principal objetivo da Associação BlocoBrasil é garantir e defender a qualidade do bloco de concreto, levando-o à um alto patamar de competitividade em relação a outros materiais construtivos presentes e já consolidados no mercado.

Para garantia da qualidade dos sistemas construtivos de blocos de concreto há regulamentações para a fabricação e uso dos blocos, a exemplo da normatização técnica da ABNT referente aos sistemas construtivos com blocos de concreto, do Selo de Qualidade ABCP e do Programa Setorial de Qualidade – PSQ–SINAPROCIM (Caderno de desempenho BlocoBrasil).

2.1.1. Caracterização dos Blocos de Concreto

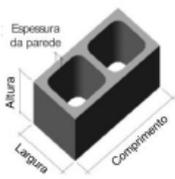
Os materiais utilizados na fabricação de blocos de concreto são basicamente: cimento Portland, agregados graúdo e miúdo, e água. Dependendo de requisitos específicos, a dosagem do concreto poderá também empregar outros componentes, tais como adições minerais, pigmentos, aditivos etc. O bloco de concreto pode ser confeccionado em diversas geometrias e resistências à compressão, seus materiais constituintes devem ser especificados e utilizados de acordo com suas propriedades, para que o produto final esteja em conformidade com as metas projetadas (SALVADOR, 2007). Os processos de fabricação e cura dos blocos devem assegurar a obtenção de um concreto suficientemente compacto e homogêneo (ROMAN, MUTTI & ARAÚJO, 1999).

Os ensaios para a caracterização e controle de qualidade dos blocos de concreto são especificados pelas seguintes normas:

- NBR 6136 (ABNT,2014) - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural – Requisitos;
- NBR 12118 (ABNT,2010) - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio;
- NBR 12118 (ABNT,2010) - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Determinação da absorção de água, do teor de umidade e da área líquida.

Através das figuras 1 e 2 podem ser verificados alguns dos requisitos acerca das características formais e propriedades físicas:

Figura 1: Famílias modulares e Dimensões nominais dos blocos (ABNT NBR 6136).

Família (largura x comprimento) (medidas modulares)		20 x 40	15 x 40	15 x 30	12,5 x 40	12,5 x 25	12,5 x 37,5	10 x 40	10 x 30	7,5 x 40	
	Largura	190	140		115			90		65	
	Altura	190	190	190	190	190	190	190	190	190	
	Medida Nominal (mm) Comprimento	Inteiro	390	390	290	390	240	365	390	290	390
		Meio	190	190	140	190	115	-	190	140	190
		2/3	-	-	-	-	-	240	-	190	-
		1/3	-	-	-	-	-	115	-	90	-
		Amarração "L"	-	340	-	-	-	-	-	-	-
		Amarração "T"	-	540	440	-	365	-	-	290	-
		Compensador A	90	90	-	90	-	-	90	-	90
		Compensador B	40	40	-	40	-	-	40	-	40
		Canaleta inteira	390	390	290	390	240	365	390	290	-
		Meia canaleta	190	190	140	190	115	-	190	140	-
	Tolerâncias: ± 2,0 mm para a largura e ± 3,0 mm para a altura e para o comprimento. As dimensões da canaleta J devem ser definidas mediante acordo entre fornecedor e comprador, em função do projeto.										

Fonte: Manual de Desempenho – Alvenaria com Blocos de Concreto – BlocoBrasil e Associação Cimento Portland (2014)

Figura 2: Espessura mínima da parede dos blocos (ABNT NBR 6136).

Classe	A		B		C					
	190	140	190	140	190	140	115	90	65	
Largura nominal (mm)	190	140	190	140	190	140	115	90	65	
Paredes longitudinais ^a (mm)	32	25	32	25	18	18	18	18	15	
Paredes transversais	Paredes ^a (mm)	25	25	25	25	18	18	18	18	15
	Espessura equivalente ^b (mm/m)	188	188	188	188	135	135	135	135	113

^a Média das medidas das paredes tomadas no ponto mais estreito.

^b Soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos (em milímetros), dividida pelo comprimento nominal do bloco (em metros).

Fonte: Manual de desempenho – Alvenaria com Blocos de Concreto – BlocoBrasil e Associação Cimento Portland (2014).

2.1.2 Classificação dos Blocos de Concreto

Os blocos de concreto possuem parâmetros de classificação quanto à sua resistência característica à compressão axial, absorção e retração segundo a NBR 6136 (ABNT, 2014) conforme pode ser visto através da Figura 3.

Figura 3: Requisitos para resistência característica à compressão, Absorção e Retração.

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial ^a - f_{ck} (MPa)	Absorção de água (%)				Retração por secagem ^d (%)
			Agregado normal ^b		Agregado leve ^c		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	$f_{ck} \geq 8,0$	$\leq 8,0$	$\leq 6,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$
	B	$4,0 \leq f_{ck} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 8,0$			
Com ou sem função estrutural	C	$f_{ck} \geq 3,0$	$\leq 12,0$	$\leq 10,0$			

^a Resistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias.
^b Blocos fabricados com agregado normal.
^c Blocos fabricados com agregado leve.
^d Ensaio facultativo.

Fonte: Manual de Desempenho – Alvenaria com Blocos de Concreto – BlocoBrasil e Associação Cimento Portland (2014)

De acordo com a classificação dos blocos de concreto presente na NBR 6136 (ABNT, 2014) e apresentada na figura 10, são estabelecidas as seguintes especificações quanto ao seu uso:

- Para aplicação abaixo do nível do solo, devem ser utilizados blocos Classe A;
- Permite-se o uso de blocos com função estrutural Classe C, com largura de 90mm, para edificações de no máximo um pavimento;

- Permite-se o uso de blocos com função estrutural Classe C, com largura de 115mm, para edificações de no máximo dois pavimentos;
- Permite-se o uso de blocos com função estrutural Classe C, com largura de 140mm e 190mm, para edificações de até cinco pavimentos;
- Os blocos com largura de 65mm têm seu uso restrito para alvenaria sem função estrutural.

A escolha do tipo de bloco depende da altura da edificação, da existência de fornecedores locais, custo, tradição da construtora, entre outros. Quanto à aplicação, as unidades podem ser de vedação, quando tem somente função de fechamento e estruturais, quando conferem resistência e dão suporte à estrutura. Sendo o bloco o elemento mais importante da composição da alvenaria estrutural, as características do mesmo serão as que mais influirão no desempenho térmico do fechamento opaco (KAUPPAN, 2012).

2.2. Propriedades termofísicas da envoltória da edificação

O desempenho térmico de uma edificação depende basicamente de dois processos: da transferência de calor através dos diferentes componentes da estrutura e do fluxo de ar por ventilação e/ou infiltração. A razão do fluxo de calor através da estrutura é determinada pelas propriedades térmicas e físicas dos seus componentes e pelos elementos climáticos aos quais estão expostos, principalmente temperatura do ar, radiação solar, umidade e vento (DEVENTER, 1971).

A interface de comunicação entre a radiação solar e os ambientes internos de uma edificação ocorre através da envoltória, composta pela cobertura e vedações externas. Portanto, percebe-se que o desempenho térmico da edificação irá depender, dentre outros fatores, da tecnologia construtiva escolhida para a construção.

Em conjunto ao partido arquitetônico adotado, os componentes da envoltória deverão ser empregados de forma a promover melhor adequação do edifício ao meio que o envolve, em função das condições climáticas do seu local de implantação, viabilizando a promoção do conforto térmico ao usuário. Dentro deste contexto os materiais construtivos adotados para a construção, através de suas propriedades e características térmicas e físicas, orquestram a troca térmica entre o meio exterior e interior.

O foco da presente pesquisa é a vedação vertical externa, referente à alvenaria em blocos de concreto. Portanto, faz-se necessário entender os mecanismos de transferência de calor através de elementos opacos na envolvente.

2.2.1 Materiais opacos e a transferência de calor

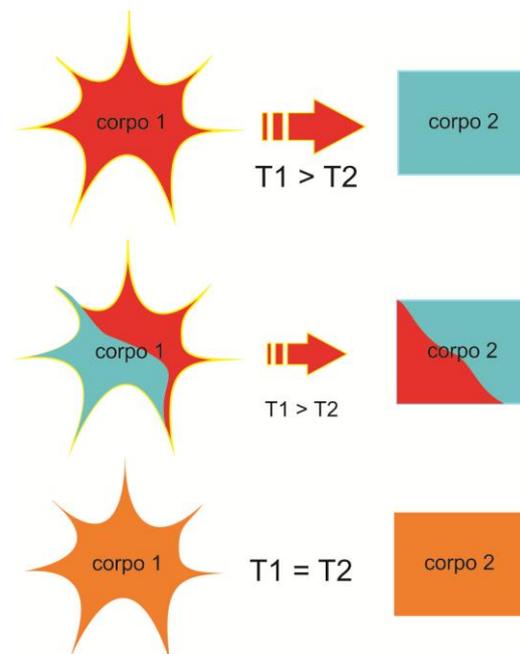
Conforme Marques (2013) materiais opacos não possibilitam a transmissão direta da radiação solar ao ambiente interno, já os transparentes transmitem uma grande parcela de radiação. A intensidade das trocas de energia através desses fechamentos será função da:

- radiação solar incidente;
- temperaturas interna e externa da edificação.;
- propriedades termofísicas dos materiais que compõem a envoltória;

Em síntese, a transmissão da energia térmica para o interior da edificação é a resposta da envoltória frente às mudanças meteorológicas da temperatura do ar, da radiação solar, da direção e velocidade dos ventos, volumetria do edifício, etc. Estes mecanismos e processos físicos definem o desempenho térmico da edificação e sua repercussão no conforto térmico e consumo energético.

A princípio, a condição essencial para a transmissão de calor é que os corpos tenham temperaturas diferentes. O corpo A, com maior temperatura, cede parte de sua energia térmica, o que causa a redução de sua temperatura, enquanto o corpo B, ao assimilar esta energia térmica, aumentará a sua temperatura. A tendência é que, os corpos estabilizem suas temperaturas (Figura 4).

Figura 4: Transmissão de calor.

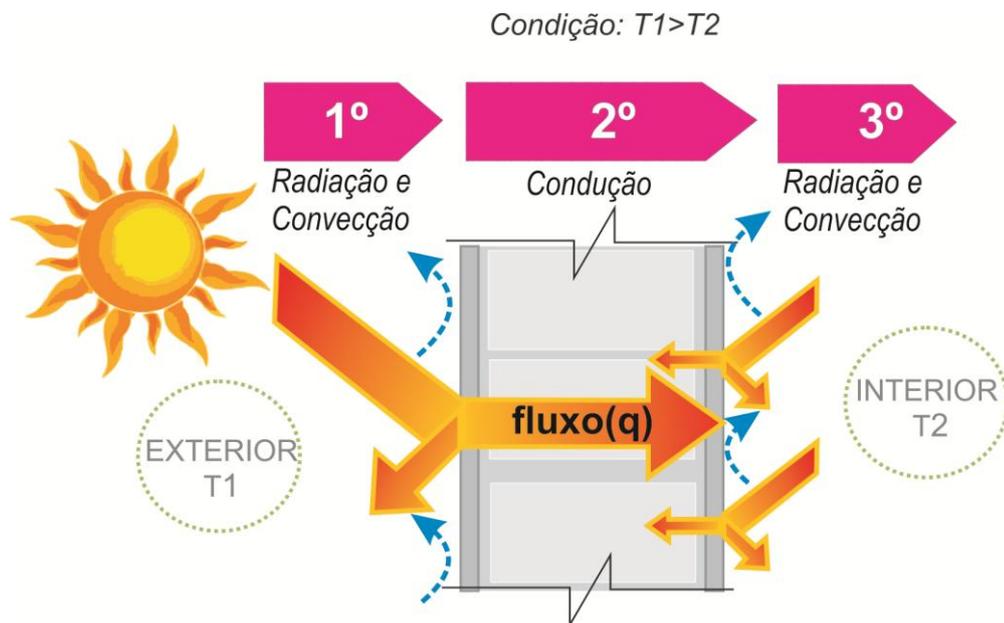


Fonte: A autora.

Conforme pode ser visto através da Figura 5, havendo diferença de temperaturas entre os meios, a transferência de calor através do envelope da edificação pode ocorrer através de três processos físicos:

1. *Radiação*
2. *Convecção*
3. *Condução*

Figura 5: Fluxo de calor em paredes.



Fonte: A autora.

Conforme visto na figura 2, em fechamentos opacos, acontecem três fases de transmissão de calor:

- Fase 1: Trocas de calor por Radiação (ondas longas) e Convecção.

Sobre a superfície externa incide a radiação solar, onde parte desta radiação é absorvida e parte é refletida, por consequência a superfície é aquecida. Por convecção – a transferência de calor ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície - o ar que correr próximo a esta superfície irá trocar calor com a mesma por apresentarem temperaturas distintas. Desta forma o fechamento troca energia térmica com o meio exterior.

- Fase 2: Troca térmica por Condução.

Com o aquecimento decorrente da primeira fase, cria-se uma diferença de temperatura entre a superfície externa e a interna do fechamento, o que por condução - transmissão de energia de molécula a molécula em um meio sólido - ocorre a troca de calor entre as mesmas.

- Fase 3: Troca de calor com o meio interior – Radiação e Convecção.

Ao final do percurso do fluxo do calor, como na fase 1, a troca de calor volta a acontecer por convecção e por radiação para o ambiente interno da edificação, onde deverá ser incluída a carga térmica dos eletrodomésticos presentes no ambiente, padrões de ocupação, a exemplo do número de pessoas que habitam a edificação, suas atividades, o uso da iluminação, etc. A depender da capacidade térmica dos materiais que constituem essa camada superficial interna, o repasse do calor ocorrerá com menor ou maior intensidade.

2.2.2 Propriedades termofísicas da envoltória

As propriedades dos materiais de construção determinam o seu comportamento quanto à admissão, transferência, armazenamento e emissão de calor. As principais grandezas envolvidas nesse processo são definidas pela NBR 15220-1 (ABNT, 2005), algumas das quais podem ser destacadas: condutividade térmica, densidade de massa aparente, calor específico, transmitância térmica e Fator de ganho de calor solar de elementos opacos (GRABARZ; SOUZA; PARSEKIAN, 2013).

A seguir serão descritas as propriedades térmicas e físicas da envoltória opaca que comandam a troca de calor, serão também apresentadas as equações através das quais são calculadas as propriedades térmicas. É válido mencionar que:

As grandezas físicas relativas ao **material** (no caso da presente pesquisa, o concreto dos blocos de concreto) são:

- Condutividade térmica (λ)
- Densidade de massa aparente (ρ)
- Calor específico (c)

As propriedades térmicas relativas **aos elementos e componentes construtivos** (os blocos de concreto e as vedações em blocos de concreto) são:

- Resistência térmica (R)
- Transmitância térmica (U)

- Capacidade térmica (C)
- Fator solar de elementos e componentes opacos (Fs)
- Atraso(ω) e amortecimento térmico(μ)

A absorptância (α), refletância (ρ) e emissividade(ϵ) referem-se à **camada superficial do componente construtivo**.

Absortância (α) e Refletância (ρ)

A absorptância é a razão entre a taxa de radiação solar absorvida pela superfície receptora do fechamento opaco e a taxa de radiação solar incidente sobre a mesma. Uma superfície que tem absorptância igual a 0,8 significa dizer que de 100% da energia incidente, 80% será absorvido e 20% refletido, a refletância responde por esta taxa refletida pela superfície em razão da radiação solar incidente. A variação dos valores de refletância ocorre devido a uma infinidade de fatores, como a superfície dos materiais (rugosidade), clima do ambiente onde o material está sendo exposto (como radiação solar, temperatura e presença de nuvens), etc. (SIMPSON, McPHERSON; 1997).

A principal característica da envolvente que irá reger estas duas propriedades será a sua cor superficial. Conforme explica Dornelles (2008), por absorver grande parte da energia solar, as cores contribuem para o aumento da temperatura da parede, transmitindo, assim, mais calor para o interior dos ambientes. Um material de superfície escura (alta absorptância) absorverá uma maior parte da radiação incidente quando comparado a um material de superfície mais clara (baixa absorptância).

Emissividade (ϵ)

Esta é a propriedade térmica que rege a emissão de radiação para o ambiente interno, a emissividade, em síntese, é a capacidade dos materiais em repassar o calor para o interior do ambiente, refere-se portanto a superfície emissora.

Condutividade Térmica (λ)

Propriedade que depende da densidade do material e representa sua capacidade de conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo (Lamberts, 2010), dessa forma relaciona-se diretamente a intensidade do fluxo térmico em um material. Segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), a condutividade térmica corresponde à propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m², quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro. Isolantes térmicos são compostos por materiais de baixa condutividade térmica.

Resistência Térmica (R)

Propriedade que um componente tem em resistir à passagem do calor. Quanto maior for à condutividade térmica de um material, melhor condutor ele é e menor será a resistência térmica do elemento ou componente construtivo. Sendo conhecida a condutividade térmica (λ) e espessura do material, calcula-se a resistência térmica (R) de uma camada homogênea de material sólido seja determinada pela equação (1), conforme estabelecido pela NBR 15220 (ABNT, 2005):

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (\text{m}^2 \text{K} / \text{W}) \quad (1)$$

Onde:

- e : é a espessura da camada;
- λ : é a condutividade térmica do material da camada.

A resistência térmica de superfície a superfície de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela equação (2) e (3):

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (2)$$

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (3)$$

Onde:

- R_t : é a resistência térmica de superfície a superfície.
- R_{se} e R_{si} : são as resistências superficiais externa e interna, cujos valores constam na norma.
- A_a, A_b, \dots, A_n : são as áreas de cada seção;
- R_a, R_b, \dots, R_n : são as resistências térmicas de superfície à superfície para cada seção.

Transmitância Térmica (U)

Transmitância térmica (U) ou coeficiente global de transferência de calor é uma propriedade dos componentes construtivos relacionada à permissão da passagem de energia e é função dos materiais que a compõe. É o inverso da resistência térmica (R) conforme equação (4), definida como o fluxo de calor que, na unidade de tempo e por unidade de área, passa através do componente (NBR 15220/2005):

$$U = \frac{1}{R} \quad \text{W}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (4)$$

Capacidade Térmica (C) e Calor específico (c)

A NBR 15220 (ABNT,2005) define a Capacidade térmica (C) como a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema. O calor específico (c) ou capacidade térmica específica é o quociente da capacidade térmica pela massa, caracterizando a capacidade de um material acumular calor. Quanto mais elevado o calor específico de uma substância, mais calor absorverá para um incremento dado de temperatura. A água, entre todas as substâncias, é a que tem o calor específico mais elevado: 4187 J/kg °C. Em função disso, a água é utilizada como meio de armazenamento térmico em várias situações (DORNELLES, 2004).

A capacidade térmica (C) irá depender da espessura da camada (e), da densidade da mesma (ρ) e do calor específico (c), como pode ser visto na equação (5):

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad \text{kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (5)$$

Onde:

- λ_i é a condutividade térmica do material da camada i^a ;
- R_i é a resistência térmica da camada i^a ;
- e_i é a espessura da camada i^a ;
- c_i é o calor específico do material da camada i^a ;
- ρ_i é a densidade de massa aparente do material da camada i^a ;

A capacidade térmica de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, segundo a NBR 15220 (ABNT,2005) é calculada pela Equação (6):

$$C_T = \frac{Aa + Ab + \dots + An}{\frac{Aa}{C_{Ta}} + \frac{Ab}{C_{Tb}} + \dots + \frac{An}{C_{Tn}}} \quad (6)$$

Onde:

- $C_{Ta}, C_{Tb}, \dots, C_{Tn}$: são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n);
- Aa, Ab, \dots, An : são as áreas de cada seção.

Difusividade térmica (α) e Efusividade térmica (b)

Segundo Frota e Schiffer (2001) geralmente os fechamentos absorvem calor tanto do exterior quanto do interior, dependendo de onde o ar tiver a maior temperatura. A velocidade com que o calor irá passar através deste material irá depender da sua difusividade térmica (α)

- quociente da condutividade térmica (λ) de um material pela sua capacidade de armazenar energia térmica (ρc) (NBR 15220/2005). Um baixo valor de difusividade térmica consegue retardar em muitas horas o aumento de temperatura da face interna da parede de um ambiente quando há troca de calor com o meio externo.

Já quando se fala da quantidade de calor que este material ou componente terá a capacidade de absorver ou ceder mais energia térmica, ocasionando um amortecimento da variação da temperatura interna comparada à variação externa, tal propriedade refere-se a efusividade térmica (b). Segundo Goulart (2004), o conceito de efusividade térmica está relacionado com a reação dos primeiros centímetros das seções das superfícies internas de um ambiente aos ganhos internos de calor e seu subsequente efeito sobre a temperatura do ar interno. As equações (7) e (8) refere-se ao cálculo das propriedades citadas:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (7)$$

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \quad (8)$$

Atraso térmico (ω), Amortecimento térmico (μ) e Inércia Térmica

A **inércia térmica** depende das características térmicas da envolvente e dos componentes construtivos internos. Um material ao conduzir o calor, retém uma parte no seu interior, como consequência de sua massa térmica e respectivo calor específico, e após certo tempo este calor é liberado, este tempo de armazenamento de energia térmica refere-se a propriedade Inércia térmica. Para o interior de uma edificação, o material que compõe e reveste a envoltória, é importante na inércia térmica do recinto, pois facilitarão ou impedirão a saída e entrada de calor no ambiente, influenciando no atraso térmico e coeficiente de amortecimento deste (Fanger,1972).

Conforme a NBR 15220 (ABNT, 2005) o **atraso térmico(ω)** é o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor.

O cálculo do atraso térmico, de um elemento heterogêneo, caso dos blocos de concreto, é determinado através da equação (9):

$$\omega = 1,382 \cdot \text{Rt} \cdot \sqrt{B_1 + B_2} \quad \text{horas} \quad (9)$$

Onde:

- Rt: é a resistência térmica de superfície a superfície do componente ;
- B_1 : é dado pela equação (10);
- B_2 : é dado pela equação (12);

$$B1 = 0,226 \cdot \frac{Bo}{Rt} \quad (10)$$

Onde Bo é dado pela expressão:

$$Bo = C_T - C_{Text} \quad (11)$$

Onde:

- C_T : é a capacidade térmica total do componente;
- C_{Text} : é a capacidade térmica da camada externa do componente.

$$B2 = 0,205x \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{Rt} \right) x \left(R_{ext} - \frac{Rt - R_{ext}}{10} \right) \quad (12)$$

Conforme Roriz e Dornelles (2003) durante o processo de transmissão de calor, nem todo o calor que entra através da face externa de um elemento chegará à face interna, pois parte dele será consumida no aquecimento do próprio material da parede. Portanto, o valor máximo da temperatura interna será menor que o da externa. Diante deste contexto, a relação entre as amplitudes térmicas interna (A_i) e externa (A_e) é chamada **amortecimento** (μ), calculada através da equação (13):

$$\mu = 1 - \frac{A_i}{A_e} \quad (\%) \quad (13)$$

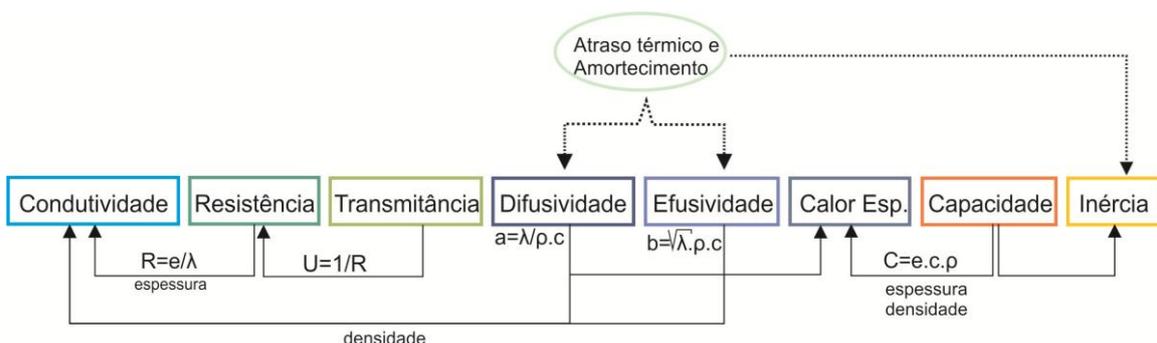
Fator Solar de elementos opacos (Fso)

De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005) é quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo, é dado pela equação (14):

$$FS = 4 \cdot U \cdot \alpha \quad (\text{adimensional}) \quad (14)$$

A Figura 6 mostra uma síntese do que foi exposto anteriormente na descrição de cada propriedade e a correlação entre elas:

Figura 6: Correlação entre as propriedades termofísicas.



Fonte: A autora.

2.3. Desempenho térmico de edificações

A apropriada compreensão dos fenômenos que governam a relação entre ambiente construído e ambiente natural proporciona a escolha de tipologias construtivas e espaciais cujas propriedades apresentam maior potencial de adaptação ao ambiente climático, bem como sugerem a utilização de elementos construtivos peculiares às especificidades do clima local, gerando um vocabulário arquitetônico também próprio as diferentes regiões climáticas (BITTENCOURT, 2007). Todas as ações, investimentos, pesquisas, acerca do universo que compõe a promoção de edificações cada vez mais eficientes, tem como força motriz de todos estes esforços, a garantia de melhor nível de conforto ao usuário, bem como a redução do impacto ambiental causado pelos edifícios. Diretamente relacionado ao desempenho térmico das edificações, o conforto térmico é definido pela ASHRAE (2009), como o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico.

2.3.1 Desempenho térmico de vedações em blocos de concreto

Diante deste contexto, pesquisas apontam o bloco de concreto como um componente construtivo que apresenta índices elevados de ganhos de calor. Sacht e Rissignolo (2009) constataram, através de simulações térmicas computacionais que, a habitação multipavimentos em análise, cuja vedação é em alvenaria de blocos de concreto, no verão, não atendeu ao nível mínimo de desempenho térmico para as dez cidades analisadas.

Em análise comparativa, entre envoltórias em blocos cerâmicos e em blocos de concreto de mesmas dimensões, baseada na observação de quais componentes construtivos proporcionam maior ou menor ganho de calor para a habitação, os resultados validaram que a envoltória em blocos cerâmicos apresentou maior quantidade de horas dentro da zona de conforto térmico, as menores temperaturas internas no verão além de proporcionar ganhos de calor inferiores no solstício de verão. Portanto, as envoltórias de blocos cerâmicos possuem melhor desempenho térmico (SANSÃO, AGUILAR, MARQUES; 2012).

Santos et al. (2015) realizaram estudo de caso para avaliar comparativamente o comportamento térmico dos fechamentos em alvenaria estrutural, em blocos de concreto e em blocos cerâmico, ao analisar as propriedades térmicas dos fechamentos verticais executados com os dois tipos de blocos em edificações localizadas na ZB-2 e comparando com as recomendações técnico-construtivas da normas NBR 15220-2(2005) e com os critérios

estabelecidos pela NBR 15575-4(ABNT,2013), foi constatado que ambos os blocos não seriam adequados para a zona bioclimática brasileira analisada.

Frente à literatura pesquisada, podem ser destacadas alternativas para otimização do desempenho térmico, seja do componente construtivo (bloco), onde pode se explorar a adição de materiais isolantes a sua composição, de forma a modificar a matriz cimentícia e suas propriedades termofísicas, seja no âmbito da vedação (alvenaria), onde destaca-se o acréscimo da argamassa de revestimento (reboco) de forma a aumentar a massa térmica da envoltória, influenciando em seu ganho térmico, bem como o acréscimo de pintura externa com cores claras, que conforme esclarece Dornelles (2008) por absorver grande parte da energia solar, as cores contribuem para o aumento da temperatura da parede, transmitindo, assim, mais calor para o interior dos ambientes. Sendo que cores claras de baixa absorvência podem ser utilizadas como forma de diminuir o ganho de calor pelas envolventes.

2.3.1.1 Adição de materiais isolantes à matriz cimentícia

Conforme elucidada Johansen et al. (1995) geralmente, existem seis tipos básicos de isolamento térmico: (1) câmaras de ar, a exemplo das presentes nos blocos de concreto e cerâmicos, (2) materiais celulares, composto por materiais porosos, com inserção de vazios/ar), (3) materiais fibrosos, seja compostos por materiais orgânicos, a exemplo das fibras vegetais, ou sintéticos como a lã de rocha, (4) materiais em flocos, que podem ser utilizados no preenchimento de câmaras de ar, ou unidos de forma rígida como por exemplo para a aplicação em tubos, blocos ou placas, onde são comumente usadas a perlite e a vermiculite, no entanto, combinados em algum tipo de matriz, ou como isolantes soltos (5) materiais granulares compostos de partículas pequenas que contém vazios ou espaços vazios, a exemplo da magnésia, silicato de cálcio, e cortiça vegetal (6) isolamento refletivo, composto por folhas finas paralelas, onde o espaço de ar entre duas folhas causa uma redução na condução e convecção. Outro tipo de material de isolamento, mais parecido com as composições e estruturas acima descritas, são os concretos com propriedades isolantes, fabricado por métodos especiais, ou pela adição de agregados esponjosos ou materiais isolantes.

Um material compósito é composto por materiais diferentes que possuem algumas afinidades físico-químicas que permitam ser misturados entre si para obter-se um novo material composto, no sentido macromolecular. Cabe lembrar que, no sentido micromolecular, os compostos ocorrem na natureza ou nas indústrias química e petroquímica,

ao serem produzidos os ácidos, álcalis, aromáticos derivados do petróleo e tantos outros produtos químicos (ORTENZI, 2007).

Asasutjarit et al (2007) realizaram pesquisa experimental onde foi avaliada a utilização da fibra de coco, reconhecida por suas propriedades isolantes térmica e acústicas, em placas de cimento leve e a sua influência nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas da matriz cimentícia. Para utilização da fibra de coco, o tratamento consistiu em ferve-la e lava-la, e a dosagem utilizada para confecção do compósito foi estabelecida pela relação: (cimento:fibra:água):(2:1:2). Os resultados indicaram propriedades físicas e mecânicas satisfatórias, e quanto as propriedades térmicas foi concluído, através da determinação da condutividade térmica, que este compósito possui propriedades isolantes, podendo ser empregado para a fabricação de componentes construtivos que atuarão como isolantes térmicos.

Yesilata et al. (2011) realizaram estudo exploratório para investigar os benefícios térmicos quando são adicionadas sucata de borrachas de pneu ao concreto que compõem o envelope de uma construção, tal aplicação reduziu a transferência de calor através das vedações, em razão do aumento da resistência térmica do compósito.

Em estudo experimental realizado por Gomes et al. (2013) foram confeccionados blocos de concreto com adição de resíduos de EVA(etileno-acetato de vinila), e a partir de cálculos de desempenho térmico (NBR 15220-2/2005) e através de ensaio em câmara térmica, acredita-se que o agregado de EVA presente na composição do bloco contribuiu para a melhora do isolamento térmico do componente construtivo.

2.3.1.2 Influência do acréscimo da argamassa de revestimento e da pintura externa no desempenho térmico da vedação

Em uma edificação, o consumo de energia com sistemas de refrigeração pode ser significativamente reduzido limitando-se o ganho de calor solar através de seu envelope, o qual depende da intensidade da radiação solar incidente e da absorvância da superfície externa, característica normalmente associada à utilização de diferentes cores superficiais. As absorvâncias do envelope construtivo estão associadas ao impacto da radiação solar na edificação, pois indicam qual fração da energia solar que chega ao edifício é realmente absorvida por seu envelope, afetando seu ganho de calor e as temperaturas internas, e qual fração é refletida, sem nenhum efeito sobre as condições térmicas da edificação (DORNELLES, 2008).

Devido ao acréscimo da argamassa de revestimento à vedação, a barreira térmica aumenta em razão do aumento da massa térmica do fechamento opaco da edificação, o que fará com que os recintos internos recebam mais lentamente a energia térmica transmitida através da envoltória. Este comportamento pode ser explicado através de dois fenômenos: o amortecimento e atraso térmico, que juntos compõem a inércia térmica; conforme Frota e Schiffer (2001) uma parede apresenta maior ou menor inércia segundo seu peso e sua espessura, portanto os revestimentos desempenham importante papel, pois revestimentos isolantes reduzem as trocas de calor com a parede e reduzem sua inércia.

Segundo Kolokotroni e Young (1990), quase 70% do desempenho térmico de uma edificação está relacionado às absorptâncias e à espessura das paredes do envelope do edifício, à orientação das aberturas, bem como o sombreamento, e a ventilação disponíveis em razão do seu partido arquitetônico e local de implantação.

Segundo Givoni (1994) utilizar uma cor mais refletiva no envelope da edificação é a característica arquitetônica de controle climático mais eficaz e a maneira mais viável de minimizar as cargas térmicas das edificações, principalmente no verão.

Grabarz et al (2013) analisaram o desempenho térmico da alvenaria estrutural em blocos cerâmicos e de concreto, nas diversas regiões climáticas brasileiras, acrescentando-se pintura externa branca ou amarela e variadas espessuras de reboco interno e externo. Os resultados apontam a influência positiva no desempenho térmico das envoltórias, quando acrescentados estes elementos, propiciando maior adequação da alvenaria às regiões bioclimáticas brasileiras, de forma a garantir melhores condições de conforto térmico aos seus usuários.

2.3.2 Normas técnicas de desempenho térmico

Diante da crescente oferta e desenvolvimento de novos produtos e técnicas construtivas houve a necessidade de vistoriar e avaliar a adequabilidade e desempenho destas soluções. Em alguns países, como Estados Unidos e França, já haviam instituído seus regulamentos de desempenho térmico e energético antes de 1990 (ASHRAE, 1989). Segundo pesquisa realizada por Janda e Busch (1992) com relação aos conteúdos das normas de desempenho, observou-se que a maioria dos países levou em consideração a combinação das exigências prescritivas e de desempenho no projeto.

Os primeiros regulamentos relacionados ao desempenho térmico de edificações foram criados na Europa no início dos anos 1970. Esses regulamentos definiam parâmetros para o envelope construtivo das edificações, no intuito de diminuir a transferência de calor pelos

seus componentes construtivos, diminuindo as perdas nos períodos frios do ano (aumentando o isolamento térmico, diminuindo a infiltração da envoltória, e conseqüentemente, reduzindo as cargas de aquecimento). A certificação energética de edificações passou a ser uma tendência mundial, adotada inicialmente por diversos países na Europa. Nos Estados Unidos, sua implantação é mais recente, com a etiqueta da associação ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (VERSAGE, 2011).

O adequado desempenho térmico repercute no conforto das pessoas e em condições adequadas para o sono e atividades normais em uma habitação, contribuindo ainda para a economia de energia. No Brasil, o desempenho do edifício e sua necessidade de normalização foram inicialmente discutidos em 1991, em um encontro nacional (CHICHIERCHIO; FROTA, 1991; LAMBERTS, 1991), o que resultou em duas normas da ABNT atualmente vigentes e que englobam o desempenho térmico das habitações: a NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005) e a NBR 15575 - Edificações Habitacionais – Desempenho (ABNT, 2012).

2.3.2.1 NBR 15220: Desempenho térmico de edificações

A NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005) é composta por cinco partes (ver tabela 1):

Tabela 1: Descritivo partes da NBR 15220.

NBR 15220/2005: Desempenho térmico de edificações	
Parte 1	Definições, símbolos e unidades;
Parte 2	Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e
Parte 3	Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
Parte 4	Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;
Parte 5	Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

Fonte: A autora - adaptação da NBR 15220 (ABNT, 2005).

Esta norma trata especificamente do desempenho térmico e incorpora recomendações técnico-construtivas que visam a otimização do desempenho das edificações, através de sua melhor adequação climática. Para a definição dos atributos que a edificação e as tecnologias construtivas utilizadas devem possuir, e para métodos de avaliação e critérios de desempenho,

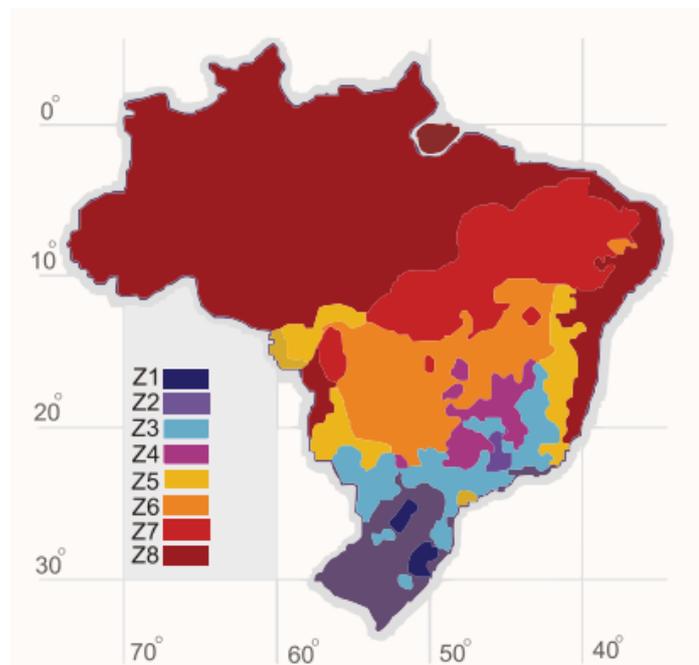
foi estabelecido em norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) a divisão do território brasileiro em oito zonas bioclimáticas.

2.3.2.1.1 Zoneamento Bioclimático

O Brasil é o quinto país mais extenso do mundo, analisando-o por latitudes descobre-se, segundo dados do IBGE (2011) que o Brasil tem 27 municípios (0,5% do total) acima da Linha do Equador, e o restante de sua área, os outros 95% do seu território situa-se abaixo da linha do Equador.

Naturalmente, diante destas dimensões continentais, o Brasil apresenta diversidades climáticas, é por esta razão que a Associação Brasileira de Normas Técnicas ao adentrar no universo do desempenho térmico de edificações, sinalizou por necessidade dividir o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas (figura 7).

Figura 7: Zoneamento Bioclimático Brasileiro.



Fonte: SANTOS (2015) adaptado da NBR 15220-3 (ABNT,2005)

Pode-se entender por zona bioclimática, segundo definição da NBR 15220 (ABNT,2005), como região geográfica homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano. Para cada uma dessas zonas climáticas é definido o dia típico de inverno e o dia típico de verão, estabelecidos com base na temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar incidente para o dia mais frio e para o dia mais quente do ano respectivamente, segundo a média observada num número representativo de anos.

É importante informar que a NBR 15220-3(ABNT, 2005) foi redigida tendo em vista habitações unifamiliares de interesse social e que o zoneamento proposto por ela foi apropriado pela NBR 15575(ABNT, 2013), por ser o único disponível no país na época. Essa adaptação implica em certas restrições, haja vista a NBR 15575(ABNT, 2013) considerar qualquer tipo de habitação. No entanto, atualmente o zoneamento bioclimático encontra-se em processo de revisão e está sendo aperfeiçoado tendo em vista essas questões (RORIZ, 2012b).

O cerne desta pesquisa é o estudo do desempenho térmico de alvenarias em blocos de concreto com o objetivo de propor melhorias ao sistema construtivo, portanto inclina-se inicialmente o estudo da NBR 15220 (ABNT, 2005) onde são detalhados os métodos de cálculo das propriedades térmicas dos componentes construtivos, possibilitando a análise do desempenho térmico da edificação através dos dados obtidos, e dos parâmetros comparativos com as determinações da NBR 15575 (ABNT, 2013).

2.3.2.1.2 Diretrizes construtivas estabelecidas para vedações localizadas na ZB-8

Segundo as diretrizes construtivas presentes na NBR 15220 (ABNT,2003), de caráter orientativo, para a ZB-8, zona bioclimática foco da presente pesquisa, recomenda-se que as vedações externas (paredes e cobertura) sejam leves e refletoras, cuja classificação é estabelecida através de valores admissíveis de transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis tanto para a parede (vide Tabela 2), quanto para a cobertura.

Tabela 2: Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para parede leve refletora.

Vedação externa (alvenaria)		Transmitância térmica - U (W/m ² .k)	Atraso térmico - ϕ (horas)	Fator Solar - FS (%)
Parede	Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	$FS \leq 4,0$

Fonte: NBR 15220-3(ABNT,2003)

2.3.2.2 NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho

A tecnologia construtiva utilizada para a construção do edifício influenciará diretamente no conforto ambiental proporcionado ao seu usuário. Dada essa relação, estabelece-se o foco para as exigências dos usuários quanto ao desempenho das edificações, na etapa de uso, as quais terão seu atendimento condicionado à escolha da tecnologia adequada e às diretrizes do projeto acerca dos parâmetros técnicos, econômicos, sociais e ambientais. Para definição dos critérios estabelecidos para uma edificação habitacional e seus sistemas, com base em requisitos do usuário, objetivando a melhoria da qualidade da

habitação, foi criada a norma NBR 15575 (ABNT,2010) “Edificações Habitacionais – Desempenho” em vigor desde julho de 2013, sendo consenso que o referido conjunto normativo (Partes 1 a 6) constitui importante e indispensável marco para a modernização tecnológica da construção brasileira e melhoria da qualidade de nossas habitações.

A NBR 15575(ABNT,2013) sob o título geral “Edificações habitacionais — Desempenho” está subdividida em 6 partes (tabela 3):

Tabela 3: Descritivo partes da NBR 15575.

NBR 15575/2013: Edificações Habitacionais - Desempenho	
Parte 1	Requisitos gerais;
Parte 2	Requisitos para os sistemas estruturais;
Parte 3	Requisitos para os sistemas de pisos;
Parte 4	Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas;
Parte 5	Requisitos para os sistemas de coberturas;
Parte 6	Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

Fonte: Autora adaptação da NBR 15575 (ABNT, 2013).

Cada parte da norma foi organizada por elementos da construção, percorrendo uma sequência de exigências relativas à segurança (desempenho mecânico, segurança contra incêndio, segurança no uso e operação), habitabilidade (estanqueidade, desempenho térmico e acústico, desempenho lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil) e sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade e adequação ambiental).

Para a definição dos atributos que a edificação e as tecnologias construtivas utilizadas devem possuir, e para métodos de avaliação e critérios de desempenho, foi estabelecido em norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) a divisão do território brasileiro em oito zonas bioclimáticas, como já elucidado anteriormente. Para cada critério são estabelecidos três níveis de atendimento de desempenho: o mínimo (obrigatório a todas as edificações), o intermediário e o superior.

Vale ressaltar que a norma de desempenho impulsiona a detalhada definição das propriedades dos diversos elementos da construção. Tal base atenta que a responsabilidade para que o edifício atinja determinado nível de desempenho começa no projeto e na escolha dos materiais adequados. Sob esta ótica, conclui-se que todos os elementos construtivos

utilizados devem ter seu desenvolvimento calcado no atendimento às exigências quanto à segurança, habitabilidade e sustentabilidade, resguardando suas particularidades de uso na edificação.

Quanto ao desempenho térmico é válido alertar que a norma não trata da edificação sob condicionamento artificial (refrigeração ou calefação). Ou seja, todos os critérios de desempenho foram estabelecidos com base em condições naturais de insolação, ventilação e outras. O desempenho térmico depende de diversas características do local da obra (topografia, temperatura e umidade do ar, direção e velocidade do vento etc.) e da edificação (materiais constituintes, número de pavimentos, dimensões dos cômodos, pé direito, orientação das fachadas, etc). A sensação de conforto térmico depende muito das condições de ventilação dos ambientes, com grande influência do posicionamento e dimensões das aberturas de janelas, o que é considerado pela NBR 15575-4(ABNT,2013).

2.3.2.2.1 Avaliação do desempenho térmico

A avaliação de desempenho pode ser feita de forma simplificada, com base em propriedades térmicas das fachadas e das coberturas, ou por simulação computacional, onde são cotejados simultaneamente todos os elementos e todos os fenômenos intervenientes. A Norma determina que a edificação habitacional deve reunir características que atendam às exigências de desempenho térmico, considerando-se a zona bioclimática definida na NBR 15220-3(ABNT,2005):

A) Procedimento 1 A – Simplificado (normativo): presta-se a verificar o atendimento aos requisitos e critérios para o envelopamento da obra, com base na transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) das paredes de fachada e das coberturas.

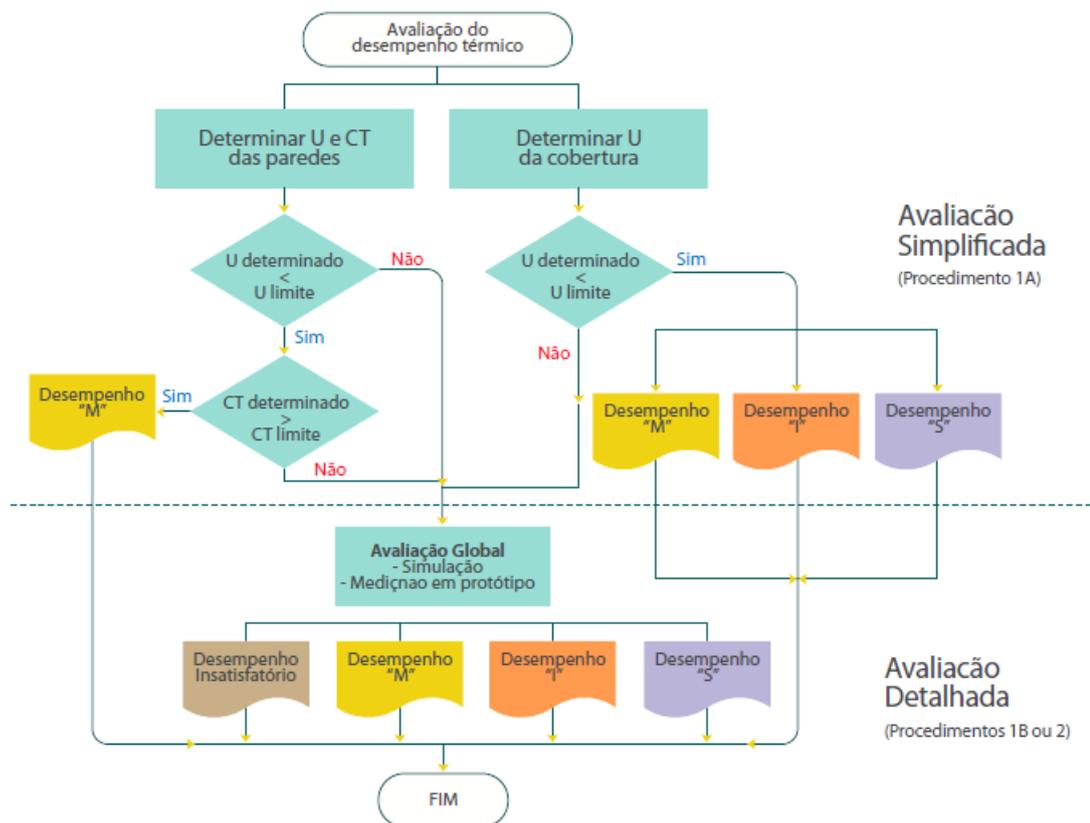
B) Procedimento 1 B – Simulação computacional através do *software Energy Plus* (normativo): Para os casos em que os valores obtidos para a transmitância térmica e/ou capacidade térmica se mostrarem insatisfatórios frente aos critérios e métodos estabelecidos nas partes 4 e 5 da norma NBR 15575, o desempenho térmico global da edificação deve ser avaliado por simulação computacional.

C) Procedimento 2 – Medição in loco (informativo, Anexo A da NBR 15575-1): Quando se utiliza a medição, a temperatura do ar é monitorada nas edificações ou em

protótipos construídos. Tem caráter meramente informativo e não se sobrepõe aos procedimentos descritos nos itens.

Os procedimentos de avaliação do desempenho térmico de habitações descritos são apresentados na Figura 8:

Figura 8: Métodos alternativos de avaliação do desempenho térmico.



Fonte: IPT/Guia CBIC (2013).

Parâmetros de Avaliação da Edificação Segundo a NBR 15575/2013 – Níveis de Desempenho

Quanto à avaliação simplificada

A NBR 15575 (ABNT,2013) determina os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) de acordo a absorvância (α) da superfície externa (vide Tabela 33), bem como da capacidade térmica (CT) (vide Tabela 34) das paredes externas, para as oitos zonas bioclimáticas, para que proporcionem pelo menos desempenho térmico mínimo.

Tabela 4: Transmitância térmica de paredes externas.

Transmitância térmica (U, em W/m ² .k)		
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 8	
$U \leq 2,5$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$

	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$
--	--------------	--------------

α é absorptância à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: NBR 15575 (ABNT,2013).

Tabela 5: Capacidade térmica de paredes externas.

Capacidade térmica (CT, em KJ/m ² .k)	
Zona 8	Zonas 1,2,3,4,5,6 e 7
Sem exigência	≥ 130

Fonte: NBR 15575 (ABNT,2013).

Quanto à avaliação detalhada

A partir dos requisitos e critérios estabelecidos em norma, são definidos para a edificação analisada, a partir do resultado das simulações e da medição in loco, três níveis de atendimento de desempenho: o mínimo (obrigatório a todas as edificações), o intermediário e o superior. Os níveis de desempenho devem ser avaliados para as condições de inverno e verão. Esses níveis de desempenho podem ser entendidos da seguinte forma, segundo Sacht e Rossignolo (2010):

. *Nível de desempenho M (mínimo): é o nível mínimo de desempenho que deve ser atendido para aceitação (condições internas não piores do que as externas);*

. *Nível de desempenho I (intermediário): atende além das exigências mínimas e seu atendimento é facultativo;*

. *Nível de desempenho S (superior): excede o nível de desempenho intermediário, e o atendimento também é facultativo.*

Para classificação, a NBR 15575 (ABNT,2013) estabelece os critérios de avaliação de em função das temperaturas máximas e mínimas registradas em determinado recinto da edificação, escolhido em função de ter a condição mais crítica do ponto de vista térmico.

Através das tabelas 6 e 7 são apresentados estes critérios:

Tabela 6: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
I	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2 \text{ } ^\circ\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1 \text{ } ^\circ\text{C})$
S	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4 \text{ } ^\circ\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2 \text{ } ^\circ\text{C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1 \text{ } ^\circ\text{C})$

Fonte: Adaptada da NBR 15575(ABNT,2013).

Tabela 7: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno.

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 5	Zona 6, 7 e 8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3 \text{ } ^\circ\text{C})$	Nestas zonas este critério não precisa ser verificado
I	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5 \text{ } ^\circ\text{C})$	
S	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7 \text{ } ^\circ\text{C})$	

Fonte: Adaptada da NBR 15575(ABNT,2013).

2.3.3 Características do clima da cidade de Salvador/Bahia

A cidade de Salvador/ BA está situada na costa nordeste brasileira. Possui uma peculiaridade que a distingue das demais cidades brasileiras, estando conformada sobre uma península, que avança no Oceano Atlântico como uma ponta, o que confere à cidade três fachadas continentais (NERY et al., 1997). No sentido leste e sul, está o mar aberto; e no sentido oeste, a Baía de Todos os Santos.

As três fachadas continentais da cidade de Salvador são representadas pela imagem da Figura 9:

Figura 9: As três fachadas continentais de Salvador.



Fonte: Souza (2013)

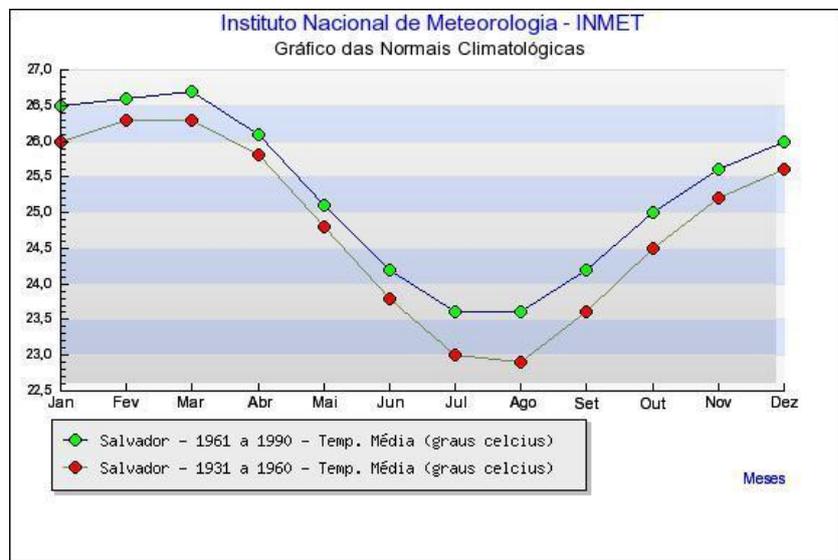
Salvador encontra-se situada entre as latitudes: 12°45'00" e 13°7'30"Sul; e longitudes: 38°22'30" e 38°37'30"Oeste. A característica climática regional é tropical quente e úmido, de baixa amplitude térmica, com médias anuais de 25,2°C de temperatura do ar; 80,8% de umidade relativa e cerca de 3,1 m/s de velocidade do vento (NERY et al., 1997). De acordo

com o modelo de classificação climática de abordagem empírica, desenvolvido por Köppen entre 1900 e 1936, a região estudada se enquadra como clima tropical quente e úmido, tipologia climática.

As características gerais do clima de Salvador se configuram por pequenas variações de temperatura durante o dia, ou seja, pouca amplitude térmica. Além de dias quentes e úmidos e noites com temperaturas mais amenas e umidade mais elevada. Possui basicamente duas estações anuais: verão e inverno, com pequena variação de temperatura entre elas. Os ventos predominantes se originam dos sentidos Sudeste e Sul, mas a cidade se beneficia com ventilação de outras direções o ano todo, pela característica peninsular sobre o Atlântico. A proximidade da cidade ao equador geográfico permite uma exposição à radiação solar, aproximadamente perpendicular à sua superfície durante grande parte do ano (SOUZA,2013).

Salvador tem apresentado indicações de aumento das médias de temperatura do ar ao longo dos anos. Através da análise das Normais Climatológicas de Salvador para as médias de temperaturas do ar, acompanhadas entre dois intervalos de 30 anos consecutivos: de 1931 a 1960 e de 1961 a 1990, percebe-se aumento nas médias de temperatura do ar em pouco mais de 0,5°C para 2/3 dos meses (Figura 10):

Figura 10: Normais Climatológicas - temperatura média do ar (°C).



Fonte: INMET (1992).

2.4 Lã de Rocha

A Lã de rocha é um material especialmente desenvolvido para o setor da construção civil, sendo utilizado tanto para o isolamento térmico, quanto acústico.

Fabricada em todo o mundo, ela atende a diversos segmentos da indústria e construção civil, sendo muito usada em telhados, paredes, pisos, estúdios, salas de cinema, coberturas e paredes externas, dentre outros.

A lã de rocha é produzida a partir de matérias-primas abundantes na natureza (rocha basáltica e outros minerais) e recicladas (escória metalúrgica). Após sua fusão a 1500°C, estes minerais são transformados em finas fibras por centrifugação.

De acordo com as informações fornecidas pelo fabricante da Lã de rocha, THERMAX®, a qual foi utilizada a Lã de Rocha em Super-Flocos (figura 11) na presente pesquisa, estas finas fibras (6 – 8 micra) são, então, aglomeradas com resinas especiais e aditivos que proporcionam espessuras controladas e propriedades de repelência à água e ausência de poeira. Estas características únicas da lã de rocha resultam no mais efetivo material para isolamento térmico e acústico, e para proteção contra o fogo.

Figura 11: Lã de Rocha Super-flocos.



Fonte: A autora.

Conforme descrição do fabricante, os Super-flocos são flocos amorfos constituídos por fibras em lã de rocha THERMAX®, isentos de resinas e materiais orgânicos, possuem diâmetro médio entre 6 e 7 micra. Possui densidade de aproximadamente 60 kg/m³. Suas propriedades são descritas a seguir:

- **Térmicas:** Suportam picos de temperatura superiores a 1000°C. Sua baixa condutividade térmica resulta em excelente eficiência, provendo economia de energia. Trabalham dentro de uma larga faixa de temperatura de -200 a +750°C. Reduzem o fluxo (ou troca) de calor entre a superfície interna e externa isolada, devido à sua baixa condutividade térmica.
- **Acústicas:** Possuem elevados índices de absorção acústica.

- **Resiliência:** recuperam o volume original após a retirada da força que causou a compactação.
- **Resistência à água:** A lã de rocha é repelente à água devido aos aglomerantes adicionados ao produto, preservando as características originais depois de seca.
- **Inércia química:** Não ataca as superfícies com as quais mantém contato, quer sejam do revestimento externo ou do casco/parede internos.
- **Saúde:** Material não classificável como cancerígeno: Grupo 3, segundo classificação da IARC (*International Agency for Research on Cancer*), órgão sediado em Lyon (França), pertencente à Organização Mundial de Saúde (OMS) e subordinado à Organização das Nações Unidas (ONU).
- **Comportamento ao Fogo:** Por serem incombustíveis, oferecem grande segurança em sua aplicação, transporte e armazenamento.

A norma brasileira que trata dos Isolantes térmicos de lã de rocha – Flocos é a ABNT NBR 11626, cuja responsável por sua criação é a CEE 155, que trata dos materiais usados como isolantes térmicos e acústicos.

Na presente pesquisa, a Lã de rocha Super-flocos foi adicionada ao concreto para a produção dos blocos em seu estado natural, na literatura pesquisada não foram encontrados estudos que a utilizassem desta forma. A decisão por utilizar a lã de rocha em seu estado natural foi em razão de dois principais fatores: para preservar suas características isolantes e para avaliar se ao ser incorporada em matriz cimentícia conservaria suas propriedades isolantes de forma a contribuir com a melhoria do desempenho térmico do concreto. A lã de rocha foi utilizada em substituição parcial a areia (agregado miúdo) nos teores 10%, 20% e 20%.

Quanto à utilização da lã de rocha em compósitos à base de cimento, na literatura pesquisada, foi encontrado maior número de trabalhos no qual eram utilizados os resíduos de lã de rocha (RLR) (figura 12) o qual sofriam processamento, geralmente moagem, e eram adicionados em substituição parcial ao cimento.

Figura 12: Resíduo de Lã de Rocha após moagem.



Fonte: Medeiros (2014).

Cheng et al. (2011) realizou estudo cujo objetivo foi investigar as propriedades dos compósitos à base de cimento com adição de resíduos de lã de rocha. Este estudo utilizou resíduos de lã de rocha com uma distribuição de tamanhos cilíndricos variando de 17 a 250 μm , sendo 30% inferior a 150 μm . Conclui-se que os resíduos de lã de rocha podem ser usados como substituto adequado para agregados grosseiros e finos, economizando no custo de agregados naturais e minimizando o impacto ambiental da disposição de resíduos sólidos. Além disso, como a composição de resíduos de lã de rocha é semelhante a outros materiais pozolanos, tais como cinzas volantes, escória de alto-forno granulada moída e fumo de sílica, portanto pode ser considerada como material cimentício suplementar.

Os resultados experimentais mostram que a substituição parcial de agregados naturais por resíduos de lã de rocha melhora a resistência à compressão, a resistência à ruptura, a resistência à abrasão, a absorção, a resistência à potencial reatividade alcalina, a resistividade e a penetração de íons cloreto de compósitos à base de cimento. Estas propriedades melhoradas são o resultado da estrutura densa conseguida pelo efeito de enchimento do produto pozolânico. Os resultados do índice de atividade da força pozolânica e as observações do microscópio eletrônico de varredura (MEV) confirmam esses achados. Por conseguinte, os resíduos de lã de rocha podem atuar como um material cimentício ou como material de enchimento inerte em compósitos à base de cimento, dependendo do tamanho de partícula (CHENG,2011).

Porém neste referido estudo, não foi abordado o desempenho térmico, para saber se a adição de RLR favorece ou não as propriedades termofísicas do compósito cimentício. Na literatura pesquisada, não foi encontrado estudos ou pesquisas relacionadas à incorporação/adição de lã de rocha, em seu estado natural, nem processadas, em materiais

construtivos, no tocante ao seu desempenho térmico, desta maneira o conhecimento de seu comportamento, suas características, propriedades termofísicas é ainda muito limitado.

Segundo estudo realizado por Medeiros et al. (2014), cujo objetivo consistiu na caracterização e classificação do resíduo industrial de lã de rocha (RLR), de modo, a sugerir o reaproveitamento e/ou reciclagem deste, foi concluído que com base em análises realizadas, é possível sugerir a incorporação do resíduo em matrizes de cimento. Os resultados demonstraram que o resíduo de lã de rocha segundo sua classificação é enquadrado como resíduo classe II - A, Não Inerte, ou seja, não apresenta nenhum indicativo de periculosidade, facilitando assim seu reaproveitamento e/ou reciclagem. De acordo com a composição química apresentada é possível determinar que o RLR apresenta, segundo a norma NBR 12653 (ABNT, 2012), características pozolânicas (ver Tabela 8), pelo fato do material, possuir componentes ricos em sílica e alumina, características de sólido amorfo e com granulometria fina que pode ser utilizado como pozolana, classificando o resíduo como um agregado aplicável a indústria cimenteira.

Tabela 8: Composição nominal, em óxidos, do resíduo de lã de rocha.

COMPOSTOS	QUANTIDADE (% MASSA)
SiO ₂	43,27%
Al ₂ O ₃	9,77%
Fe ₂ O ₃	8,87%
CaO	13,53%
K ₂ O	0,96%
MgO	13,39%
Na ₂ O	0,59%
MnO	-
P ₂ O ₅	0,10%
TiO ₂	3,49%
SrO	-
P.F.	0,02%

Fonte: Medeiros (2014).

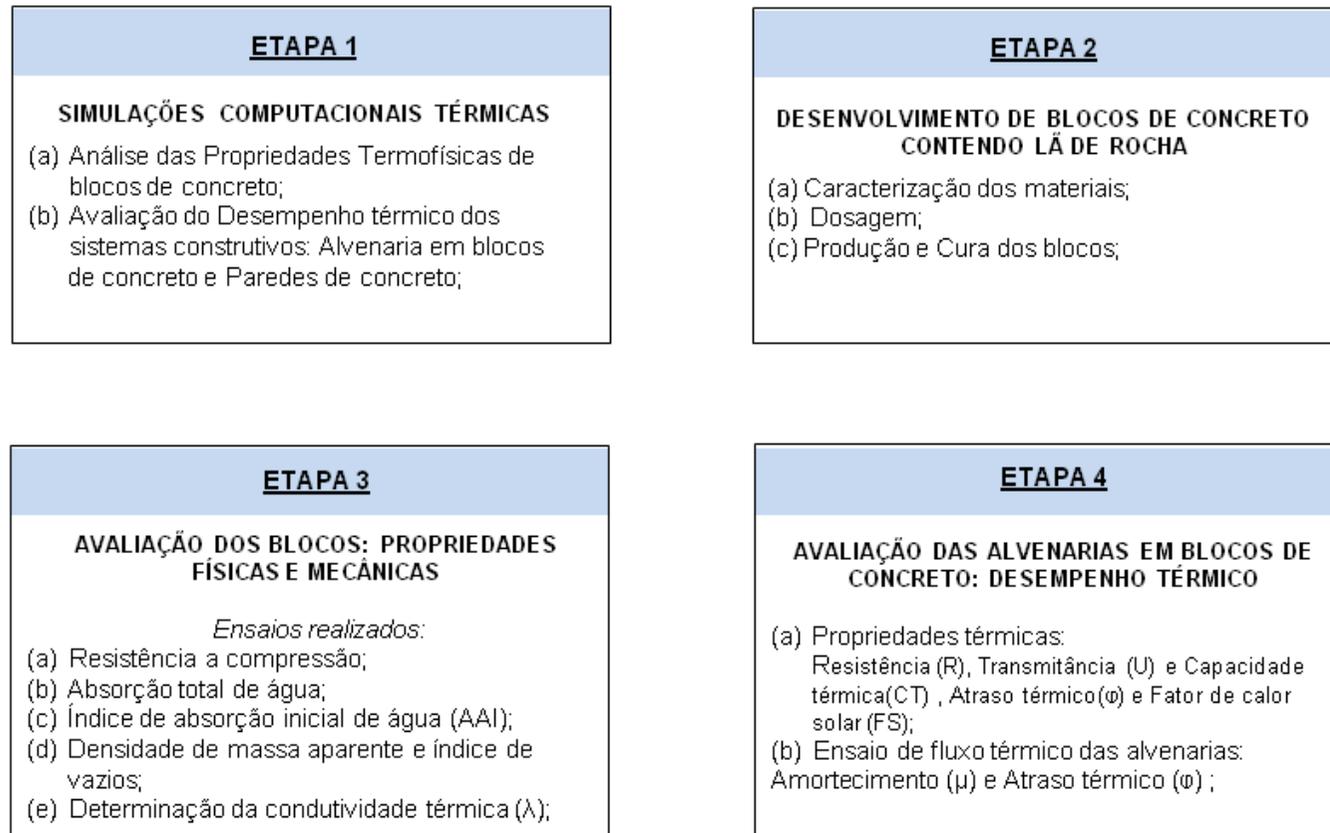
Ainda segundo Metha e Monteiro (1994) devido a lã de rocha apresentar características pozolânicas, pode ser vantajoso, em alguns casos fazer a substituição, tanto parte cimento Portland, como de parte do agregado miúdo.

3. METODOLOGIA

3.1. Descrição das Etapas do Programa Experimental

Para alcance dos objetivos desta pesquisa, foi elaborado um programa experimental dividido em quatro etapas, apresentado na Figura 13.

Figura 13: Etapas do Programa Experimental.



Fonte:A autora.

Descrição das etapas do programa experimental:

1ª ETAPA – SIMULAÇÕES TÉRMICAS:

- Análise de sensibilidade das propriedades termofísicas do sistema construtivo alvenaria em blocos de concreto através de simulação computacional utilizando o software *EnergyPlus*. Para isto, foram feitas variações nos valores das propriedades térmicas - dados input do *E-plus* - de forma a analisar a resposta – dados output - da temperatura do ar interna do ambiente analisado da edificação em estudo.

Identificação, a partir da análise de resultados da simulação térmica computacional, das propriedades termofísicas que mais influenciam o desempenho térmico do sistema construtivo.

- Avaliação do desempenho térmico dos sistemas construtivos utilizando métodos computacionais: alvenaria estrutural em blocos de concreto e paredes de concreto moldadas “in loco”. Esta etapa da pesquisa tem por objetivo avaliar e comparar o nível de desempenho térmico dos sistemas construtivos, que é categorizado, de acordo com o estabelecido em norma, como: mínimo, intermediário e máximo.

2ª ETAPA – DESENVOLVIMENTO DE BLOCOS DE CONCRETO CONTENDO LÃ DE ROCHA:

- Produção dos blocos de concretos de referência (0%Lã) e dos blocos de concreto com adição de lã de rocha nos teores 10%, 20% e 30% em substituição parcial à areia (agregado miúdo).

3ª ETAPA – AVALIAÇÃO DOS BLOCOS: PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS:

- Ensaios de resistência à compressão, absorção total de água dos blocos, índice de absorção inicial de água (AAI), densidade de massa aparente e determinação da condutividade térmica.
- Projeto e execução de câmara térmica para realização dos ensaios para determinação da condutividade térmica (λ) e fluxo térmico.

4ª ETAPA – AVALIAÇÃO DAS ALVENARIAS EM BLOCOS DE CONCRETO: DESEMPENHO TÉRMICO:

- Realização de cálculos, estabelecidos pela NBR 15220-2(ABNT,2005), para determinação das propriedades termofísicas - Resistência, Transmitância e Capacidade Térmica, Atraso Térmico e Fator de Calor Solar – de cada alvenaria 0Lã, 10Lã, 20Lã e 30Lã. Desta forma, tornou-se possível a avaliação do desempenho térmico apresentado por cada vedação, através do método de avaliação simplificada estabelecido pela NBR 155752 (ABNT,2013).
- Realização do ensaio de fluxo térmico: Execução de quatro painéis de alvenaria de 0,50m², um para cada traço do bloco de concreto (0%,10%,20% e 30%) com o objetivo de analisar o comportamento térmico característico a cada parede mediante o fluxo térmico, e determinar o amortecimento e atraso térmico referente as vedações de forma a avaliar seu desempenho térmico. Estes painéis foram submetidos a um fluxo térmico constante advindo de uma fonte de calor constituída por duas lâmpadas incandescentes com 100w de potência cada uma. Durante 24 horas foram aferidas, através de dataloggers, a temperatura do ar nos três setores (temperatura do ar externa, temperatura do ar interna, temperatura do ar no interior da câmara de ar do bloco de concreto) para análise comparativa entre o desempenho térmico da vedação composta pelos blocos de concreto referência (0Lã) e as demais compostas pelos blocos de concreto contendo lã de rocha;

Este ensaio de fluxo térmico foi realizado em três etapas:

- Painéis de alvenaria não rebocados;
- Painéis de alvenaria rebocados;
- Paineis de alvenaria 0Lã com pintura externa com a cor branca, de baixa absorvância;

ETAPA 1

3.2. Simulações Térmicas

Conforme elucida Mendes et al. (2005) avaliar o desempenho energético de edificações é uma tarefa complexa que envolve grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares. O advento do computador foi fundamental para o desenvolvimento dos modelos físicos que representam o comportamento térmico e energético de edificações, permitindo a simulação de diferentes cenários.

A complexidade crescente dos projetos arquitetônicos e o consequente interesse por soluções como fachadas duplas, novos materiais e formas inusitadas, é inegável a importância dos procedimentos avançados de simulação computacional para a formulação de respostas sobre o desempenho ambiental do edifício (GONÇALVES, 2015).

Conforme estabelecido pela NBR 15575(ABNT,2013) para a realização das simulações térmicas computacionais, recomenda-se o emprego do programa EnergyPlus, o qual foi utilizado na presente pesquisa. O programa foi alimentado com dados fidedignos das propriedades térmicas dos materiais e/ou componentes construtivos, presentes na NBR 15220 (ABNT,2005).

3.2.1. Simulação térmica Etapa A

Análise das propriedades termofísicas de blocos de concreto através de simulação computacional, visando à otimização do seu desempenho térmico quando adotado na envoltória de edificação na cidade de salvador-ba.

3.2.1.1 Objetivos

O objetivo desta etapa compreende avaliar a sensibilidade das propriedades termofísicas do bloco de concreto, através de simulação computacional, a fim de apontar o limite de contribuição das mesmas no desempenho térmico das edificações, de forma a estabelecer um direcionamento quanto à otimização de suas características térmicas.

3.2.1.2 Método

Os dados de entrada (*input*) para a realização das simulações computacionais no software EnergyPlus®, dentre diversas outras definições relativas aos componentes construtivos da edificação, referem-se as propriedades térmicas e físicas dos mesmos, base do presente estudo, são elas:

- (a) Espessura
- (b) Densidade
- (c) Condutividade térmica
- (d) Rugosidade
- (e) Absortância
- (f) Emissividade
- (g) Calor específico.

É importante sobressaltar que as propriedades absorvância e emissividade referem-se à superfície exposta da vedação.

Nesta etapa cujo objetivo é a análise da sensibilidade das propriedades termofísicas do bloco de concreto no tocante ao desempenho térmico global da edificação, utilizou-se o método que, para cada propriedade a ser analisada, são realizadas três simulações e adotados três valores distintos para a mesma: o valor padrão da propriedade, o valor menor que o padrão e o valor maior que o padrão. Desta forma, a análise será realizada mediante a resposta térmica da edificação, frente à esta variação. As simulações térmicas apresentam como resposta a temperatura interna do ambiente em análise, apresentadas em gráficos.

Para o estudo proposto, as simulações foram desenvolvidas em duas etapas. Para a primeira etapa, as simulações foram configuradas considerando a envoltória (vedação vertical) rebocada em ambas as faces e a segunda com a envoltória sem argamassa de revestimento (ver tabela 9).

Tabela 9 : Etapas da Simulação.

Simulação	
Etapa A	Com argamassa de revestimento
Etapa B	Sem argamassa de revestimento

Fonte: A autora .

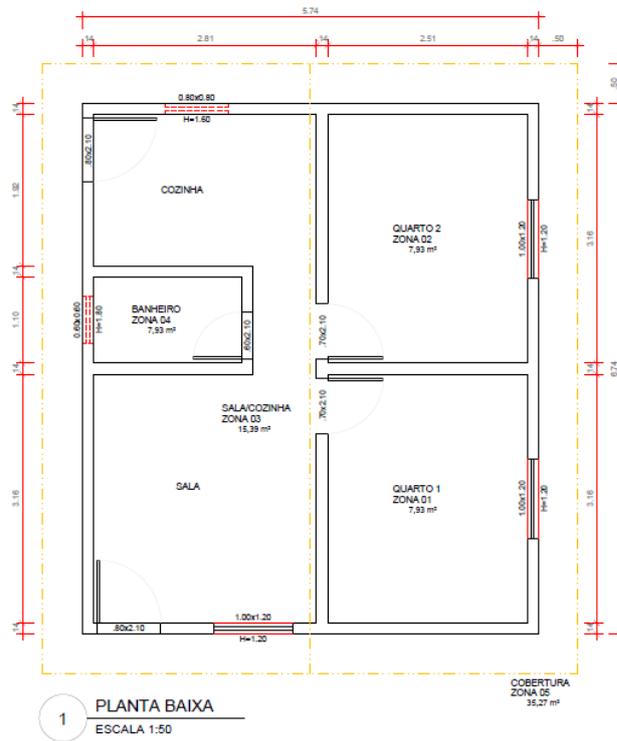
3.2.1.2.1 Definição de parâmetros

Caracterização da edificação de referência e características da modelagem da edificação

Definiu-se para as referidas simulações a edificação residencial unifamiliar, padrão Caixa Econômica Federal para Habitação de Interesse Social, em fase de projeto, sendo definida sua localização na cidade de Salvador/Bahia. A edificação tem área construída de 38,70 m², com dimensões de 6,74m x 5,74m x 2,80m, é composta por dois quartos, sala, um sanitário, cozinha e área de serviço.

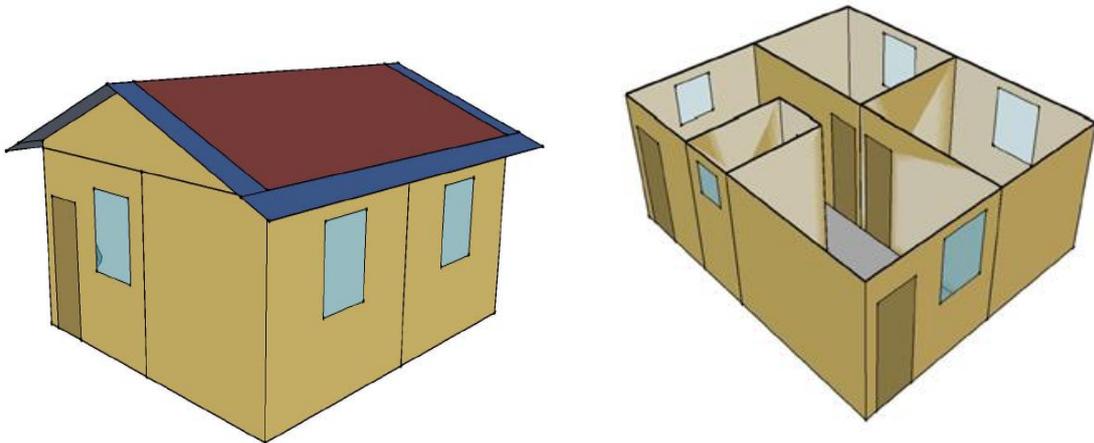
A partir das informações disponibilizadas no site da Caixa, foi reproduzida a planta baixa da edificação (figura 14) no *software AutoCad 2012*, bem como foi realizada a maquete virtual (ver figuras 15 e 16) no *software Google SketchUp*. Estas peças gráficas serviram de base para os dados requeridos, referentes à geometria da edificação, para simulação computacional no *software EnergyPlus®*.

Figura 14: Planta baixa edificação.



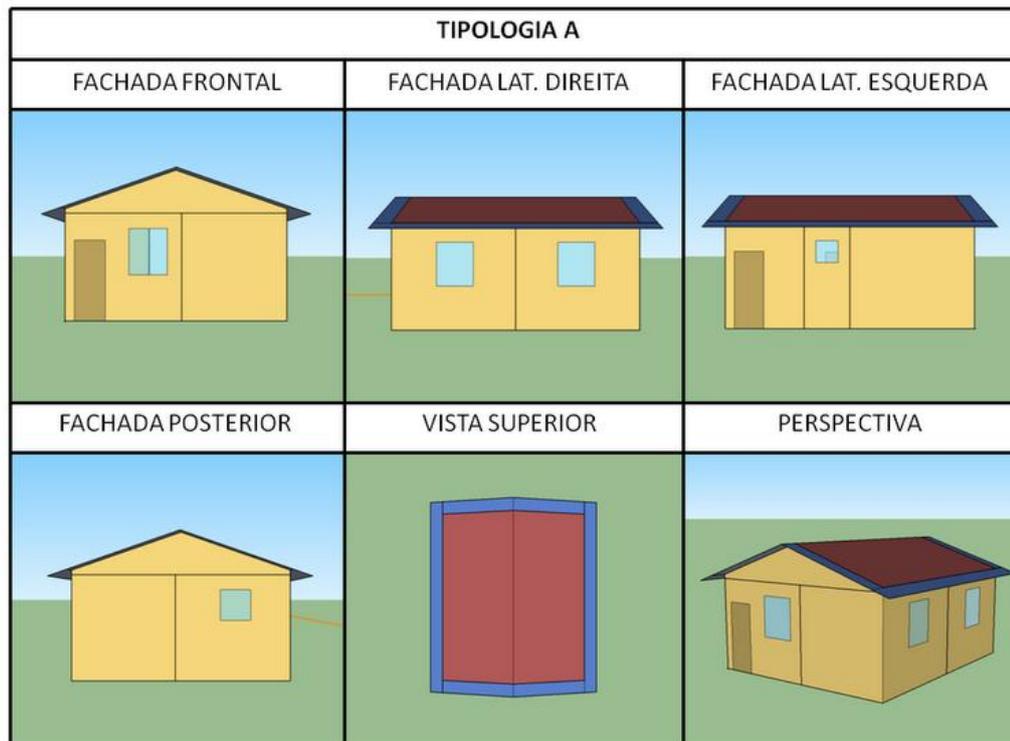
Fonte: A autora.

Figura 15: Perspectivas da edificação.



Fonte: A autora.

Figura 16: Fachadas edificação.



Fonte: A autora.

A edificação foi modelada no programa EnergyPlus® com cinco zonas térmicas, sendo quatro zonas para os ambientes e uma para o ático da cobertura. Foi utilizado o arquivo climático do INMET (2015) da cidade de Salvador (zona bioclimática 8), disponibilizado pelo LabEEE/UFSC.

Configuração dos componentes construtivos

A vedação vertical externa e interna da edificação é composta por blocos de concreto, assentados com argamassa de 1,0cm, e para a etapa A, são rebocados em ambas as faces com argamassa de 2,5cm (propriedades vide quadro 2). O tamanho da abertura das esquadrias para ventilação e iluminação é de 15% em relação à área do ambiente, nos ambientes de permanência prolongada as esquadrias possuem dispositivos de sombreamento externo (venezianas). A cobertura é composta por telha cerâmica clara (baixa absorvância) e barreira radiante de alumínio, a edificação dispõe de laje de concreto, e encontra-se em contato com o solo (Ver Tabela 10 e Figura 17).

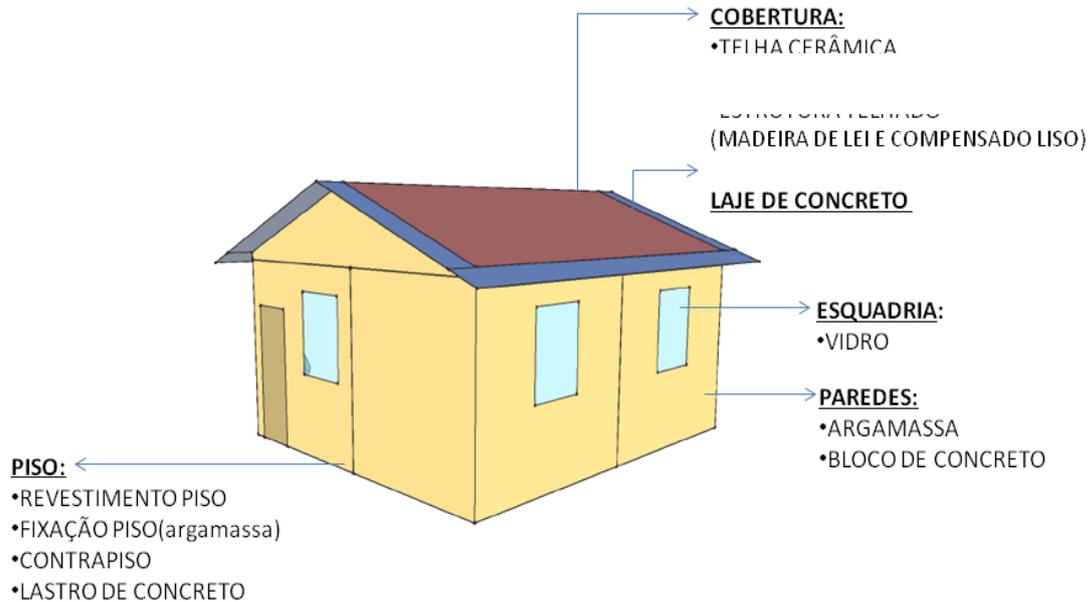
Tabela 10: Especificações componentes construtivos.

Componentes Construtivos	Especificações
Vedação Externa e Interna	Alvenaria em Blocos de concreto
Cobertura	Telhas cerâmicas claras ($\alpha=0,3$)

Esquadrias	Barreira Radiante de Alumínio Vidro / Venezianas
Laje	Concreto espessura 10cm
Piso	Em contato com o solo

Fonte: A autora.

Figura 17: Componentes construtivos da edificação.



Fonte: A autora.

Para as propriedades físicas e térmicas da argamassa de revestimento foram adotados os valores presentes na NBR 15220-1(ABNT, 2003), como pode ser verificado na Tabela 11.

Tabela 11: Valores adotados argamassa de revestimento.

Propriedades	Valor
Rugosidade	Rugoso
Espessura (m)	0,025
Condutividade (W/m.K)	1,15
Densidade (kg/m ³)	2000
Calor específico (J/kg.K)	1,0

Fonte: A autora.

Propriedades analisadas

Foram analisadas as propriedades termofísicas do componente construtivo bloco de concreto: espessura(m), rugosidade(adimensional), densidade(kg/m³), condutividade térmica(W/m.K), absorvância(%), emissividade(%) e calor específico(kJ/kg.K). Os valores adotados podem ser verificados na tabela 12:

Tabela 12: Valores adotados propriedades termofísicas do bloco de concreto.

Propriedades Termofísicas	Menor Valor	Valor Padrão	Maior Valor
Rugosidade	Suave	Rugoso	Muito Rugoso
Espessura (m)	0,09	0,14	0,19
Condutividade (W/m.K)	1,48	1,75	2,02
Densidade (kg/m ³)	2137	2400	2663
Calor específico (J/kg.K)	0,5	1	1,5
Emissividade(%)	0,7	0,85	0,95
Absortância (%)	0,3	0,5	0,7

Fonte: A autora.

Os valores adotados das propriedades físicas e térmicas inerentes ao componente construtivo em análise foram definidos a partir dos critérios abaixo descritos:

- Para a densidade e a condutividade térmica, foi adotado como padrão o valor presente na NBR 15220-1(ABNT, 2003). Para o menor valor foi adotado o presente no Relatório no 282/2014 do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina. E, como parâmetro para adoção do maior valor foi somado ao valor padrão, a diferença entre o valor padrão e o menor valor.
- Quanto à rugosidade, foram adotados parâmetros estabelecidos pelo software Energy Plus para a rugosidade da superfície da alvenaria.
- Espessura: Valores específicos das famílias de blocos de concreto presentes no mercado.
- Absortância e Emissividade: foram adotados valores que representam, respectivamente, a pintura da superfície com cor clara, cor média (padrão), e cor escura.
- Calor específico: Foi adotado o valor padrão especificado na NBR 15220-1 (ABNT, 2003) e para obtenção do menor e maior valor, foi respectivamente subtraído e somado o valor 0,5 do valor padrão.

Definição das cargas térmicas

Para realização da simulação computacional, um dos parâmetros a ser definido é a carga térmica presente na edificação, determinada pelos padrões de ocupação e iluminação. Para que a simulação pudesse se aproximar ao máximo da realidade de uso, foram adotados alguns procedimentos proposto por Sorgato *et al.*(2012):

Padrão de ocupação

Para cada dormitório da edificação deve ser adotado o padrão de ocupação de duas pessoas, entre as 21h e 7h. A sala de estar da edificação deve ser simulada com um padrão de ocupação de 50%, entre às 14h e 18h e com 100% entre às 18h e 21h.

A taxa metabólica para cada atividade é determinada em função do tipo de atividade desempenhada em cada ambiente. Para a atividade no dormitório (dormindo ou descansando), o valor de calor dissipado de 81 W/pessoa. Para a atividade na sala (sentado ou assistido televisão) o valor considerado é de 108 W/ pessoa.

Padrão de uso da iluminação

Considera-se que os usuários utilizam a iluminação artificial no dormitório nas primeiras horas da manhã, entre 6h e 7h, e no período noturno entre 21h e 23, e na Sala de estar das 17h às 21h.

Método de simulação segundo a NBR 15575/2013

Para a cidade de Salvador, localizada na ZB 8, conforme determina a NBR 15575-1(ABNT, 2013), não é necessário realizar avaliação de desempenho térmico para inverno. Portanto, as avaliações realizadas foram feitas no dia típico de verão, 21 de dezembro.

Ainda segundo a norma, o desempenho da edificação deve ser avaliado em um ambiente de permanência prolongada (dormitório ou sala de estar) para a condição mais crítica do ponto de vista térmico. O ambiente selecionado para a análise no verão foi o dormitório com a janela orientada para oeste e a outra parede voltada para norte.

Os resultados desta etapa A da simulação térmica serão apresentados no capítulo 4.

3.2.2 Simulação térmica - Etapa B

Avaliação do desempenho térmico, utilizando métodos computacionais, dos sistemas construtivos racionalizados: alvenaria estrutural em blocos de concreto e paredes de concreto moldadas “in loco”

3.2.2.1 Objetivos

Esta etapa tem por objetivo avaliar e comparar o nível de desempenho térmico dos sistemas construtivos racionalizados de matriz cimentícia, que é categorizado, de acordo com o estabelecido na NBR 15575(ABNT, 2013), como: mínimo, intermediário e máximo.

3.2.2.2 Métodos

A avaliação térmica foi efetuada a partir dos resultados obtidos por meio de simulação computacional realizada com o software *EnergyPlus*, que constitui uma das etapas do procedimento de avaliação detalhada determinado pela NBR 15575 (ABNT, 2013). Foram feitas as análises de temperaturas dos dois dias típicos de projeto, de verão (21 de junho) e de inverno (21 de dezembro); sendo que, obedecendo aos critérios determinados em norma, as cinco cidades brasileiras escolhidas (representando as cinco regiões do território brasileiro) foram analisadas na condição verão, porém apenas duas foram analisadas na condição inverno (Ver Tabela 13). Foram utilizados os dados climáticos das cidades obtidos a partir dos arquivos INMET 2015, disponibilizados no site do LABEE/UFSC.

Tabela 13: Simulações: cidades e análises do dia típico verão e inverno.

Região	Capitais	ZB	Análise Verão	Análise Inverno
Norte	Manaus	8	✓	-
Nordeste	Salvador	8	✓	-
Centro-Oeste	Cuiabá	7	✓	-
Sudeste	São Paulo	3	✓	✓
Sul	Curitiba	1	✓	✓

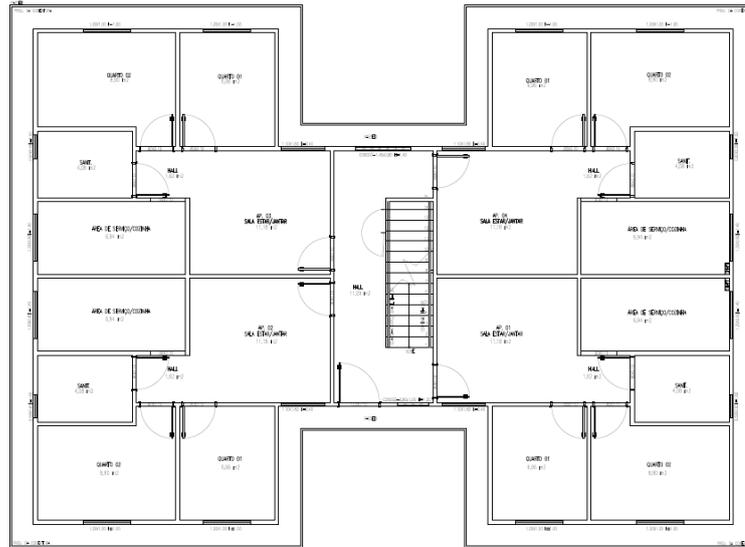
Fonte: A autora.

3.2.2.1.1 Definição de parâmetros

Caracterização da Edificação de Referência e Características da Modelagem da edificação

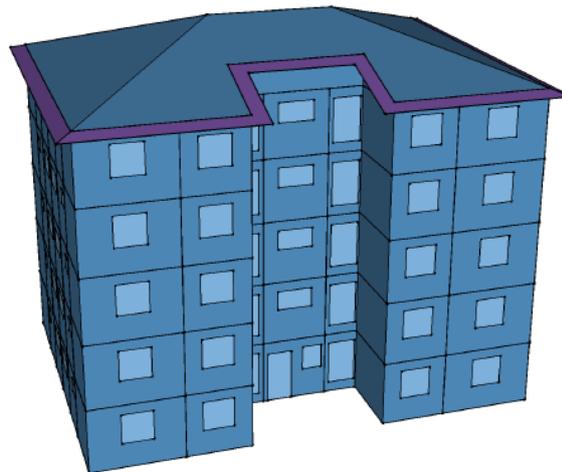
Definiu-se para as referidas simulações a habitação social multifamiliar, em fase de projeto. O edifício é em forma de H, composto por cinco pavimentos, quatro apartamentos por andar e cada unidade habitacional tem área útil de 41,30 m², sendo composta por dois quartos, sala, banheiro, cozinha e área de serviço (figura 18). Foi disponibilizada a planta da edificação digitalizada no software *AutoCad* e a partir desta, foi modelada a maquete virtual (figuras 19 e 20) no software *Google SketchUp 2015*.

Figura 18: Planta baixa pavimento.



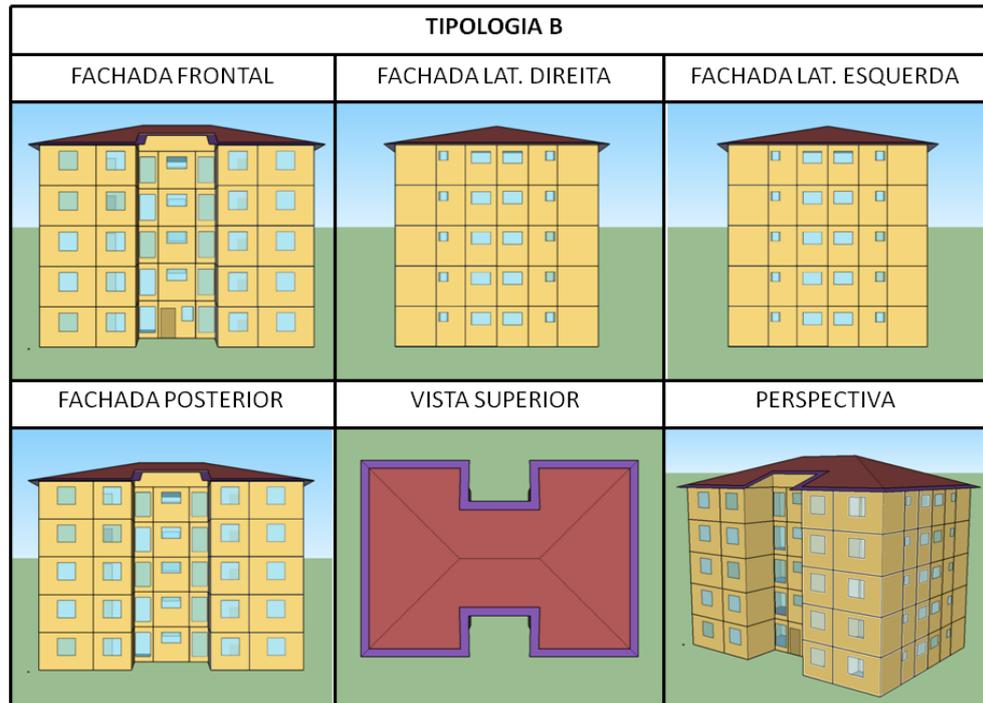
Fonte:A autora.

Figura 19: Maquete virtual.



Fonte:A autora.

Figura 20: Fachadas da edificação.



Fonte: A autora.

A partir da modelagem foi possível obter os dados referentes à geometria da edificação, necessários para a simulação no *EnergyPlus*, além disso, foram definidos os dados de entrada relativos às propriedades termofísicas das vedações, para cada um dos sistemas construtivos em análise, e para os diversos componentes construtivos presentes na edificação.

Como parâmetro de avaliação foi escolhido um cômodo de permanência prolongada (quarto) situado em uma unidade habitacional localizada no último andar (com a cobertura exposta), considerada a situação crítica para edificações multipiso, conforme determina a NBR 15575/1 (ABNT, 2013). Foram simuladas todas as orientações de fachada a nível de estudo, visto que a norma determina ser necessário a avaliação de uma única unidade habitacional da edificação, a mais crítica do ponto de vista térmico (Tabela 14). Foi adotada uma taxa de ventilação do ambiente de 1ren/h e foram consideradas as trocas térmicas entre os recintos.

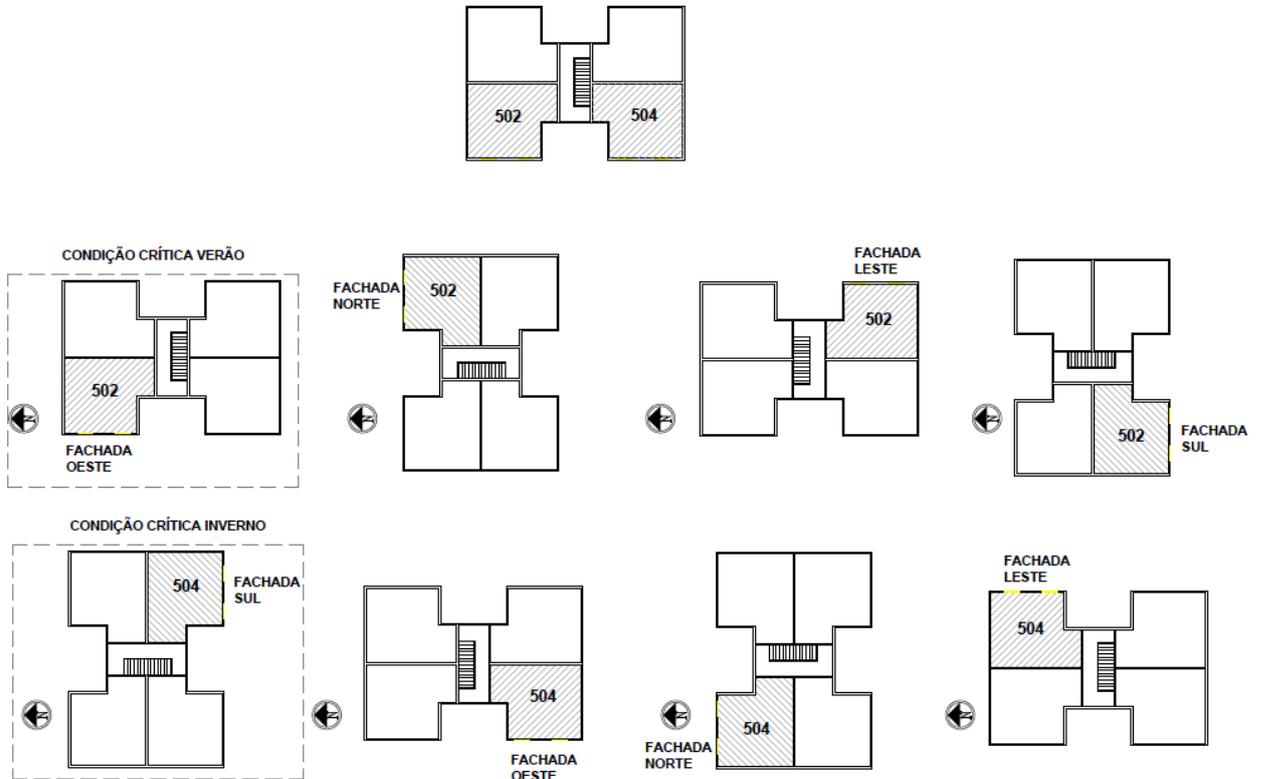
Tabela 14: Unidade habitacional com condições críticas térmicas para as simulações, para cada estação, segundo NBR 15575 (ABNT,2013).

Estação	Orientação – Condição crítica do ponto de vista térmico
Verão	Janela do dormitório voltada para oeste e a outra parede exposta voltada para norte.
Inverno	Janela do dormitório voltada para sul e a outra parede exposta voltada para leste.

Fonte: A autora.

Na figura 21 pode ser vista a configuração utilizada para as simulações:

Figura 21: Unidades habitacionais – orientações.



Fonte: A autora.

Os apartamentos têm pé direito de 2,50m. A edificação dispõe de lajes de concreto de 10 cm de espessura, esquadrias com vidro transparente, sem venezianas, o telhado da cobertura é composto por telha cerâmica clara (baixa absorvância) e barreira radiante de alumínio, o edifício encontra-se em contato com o solo. A fim de parametrizar as simulações para ambos os casos analisados, de forma que as diferenças de temperaturas internas sejam exclusivamente em decorrência do sistema construtivo em análise, foi adotada a espessura de 2,5cm de argamassa de revestimento para ambos os sistemas. As especificações podem ser visualizadas na tabela 15.

Tabela 15: Especificações componentes construtivos.

Componentes Construtivos	Especificações
Vedação Externa e Interna	Alvenaria em Blocos de concreto (14x19x39cm) (Simulações A) / Parede de concreto 10 cm (Simulações B)
Cobertura	Telhas cerâmicas ($\alpha=0,3$) Barreira Radiante de Alumínio
Esquadrias	Vidro transparente/ Sem venezianas

Laje	Concreto espessura 10cm
Piso	Em contato com o solo

Fonte: A autora.

Parâmetros de Avaliação da Edificação Segundo a NBR 15575/2013 – Níveis de Desempenho

Conforme a NBR 15575(ABNT,2013) são estabelecidos três níveis de desempenho térmico: o mínimo (obrigatório a todas as edificações), o intermediário e o superior. Os critérios de avaliação, como já apresentado no referencial teórico desta dissertação, são (ver tabelas 16 e 17):

Tabela 16: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
I	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2 \text{ } ^\circ\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1 \text{ } ^\circ\text{C})$
S	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4 \text{ } ^\circ\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2 \text{ } ^\circ\text{C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1 \text{ } ^\circ\text{C})$

Fonte: Adaptada da NBR 15575(ABNT,2013).

Tabela 17: Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno.

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 5	Zona 6, 7 e 8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3 \text{ } ^\circ\text{C})$	
I	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5 \text{ } ^\circ\text{C})$	Nestas zonas este critério não precisa ser verificado
S	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7 \text{ } ^\circ\text{C})$	

Fonte: Adaptada da NBR 15575(ABNT,2013).

Os resultados desta etapa B da simulação térmica serão apresentados no capítulo 4.

ETAPA 2

3.3. Desenvolvimento de blocos de concreto contendo lã de rocha

3.3.1 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados foram cimento CP II F-40, areia, pó de pedra, brita #9,5mm, água e aditivo plastificante, cujas caracterizações estão apresentadas nas Tabelas 18 e 19, e nas Figuras 22 e 23. Todos eles foram fornecidos pelo fabricante dos blocos, exceto a lã de rocha, foi utilizada a Super-flocos da empresa Thermax, que são flocos amorfos constituídos por fibras em lã de rocha, de diâmetro médio entre 6 e 7 micra, são isentos de resinas e materiais orgânicos, e possui densidade de aproximadamente 60 kg/m³.

Tabela 18: Caracterização física e química do cimento.

Teores (%)		Finura		Blaine
PF	MgO	SO ₃	RI	#200 #325 (cm ² /g)
3,15	2,55	3,03	1,61	0,7 3,2 4619

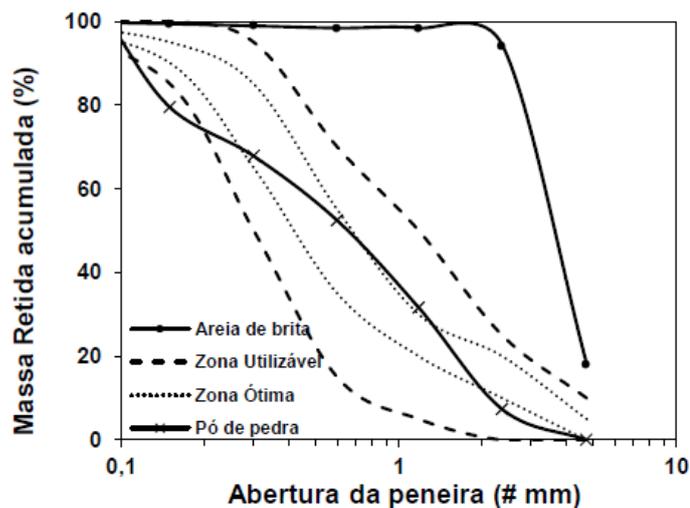
Fonte: Fábrica de blocos.

Tabela 19: Caracterização da areia e brita utilizados nos blocos de concreto.

Características	Norma	Areia	Pó de pedra	Brita
Massa unitária (kg/dm ³)	NBR NM 45	1,37	1,54	1,44
Massa específica (kg/dm ³)	NBR NM 52	1,78	2,79	2,42
Materiais pulverulento (%)	NBR NM 46	1,80	16,40	1,90
D max (# mm)	NBR NM 248	9,5	4,75	9,5
Módulo de Finura	NBR NM 7211	5,08	2,39	5,64
Absorção (%)	NBR NM 53	2,00	-	2,00

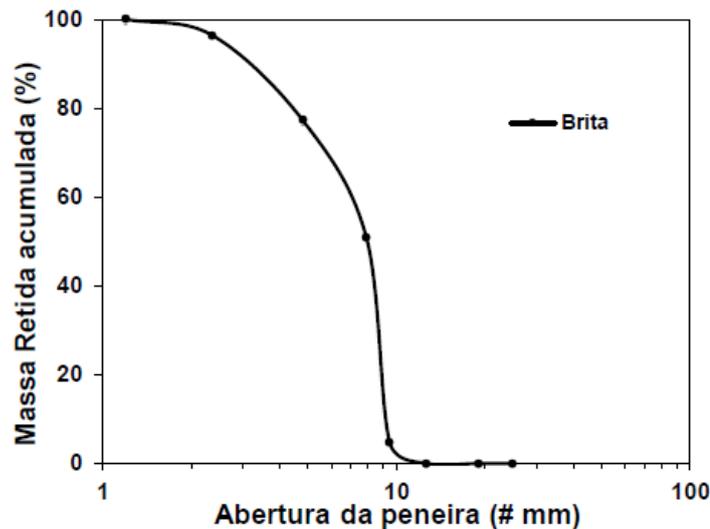
Fonte: Fábrica de blocos (2016).

Figura 22: Curva granulométrica da areia utilizada nos blocos de concreto.



Fonte: Fábrica de Blocos.

Figura 23: Curva granulométrica da brita utilizada nos blocos de concreto.



Fonte: Fábrica de blocos (2016).

3.3.2 Dosagem.

Foi utilizado o mesmo traço utilizado pela fábrica de blocos, cujo método de dosagem utilizado foi o do IPT adaptado para blocos, onde para definição do traço a ser empregado em escala real de produção, o principal requisito a cumprir é o fbk (resistência à compressão característica), no caso da presente pesquisa fbk igual a 3,0Mpa; Para isto inicialmente são ensaiados à compressão blocos com traços experimentais de consumo de cimento variável, em umidade ótima, onde a partir dos resultados são traçadas curvas que relacionam o consumo de cimento à resistência obtida nas referidas condições.

A partir dessas curvas, são determinados os traços para as diversas resistências médias, que serão utilizadas pela fábrica, as quais são calculadas com as respectivas resistências mínimas acrescidas de um valor que depende da variabilidade do processo produtivo, para este caso, o valor adotado foi 1,65 vez o desvio-padrão esperado. Além deste requisito, deve-se garantir uma retração por secagem máxima, além de requisitos de absorção de água máxima, aparência, geometria, etc. conforme estabelecido pela NBR 6136 (ABNT,2014).

Os blocos produzidos pertencem a unidade modular família 39 - bloco B39 de dimensão de 140x190x390mm(L x A x C), sendo o traço utilizado(tabela 20) para a produção de blocos de 3,0MPa. Foram produzidos dois grupos de blocos de concreto: blocos de concreto sem lã de rocha(referência) e blocos de concreto contendo substituição parcial da areia (agregado miúdo) por 10%, 20% e 30% de lã de rocha. Foram mantidos os parâmetros de dosagem, com a relação à água/aglomerante: 0,4.

Tabela 20: Composição unitária dos materiais utilizados para fabricação dos blocos de concreto.

Tipo	Traço unitário						
	Cimento	Lã	Areia	Pó de Pedra	Brita	Aditivo	a/agl.
0 Lã	1	0	1	8,33	2,92	1,16	0,4
10 Lã	1	0,10	0,90	8,33	2,92	1,16	0,4
20 Lã	1	0,20	0,80	8,33	2,92	1,16	0,4
30 Lã	1	0,30	0,70	8,33	2,92	1,16	0,4

Fonte: A autora.

3.3.3 Produção e Cura dos blocos de concreto contendo lã de rocha.

A produção dos blocos de concreto foi realizada em uma fábrica de pré-moldados na região metropolitana de Salvador, com a utilização de uma máquina industrial - marca Piorotti, modelo Blocopac 1300 - que faz a produção dos blocos por processo de vibro prensagem, conforme a Figura 24.

Figura 24: Produção dos blocos.



Fonte: A autora.

A quantidade de lã de rocha devida a cada teor, em conformidade com o traço, foi inicialmente separada e pesada, e logo após foi adicionada manualmente à mistura seca na central de concreto (silo), no início do processo de fabricação dos blocos (figuras 25 e 26).

Figura 25: Adição da lã de rocha durante a produção dos blocos .



Fonte: A autora.

Figura 26: Blocos produzidos.



Fonte: A autora.

Após a fabricação, os blocos foram colocados em cura numa estufa à 28°C por 24h, e após esse período foram postos em cura ao ar por 28 dias, quando foram então submetidos aos ensaios para a avaliação das suas propriedades físicas e mecânicas.

ETAPA 3

3.4. Avaliação dos blocos: Propriedades físicas e mecânicas

Para avaliação dos blocos de concreto produzidos foram realizados os ensaios de: Resistência à compressão, Absorção total de água, Determinação da densidade de massa aparente (ρ) e do índice de vazios (i_v), Determinação da condutividade térmica (λ) dos concretos dos blocos de concreto.

3.4.1. Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado na própria fábrica de blocos, com seis blocos de cada amostra em idade superior a 28 dias, em conformidade com a NBR 12118 (ABNT,2014). A preparação inicial dos blocos para a realização do ensaio consistiu na retificação dos blocos por meio de uma lima de pedra, de forma a obter a superfície devidamente lisa para a aplicação da carga. Conforme informações da fábrica de blocos este processo, que dispensa o capeamento, foi amplamente estudado e atestado pelo setor de qualidade da empresa, e não promove alteração nas resistências mecânicas dos blocos.

Após o lixamento dos blocos, os mesmos foram submetidos à compressão numa prensa hidráulica da marca Emic de 2000KN (Figura 27), a velocidade de carga aplicada foi de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s, conforme NBR 12118 (ABNT,2014).

Figura 27: Prensa hidráulica utilizada na compressão dos blocos de concreto.



Fonte: A autora.

A resistência à compressão foi calculada dividindo a carga máxima obtida no ensaio pela área bruta do bloco, e o cálculo do f_{bk} , est obedeceu aos dois critérios estabelecidos pela NBR 6136 (ABNT,2014) para quando o valor do desvio-padrão da fábrica não é conhecido:

a) O valor da resistência característica à compressão (f_{bk}) dos blocos de concreto, referida à área bruta, deve ser estimado a partir da equação (15):

$$f_{bk, est} = 2x \left[\frac{fb(1) + fb(2) + \dots + fb(i-1)}{i-1} \right] - fb_i$$

Sendo:

$i = n/2$, se n for par;

$i = (n-1)/2$, se n for ímpar;

Onde:

fbk_{est} é a resistência característica estimada da amostra, expressa em MPa (megapascals);

$fb(1), fb(2), \dots, fb(i)$ são os valores de resistência à compressão individual dos corpos de prova da amostra, ordenados em ordem crescente;

n é igual à quantidade de blocos da amostra;

b) Critério de ψ

Para determinação da resistência característica da amostra, fbk , o valor do fbk deve ser igual a fbk_{est} , não sendo admitido valor de fbk inferior a $\psi \times fb(1)$ ou seja, se o resultado for inferior, adota-se para fbk o valor $\psi \times fb(1)$.

Onde:

$fb(1)$ é o menor valor individual da amostra;

ψ é dado em função da quantidade de blocos ensaiados, seus valores estão indicados na tabela 21.

Tabela 21: Valores de ψ em função da quantidade de blocos.

Qtde.	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18
ψ	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,04

Fonte: NBR 6136(ABNT,2014).

Os resultados serão apresentados no capítulo 4.

3.4.2. Ensaio de absorção total de água nos blocos

O ensaio de absorção foi realizado no Centro de Tecnologia de Argamassa (CETA) da UFBA, obedecendo aos critérios da NBR 12118 (ABNT,2010). Onde inicialmente foi anotada a massa seca ao ar (m_3) dos blocos, logo após foram colocados em estufa (Figura 28a) em temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, por um período mínimo de 24 h, medindo a sua massa a cada 2h, até que a sua variação de massa não fosse superior a 0,5% da massa anterior, sendo então considerada como a massa seca (m_1). Posteriormente os blocos foram resfriados à temperatura ambiente e para provocar saturação, foram imersos em água à temperatura de $23 \pm 5^\circ\text{C}$

durante 24h (Figura 28b). O cálculo da absorção foi feito por meio da equação (16). Os ensaios foram feitos com três blocos de cada percentagem na idade de 28 dias.

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (16)$$

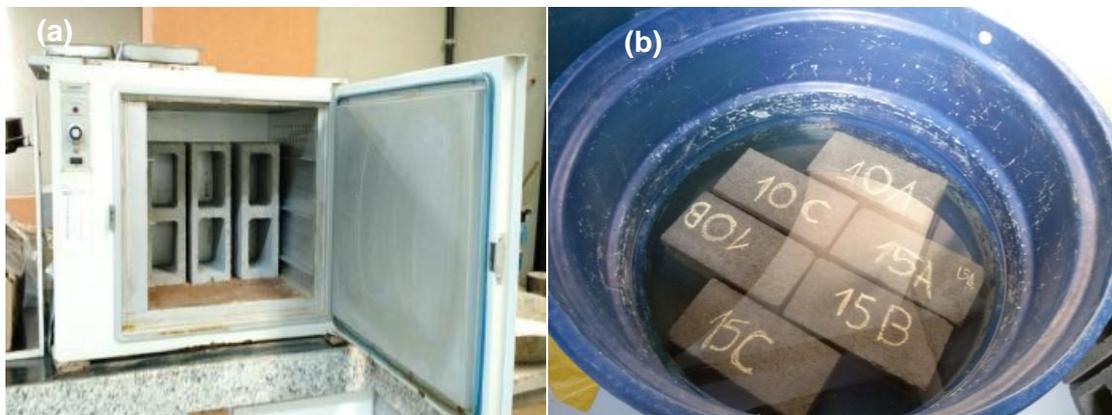
Onde:

a = absorção total (%);

m1 = massa do corpo de prova seco em estufa (g);

m2 = massa do corpo de prova saturado (g);

Figura 28: Ensaio de absorção total de água dos blocos: (a) Secagem dos blocos; (b) Imersão em água.



Fonte: A autora.

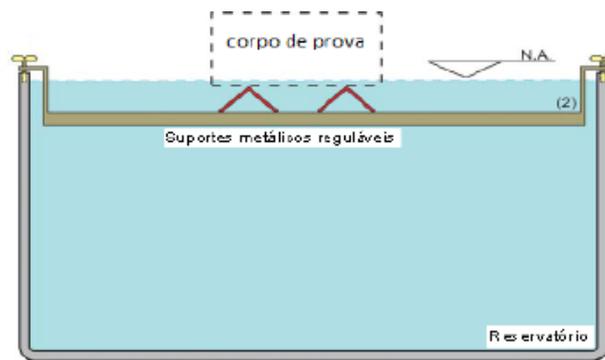
3.4.3. Índice de Absorção Inicial de Água (AAI)

O índice de absorção inicial de água é um ensaio especial preconizado pela NBR 15270-3(ABNT,2009) para blocos cerâmicos, na presente pesquisa o mesmo foi aplicado para os blocos de concreto. O seu fundamento está na sucção de água que o substrato promove nas argamassas de assentamento e revestimento, promovendo influência na aderência substrato/argamassa. Este ensaio, segundo Silva (2015), estima a retirada de água da argamassa e a aderência do conjunto argamassa-bloco, indicando se será necessário o prévio umedecimento do bloco antes do levante das paredes. A NBR 15270-3(ABNT,2009) estabelece que o limite de absorção de água inicial para blocos cerâmicos deve ser atingir valor máximo de (30g/193,55cm²)/min, e caso esse valor seja superior ao limite normativo, os blocos devem ser devidamente umedecidos antes da utilização.

Não há limites normativos para blocos de concreto, sendo necessária uma definição para esta modalidade de bloco devido a sua grande utilização para alvenaria de vedação e estruturais. Uma elevada absorção de água pode promover a retirada de água necessária para a

hidratação do cimento e assim diminuir a resistência de aderência entre revestimento e base. Ao mesmo tempo, é necessária uma absorção mínima que favoreça a entrada de produtos de hidratação do cimento no bloco, favorecendo a sua ancoragem mecânica e aumento da resistência de aderência (Silva, 2015).

Para a realização do ensaio de absorção inicial de água foram utilizados os mesmos blocos ensaiados para absorção total de água, três blocos para cada percentagem (0Lã, 10Lã, 20Lã e 30Lã) na idade de 28 dias, sendo realizado no Centro de Tecnologia de Argamassas (CETA) da UFBA. Foram obedecidas as orientações da NBR 15270-3(ABNT,2009), para a secagem dos blocos e seguiram-se os mesmos procedimentos para o ensaio de absorção total. Após a medida das massas secas, os blocos foram colocados em um recipiente com hastes metálicas em que foi mantido o nível de água constante de 3 ± 2 mm conforme Figura 29, e deixados por 60 ± 1 s, onde se mediu a massa úmida e calculou-se o Índice de Absorção Inicial por meio da equação (17). O ensaio foi realizado em apenas uma superfície do bloco. Figura 29: Esquema do ensaio de AAI.



Fonte: NBR 15270-3 (2009).

$$AAI = 193,55 \times \frac{\Delta p}{\text{Área}} \quad (17)$$

Onde:

AAI = índice de absorção d'água inicial (sucção) da face ensaiada dos blocos, expresso em (g/193,55cm²)/min;

Δp = variação de massa obtida no ensaio (g);

Área = área bruta ou área líquida dos blocos ensaiados (cm²).

3.4.4. Determinação da densidade de massa aparente e índice de vazios

O ensaio para determinação do índice de vazios e densidade de massa aparente dos concretos dos blocos produzidos pela pesquisa foi realizado no Centro de Tecnologia de Argamassa (CETA) da UFBA, obedecendo aos critérios da NBR 9778(ABNT, 2006). As

amostras utilizadas para o ensaio – três para cada traço- foram retiradas dos blocos de concreto mediante corte à seco (Figura 30).

Figura 30: Parte das amostras utilizadas no ensaio de densidade.



Fonte: A autora.

Neste ensaio, inicialmente foi anotada a massa seca ao ar das amostras, logo após foram colocados em estufa em temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, por um período mínimo de 24 h, medindo a sua massa, até que a sua variação de massa não fosse superior a 0,5% da massa anterior, sendo então considerada como a massa seca (M_s). Completada a secagem em estufa e determinada a massa, as amostras foram imersas em água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 24h (Figura 31). Decorridas 24h, após saturação, as superfícies das amostras foram enxutas com toalha absorvente, e logo após, foram pesadas em balança com resolução de 0,1g, sendo determinada a massa da amostra saturada (M_{sat}); Para determinação da massa da amostra imersa em água (M_i) foi utilizada balança hidrostática com resolução de 0,1g. (Fig.31).

Figura 31: Ensaio densidade: (a) Pesagem da amostra – massa seca ao ar (b) Amostras imersas amostras (c) Pesagem da amostra – massa da amostra imersa em água.



Fonte: A autora.

O cálculo da massa específica da amostra seca (kg/m^3) – densidade de massa aparente(ρ) - foi feito por meio da equação (18), e o índice de vazios (iv) - teor de ar incorporado - através da equação (19), de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2006):

$$\rho = \frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \quad (18)$$

$$iv(\%) = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \times 100 \quad (19)$$

Onde:

M_i : massa da amostra, imersa em água.

M_{sat} : massa da amostra saturada.

M_s : massa do corpo-de-prova seco em estufa.

Os resultados serão apresentados no capítulo 4.

3.4.5 Ensaio para determinação da condutividade térmica

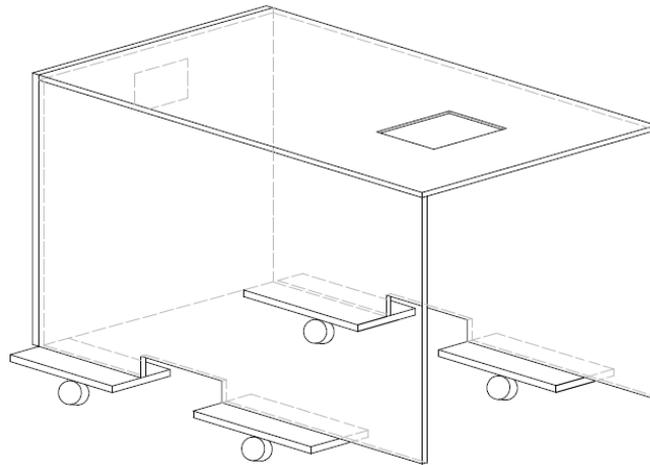
3.4.5.1 Projeto e execução de câmara térmica

Para realização do ensaio para determinação da condutividade térmica dos materiais constituintes dos blocos de concreto produzidos, bem como para realização do ensaio do fluxo térmico nos painéis de alvenaria(etapa 4), foi projetada (projeto em anexo) e fabricada uma câmara térmica de mdf (*Medium Density Fiberboard*) (Figura 32a e 32b), de dimensão

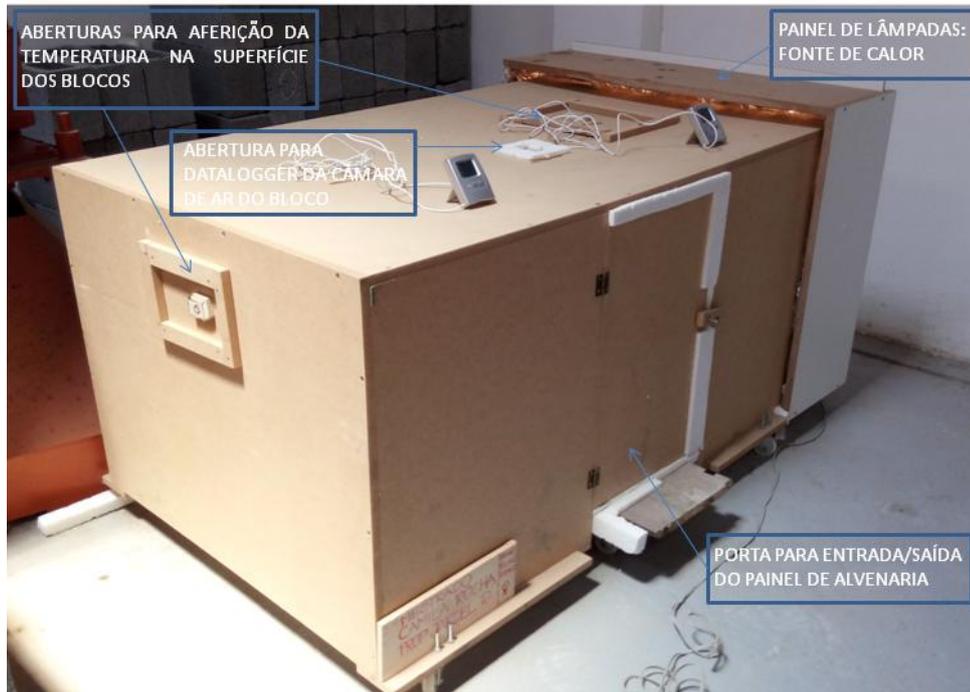
1,34x0,67x0,85m, a qual foi revestida internamente por placas de poliestireno de espessura 3cm (Fig. 32c), de forma a otimizar a condição para torna-la hermeticamente fechada.

A câmara térmica possui em sua face frontal uma porta para entrada/saída do painel de alvenaria, consta de duas outras aberturas - uma na parte superior e outra na lateral - que permitem que durante a realização do ensaio de condutividade térmica sejam aferidas, através do termômetro de superfície, as temperaturas das faces do painel de alvenaria. A câmara térmica possui ainda pequena abertura na face superior para permitir a introdução do datalogger no interior da câmara de ar do bloco de concreto durante o ensaio de fluxo térmico.

Figura 32: Câmara térmica: (a) Projeto perspectiva; (b) Câmara térmica; (c) Revestida internamente;



(b)



(c)



Fonte: A autora.

Para facilitar a locomoção dos painéis de alvenaria, bem como a sua introdução e retirada do interior da câmara térmica, foi executado um carrinho (placa de mdf + rodízios) como pode ser visto na Figura 33.

Figura 33: Fonte de calor.



Fonte: A autora.

Fonte de calor

Para composição da fonte de calor da câmara térmica foi projetado e executado um painel de lâmpadas (Figura 34), cuja estrutura é em mdf (*Medium Density Fiberboard*) e possui capacidade para a instalação e acionamento de vinte e quatro lâmpadas. Este painel encaixa-se na lateral direita da câmara térmica.

Figura 34: Carrinho para deslocamento das alvenarias.



Fonte: A autora.

Para a realização dos ensaios que utilizaram a câmara térmica, foram utilizadas duas lâmpadas incandescentes de 100W, totalizando uma potência de 200W. A razão para utilização de duas lâmpadas deve-se a premissa de que, no setor no qual está presente a fonte de calor, e que representa o meio externo, a temperatura do ar máxima a ser atingida deveria ser compatível, não muito divergente, com a temperatura do ar máxima registrada em

Salvador (cidade localizada na ZB-8) de forma que a condição simulada no ensaio fosse o mais próximo possível da realidade.

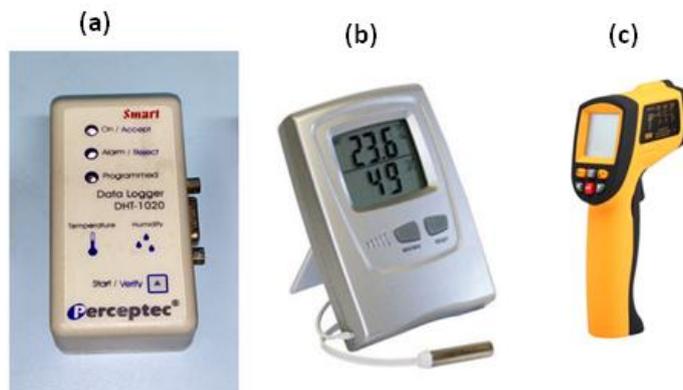
Segundo dados do INMET (2017), a temperatura do ar máxima registrada no verão 2016/2017 em Salvador foi de 32°C, quando utilizadas duas lâmpadas a faixa de temperatura do ar máxima obtida no setor externo encontra-se entre 42°C e 48°C. Tal aparato situa-se a uma distância de 0,58m da face do painel de alvenaria que ficará exposta à fonte de calor.

Aferição de temperatura

Para aferição da temperatura foram utilizados dataloggers, termo-higrômetros e termômetro de superfície, conforme podem ser visto através da Figura 35. As características técnicas destes equipamentos são descritas a seguir:

- **Dataloggers:** Para registro da temperatura do ar dos setores internos da câmara térmica foram utilizados três dataloggers da Perceptec- modelo DHT 1020 – de dimensão 83x43x28mm, que operam com a capacidade de registrar a temperatura do ar, onde estão locados, na faixa entre -40°C a +85°C, com precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Têm capacidade de memória de armazenamento de até 16000 dados, operando com o registro de temperatura de hora em hora.
- **Termo-higrômetros:** Para registro da temperatura do ar do ambiente e dos setores internos da câmara térmica foram utilizados termo-higrômetros digitais da Inconterm - modelo 7666.02, que operam através de dois canais, com a capacidade de registrar temperaturas - para temperatura interna - na faixa de 0°C à 50°C e para temperatura externa -50°C. Os termo-higromêtros vieram com certificado de calibração.
- **Termômetro infravermelho:** Para registro da temperatura da superfície dos blocos foi utilizado termômetro de superfície da Instrutemp - modelo ITTI 380, modelo profissional de alta precisão, com escala de medição de -50°C a 380°C.

Figura 35: Equipamentos utilizados para aferição de temperaturas: (a) datalogger; (b) termo-higrômetro; (c) termômetro de superfície;



Fonte: A autora.

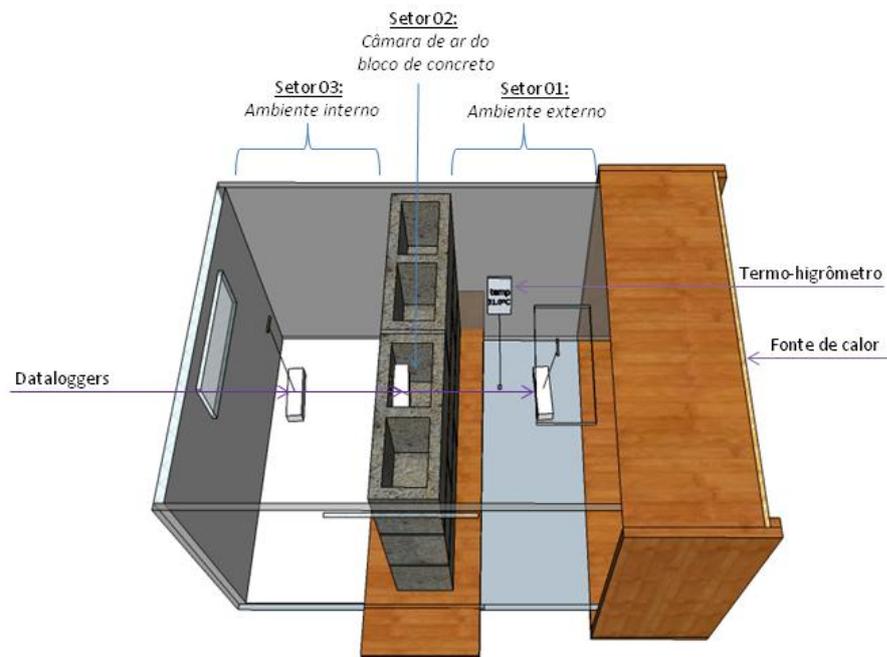
Calibração dos dataloggers e da câmara térmica.

A calibração dos dataloggers e da câmara térmica foi realizada simultaneamente: quanto a calibração dos dataloggers foi determinado por parâmetro os registros de temperatura do ar dos termo-higrômetros que estavam devidamente calibrados, além da concordância entre os três dataloggers; quanto a calibração da câmara térmica, a mesma foi realizada de acordo com os ensaios que adiante seriam realizados, então foi inserido o painel de alvenaria, onde o mesmo dividiu o interior da câmara térmica em três setores:

- Setor 01: Ambiente externo; Cujo objetivo é que, no ensaio de fluxo térmico, ao ser acionada a fonte de calor, seja simulada a situação de exposição de paredes externas(fachadas) de uma edificação que recebem cargas de radiação solar.
- Setor 02: Interior da câmara de ar do bloco de concreto;
- Setor 03: Ambiente interno; Simula o interior de um recinto cuja vedação refere-se a fachada exposta a fonte de calor;

Em cada setor foi posicionado um datalogger no centro do ambiente, e no setor 1 foi locado um termo-higrômetro conforme pode ser visto no esquemático da Figura 36.

Figura 36: Setores da câmara térmica.



Fonte: A autora.

Dessa forma, para calibração, o painel de lâmpadas permaneceu desligado, e durante 10 horas foram feitos registros à temperatura ambiente, simultaneamente, entre um termo-higrômetro e os dataloggers, de forma a comparar seus registros e verificar a compatibilidade entre eles. Estes mesmos registros serviram para certificar que a câmara estava hermeticamente fechada, ou seja, sem troca de calor com o ambiente externo. Para isto, foram estabelecidos como parâmetros:

- Não haver aumento, nem redução da temperatura do ar nos três setores, registrada pelos dataloggers e termo-higrômetro, ou seja, permanecer constante durante todo o tempo de ensaio;
- O registro de temperatura do ar nos três dataloggers e do termo-higrômetro ser igual, ou diferir o mínimo possível, entre os quatro instrumentos, durante todo o tempo do ensaio;

Tais registros podem ser conferidos através da tabela 22 a seguir:

Tabela 22: Calibração dataloggers, câmara térmica e termo-higrômetro.

Tempo (h)		Temperatura (°C)		
Hora	Termo-hig.	Datalogger 1	Datalogger 2	Datalogger 3
1	29,4	29,6	29,8	29,6
2	29,6	30,0	30,0	29,8
3	29,6	30,4	30,4	30,0
4	29,8	30,5	30,6	30,3
5	29,8	30,5	30,6	30,5

6	29,8	30,2	30,4	30,6
7	29,7	29,8	30,1	30,5
8	29,9	29,4	29,8	30,3
9	29,9	29,8	29,9	30,1
10	29,8	29,6	29,7	29,8

Fonte: A autora.

Ao analisar os registros, constatou-se que ambos estavam operando de maneira adequada e compatível, onde a diferença entre os registros, ao focar os dados de um mesmo datalogger e termo-higrômetro, durante as 10 horas, ficou numa faixa entre 0,1°C a 1,1°C; e ao se comparar os registros entre os três dataloggers e termo-higrômetro, esta faixa de diferença fica entre 0,1°C a 0,9°C. Tais faixas podem ser consideradas, dentro dos limites de regularidade, sem acarretar desconformidades para os futuros resultados.

3.4.5.2 Determinação da Condutividade Térmica do concreto dos blocos(λ)

3.4.5.2.1 Metodologia

Segundo Kumar e Chandra (2013) a condutividade térmica é a propriedade física do material que denota a facilidade com que determinado material pode realizar a transmissão da energia térmica pelo movimento molecular. A condutividade térmica de um material depende da composição química da substância ou substâncias de que é composta; em todos os sólidos, a energia pode ser transferida por meio de vibrações elásticas da rede que se deslocam através do cristal na forma de ondas.

Visto que a transferência de calor por condução é governada pela Lei de Fourier, a qual relaciona o fluxo de calor que atravessa um corpo com a diferença de temperatura entre as suas faces (Equação 20), a mesma foi utilizada com o objetivo de determinar o coeficiente de condutividade do material (λ) da parede plana (painel de alvenaria). Levando também em consideração o processo de convecção, que ocorre quando o ar aquecido entra em contato com a superfície do material, alterando a sua temperatura e, portanto proporcionando a troca de calor por condução entre as superfícies da alvenaria, pelo fato da temperatura da superfície oposta está em temperatura inferior. A taxa de transferência de calor por convecção pode ser mensurada pela Equação (21).

A metodologia utilizada foi adaptada do método utilizado por Oliveira et al. (2015) para determinação da condutividade térmica de compósitos constituídos através da fibra de coco, e do método da “caixa quente protegida” (FARHAT, 1988) baseado na norma ASTM C-177.

Equações utilizadas para determinação do coeficiente de condutividade térmica:

$$q = \frac{\lambda \cdot A}{L} (T_{si} - T_{se}) \quad (20)$$

$$q_c = h_e \cdot A (T_{se} - T_{ae}) \quad (21)$$

Sendo $h_e = \frac{1}{R_{se}}$, onde R_{se} de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005) para direção do fluxo de calor horizontal tem valor igual a 0,04 (m².K)/W. Então: $h_e = \frac{1}{0,04}$; $h_e = 25$.

Onde:

- q : Taxa de transferência de calor por condução, em [W]
- q_c : Taxa de transferência de calor por convecção, em [W]
- λ : coeficiente de condutividade térmica, em [W/(m.°C)]
- h_e : Coeficiente de transferência de calor por convecção da superfície exterior, em [W/(m².°C)]
- A : Área da parede normal à direção de transferência de calor, em [m²]
- L : Espessura da amostra, em [m]
- R_{se} : Resistência térmica superficial externa, em [(m².°C)/W]

E os dados que serão determinados através do ensaio:

- T_{si} : Temperatura da superfície interna da amostra, em [°C].
- T_{se} : Temperatura da superfície externa da amostra, em [°C].
- T_{ae} : Temperatura do ar do ambiente externo, em [°C].

Portanto, através das aferições da temperatura, da entrada de energia (calor) para a amostra, combinados com dados da área da seção transversal, e espessura da amostra, torna-se viável o cálculo da condutividade térmica do concreto dos blocos com base na equação de Fourier, bem como através do cálculo da taxa de transferência de calor por convecção.

Para determinação aferição das temperaturas internas e externas da superfície da amostra, além da temperatura do ar próximo a superfície externa, foi criado um sistema de obtenção destes dados, o qual é descrito a seguir.

Sistema de obtenção de dados

O desenvolvimento deste método de medição da condutividade térmica neste trabalho foi pensado de maneira estratégica, de acordo com os recursos disponíveis para tal, de forma a possibilitar a mensuração do valor da condutividade térmica para os quatro diferentes concretos dos blocos em análise nesta pesquisa. Desta forma, foi elaborado um sistema de obtenção de dados utilizando a câmara térmica produzida pela pesquisa, o qual é explicado a seguir.

O sistema montado para a realização dos ensaios constituiu-se dos seguintes componentes:

- Câmara térmica
- Datalogger
- Termômetro infravermelho
- Painel de alvenaria (amostra)

Amostra

Foram produzidos quatro painéis com os blocos produzidos pela pesquisa (0Lã, 5Lã, 10Lã e 15Lã), os quais foram seccionados ao meio no sentido longitudinal, de forma a possibilitar a aferição, através de termômetro de superfície, da temperatura superficial do material na face exposta a fonte de calor, que representa a temperatura superficial interna e na face oposta que representa a temperatura superficial externa.

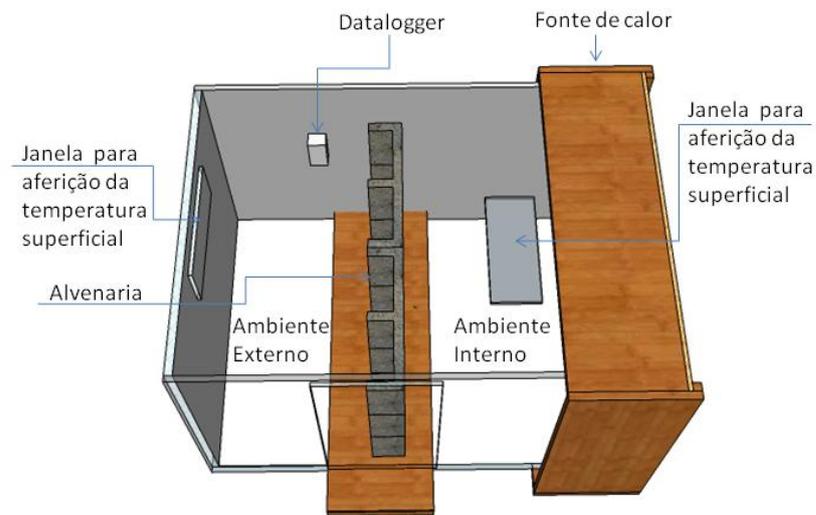
Figura 37: Amostra para ensaio condutividade térmica em câmara térmica: **(a)** Face interna; **(b)** Face externa;



Fonte: A autora.

Para cada amostra, foi realizado um ensaio. A amostra (painel) foi introduzida na câmara térmica, de modo que, devido a esta configuração espacial, o interior da câmara térmica ficou dividido em dois ambientes (setores): um em que está localizada a fonte de calor, que refere-se ao ambiente interno, e o oposto, o qual refere-se ao ambiente externo (Figura 38).

Figura 38: Sistema de obtenção de dados na câmara térmica.



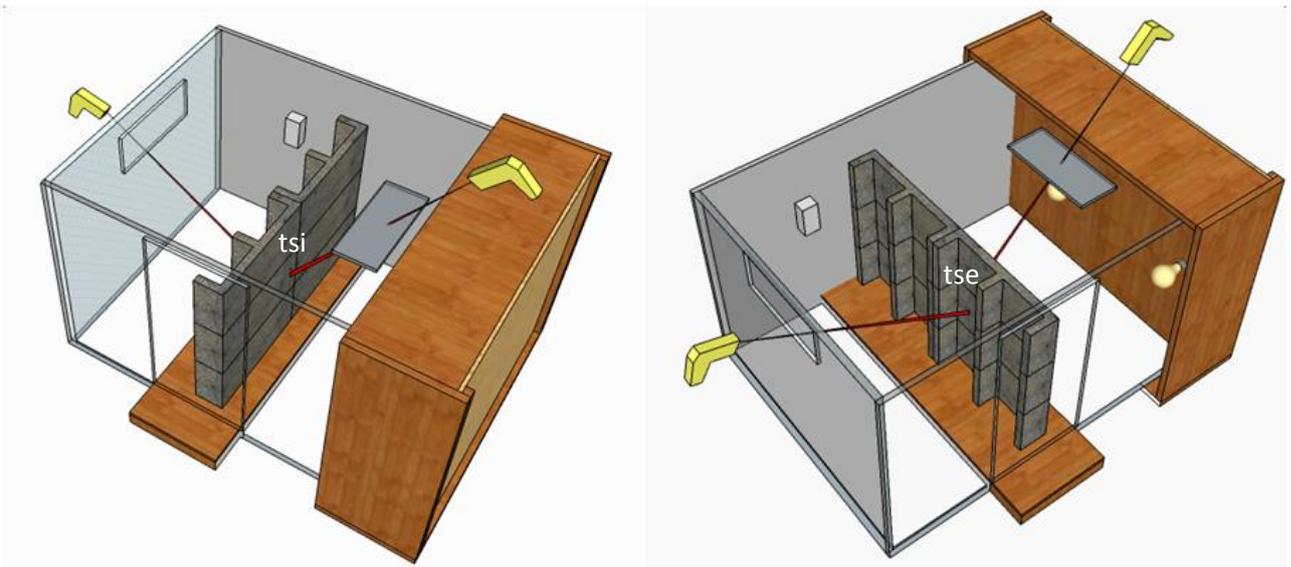
Fonte: Autora (2017).

A fonte de calor foi constituída por duas lâmpadas incandescentes de 100W acionadas, para aferição da temperatura nas superfícies dos blocos foi utilizado o termômetro infravermelho, e para registro da temperatura do ar, referente ao ambiente externo, foi utilizado o datalogger (descrição dos instrumentos anteriormente referidas).

O ensaio

O ensaio foi realizado durante três horas, com o painel de lâmpadas acionado durante todo o período, onde a cada dez minutos eram aferidas as temperaturas superficiais da face do bloco exposta à fonte de calor e da face oposta a mesma. A temperatura do ar, no setor referente ao ambiente externo, era registrada a cada hora através do datalogger, como mostra o modelo esquemático da coleta dos dados na figura 39.

Figura 39: Ensaio Condutividade – aferição de temperatura superficial.



Fonte: Autora (2017).

A partir dos dados coletados, foram elaboradas planilhas de cálculo do coeficiente de condutividade térmica, que serão apresentadas em resultados e discussões (capítulo 4).

ETAPA 4

3.5 Avaliação das alvenarias em blocos de concreto: desempenho térmico

3.5.1 Cálculo das Propriedades térmicas

Foram realizados os cálculos das propriedades térmicas - através dos procedimentos de cálculo estabelecidos pela NBR 15220-2(ABNT,2005): Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações - das alvenarias compostas pelos blocos de concreto produzidos pela pesquisa, não rebocadas e rebocadas, bem como considerando a superfície externa pintada com a cor branca. Os procedimentos de cálculos utilizados foram anteriormente apresentados na revisão bibliográfica.

Para tornar possível a realização destes cálculos, foi necessária a determinação de duas propriedades físicas dos concretos produzidos: a condutividade térmica (λ) e a densidade de massa aparente (ρ), as quais foram obtidas através dos ensaios anteriormente explanados. As propriedades térmicas calculadas foram: resistência (R), transmitância (U) e capacidade térmica(CT) , atraso térmico(ω) e fator de calor solar (FS).

3.5.2 Ensaio de Fluxo Térmico das alvenarias

Conforme elucidada Dornelles e Roriz (2004), uma das estratégias arquitetônicas e construtivas capaz de reduzir o consumo de energia e oferecer condições de satisfação térmica ao usuário, é a utilização da inércia térmica, caracterizada como a capacidade que tem uma edificação de armazenar calor e liberá-lo algum tempo depois. A inércia térmica provoca dois importantes efeitos sobre os fluxos de calor entre o ambiente interno das edificações e o meio exterior. O primeiro, denominado Amortecimento, atua como redutor das oscilações das temperaturas internas. O segundo é o Atraso Térmico, ou seja, a defasagem das mesmas em relação às temperaturas externas.

Ainda segundo Frota e Schiffer (2001), os fenômenos de atraso e amortecimento térmico, que juntos compõem a inércia térmica, são bastante significativos para o comportamento térmico do edifício.

Portanto o ensaio de fluxo térmico, tendo como aparato a câmara térmica, foi elaborado para possibilitar a análise do comportamento térmico das alvenarias em blocos de concreto mediante à transferência de calor, tornando possível obter duas significativas variáveis: atraso (ω) e amortecimento térmico (μ). Através da análise comparativa dos resultados obtidos foi possível investigar a influência da lã de rocha incorporada ao bloco de concreto, bem como analisar a influência da argamassa de revestimento (reboco) e da pintura externa.

3.5.2.1 Determinação do amortecimento (μ) e atraso térmico (ω)

Conforme Roriz (1996), a relação entre as amplitudes térmicas interna (A_i) e externa (A_e) é chamada amortecimento (μ), calculada através da equação (22):

$$\mu = 1 - \frac{A_i}{A_e} \quad (22)$$

A amplitude térmica é calculada através da equação (23):

$$A = T_{max} - T_{min} \quad (23)$$

Além disso, quando a temperatura externa é máxima, a interna só atingirá seu valor máximo algum tempo depois. Este atraso na transmissão da onda de calor é denominado atraso térmico (ω), o qual será encontrado diretamente através do gráfico.

Os resultados serão apresentados através de gráficos, onde será possível analisar através da variação das temperaturas internas em relação às externas, ao longo das 24h de ensaio, a influência nos diferentes blocos da incorporação da lã de rocha, da argamassa de

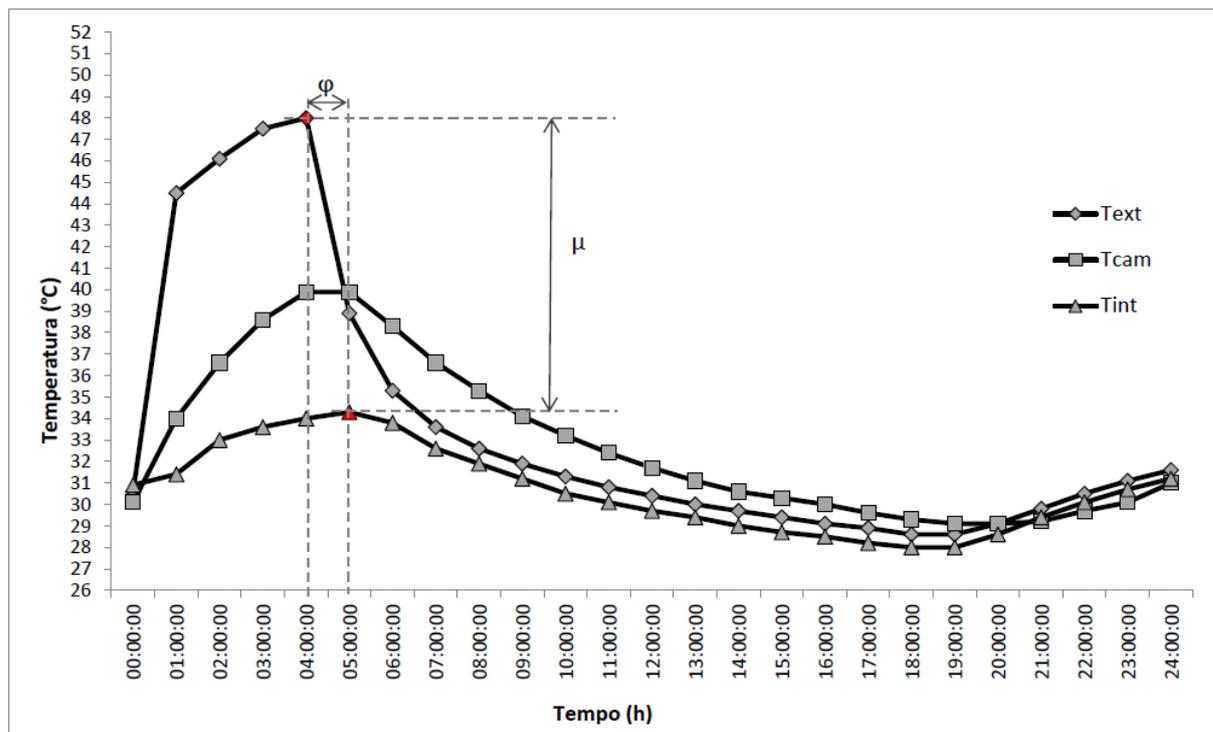
revestimento e da pintura. A figura 40 apresenta o modelo de gráfico obtido através do ensaio de fluxo térmico das alvenarias não rebocadas e rebocadas, onde podem ser visualizadas:

- As variações das temperaturas internas (T_{int});
- As variações das temperaturas externas (T_{ext});
- As variações das temperaturas no interior da câmara de ar (T_{cam})**;
- O amortecimento térmico (μ);
- O atraso térmico (ϕ);

*A sigla “**reb**” foi utilizada para identificar as alvenarias rebocadas.

**As variações das temperaturas no interior da câmara de ar serão apresentadas apenas para apreciação do comportamento do fluxo térmico neste setor, o que amplifica a análise do comportamento térmico das alvenarias, pois é possível investigar também a contribuição da câmara de ar no desempenho térmico do componente (bloco).

Figura 40: Modelo de gráfico obtido através do ensaio de fluxo térmico das alvenarias rebocadas e não rebocadas.



Fonte: A autora.

3.5.2.2 Metodologia do ensaio

Amostras - Painéis de alvenaria

Para análise comparativa do comportamento térmico entre a alvenaria composta pelos blocos de concreto de referência e as alvenarias compostas pelos blocos de concretos em que

foi incorporada a lã de rocha, foram construídos quatro painéis de alvenaria, um para cada tipo de bloco:

P1- Blocos de concreto de referência 0% Lã;

P2- Blocos de concreto 10% Lã;

P3- Blocos de concreto 20% Lã;

P4- Blocos de concreto 30% Lã;

Cada painel tem dimensão de 0,14x0,80x0,61m, é composto por cinco blocos (0,14x0,39x0,19m) e dois meio-blocos (0,14x0,19x0,19m), totalizando uma área de aproximadamente 0,50m² (ver Figura 41). Para o assentamento dos blocos foi utilizada argamassa industrializada própria para assentamento de blocos de concreto, com espessura de 2 cm.

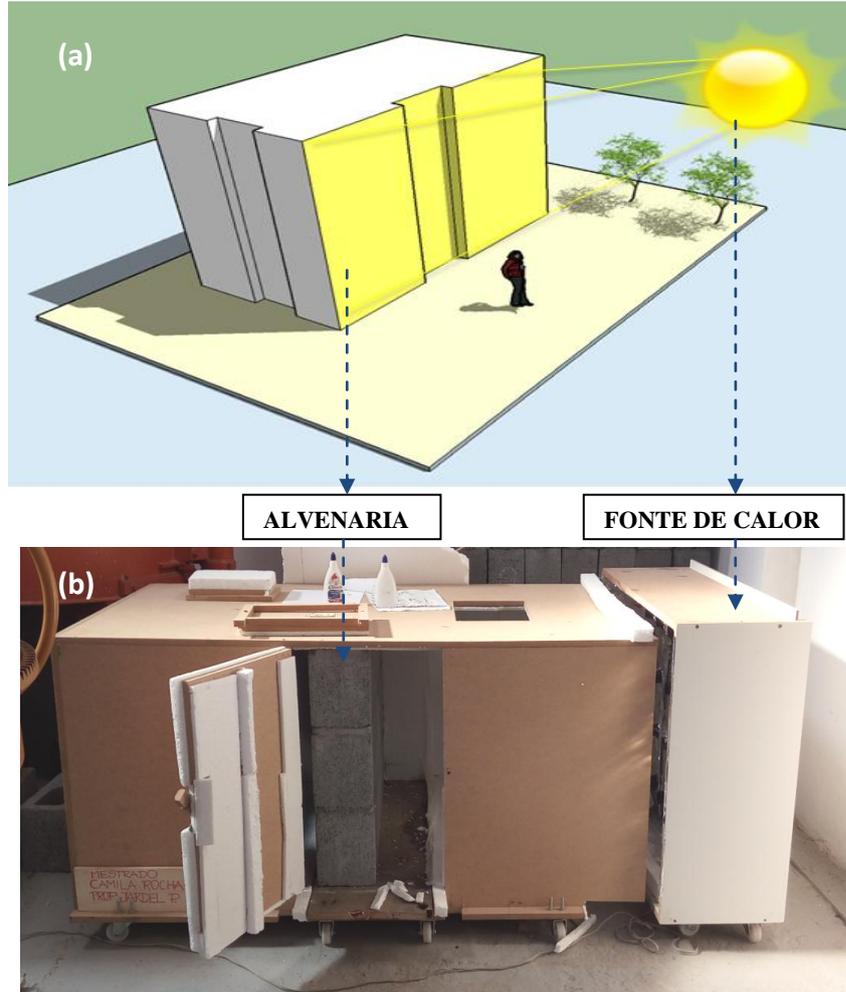
Figura 41: Painéis de alvenaria.



Fonte: A autora.

A condição, a qual, os painéis de alvenarias foram submetidos, simula a situação de exposição da envoltória de uma edificação que recebe cargas diretas de radiação solar; Através da figura 42a e 42b pode-se visualizar a condição objetivada, a figura 43 mostra a câmara térmica fechada durante a realização do ensaio:

Figura 42: (a) Esquemático de condição simulada para ensaio fluxo térmico; (b) Câmara térmica;



Fonte: A autora.

Figura 43: Câmara térmica durante a realização do ensaio.



Fonte: A autora.

Sistema de obtenção de dados

Para a realização dos ensaios foi utilizada a câmara térmica, hermeticamente fechada, com os instrumentos de aferição de temperatura (dataloggers) devidamente calibrados. O método, pelo qual, foi realizado o ensaio, destinou-se a obtenção da temperatura do ar nos setores da câmara.

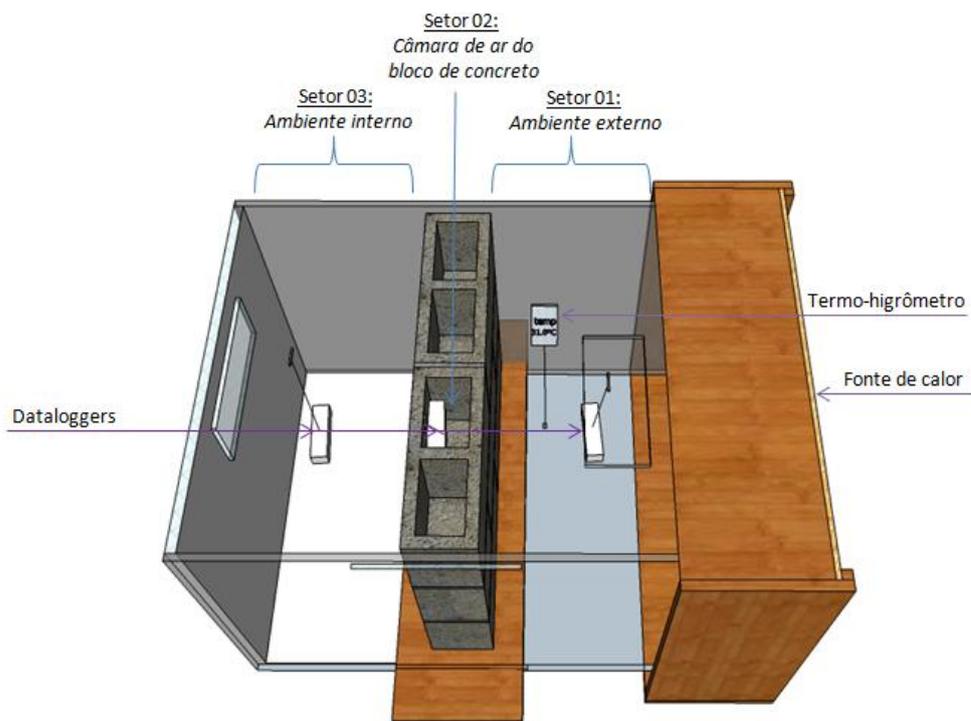
O painel de alvenaria foi inserido no interior da câmara térmica, de forma a dividi-lo em dois setores: setor exposto à fonte de calor - ambiente externo e o setor oposto, que corresponde ao ambiente interno.

Nestes dois setores, para aferição da temperatura do ar, com registros a cada hora, foram situados dataloggers no centro do ambiente. Porém, para melhor investigação do comportamento da alvenaria mediante a transferência de calor, foi constatado que seria de grande importância investigar o fluxo térmico no interior do bloco de concreto, o que poderia ser alcançado através da locação de um datalogger dentro da câmara de ar do bloco, para aferição da temperatura do ar, o qual foi feito.

Desta forma, conforme pode ser visto através das Figuras 44 e 45, as temperaturas do ar foram registradas em três setores:

- Setor 01: Ambiente externo;
- Setor 02: Interior da câmara de ar do bloco de concreto;
- Setor 03: Ambiente interno;

Figura 44: Componentes – Setores da Câmara térmica



Fonte: A autora.

Figura 45: Vista frontal e Perspectiva da Câmara térmica.



Fonte: A autora.

Para cada painel de alvenaria, foi realizado um ensaio de fluxo térmico, com registros de temperatura do ar durante 24h, onde a fonte de calor permaneceu ligada ao longo das primeiras 4,5 horas, período em que, em ensaios anteriormente realizados, verificou-se que a temperatura do ar atingia o seu valor máximo. A fonte de calor foi composta por duas lâmpadas incandescentes de 100W, totalizando uma potência de 200W.

Com a presença da fonte de calor, o fluxo de calor é induzido por uma diferença de temperatura entre os dois ambientes, o que ocasionará o sentido do fluxo de calor originário no setor 1, transpassando a alvenaria (setor 2) e transportando-se para o setor 3.

Vale ressaltar, que no interior da câmara térmica, na divisão dos setores concebida pelo painel de alvenaria, qualquer fresta que pudesse haver no encontro do mesmo com as faces internas da caixa foi preenchida com poliestireno, de forma à promover que a passagem do fluxo de calor fosse realizada exclusivamente pelo painel de alvenaria, conforme pode ser visto na Figura 46.

Figura 46: Painel de alvenaria no interior da câmara térmica.

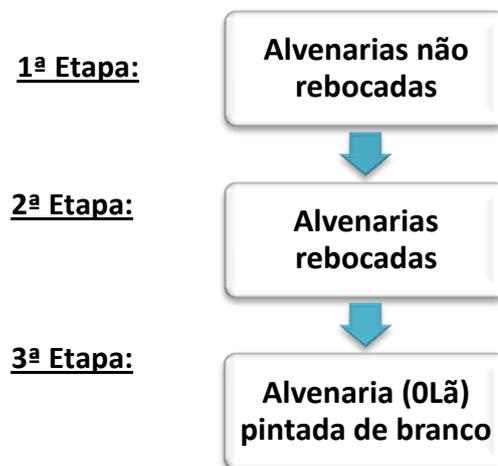


Fonte: Autora (2017).

3.5.2.3 Etapas do ensaio de fluxo térmico

O ensaio de fluxo térmico foi composto por três etapas, conforme a figura 47:

Figura 47: Etapas dos ensaios de fluxo térmico.



Fonte: A autora.

Com objetivo de analisar a influência do acréscimo da argamassa de revestimento no desempenho térmico do sistema construtivo alvenaria em blocos de concreto, após o ensaio com os painéis de alvenaria não rebocados, os mesmos foram rebocados para realização do ensaio de fluxo térmico (figura 48). Para o reboco das alvenarias, foi utilizada argamassa industrializada para reboco da Concremassa, indicada para áreas internas e externas. Na face referente ao exterior, a espessura da camada de reboco foi de 3 cm e na face referente ao ambiente interior 2 cm, obedecendo às especificações da NBR 13749 (ABNT, 1996).

Figura 48: Painéis rebocados.



Fonte: A autora.

Posteriormente aos ensaios com os painéis rebocados, para análise da influência da pintura externa no desempenho térmico do sistema construtivo, a superfície externa do painel de alvenaria de referência (0Lã) foi pintada com tinta acrílica da Suvnil, acabamento fosco, indicada para exteriores, na cor branco neve (figura 49).

Figura 49: Painel 0%Lã pintado com a cor branca.



Fonte: A autora.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na execução do programa experimental, bem como serão realizadas as análises dos mesmos. Para facilitar a leitura, a apresentação obedecerá à ordem das etapas do programa experimental:

- Resultados e análises das Simulações térmicas: Etapa A e Etapa B.
- Resultados e análises dos Ensaio de: Resistência à compressão, Absorção total de água dos blocos, Índice de absorção inicial de água (AAI), Densidade de massa aparente e determinação da condutividade térmica. Cujo objetivo é a avaliação dos blocos quanto as suas propriedades físicas e mecânicas.
- Resultados dos Cálculos para determinação das propriedades termofísicas - Resistência, Transmitância e Capacidade Térmica, Atraso Térmico e Fator de Calor Solar – de cada alvenaria 0Lã, 10Lã, 20Lã e 30Lã. Onde será também realizada, a avaliação do desempenho térmico apresentado por cada vedação, através do método de avaliação simplificada estabelecido pela NBR 15575(ABNT,2013).
- Resultados do Ensaio de Fluxo térmico de cada alvenaria, onde foram determinados o amortecimento e atraso térmico referente às vedações; Através destes parâmetros, através de análise comparativa, foi avaliado o desempenho térmico das vedações, e a análise da influência da lã de rocha incorporada ao concreto, do acréscimo da argamassa de revestimento e da pintura externa com cor de baixa absorvância.

4.1. Resultados e análises das Simulações térmicas: Etapa A e Etapa B.

4.1.1 *Simulação térmicas Etapa A*

É importante ressaltar que, a partir das figuras 50, 51, 52, 53, 54, 55 e 56 a seguir apresentadas, podem ser feitas diversas análises, que podem abordar desde o sentido do fluxo térmico entre o ambiente interno e o meio exterior e seus intervenientes à quantidade de horas dentro da zona de conforto térmico, quanto a uma maior investigação quanto à influência do revestimento da superfície da vedação no desempenho térmico global da edificação. Porém, a presente pesquisa priorizou a análise da influência das propriedades termofísicas dos blocos de concreto estabelecendo como parâmetro as maiores temperaturas registradas no ambiente, e, portanto, ao reflexo da variação de seus valores no desempenho térmico da edificação.

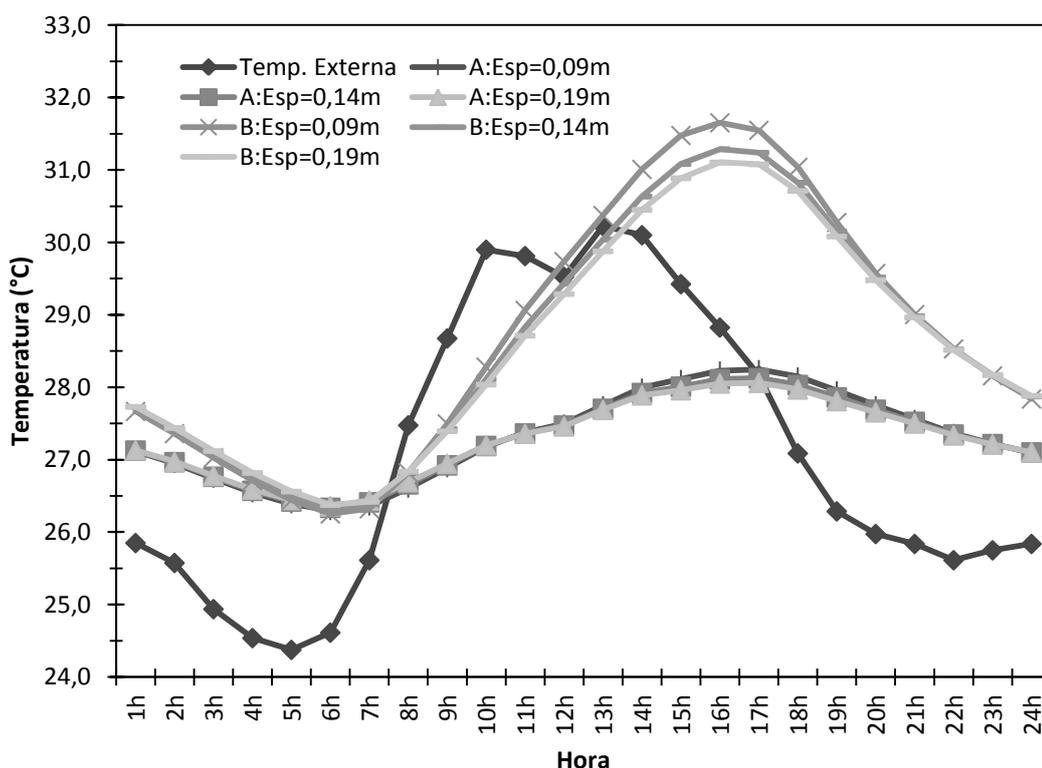
A seguir são apresentados, em gráficos, os resultados – variação da temperatura do ar interna (do ambiente em análise) das simulações térmicas, e posteriormente a análise dos resultados para cada propriedade:

A – Considerada a vedação rebocada.

B – Considerada a vedação não rebocada.

Espessura

Figura 50: Gráfico 1 – Variação da Espessura.



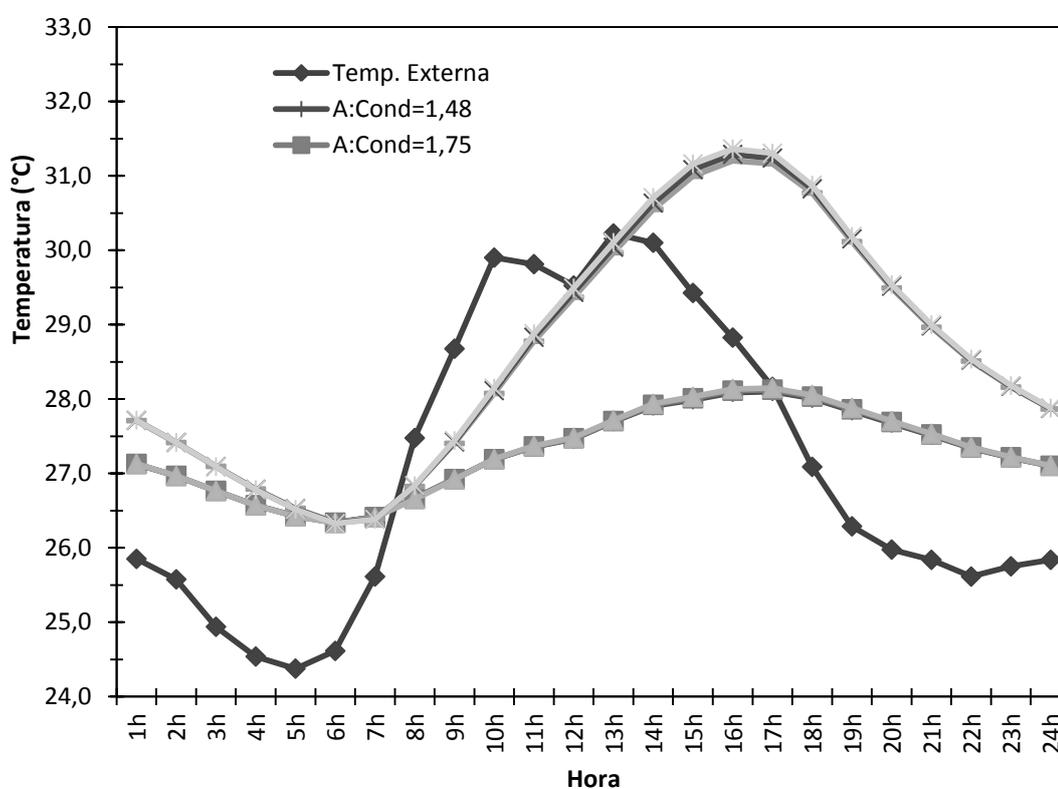
Fonte: A autora.

Nota-se que quanto maior a espessura do bloco de concreto, considerando as camadas homogêneas e a câmara de ar perpendiculares ao fluxo de calor, menor a densidade de fluxo de calor que irá atravessá-lo passando para o ambiente interno, portanto a temperatura do ambiente tende a ser menor. Isto pode ser explicado pelo fato de que quanto maior a espessura, maior a câmara de ar que compõe o bloco de concreto; para os blocos de 9cm, 14cm e 19cm, a espessura da câmara de ar é respectivamente 5cm, 10cm, 15cm. Por ser o ar um ótimo isolante térmico, quanto maior a câmara de ar presente no bloco, maior a resistência térmica do bloco de concreto. Ao analisar a simulação B, esta afirmação pode ser claramente evidenciada ao verificar o aumento da temperatura do ambiente em até 1,5°C quando utilizado o bloco de menor espessura. Entretanto na simulação A esta diferença quase não consegue ser

notada, denotando que o revestimento exerce forte influência neste comportamento térmico. Diante do exposto, nota-se que esta propriedade intrínseca ao bloco de concreto e a sua geometria pode exercer significativa influência no desempenho térmico da edificação quando a superfície da alvenaria não está revestida. Porém, na situação em que se encontra revestida, o revestimento da alvenaria mostra maior influência quanto ao desempenho térmico da edificação analisada.

Condutividade

Figura 51: Gráfico 2 – Variação da Condutividade térmica.



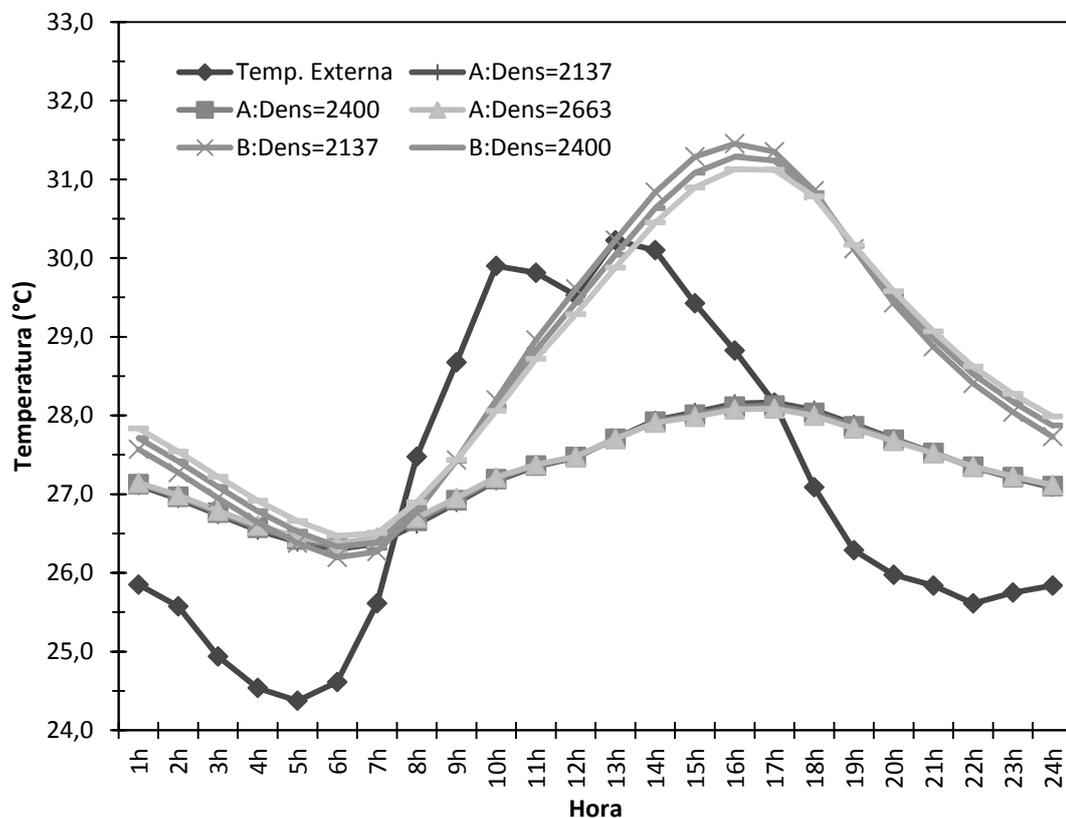
Fonte: A Autora.

A condutividade térmica de um material representa sua capacidade em conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo. Primeiramente para análise, é necessário identificar o sentido do fluxo de calor, determinado pelo meio de maior temperatura ao meio de menor temperatura. Maior condutividade, e a depender da área e da espessura da parede e da diferença da temperatura entre o interior da edificação e o meio exterior, maior será a taxa de fluxo de calor que atravessará a vedação, e portanto maior tende a ser a temperatura interna do ambiente. Conforme Lamberts et al.(2014) quanto maior for o valor da condutividade térmica, maior será a quantidade de calor transferida entre as superfícies dos materiais. Esta tendência pode ser verificada no gráfico 2, tanto para as simulações A quanto para a B.

Porém, a diferença entre as temperaturas do ambiente quando variados os valores da condutividade foi pequena, menor que $0,5^{\circ}\text{C}$, o que revela influência não muito significativa, neste caso específico, dos valores adotados para a condutividade térmica, quanto ao desempenho térmico da edificação. No entanto, deve ser destacada a forte influência do revestimento da superfície da alvenaria no desempenho térmico, materializando uma diferença de até $3,5^{\circ}\text{C}$ no interior da edificação, quando comparada a situação da alvenaria estar ou não revestida.

Densidade

Figura 52: Gráfico 3 – Variação da Densidade.



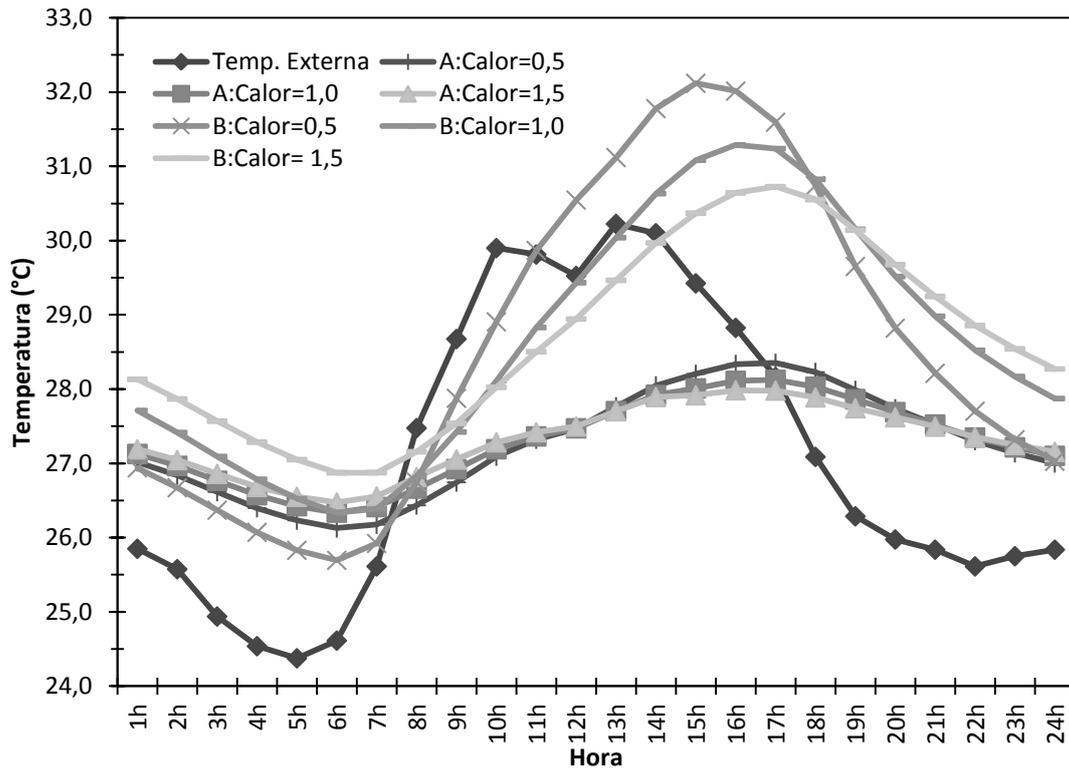
Fonte: A autora.

De acordo com a NBR 15220-1(ABNT,2005) menor densidade do material, menor condutividade térmica. Porém o que pode ser verificado nas simulações A, e mais notório na B, é um comportamento não linear da temperatura interna do ambiente, a depender do horário e do sentido do fluxo de calor, determinado pela diferença de temperatura entre o meio interno e externo, o menor valor da densidade corresponde a uma menor temperatura do ambiente e por hora a uma maior temperatura. Tal comportamento é repetido quando adotado o maior valor da propriedade termofísica. Desta forma, não há como estabelecer uma

tendência de comportamento, devendo-se o fato à troca de calor entre os meios. O que pode ser mais uma vez destacado, é a forte influência do revestimento da alvenaria no desempenho térmico da edificação em análise.

Calor Específico

Figura 53: Gráfico 4 – Variação do Calor específico.



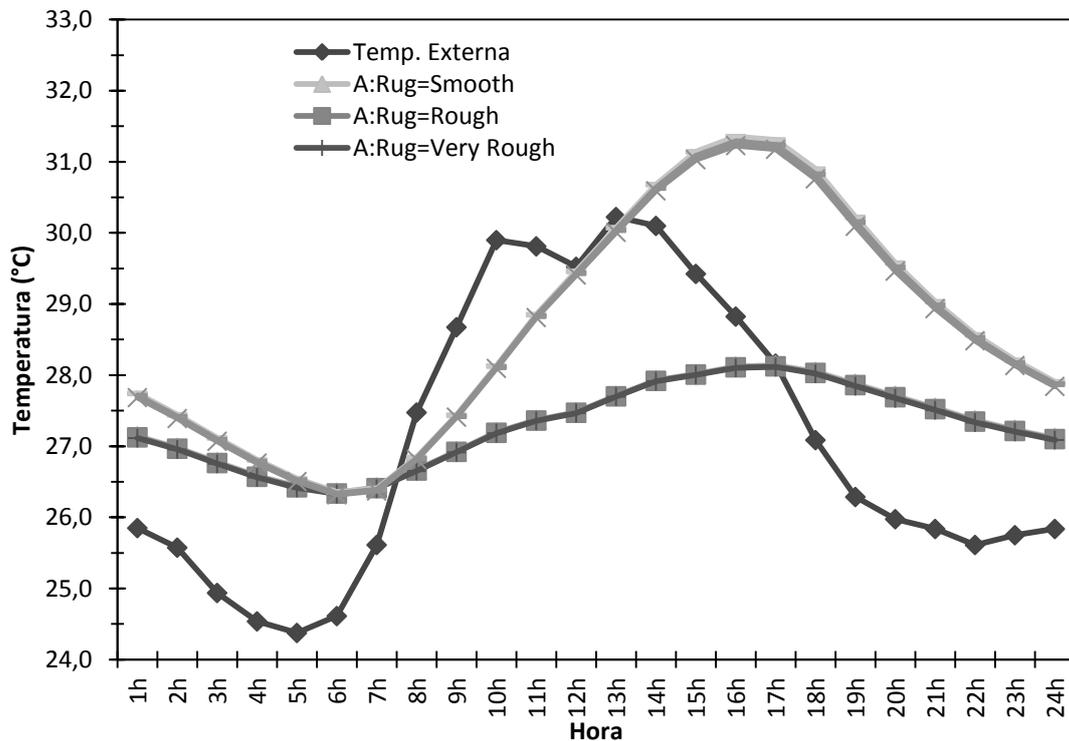
Fonte: A autora.

Segundo definição dada pela NBR 15220-1(ABNT,2003), calor específico é o quociente da capacidade térmica pela massa. A capacidade térmica pode ser definida como a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema, em síntese calor específico é a capacidade de um corpo de armazenar calor. A partir da leitura do gráfico pode-se notar, mais especificamente para as simulações B, que para os três valores adotados, a temperatura do ambiente apresenta comportamentos distintos. No tocante ao atraso térmico (o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo) relacionando-o ao tempo transcorrido entre o pico de temperatura máxima externa e a temperatura máxima interna (Gomes, 2015), verifica-se que quanto maior o valor adotado para o calor específico, maior o atraso térmico. O que para a ZB8, de clima quente e úmido, segundo a NBR 15220-3(ABNT, 2005a) as temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de

paredes (externas e internas) com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem. Porém, ao voltar o foco para o pico de maior temperatura no interior do ambiente, este foi atingido quando adotado o menor valor para o calor específico, revelando uma tendência de quanto menor o calor específico, maior a temperatura do ambiente.

Rugosidade

Figura 54: Gráfico 5 – Variação da Rugosidade.

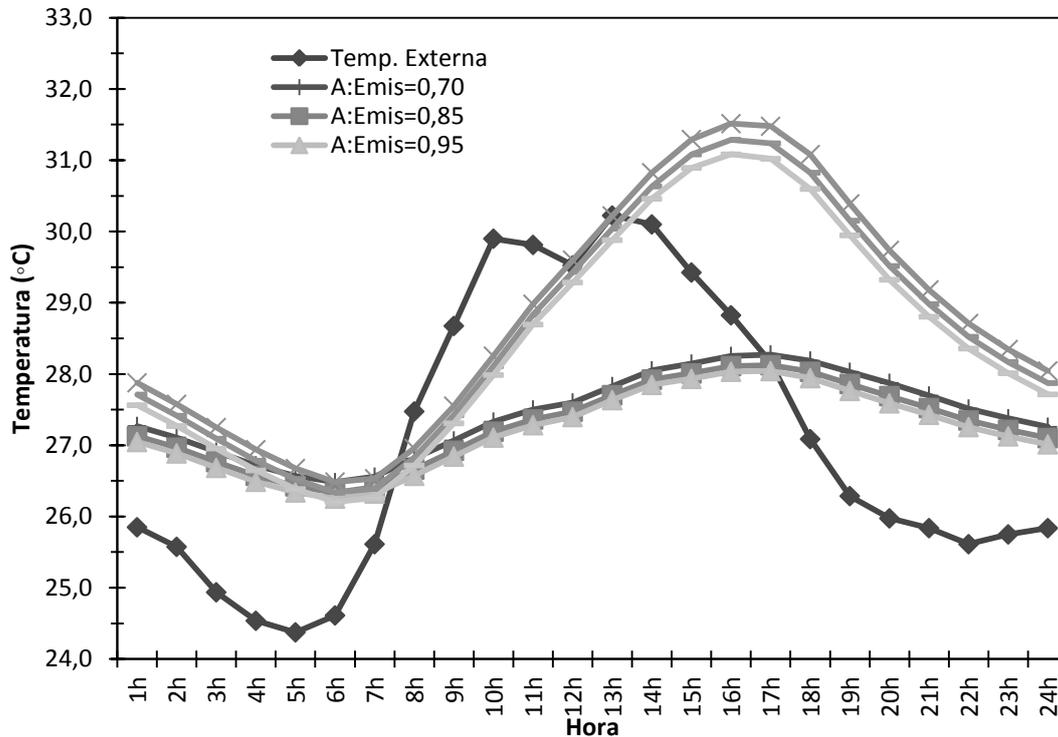


Fonte: A autora.

Não há nenhuma citação na NBR 15220-1(ABNT,2005) relacionando a rugosidade de um componente construtivo ao desempenho térmico da edificação, porém segundo Coutinho(2005) a troca do calor por convecção é função da velocidade, e densidade do fluido, bem como da forma e da rugosidade da superfície. No caso das vedações os parâmetros mais importantes são a velocidade do ar e o acabamento superficial. Nas simulações, apesar de ínfima a diferença entre temperaturas, a maior temperatura interna do ambiente registrada foi quando o acabamento da superfície da alvenaria, tanto para as simulações A quanto B, ou seja, tanto para a argamassa de revestimento quanto para o bloco de concreto, apresentou a rugosidade suave.

Emissividade

Figura 55: Gráfico 6 – Variação da Emissividade.

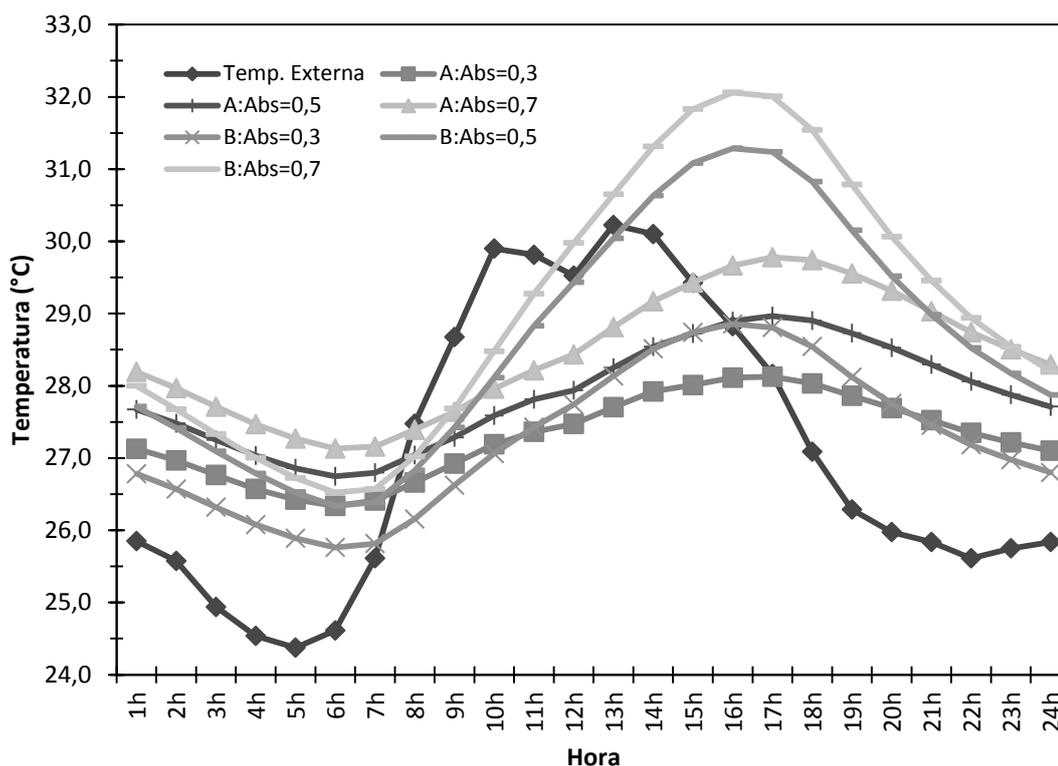


Fonte: A autora.

Esta propriedade termofísica rege a emissão da radiação para o ambiente interno, expressa a quantidade de energia térmica emitida por unidade de tempo. É importante destacar que esta propriedade pertence à camada superficial do material emissor (Lamberts et al,2014). Para tanto, primeiramente deve-se saber qual o sentido do fluxo de calor, pois a superfície estará emitindo calor para o meio de menor temperatura. O gráfico 6, para ambas as simulações, denota uma tendência de que menor emissividade da superfície da argamassa de revestimento ou do bloco de concreto, maior a temperatura do ambiente. Tal fato pode ser justificado pelo sentido do fluxo de calor, quando se pressupõe que o ambiente interno está perdendo calor para o meio externo.

Absortância

Figura 56: Gráfico 7 – Variação da Absortância.



Fonte: Autora.

Segundo definição disposta na NBR 15220-1(ABNT,2005) a absorptância é o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. Esta propriedade é função da cor da superfície externa (tons claros a escuros), sensível à radiação solar direta. Quanto maior a absorptância, maior a condução de calor para o ambiente interno, portanto maior a temperatura do ambiente, o que pôde ser observado na figura 24. Em relação às demais propriedades analisadas, a simulação térmica desta, similar a do calor específico, registrou a maior temperatura, 32,1°C, o que demonstra sua parcela significativa de contribuição no tocante ao desempenho térmico da edificação.

4.1.1.1 Considerações finais

A partir da análise dos resultados, amplia-se um leque para diversas observações. Pondera-se primeiramente para o fato de que as temperaturas do ambiente da edificação obtidas através das simulações térmicas, são resultantes de um conjunto de variáveis acerca dos componentes construtivos da edificação, não sendo resultantes da ação exclusiva através das trocas de calor da vedação em análise, mas também da composição dos demais elementos da edificação: da cobertura, das esquadrias, bem como das condições da edificação como estar

em contato com o solo, quanto a sua orientação à incidência dos raios solares e a sua geometria.

Todavia, foi estabelecido como parâmetro a influência da variação dos valores adotados das propriedades termofísicas no comportamento térmico do ambiente analisado durante o período do dia típico de verão. De acordo com o método utilizado, este comportamento térmico deve-se exclusivamente a esta variação realizada. Diante do exposto, pode-se chegar a algumas afirmativas quanto às propriedades termofísicas da alvenaria em blocos de concreto:

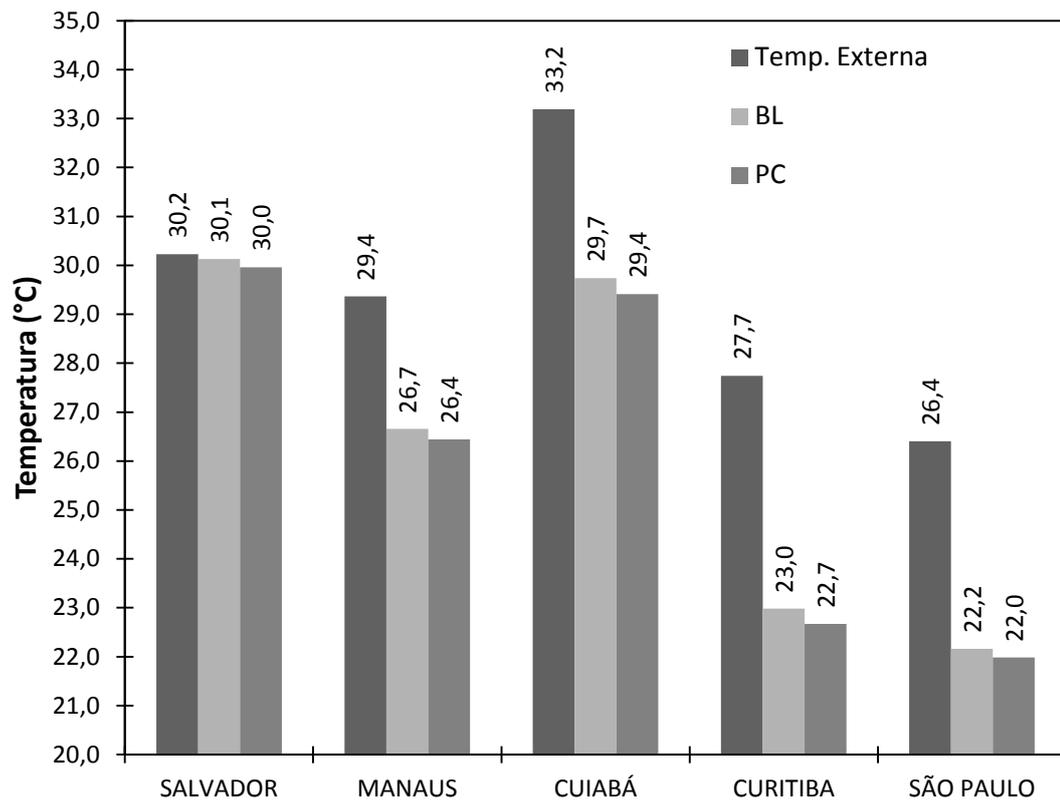
- Para todas as simulações realizadas, nota-se que as maiores temperaturas foram registradas no ambiente analisado, da edificação em questão, quando a vedação foi considerada sem revestimento, apresentando uma diferença de +4,5°C quando comparada a condição da vedação com revestimento. Tal fato denota que a argamassa de revestimento exerce significativa influência quanto ao desempenho térmico global da edificação, sendo a sua contribuição maior do que a notada quando foram feitas alterações nas propriedades termofísicas do componente construtivo (bloco de concreto).
- As propriedades relativas ao bloco de concreto, que mais influenciaram o desempenho térmico da edificação, onde se obteve uma maior variação da temperatura interna do recinto quando alterados os seus valores, apontando dessa forma uma tendência de comportamento, foram: **espessura, calor específico e absorvância**. Onde quanto maior a espessura, maior o calor específico e menor a absorvância, maior otimização do desempenho térmico da edificação.
- Portanto, diante dos resultados, pode-se concluir que a edificação analisada, localizada na ZB-8, apresentará melhor desempenho térmico, de forma a promover melhores condições de conforto térmico aos seus usuários quando for acrescentada a sua vedação externa em blocos de concreto, argamassa de revestimento e pintura externa com cores claras, de baixa absorvância.

4.1.2 Simulações térmicas Etapa B

As simulações dão por resposta a temperatura interna do ambiente em análise, para cada localidade, permitindo, ainda segundo definições da norma, avaliar a resposta térmica da edificação. São apresentados os resultados (figuras 57 e 58) e a classificação do nível de

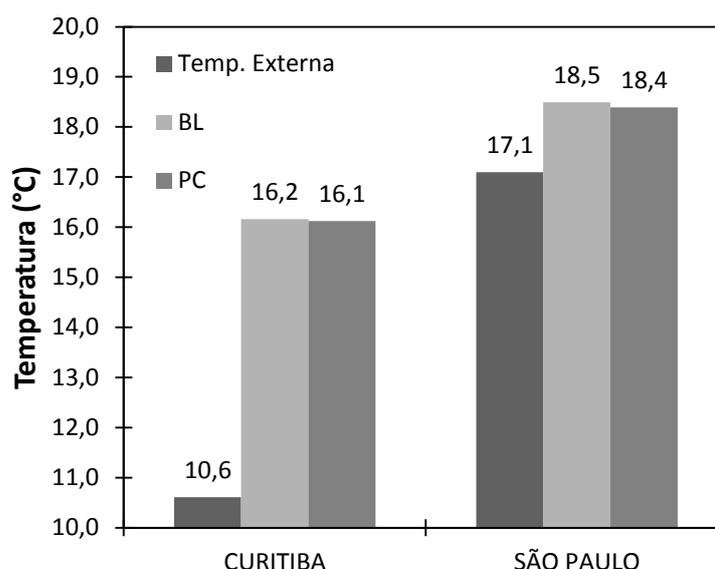
desempenho do edifício (tabela 23 e 24), de forma a ser estabelecida uma análise comparativa entre os sistemas construtivos analisados, conforme os requisitos e critérios estabelecidos pela NBR 15575 (ABNT, 2013).

Figura 57: Gráfico 1 - Temperaturas máximas externas e temperaturas máximas internas da edificação para as cidades analisadas, quando utilizado o bloco de concreto e a parede maciça de concreto – Condição verão.



Fonte: A autora.

Figura 58: Gráfico 2- Temperaturas mínimas externas e temperaturas mínimas internas da edificação para as cidades analisadas, quando utilizado o bloco de concreto e a parede maciça de concreto – Condição inverno.



Fonte: A autora.

Análise Comparativa dos Sistemas

Para a edificação multipavimentos em análise, para as cinco cidades brasileiras, os dois tipos de vedações apresentaram desempenho semelhante tanto para a condição verão, quanto para a condição inverno, atingindo inclusive os mesmos níveis de desempenho térmico para cada condição.

Resultados das Simulações Computacionais para o Verão

A partir das simulações, foram obtidas as temperaturas horárias para o dia típico de verão (21 de dezembro). De posse desses valores, foram tomadas as máximas temperaturas interna e externa, e feita avaliação do nível de desempenho, tendo como base a tabela adaptada da NBR 15575 (ABNT, 2013) e aqui apresentada. A seguir, a tabela 23 traz todos os valores máximos de temperatura para cada sistema, orientação de fachada e cidade e a devida avaliação do nível de desempenho térmico do ambiente analisado:

Tabela 23: Resultados das Simulações Computacionais para o Verão.

Simulação para o VERÃO - Último Pavimento - Dia 22 de dezembro						
Cidade	Zona	Orientação	Vedações	T _{máx} Int	T _{máx} Ext	Nível
Manaus	8	N	Bloco	26,4	29,4	I
			Parede	26,2	29,4	I
		S	Bloco	26,8	29,4	I
			Parede	26,6	29,4	I
		L	Bloco	26,6	29,4	I
			Parede	26,4	29,4	I
		O	Bloco	26,7	29,4	I

			Parede	26,4	29,4	I
Salvador	8	N	Bloco	29,6	30,2	M
			Parede	29,5	30,2	M
		S	Bloco	30,2	30,2	M
			Parede	30,0	30,2	M
		L	Bloco	30,2	30,2	M
			Parede	30,0	30,2	M
		O	Bloco	30,1	30,2	M
			Parede	30,0	30,2	M
Cuiabá	7	N	Bloco	29,2	33,2	S
			Parede	29,0	33,2	S
		S	Bloco	29,5	33,2	I
			Parede	29,3	33,2	I
		L	Bloco	29,8	33,2	I
			Parede	29,4	33,2	I
		O	Bloco	29,7	33,2	I
			Parede	29,4	33,2	I
São Paulo	3	N	Bloco	21,9	26,4	S
			Parede	21,7	26,4	S
		S	Bloco	21,9	26,4	S
			Parede	21,7	26,4	S
		L	Bloco	22,0	26,4	S
			Parede	21,8	26,4	S
		O	Bloco	22,2	26,4	S
			Parede	22,0	26,4	S
Curitiba	1	N	Bloco	22,1	27,7	S
			Parede	21,9	27,7	S
		S	Bloco	22,2	27,7	S
			Parede	22,0	27,7	S
		L	Bloco	22,5	27,7	S
			Parede	22,2	27,7	S
		O	Bloco	23,0	27,7	S
			Parede	22,7	27,7	S

Fonte: A autora.

Análise comparativa das cidades

De acordo com os resultados expostos na Tabela 13, para ambos os sistemas construtivos analisados, nas cidades de São Paulo (ZB 3) e Curitiba (ZB 1), a edificação, para todas as orientações, atingiu o nível de desempenho superior. Como também para a cidade de Cuiabá (ZB 7), porém em apenas uma das orientações, a fachada norte.

A edificação alcançou nível de desempenho intermediário na cidade de Manaus (ZB 8), para todas as orientações, e na cidade de Cuiabá (ZB 7) para as orientações Sul, Leste e Oeste.

Onde a edificação teve pior desempenho, foi na cidade de Salvador (ZB 8), atingindo nível de desempenho mínimo.

Tais resultados refletem que o projeto da edificação, executado com ambos os sistemas construtivos, quando analisada a condição verão, é mais bem adequado para as cidades que possuem climas mais amenos, como verificado em São Paulo e Curitiba.

Análise comparativa das orientações

Quando comparadas as orientações, as temperaturas máximas internas apresentaram variações ínfimas girando em torno de 0,1°C a 0,5°C de diferença, salvo a exceção da cidade de Curitiba que apresentou, quando em comparação as orientações norte e oeste, uma diferença de 0,9°C, que ainda é uma diferença pequena. Constando-se que, a nível de melhor desempenho, não houve uma orientação que se destacasse.

Resultados das Simulações Computacionais para o Inverno

A partir das simulações, foram obtidas as temperaturas horárias para o dia típico de inverno (21 de junho). De posse desses valores, foram tomadas as mínimas temperaturas interna e externa, e feita avaliação do nível de desempenho, tendo como base a tabela 18 adaptada da NBR 15575(ABNT,2013) e aqui apresentada. A seguir, a tabela 7 traz os valores mínimos de temperatura para cada sistema, orientação de fachada e cidade e a devida avaliação do nível de desempenho térmico do ambiente analisado:

Tabela 24: Resultados das Simulações Computacionais para o Inverno.

Simulação para o INVERNO - Último Pavimento - 21 de junho						
Cidade	Zona	Orientação	Vedações	Tmín Int	Tmín Ext	Nível
São Paulo	3	N	Bloco	18,1	17,1	NÃO
			Parede	18,0	17,1	NÃO
		S	Bloco	18,5	17,1	NÃO
			Parede	18,4	17,1	NÃO
		L	Bloco	18,1	17,1	NÃO
			Parede	18,0	17,1	NÃO
		O	Bloco	18,2	17,1	NÃO
			Parede	18,2	17,1	NÃO
Curitiba	1	N	Bloco	15,6	10,6	M
			Parede	15,6	10,6	M

		S	Bloco	16,2	10,6	I
			Parede	16,1	10,6	I
		L	Bloco	15,7	10,6	I
			Parede	15,7	10,6	I
		O	Bloco	15,8	10,6	I
			Parede	15,8	10,6	I

Fonte: A autora.

Análise comparativa das cidades

De acordo com os resultados expostos na Tabela 14, para a condição de inverno, a edificação ao empregar ambos os sistemas construtivos, para a cidade de São Paulo, não alcançou desempenho térmico satisfatório diante dos requisitos e critérios estabelecidos pela NBR 155575(ABNT,2013).

Para cidade de Curitiba, a edificação, tanto ao utilizar o bloco quanto a parede de concreto, atingiu o nível de desempenho térmico mínimo para a orientação norte, e para as demais orientações, nível de desempenho intermediário.

Análise comparativa das orientações

Quando comparadas as orientações, para ambos os sistemas construtivos, a diferença máxima entre as temperaturas mínimas internas e externas, para a cidade de São Paulo, foi de 0,4°C. E para a cidade de Curitiba, de 0,6°C. Constando-se que, assim como na condição de verão, que a nível de melhor desempenho, não houve uma orientação que se destacasse.

4.1.2.1 Considerações Finais

A partir da avaliação dos resultados, tanto para o inverno quanto para o verão, são válidas algumas considerações, principalmente no tocante aos parâmetros, critérios e requisitos estabelecidos na NBR 15575 (ABNT,2013):

- Apesar do desempenho térmico da edificação para a cidade de Salvador ter atingido o desempenho mínimo, e para a cidade de Cuiabá ter atingido desempenho superior para a fachada norte e intermediário para as demais orientações de fachada, observa-se que ao analisar a temperatura do ar máxima interna, as mesmas encontram-se fora da zona de conforto térmico, estabelecida entre 18°C e 29°C. Diante desta análise, os níveis mais elevados de desempenho térmico estabelecido por norma, não implica necessariamente que a edificação promove aos seus usuários um nível satisfatório de conforto térmico. Portanto, em norma deveria haver um parâmetro que estabelecesse

uma relação direta entre estes dois conceitos: nível de desempenho térmico e conforto térmico.

- Devido aos níveis de desempenho térmico apresentados pela edificação analisada apresentarem-se iguais, quanto utilizado o sistema construtivo em blocos de concreto e quando utilizado as paredes de concreto moldadas in loco, pode ser considerado que para a edificação em questão, quanto ao desempenho térmico, tanto faz se fosse adotado um sistema ou o outro. O que em condições reais, para decisão entre um ou outro, outras questões devem ser avaliadas a exemplo do conforto acústico, tempo de obra, e o custo dos sistemas.
- Outra questão a ser discutida, é a divisão das zonas bioclimáticas. Como pôde ser observado, para uma mesma ZB, neste caso a ZB8, a edificação teve comportamento térmico diferente quando analisadas cidades distintas. Entende-se, portanto ser necessária uma revisão do zoneamento, de modo a evitar estabelecer as mesmas diretrizes construtivas para cidades com diferentes características climáticas.
- A norma recomenda para o caso de não atendimento aos critérios estabelecidos para a condição verão, que a simulação deverá ser novamente refeita, considerando-se algumas alterações, a exemplo da taxa de ventilação e sombreamento da esquadria. Contudo não adota os mesmos critérios para a condição inverno, não apresentando estratégias para alcançar, ao menos, o nível de desempenho mínimo, o que revela uma falta de critério para definição do desempenho térmico global da edificação, como aconteceu nos resultados acima apresentados, para a cidade de São Paulo, onde no verão a edificação atingiu nível de atendimento superior, e no inverno, não foi atingido o mínimo de desempenho térmico requerido.

Conclui-se portanto que, este estudo realizado nesta etapa, torna-se importante não apenas para a análise do comportamento térmico da edificação quando adotados sistemas construtivos distintos, mas também como forma de contribuir para o aprimoramento da NBR 15575(ABNT,2013) no tocante a avaliação do desempenho térmico global da edificação.

4.2. Avaliação dos blocos: propriedades físicas e mecânicas.

4.2.1 Ensaio de resistência à compressão

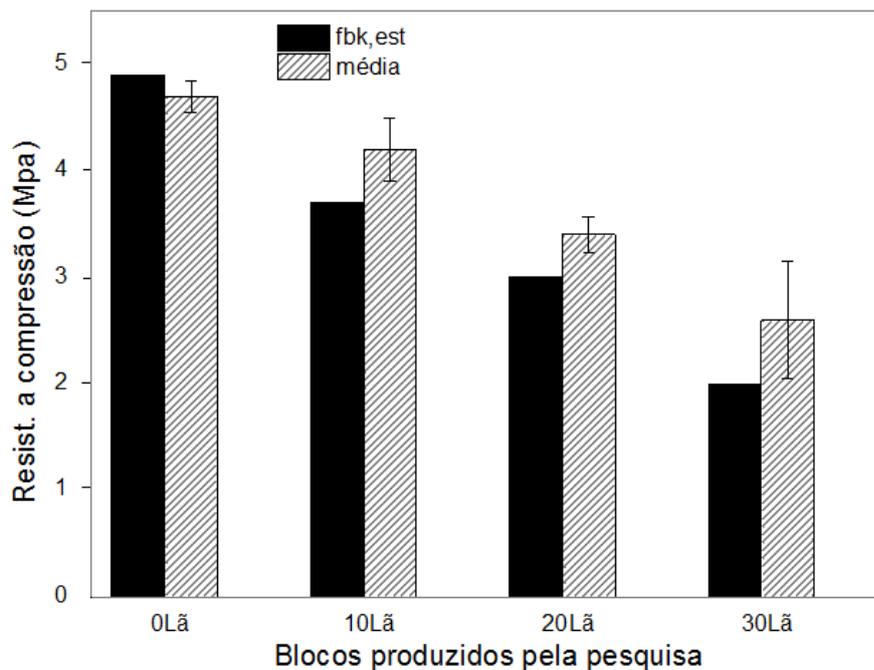
Na Tabela 25 e na figura 59 e são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão dos blocos, utilizando o critério de fbk da NBR 6136(ABNT,2014) e o valor médio das amostras.

Tabela 25: Dados individuais da resistência à compressão dos blocos.

CP	Fbk			
	0Lã	10 Lã	20Lã	30Lã
1	4,9	3,78	3,15	2,02
2	4,8	3,91	3,22	2,27
3	4,8	4,01	3,33	2,27
4	4,7	4,32	3,4	2,42
5	4,6	4,38	3,42	2,97
6	4,5	4,53	3,64	3,48
Fbk,est	4,9	3,7	3	2
$\Psi \times 0,89$	4,4	3,4	2,8	1,8
Fbk	4,9	3,7	3	2
Media	4,7	4,2	3,4	2,6
DesvPad	0,15	0,3	0,17	0,55
CV(%)	3,12	7,14	5,12	21,25

Fonte: A autora.

Figura 59: Valores da resistência à compressão dos blocos de concreto.



Fonte: A autora.

i. Análise da resistência pelo critério do fbk,est (NBR 6136)

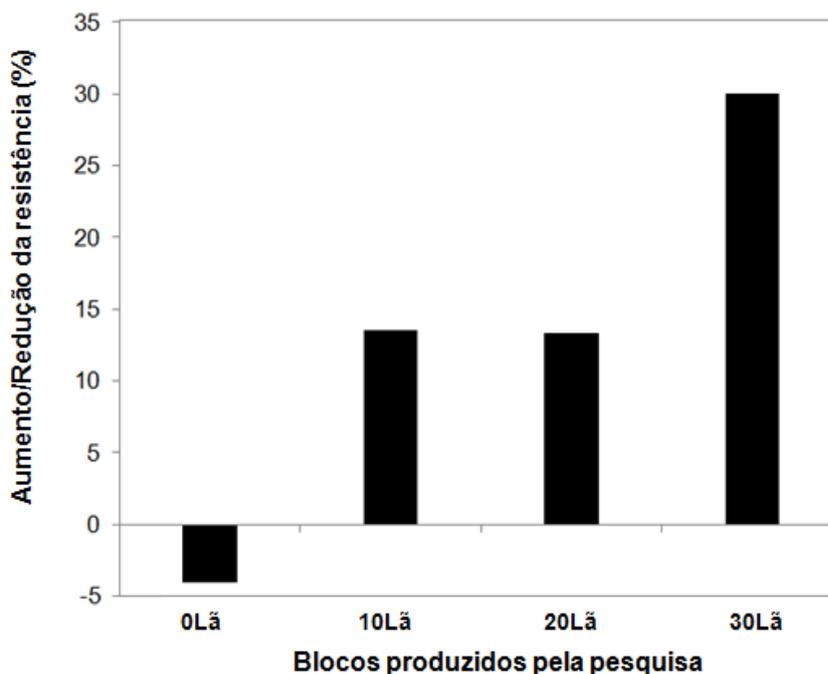
Na análise dos resultados apresentados na Figura 61 e da Tabela 19, utilizando o critério do fbk nota-se que os blocos contendo lâ de rocha 10Lã, 20Lã e 30Lã quando comparados ao bloco de referência 0Lã tiveram redução percentual na resistência a compressão em, respectivamente, 24,49%, 38,77% e 59,18%.

Quando se avalia a resistência mínima para blocos estruturais, de acordo com estabelecido pela NBR 6136(ABNT,2014) em 3Mpa, em 28 dias, o bloco 0Lã e o de 10Lã ultrapassam este valor, enquanto o bloco de 20Lã atinge exatamente este valor, e o de 30Lã não atinge este valor, o que inviabiliza o seu uso para fins estruturais. Tal análise, revela que apesar da queda de resistência à compressão dos blocos contendo Lã de rocha, este fato não inviabiliza o seu uso como matéria prima para blocos de concreto, até a porcentagem de 20%.

ii. Análise da resistência a compressão pela média

Analisando a resistência à compressão pelo critério da média aritmética simples dos dados apresentados na Figura 62 e Tabela 20, nota-se que quando se compara os valores da resistência à compressão obtida pelo método de fbk (NBR 6136) aos valores obtidos através da média aritmética simples, há uma pequena redução no valor da resistência à compressão no bloco de referência 0Lã, comportamento que não se repete para os blocos de concreto contendo lâ de rocha, em que há alterações significativas nos valores percentuais de resistência a compressão - para os blocos 10Lã e 20Lã houve aumento de 13,51% e 13,33% respectivamente, enquanto para o bloco de concreto 30 Lã houve um aumento ainda mais expressivo, de 30% (vide figura 60).

Figura 60: Aumento/redução percentual dos valores médios de resistência à compressão dos blocos em relação ao critério de fbk da NBR 6136.



Fonte: A autora.

4.2.1.1 Conclusões

Notou-se que conforme o aumento do teor de lâ de rocha incorporado ao bloco de concreto, menor a resistência à compressão dos mesmos, tal fato deve-se a modificação que a lâ de rocha causa às características de empacotamento da matriz cimentícia, interferindo em sua hidratação, com possível redução dos produtos hidratados, bem como causando alterações na zona de transição em volta dos agregados. Tais ocorrências irão influenciar em sua porosidade, o que por consequência leva a redução da resistência mecânica do bloco de concreto. Desta forma, é constatado que a lâ de rocha exerce influência física nos concretos dos blocos de concreto analisados.

Portanto, quanto maior o teor de lâ de rocha incorporado, menor resistência mecânica, devido a sua maior porosidade, o que é comprovado através dos ensaios de densidade de massa aparente e índice de vazios, de absorção total, índice de absorção inicial de água nos blocos, os quais serão apresentados a seguir.

4.2.2 Ensaio de Densidade de massa aparente e índice de Vazios

Os resultados obtidos através do ensaio para determinação da densidade de massa aparente(ρ) e índice de vazios(iv) são apresentados na tabela 26, 27 e figura 61.

Tabela 26: Densidade de massa aparente (ρ) e índice de vazios.

Material	Densidade(kg/m ³) (kg/m ³)			Média	CV(%)	Índice de Vazios(%)
	Amostra A (kg/m ³)	Amostra B (Kg/m ³)	Amostra C (Kg/m ³)			
0Lã	2196,06	2234,31	2215,83	2215,40	0,86	11,71
10Lã	2163,23	2135,50	2155,63	2151,45	0,66	14,41
20Lã	2055,78	2071,28	2020,55	2049,20	1,26	17,69
30Lã	2127,15	1907,34	2039,57	2024,69	5,46	21,06

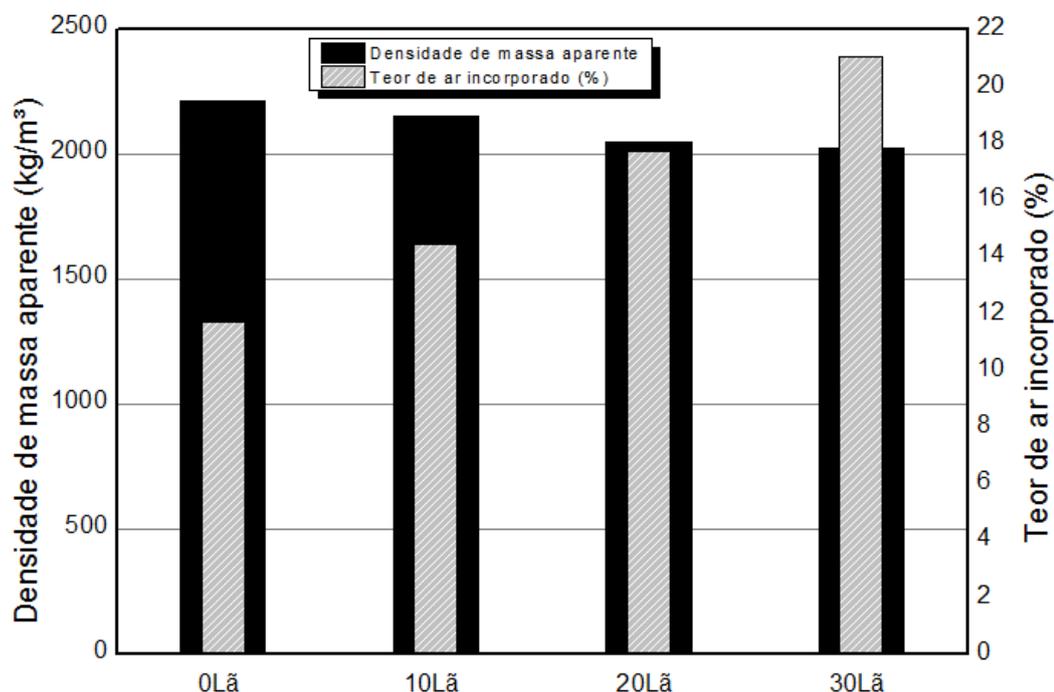
Fonte: A autora.

Tabela 27: Variação densidade de massa aparente (ρ) e teor de ar incorporado dos concretos dos blocos.

Concreto dos Blocos	ρ (kg/m ³)	Variação (%)	Índice de Vazios (%)	Variação (%)
0Lã	2215,40	-	11,71	-
10Lã	2151,45	-2,88	14,41	23,05
20Lã	2049,20	-7,50	17,69	51,06
30Lã	2024,69	-8,60	21,06	79,84

Fonte: A autora .

Figura 61: Densidade de massa aparente e teor de ar incorporado dos concretos dos blocos.



Fonte: A autora.

A densidade dos concretos dos blocos contendo lã de rocha – 10Lã, 20Lã e 30Lã – em relação ao concreto do bloco de referência, apresentou uma redução de 2,88%, 7,5% e 8,60%, respectivamente. Tal fato pode ser relacionado ao aumento significativo do índice de vazios

(Figura 61 e tabela 23) quanto maior o teor de lã de rocha, na ordem de 23,05%, 51,06% e 79,84%, quando comparado ao concreto de referência.

Tais ocorrências são justificadas pela influência física causada pela lã de rocha na matriz cimentícia, conforme Costa et al.(2013) se a superfície do substrato for não absorvente ou pouco absorvente (caso da lã de rocha), haverá um acúmulo de água nesta região, o qual tende a aumentar entre as partículas e a base e também a distância de separação interparticular, este fenômeno resultará numa interface mais porosa. Portanto, a lã de rocha interfere na hidratação da matriz cimentícia, causando alterações na zona de transição, propiciando aumento do índice de vazios, da porosidade.

Além disso, a lã de rocha substitui parcialmente a areia, cuja densidade é 97% inferior a da areia (ρ lã de rocha=60 kg/m³; ρ da areia= de 1780 kg/m³), o que reflete na densidade de massa aparente do concreto produzido.

Estes eventos podem ser atribuído ao fato da lã de rocha ter sido empregada nesta pesquisa, sem nenhum tipo de processamento, em seu estado natural, que de acordo com informações do fabricante, os flocos de lã de rocha são inertes quimicamente, bem como são repelentes à água devido aos aglomerantes adicionados ao produto. Destacando ainda, o fato de que massa específica, absorção de água e porosidade são propriedades interdependentes, fato que será comprovado na apresentação dos resultados dos ensaios de absorção na presente pesquisa.

É válido ressaltar que, em pesquisas onde o resíduo da lã de rocha (RLR) foi incorporado a matrizes cimentícias, porém inicialmente passaram por um processo de moagem, os resultados diferem do que foi constatado na presente pesquisa, a exemplo do estudo realizado por Cheng et al (2011), em que o RLR foi adicionado à compósitos cimentícios em substituições parciais do cimento nos teores de 10%, 20%, 30%, e 40%, verificou-se que esta adição levou a redução de vazios permeáveis, ajudando a formar uma microestrutura mais densa, indicando maior resistência à compressão, estas melhorias são atribuídas a uma possível atividade pozolânica desempenhada pelo RLR.

Porém neste referido estudo, não foi abordado o desempenho térmico, para saber se a adição de RLR favorece ou não as propriedades termofísicas do compósito cimentício. Na literatura pesquisada, não foi encontrado estudos ou pesquisas relacionadas à incorporação/adição de lã de rocha, em seu estado natural, nem processadas, em materiais construtivos, no tocante ao seu desempenho térmico, desta maneira o conhecimento de seu comportamento, suas características, propriedades termofísicas é ainda muito limitado.

Portanto não há como ser estabelecida uma base comparativa dos resultados obtidos à outras pesquisa .

4.2.2. Ensaio de absorção total de água dos blocos

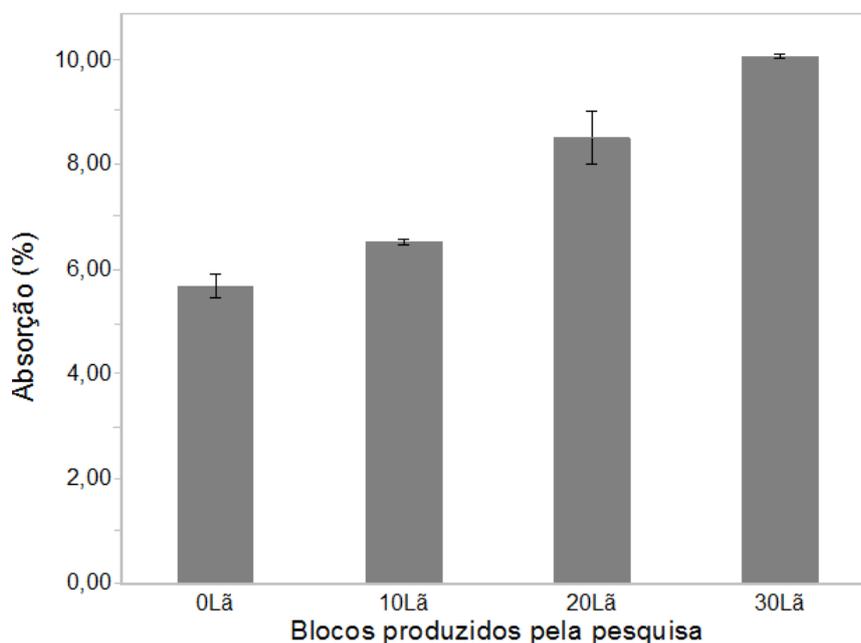
Os valores de absorção total de água dos blocos de concreto produzidos pela pesquisa são apresentados na Tabela 28 e da Figura 62.

Tabela 28: Valores individuais de absorção de água dos blocos de concreto.

Absorção (%)				
BL	0Lã	5Lã	10Lã	15Lã
1	5,94	6,61	8,15	10,1
2	5,53	6,52	9,11	10,2
3	5,62	6,51	8,37	10,1
Média	5,70	6,55	8,54	10,10
DesvPad	0,22	0,06	0,50	0,03
CV(%)	3,78	0,86	5,88	0,28

Fonte: A autora.

Figura 62: Valores de absorção total de água dos blocos de concreto.



Fonte: A autora .

Os valores de absorção total de água obtidos no ensaio mostram que conforme aumento do teor da lâ de rocha em substituição à areia no bloco de concreto, maior seu valor de absorção. Nota-se, que tal aumento percentual dos valores de absorção ocorre de forma linear, apresentando-se pequena a variação ocorrida dentro da margem de erro mostrada na barra de erro do desvio padrão.

Atenta-se ainda, que os valores de absorção dos blocos 0Lã, 10Lã e 20Lã estão abaixo do valor máximo (absorção $\leq 10\%$), estabelecido pela NBR 6136 (ABNT,2014). Porém o bloco de concreto 30Lã ultrapassa através de exígua diferença o valor máximo estabelecido.

Logo, os resultados apresentados mostram que a Lã de rocha exerce influência na absorção de água dos blocos de concreto, devido a sua maior porosidade, resultante da influência física da lã de rocha na matriz cimentícia, como elucidado anteriormente.

4.2.3. Ensaio de absorção inicial de água dos blocos.

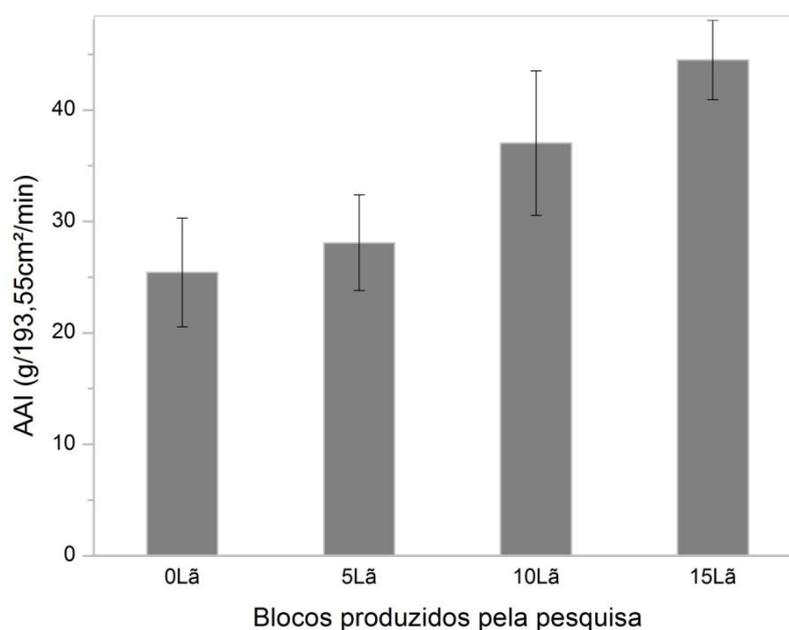
Na Tabela 29 e na Figura 63 são apresentados os resultados do ensaio de absorção inicial de água.

Tabela 29: Valores individuais do Índice de absorção inicial de água (AAI) dos blocos de concreto.

Índice de absorção inicial (g/193,55cm²/min)				
BL	0Lã	5Lã	10Lã	15Lã
1	19,92	32,97	36,19	40,62
2	27,22	26,44	31,02	45,23
3	29,17	24,85	43,92	47,64
Média	25,44	28,09	37,04	44,50
DesvPad	4,88	4,30	6,49	3,566
CV(%)	19,17	15,31	17,53	8,014

Fonte: A autora .

Figura 63: Índice de absorção inicial de água (AAI) dos blocos de concreto.



Fonte: A autora .

Ao analisar os resultados obtidos, nota-se que quanto maior o teor de lã de rocha nos blocos de concreto, maior absorção inicial de água, aumento percentual de respectivamente 10,41%, 45,59% e 74,92% em relação ao bloco de referência 0Lã.

A norma NBR 15270-3(ABNT,2009) estabelece como critério, absorção máxima de $(30g/193,55cm^2)/min$. Desta forma, os blocos de concreto aprovados, dentro desta premissa, são o 0Lã e 5Lã. O fato de não ter passado pelo critério de aprovação significa que o 10Lã e 15Lã devem ser previamente umedecidos antes do seu assentamento. É importante lembrar que este ensaio não reprova os blocos, mas estabelece critérios para a sua utilização na alvenaria. Conclui-se portanto que a Lã de Rocha promove aumento na absorção inicial dos blocos, mas isso não inviabiliza o seu uso como matéria prima para a produção dos blocos de concreto.

4.2.5. Determinação da Condutividade térmica(λ)

A seguir, nas tabelas 30, 31, 32 e 33 são apresentados os dados coletados para cada amostra e o valor médio obtido da condutividade térmica.

Tabela 30: Planilha de cálculo do coeficiente de condutividade térmica do concreto 0lã.

0Lã								
Tempo (min)	Tse	Tsi	Tae	Espessura (m)	Conv. Ext.	Dif. Temp. Superf.	Fluxo de calor	Cond Term(λ)
0	30,5	30,5	31,2	0,03	0	0	0	0
10	31,2	32,1	31,2	0,03	0	1	0	0
20	32	33	31,2	0,03	10	1,1	10	0,60
30	33,1	34,2	31,2	0,03	23,75	1,1	23,75	1,30
40	33,7	34,5	31,2	0,03	31,25	0,8	31,25	2,34
50	34,5	35,3	31,2	0,03	41,25	0,8	41,25	3,09
60	34,9	36	31,9	0,03	37,5	1,1	37,5	2,05
70	35,1	36,3	31,9	0,03	40	1,2	40	2,00
80	35,3	36,5	31,9	0,03	42,5	1,2	42,5	2,12
90	35,3	36,8	31,9	0,03	42,5	1,5	42,5	1,70
100	34,6	36,3	31,9	0,03	33,75	1,7	33,75	1,19
110	35,8	37,4	31,9	0,03	48,75	1,6	48,75	1,83
120	36,1	37,8	32,4	0,03	46,25	1,7	46,25	1,63
130	36,6	38,2	32,4	0,03	52,5	1,6	52,5	1,97
140	37,2	38,4	32,4	0,03	60	1,2	60	3,00
150	35,6	37,4	32,4	0,03	40	1,8	40	1,33
160	36,5	38	32,4	0,03	51,25	1,5	51,25	2,05
170	37,3	38,8	32,4	0,03	61,25	1,5	61,25	2,45
180	37,5	39,1	32,6	0,03	61,25	1,6	61,25	2,30

Média	1,83
--------------	-------------

Fonte: A autora .

O valor médio da condutividade térmica foi 1,83 W/(m.K) enquanto na NBR 15220-2 (ABNT,2005) consta que, o valor da condutividade térmica do concreto convencional é 1,75 W/(m.K), tal valor é adotado nos exemplos de cálculo das propriedades térmicas da parede com blocos de concreto. Devido ao valor médio da condutividade térmica, obtido através do método empregado pela pesquisa, ser compatível ao valor adotado pela NBR 15220-2 (ABNT,2005), serão validados os demais valores médios obtidos referente à condutividade térmica do concreto dos blocos com substituições parciais do agregado miúdo convencional pela lã de rocha.

Tabela 31: Planilha de cálculo do coeficiente de condutividade térmica do concreto 10lã.

10Lã								
Tempo	Tse	Tsi	Tae	Espessura (m)	Conv. Ext.	Dif. Temp. Superf.	Fluxo de calor	Cond Term(λ)
0	28,6	28,6	29,2	0,03	0	0	0	0,00
10	29,6	31,2	29,2	0,03	5	1,6	5	0,19
20	30,7	32,3	29,2	0,03	18,75	1,6	18,75	0,70
30	31,7	33,1	29,2	0,03	31,25	1,4	31,25	1,34
40	32,1	33,7	29,2	0,03	36,25	1,6	36,25	1,36
50	33	35	29,2	0,03	47,5	2	47,5	1,43
60	33,8	36	30,3	0,03	43,75	2,2	43,75	1,19
70	34,1	36,1	30,3	0,03	47,5	2	47,5	1,43
80	34,8	36,8	30,3	0,03	56,25	2	56,25	1,69
90	35,8	37,9	30,3	0,03	68,75	2,1	68,75	1,96
100	35,6	37,6	30,3	0,03	66,25	2	66,25	1,99
110	35,9	38,1	30,3	0,03	70	2,2	70	1,91
120	36	38,1	31,9	0,03	51,25	2,1	51,25	1,46
130	36,2	38,6	31,9	0,03	53,75	2,4	53,75	1,34
140	37,1	39,1	31,9	0,03	65	2	65	1,95
150	37,1	39,1	31,9	0,03	65	2,4	65	1,95
160	36,5	38,9	31,9	0,03	57,5	1,5	57,5	1,44
170	37,7	39,2	31,9	0,03	72,5	2,3	72,5	2,90
180	37,4	39,7	32,3	0,03	63,75	2,3	63,75	1,66
Média								1,55

Fonte: A autora.

Tabela 32: Planilha de cálculo do coeficiente de condutividade térmica do concreto 20Lã.

20Lã								
Tempo	Tse	Tsi	Tamb ext	Espessura(m)	Conv. Ext	Dif. Temp. Superf.	Fluxo de Calor	Cond Term(λ)
1	31	31	31,1	0,03	0	0	0	0,00
10	31,3	32,9	31,1	0,03	2,5	1,6	2,5	0,09
20	32,4	34,4	31,1	0,03	16,25	2	16,25	0,49
30	32,6	34,9	31,1	0,03	18,75	2,3	18,75	0,49
40	33,4	35,7	31,1	0,03	28,75	2,3	28,75	0,75
50	34,4	36,6	31,1	0,03	41,25	2,2	41,25	1,13
60	34,5	37	32,2	0,03	28,75	2,5	28,75	0,69
70	34,6	37,7	32,2	0,03	30	3,1	30	0,58
80	35,6	38,4	32,2	0,03	42,5	2,8	42,5	0,91
90	36	38,2	32,2	0,03	47,5	2,2	47,5	1,30
100	36,2	39,2	32,2	0,03	50	3	50	1,00
110	37,2	39,7	32,2	0,03	62,5	2,5	62,5	1,50
120	37,8	39,9	33,3	0,03	56,25	2,1	56,25	1,61
130	37,5	40	33,3	0,03	52,5	2,5	52,5	1,26
140	37,7	40,4	33,3	0,03	55	2,7	55	1,22
150	38,2	40,8	33,3	0,03	61,25	2,6	61,25	1,41
160	38,6	41,6	33,3	0,03	66,25	3	66,25	1,33
170	39,1	41,2	33,3	0,03	72,5	2,1	72,5	2,07
180	39,1	41,6	34,1	0,03	62,5	2,5	62,5	1,50
190	39,4	41,7	34,1	0,03	66,25	2,3	66,25	1,73
Média								1,11

Fonte: A autora .

Tabela 33: Planilha de cálculo do coeficiente de condutividade térmica do concreto 30Lã.

30Lã								
Tempo(min)	Tse	Tsi	Tamb ext	Espessura(m)	Conv. Ext.	Dif. Temp. Superf.	Fluxo de Calor	Cond Term(λ)
1	31,6	31,6	31,2	0,03	5	0	0	0,00
10	31,8	33,5	31,2	0,03	7,5	1,7	7,5	0,26
20	32,8	35,3	31,2	0,03	20	2,5	20	0,48
30	32,9	35,8	31,2	0,03	21,25	2,9	21,25	0,44
40	34,3	36,7	31,2	0,03	38,75	2,4	38,75	0,97
50	33,7	36,7	31,8	0,03	23,75	3	23,75	0,48
60	34,8	37,8	31,8	0,03	37,5	3	37,5	0,75
70	36	39	31,8	0,03	52,5	3	52,5	1,05
80	36,7	39,6	31,8	0,03	61,25	2,9	61,25	1,27
90	37,5	40,5	31,8	0,03	71,25	3	71,25	1,43
100	37,8	41	31,8	0,03	75	3,2	75	1,41
110	37,7	41,2	33,1	0,03	57,5	3,5	57,5	0,99
120	38,5	41,5	33,1	0,03	67,5	3	67,5	1,35

130	38,2	41,5	33,1	0,03	63,75	3,3	63,75	1,16
140	39	42,3	33,1	0,03	73,75	3,3	73,75	1,34
150	39	42,4	33,1	0,03	73,75	3,4	73,75	1,30
160	39	42,5	33,1	0,03	73,75	3,5	73,75	1,26
170	39,6	42,8	33,6	0,03	75	3,2	75	1,41
180	39,6	42,3	33,6	0,03	75	2,7	75	1,67
Média								1,06

Fonte: A autora .

Os resultados dos valores médios da condutividade térmica de cada amostra são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34: Valores médios da condutividade térmica do concreto dos blocos.

Concreto Blocos	Λ(W/mk)	Variação (%)
0Lã	1,83	-
10Lã	1,55	-15,3
20Lã	1,11	-39,3
30Lã	1,06	-42,1

Fonte: A autora.

Com base nos resultados obtidos neste ensaio, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

A utilização da lã de rocha como substituta parcial ao agregado miúdo convencional reduziu a condutividade térmica do concreto produzido, o que proporciona reflexos significativos e positivos para os blocos, quanto ao seu desempenho térmico.

Quando comparados ao concreto referencial 0Lã, os concretos dos blocos contendo lã de rocha, nos teores 10Lã, 20Lã e 30Lã apresentaram uma redução de cerca de 15,3%, 39,3% e 42,1% no valor médio de λ , respectivamente. Tal comportamento pode ser justificado pela influência física da lã de rocha na matriz cimentícia, conforme explanado anteriormente, o reflete no aumento da sua porosidade, redução da densidade de massa aparente e aumento do índice de vazios. Este fato, confirma o que Lamberts et. al (2014) elucida sobre a relação entre duas propriedades físicas: a condutividade térmica depende da densidade do material e representa sua capacidade em conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo.

Ainda segundo Frota & Schiffer (2001), a condutividade térmica depende da densidade do material, pois a matéria é sempre muito mais condutora que o ar contido em seus poros. Portanto, quando menor a densidade do material, e maior o número de vazios,

menor a condutividade térmica do mesmo. O que revela coerência entre os resultados obtidos pela presente pesquisa.

Desta forma, com reduções significativas, os concretos dos blocos produzidos com lã de rocha quando comparados ao concreto do bloco de referência 0Lã, apresentam características otimizadas, onde o de 20Lã e 30Lã, cujos valores médios de condutividade térmica é de 1,11 W/mK e 1,06 W/mK, podem ser comparados a condutividade térmica dos blocos cerâmicos, conhecido por relevante desempenho térmico, que possuem condutividade térmica variando entre 0,70 W/mK a 1,05 W/mK, conforme a NBR 15220 (ABNT, 2005).

ETAPA 4

4.3 Avaliação das alvenarias em blocos de concreto: desempenho térmico.

4.3.1 Análise das Propriedades térmicas das alvenarias.

Os valores obtidos através dos cálculos das propriedades térmicas das alvenarias não rebocadas e rebocadas, bem como pintadas, executados conforme procedimento estabelecido pela NBR 15220(ABNT,2005), são apresentados na tabela 35. As propriedades térmicas calculadas foram: resistência (R), transmitância (U) e capacidade térmica(C_T), atraso térmico(ϕ) e fator de calor solar (FS). O detalhamento dos cálculos está no Anexo.

É válido ressaltar, que quando são referidas às duas propriedades físicas - condutividade térmica (λ) e densidade de massa aparente (ρ) - estas grandezas referem-se ao material, ou seja, ao concreto, já quando são abordadas as propriedades térmicas, as mesmas referem-se ao componente construtivo – o bloco de concreto produzido com este concreto sem e com incorporação de lã de rocha.

Tabela 35: Propriedades térmicas calculadas.

Propriedades térmicas	Alvenarias não rebocadas				Alvenarias rebocadas				Alv. reb. e pintadas			
	0Lã	10Lã	20Lã	30Lã	0Lã	10Lã	20Lã	30Lã	0Lã	10Lã	20Lã	30Lã
Rt*(m ² .K)/W	0,156	0,166	0,188	0,191	0,194	0,202	0,219	0,222	-	-	-	-
Rf**(m ² .K)/W	0,326	0,336	0,358	0,361	0,364	0,372	0,389	0,392	-	-	-	-
U w/(m ² .k)	3,07	2,98	2,8	2,77	2,74	2,69	2,57	2,55	-	-	-	-
CT KJ/(m ² .k)	100	97	92	91	220	217	212	211	-	-	-	-
Fs (%)	7,98	7,75	7,28	7,2	5,48	5,38	5,14	5,1	2,2	2,15	2,05	2,04
ϕ (h)	1,9	2,0	2,1	2,1	3,9	3,9	4,0	4,0	-	-	-	-

Nota: Para a alvenaria não rebocada $\alpha=0,65$, referente ao concreto aparente, para a alvenaria rebocada $\alpha=0,5$, referente ao reboco claro, valores estabelecidos pela NBR 15220 (ABNT,2005).

*Rt refere-se a resistência térmica da parede.

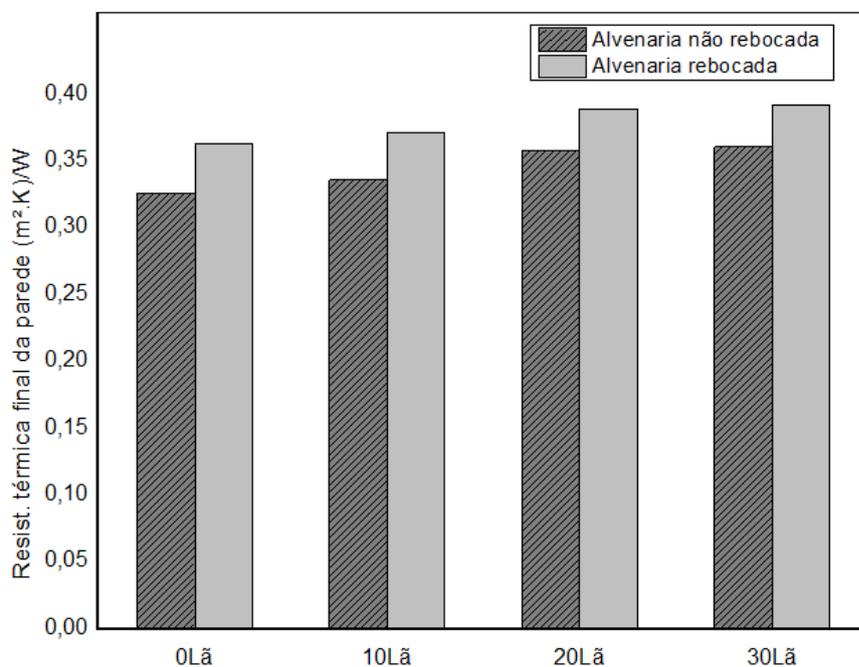
**Rf: resistência térmica final da parede considerando Rsi e Rse.
 Fonte: A autora.

Conforme explanado anteriormente nesta dissertação, na revisão bibliográfica, as propriedades térmicas de um material e de um componente estão diretamente correlacionadas, regidas, sobretudo por suas propriedades e características físicas, a exemplo da densidade de massa aparente e condutividade térmica. Como elucida Kappaun (2012), as recomendações sobre os materiais a serem utilizados na construção de edificações, muitas vezes, tratam apenas de uma das suas características térmicas, mas não é possível basear-se em somente uma de suas propriedades térmicas, de forma independente, uma vez que todo o material combina essas propriedades como uma unidade.

Através das figuras 64, 65, 66, 67 e 68, pode ser visualizada através dos gráficos de barras a variação de valores das propriedades térmicas, em função do teor de lã de rocha incorporado, e da alvenaria estar rebocada, ou não rebocada; e para a propriedade fator solar, pode ser visualizado a sua variação em função do acréscimo da pintura externa.

Resistência térmica(R)

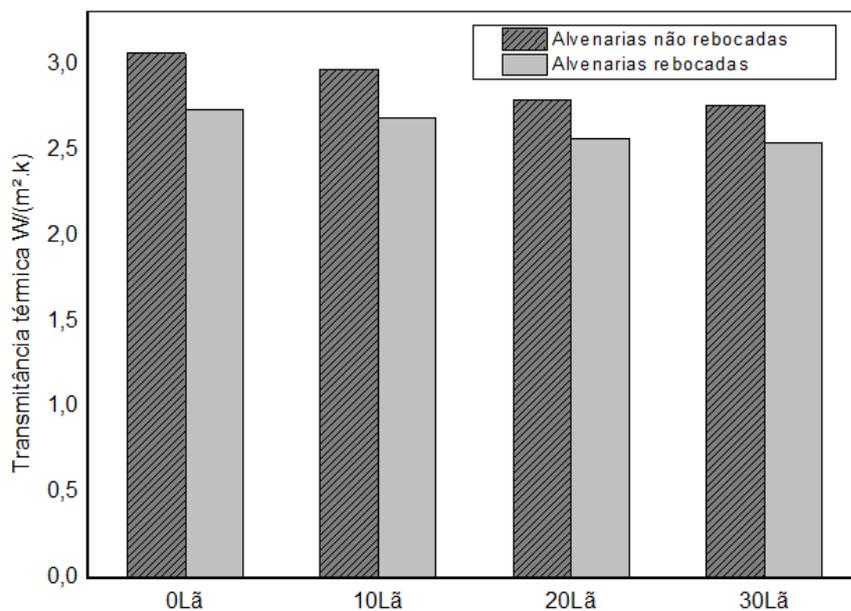
Figura 64: Resistência térmica alvenarias.



Fonte: A autora.

Transmitância térmica(U)

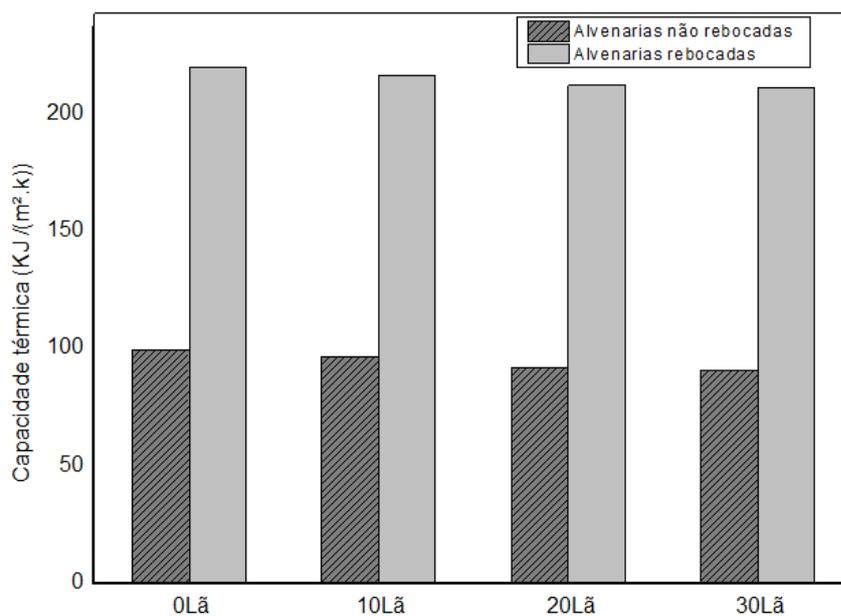
Figura 65: Transmitância térmica alvenarias.



Fonte: A autora.

Capacidade térmica (CT)

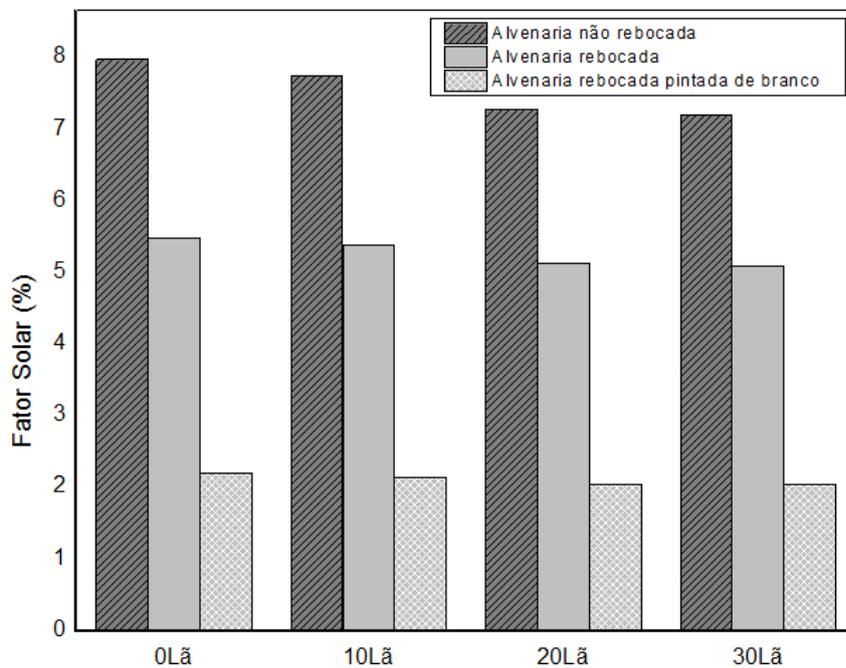
Figura 66: Capacidade térmica alvenarias.



Fonte: A autora.

Fator Solar de elementos opacos (FS)

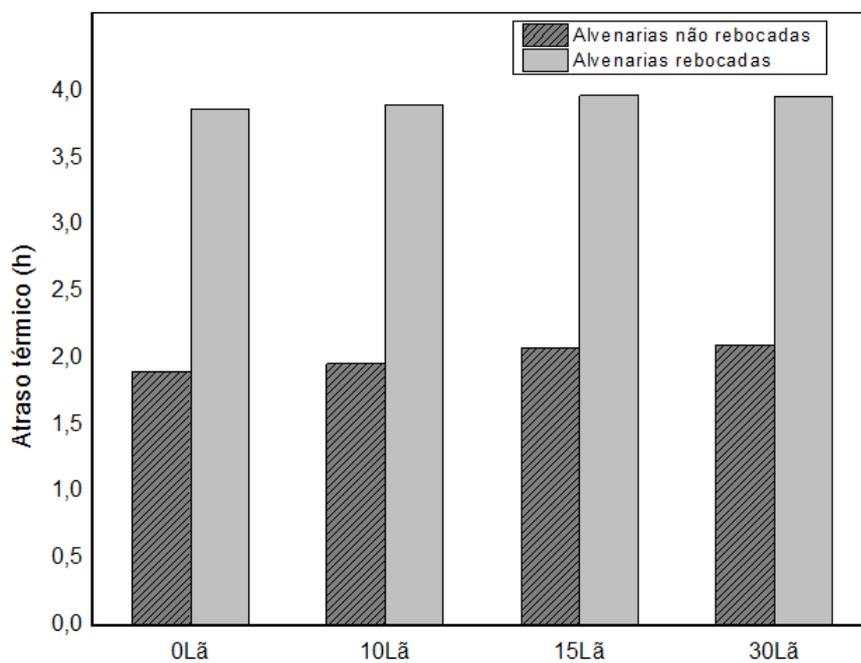
Figura 67: Fator solar alvenarias.



Fonte: A autora.

Atraso térmico (ϕ)

Figura 68: Atraso térmico alvenarias.



Fonte: A autora.

A seguir será realizada análise para avaliar a influência da lã de rocha, do acréscimo da argamassa de revestimento e da pintura externa nas propriedades térmicas das alvenarias.

4.3.1.1 Análise quanto à influência da lã de rocha*

*Para análise da influência da lã de rocha, serão avaliados os valores das alvenarias não rebocadas.

Denota-se que quanto maior a **resistência térmica (R)** oferecida por um material, maior capacidade de isolamento térmico o mesmo possui. Desta forma, conforme pode ser analisado através da Tabela 35, é identificada a otimização do comportamento térmico da alvenaria quanto maior teor de lã de rocha incorporada ao concreto, visto que a sua resistência térmica aumenta. Tal fato deve-se, sobretudo, como já explanado anteriormente, a lã de rocha interferir fisicamente na matriz cimentícia, causando a alteração em seu empacotamento, refletindo no aumento do número de vazios, maior porosidade, e, portanto maior isolamento térmico o material possui.

Como as propriedades térmicas de um material e de um componente estão diretamente correlacionadas, regidas, sobretudo por suas propriedades e características físicas, nota-se através dos resultados que, assim como a resistência térmica dos blocos de concreto sofreu alteração de acordo com o teor de lã de rocha, as demais propriedades também sofreram alteração. A **transmitância térmica(U)**, por ser o inverso da Resistência térmica (R) conforme o aumento do teor da lã de rocha teve seu valor reduzido, esta propriedade é utilizada para a definição das propriedades do isolamento térmico dos materiais, pois expressa suas características de permeabilidade à passagem de calor.

Quanto à **capacidade térmica (CT)**, segundo a NBR 15520(ABNT,2005), esta propriedade informa a quantidade de energia necessária para aumentar em uma unidade a temperatura de um sistema. A capacidade térmica de um componente é função de seu calor específico, do valor de sua dimensão paralela à direção do fluxo de calor e de sua densidade de massa aparente. Visto que a densidade de massa aparente dos concretos teve seu valor reduzido conforme aumento do teor de lã de rocha, tal fato foi refletido na redução dos valores da capacidade térmica (CT) dos concretos.

Quanto ao **Fator solar de elementos opacos**, esta propriedade é definida pela NBR 15220 (ABNT,2005) como o quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo. Depende diretamente da transmitância térmica do componente e da absorptância à radiação solar da superfície externa da vedação. Conforme aumento do teor de lã de rocha,

houve aumento da porosidade dos concretos do bloco, resultando na redução do valor do fator solar. O que reflete de maneira positiva quanto ao desempenho térmico, de forma que haverá menor transmissão da taxa de radiação solar através da alvenaria.

Quanto ao **atraso térmico(θ)** observa-se que, conforme o aumento do teor de lã de rocha incorporada ao concreto, há um pequeno incremento no valor do atraso térmico, também devido a interferência física dada pela incorporação da lã de rocha ao concreto e por sua vez a influência deste fator nas propriedades termofísicas relacionadas ao atraso térmico, apresentadas acima.

4.3.1.2 Análise quanto à influência da argamassa de revestimento*

*Para análise da influência da lã de rocha, serão avaliados os valores das alvenarias rebocadas em comparação aos valores das alvenarias não rebocadas.

Percebe-se que o acréscimo da argamassa de revestimento à alvenaria contribui de maneira significativa para a melhoria do desempenho térmico da vedação, o que pode ser observado em razão da resistência térmica das alvenarias rebocadas serem maiores que as das não rebocadas, o que por consequência leva a uma redução da transmitância térmica. A argamassa de revestimento, somada a alvenaria, exerce a função, quanto ao comportamento térmico da vedação, de reduzir a passagem do calor para o interior da edificação, pois devido ao aumento da massa térmica, aumenta também a inércia térmica, em razão do material reter uma parte em seu interior (parcela que o aquecerá), para só então depois liberar a outra parcela do calor que atingirá o ambiente interno, o que influenciará em seu atraso e amortecimento térmico.

Em função desta alteração no comportamento térmico, nota-se ainda, através dos cálculos, que as propriedades que mais sofreram influência quando consideradas as alvenarias rebocadas, foram a Capacidade térmica, Fator solar e Atraso térmico, comprovando a otimização do desempenho térmico das alvenarias.

Ressalta-se que os resultados das simulações térmicas computacionais realizadas por esta pesquisa, já haviam revelado à significativa influência da argamassa de revestimento no desempenho térmico da vedação.

4.3.1.3 Análise quanto à influência da pintura externa

A absorvância é dada em função da cor da superfície externa da vedação, onde dentre os cálculos executados, a única propriedade térmica em que a mesma é utilizada é o Fator Solar do componente construtivo. A cor escolhida para a pintura da fachada de uma

edificação determinará o quanto esta vedação irá transmitir de radiação em relação ao quanto ela recebeu.

Quando a alvenaria rebocada tem sua superfície externa pintada com a cor branca ($\alpha=0,2$), nota-se através dos cálculos, que há redução do fator de calor solar em torno de 75% quando comparado ao valor da alvenaria não rebocada, e de aproximadamente 60% em relação à alvenaria rebocada não pintada, o que reflete na redução de ganhos de calor para o interior da edificação. Portanto a pintura exerce influência significativa e positiva no desempenho térmico das alvenarias. O que também, já havia sido revelado através das simulações computacionais térmicas realizadas por esta pesquisa.

4.3.1.4 Avaliação do desempenho térmico das vedações segundo as recomendações e requisitos das normas NBR 15220 (ABNT,2005) e NBR 15575(ABNT,2013)

Através da tabela 36 são apresentadas as recomendações e requisitos presentes nas normas, e os valores da transmitância térmica, do atraso térmico e do fator solar das alvenarias não rebocadas, rebocadas e pintadas.

Tabela 36: Valores calculados transmitância térmica, atraso térmico e fator solar e as recomendações das normas 15575 e 15220.

Alvenarias	NBR 15220			NBR 15575
	Transmitância térmica - U (W/m ² .k)	Atraso térmico - ϕ (horas)	Fator Solar - FS (%)	Transmitância térmica - U (W/m ² .k)
	U<3,6	$\phi \leq 4,3$	FS $\leq 4,0$	U $\leq 3,7$ $\alpha \leq 0,6$ U $\leq 2,5$ $\alpha > 0,6$
0Lã	3,07	1,9	7,98	3,07
10Lã	2,98	2,0	7,75	2,98
20Lã	2,80	2,1	7,28	2,80
30Lã	2,77	2,1	7,20	2,77
0Lã reb	2,74	3,9	5,48	2,74
10Lã reb	2,69	3,9	5,38	2,69
20Lã reb	2,57	4,0	5,14	2,57
30Lã reb	2,55	4,0	5,10	2,55
0Lã reb e pint	2,74	3,9	2,20	2,74
10Lã reb e pint	2,69	3,9	2,15	2,69
20Lã reb e pint	2,57	4,0	2,05	2,57
30Lã reb e pint	2,55	4,0	2,04	2,55

Fonte: A autora.

De acordo com as diretrizes construtivas recomendadas para a ZB-8, presente na NBR 15220(ABNT,2005), orienta-se que as vedações externas (alvenarias) sejam paredes leves

refletores, as quais são classificadas de acordo com os valores limites estabelecidos de Transmitância térmica (U), Atraso térmico(ω) e Fator Solar(FS).

Como pode ser visualizado através da tabela 6, observa-se que todas as alvenarias, quanto às duas primeiras propriedades apresentaram valor inferior ao valor limite estabelecido pela norma, porém quanto ao Fator Solar, apresentaram valores superiores ao limite, e apenas as alvenarias pintadas apresentaram valores inferiores ao limite. O que significa que as alvenarias 0Lã, 10Lã, 20Lã e 30Lã, apenas são classificadas como leves refletores, portanto adequadas para a ZB-8, se forem rebocadas e pintadas de branco.

Diante do exposto, observa-se que o Fator Solar(FS) é uma propriedade que seu valor depende do valor da absorptância, e nota-se, mediante cálculos realizados, que se as alvenarias não rebocadas, também fossem pintadas de branco ($\alpha=0,2$) ou amarelo ($\alpha=0,3$), as mesmas atenderiam ao parâmetro estabelecido $FS \leq 4,0$, e portanto seriam consideradas paredes leves refletores.

De acordo com o estabelecido pelo método simplificado da NBR 15575(ABNT, 2013), que determina para a ZB-8 valores limites de transmitância térmica (U) a depender da absorptância, de forma a classificar o nível de desempenho térmico mínimo atingido pela vedação, nota-se através da tabela 12, que as alvenarias não rebocadas e sem pintura, não atingiram o desempenho térmico mínimo exigido pela norma, pois apresentaram valores de transmitância térmica superiores ao limite, sendo dessa forma consideradas inadequadas para a ZB-8; já as alvenarias rebocadas não pintadas, e rebocadas e pintadas atingiram, ao menos, o desempenho térmico mínimo estabelecido pela Norma.

É possível ainda ressaltar que, se as alvenarias “reprovadas” (não rebocadas) fossem pintadas com cores claras, cujo valor da absorptância seja $\leq 0,6$, a exemplo das cores: branca, amarela, e verde clara, mediante o valor da transmitância térmica apresentado abaixo de 3,7, as mesmas atenderiam ao estabelecido em norma, apresentando desempenho térmico mínimo.

Portanto, em suma, todas as alvenarias em blocos de concreto analisadas: não rebocadas e rebocadas, para a ZB-8, se pintadas com cores claras, teriam o nível de desempenho térmico classificado como mínimo, estabelecido pela NBR 15575 (ABNT,2013), sendo consideradas adequadas para a ZB-8, bem como seriam consideradas paredes leves refletores, conforme classifica e orienta a NBR 15220 (ABNT, 2005).

É importante também verificar a incongruência entre o que é recomendado pela NBR 15220 (ABNT,2005) e o que é obrigatório referente ao nível de desempenho térmico mínimo estabelecido pela NBR 15575 (ABNT, 2013). Onde, de acordo com a NBR 15575 as

alvenarias rebocadas não pintadas seriam consideradas adequadas para a ZB-8, e já pela NBR 15220 não seriam aconselhadas.

Ressalvas quanto às recomendações e critérios de avaliação vigentes nas normas de desempenho térmico

É válido ressaltar, conforme afirma Carlo (2008) que a transmitância térmica de paredes é dependente de suas capacidades térmicas, de temperaturas internas e externas bem como da volumetria da edificação. Áreas de sombreamento também irão interferir na transmissão de calor para o interior da edificação, fato que através do método simplificado, estas variáveis não são levadas em conta.

Em pesquisa realizada por Ferreira et al.(2017), cujo objetivo foi o de avaliar o conforto térmico de uma edificação residencial multifamiliar, por meio de simulações no EnergyPlus para o período de 1 ano em 24 cidades brasileiras, os resultados obtidos indicaram que o procedimento simplificado não é sensível aos impactos da transmitância e da absorvância da envoltória em comparação ao método detalhado que utilizada a simulação, podendo originar uma classificação de desempenho equivocada.

A autora ressalta que é preciso uma revisão do método de avaliação prescritivo das normas de desempenho que se baseiem fortemente na transmitância térmica da envoltória, sendo fundamental considerar a capacidade térmica dessas superfícies e as estratégias relacionadas, assim como a ventilação natural e o sombreamento, bem como coibir o uso de superfícies escuras ($\alpha > 0,6$) senão para os climas frios. A autora ainda alerta, que os valores adotados para a transmitância térmica das paredes e coberturas nas normas mostraram-se muito elevados, enquanto os valores da capacidade térmica das paredes são mais baixos do que o indicado para garantir o melhor desempenho térmico da edificação.

Nota-se através do que foi explanado, da diferença de critérios entre as normas, e através da revisão da literatura, como abordado acima, que as normas de desempenho vigentes necessitam para por revisões, para melhor estabelecer os parâmetros de avaliação.

Diante dos fatos, para melhor análise comparativa do desempenho térmico das alvenarias, bem como para a análise da influência do teor de lã de rocha incorporado, do reboco e da pintura externa, nesta pesquisa foram realizados os ensaios de fluxo térmico, cujos resultados e análises são apresentados a seguir.

4.3.2. Ensaio de Fluxo Térmico

O comportamento observado durante o ensaio de todas as alvenarias, cujo período é de 24 horas, ordena uma sequência de fluxos térmicos, alterando as temperaturas do ar nos setores. Inicialmente, tais fluxos seguem o sentido do setor inicial (onde está localizada a fonte de calor), passando pelo setor intermediário (câmara de ar), para então chegar ao setor final (representativo do ambiente interno), o que confirma a premissa da transferência de calor, onde a diferença de temperaturas funciona como força motriz, transportando o calor das coordenadas de temperaturas mais altas para as mais baixas; até que seja atingido o equilíbrio térmico entre os três setores, onde as temperaturas voltam a se igualar até atingir valores senão iguais, muito próximos à temperatura inicial, que no decorrer dos ensaios tal comportamento foi observado a partir das 19 horas.

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos para cada alvenaria através das figuras 69, 70, 71, 72, 73 e 74. Os registros de temperaturas dos ensaios encontra-se no anexo.

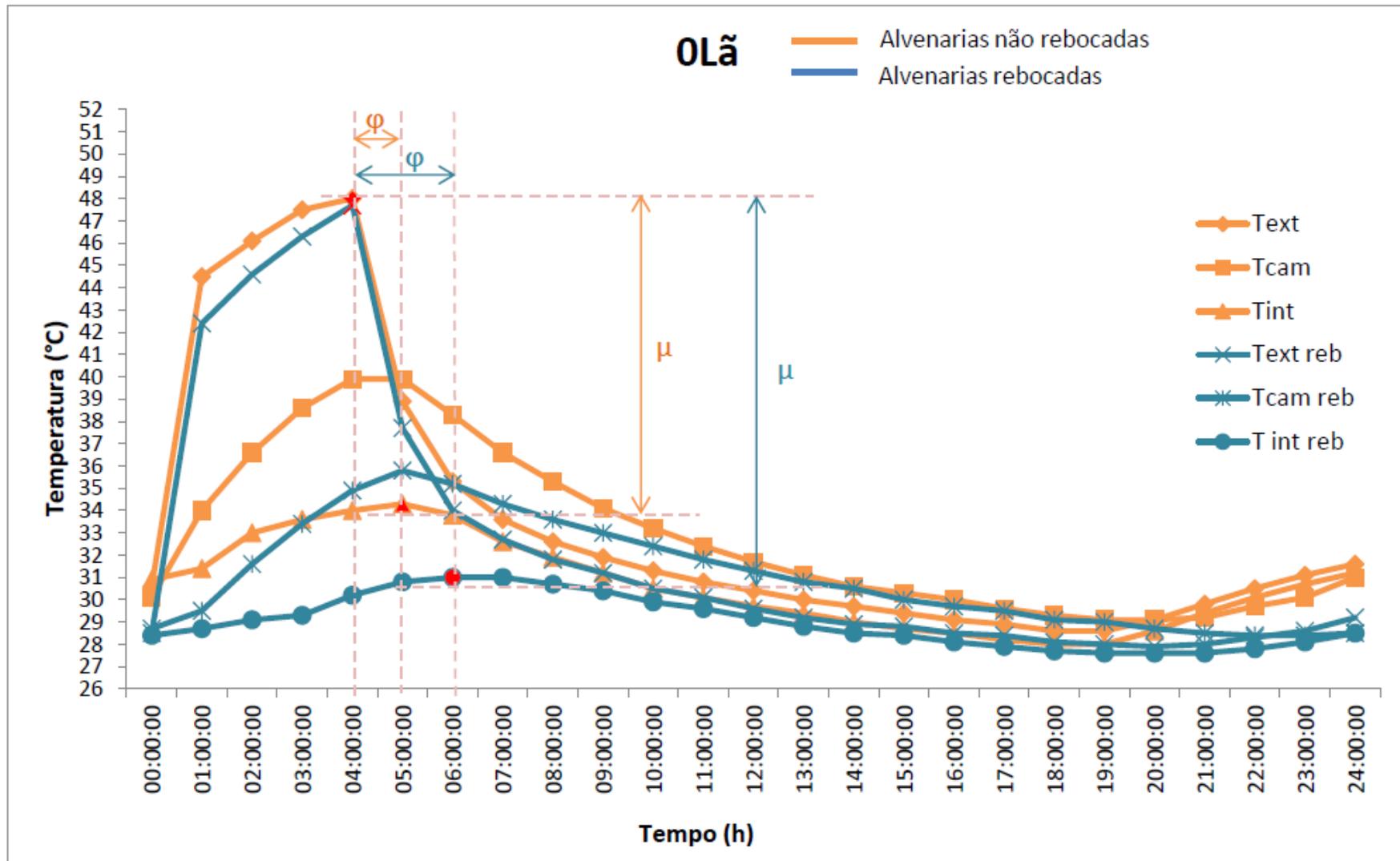
É feita a ressalva de que as observações feitas a seguir, na análise dos resultados da alvenaria 0Lã, em relação à transferência de calor através dos blocos de concreto, são próprias também aos ensaios de fluxo térmico das demais alvenarias 10Lã, 20Lã, e 30Lã.

Legenda utiliza nos gráficos:

A sigla “**reb**” foi utilizada para identificar as alvenarias rebocadas.

- **Text:** Temperatura do ar no setor 1 (Temperatura do ar externa).
- **Tcam:** Temperatura do ar no setor 2 (Temperatura do ar na câmara de ar do bloco de concreto).
- **Tint:** Temperatura do ar no setor 3 (Temperatura do ar interna).

Figura 69: Gráfico do ensaio de fluxo térmico da alvenaria OLã rebocada e não rebocada.

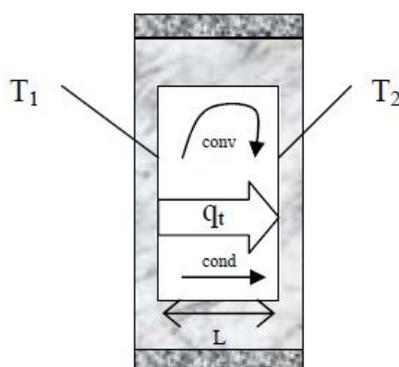


Fonte: A autora.

A figura 69 apresenta o gráfico referente ao ensaio de fluxo térmico da alvenaria 0Lã não rebocada e rebocada, através da análise deste nota-se que durante o período em que a fonte de calor permaneceu ligada, nas primeiras 4,5h de ensaio, observou-se que a temperatura do ar no setor 1, referente à temperatura externa, atingiu seu valor máximo ao final deste período, tanto no ensaio com a alvenaria não rebocada quanto rebocada apresentando valores de respectivamente, 48°C e 47,7°C; Porém apesar de no setor 2 (câmara de ar), no ensaio da alvenaria não rebocada, a temperatura atingir seu valor máximo (39,9°C) também ao final deste período, ou seja não houve atraso térmico, nota-se um significativo amortecimento térmico de 44% em relação a temperatura externa. Já no ensaio da alvenaria rebocada, nota-se que no setor 2 a temperatura máxima (35,8°C) foi atingida após 1h (atraso térmico) do registro da temperatura máxima no setor 1, e o amortecimento térmico teve valor ainda mais expressivo de 62%. Tal fato, dentre outras variáveis, se deve às interações entre a condutividade térmica e resistências térmicas superficiais da camada do material (concreto e/ou argamassa) que separa estes dois setores, bem como à da própria câmara de ar do bloco de concreto - no qual se pode ressaltar o caráter isolante térmico do ar, atuando como um amortecedor do fluxo térmico devido a sua baixa condutividade térmica, de cerca de 0,026 W/m.K, segundo dado da NBR 15220 (ABNT,2017).

Conforme explica Lamberts et al. (2007), a transferência de calor nas câmaras de ar, a exemplo do bloco de concreto, é devida à condutividade térmica do ar (condução) e aos efeitos de convecção entre as superfícies internas dos componentes e o ar encerrado. O coeficiente de convecção, neste confinamento, integra os efeitos de condução e convecção (vide Figura 70).

Figura 70: Fluxo de calor em câmara vertical não ventilada.



Fonte: Lamberts (2007).

Além disso, como elucidado por Roriz (1996), nem todo o calor que entra através da face externa da parede chegará à interna, pois parte dele será consumida no aquecimento do próprio material da parede. Analisando a partir desta ótica, a energia térmica será consumida,

através do bloco de concreto, ao aquecer inicialmente a primeira camada do bloco (concreto), depois a câmara de ar, e depois a segunda camada do bloco (concreto). Sendo que em uma alvenaria rebocada a primeira e a segunda camada a ser aquecida é composta por concreto e a argamassa de revestimento(reboco), a qual possui condutividade térmica (1,15W/m.K) menor que a do concreto; o que consumirá ainda mais energia térmica, podendo ainda ressaltar que a espessura das camadas exercem significativa influência na transferência de calor.

Em relação à temperatura do ar no setor 3, referente à temperatura interna, apresenta amortecimento térmico ainda mais significativo em relação à temperatura do ar externa(setor 1), para a alvenaria não rebocada, de 68% e de 83%, para a rebocada. Onde, respectivamente, a diferença entre a temperatura máxima externa e interna é de 13,3°C, e de 16,7°C.

Quanto ao atraso térmico, nota-se através da figura 69 e da tabela 37, que a alvenaria em blocos de concreto não rebocada apresentou valor de 1h, enquanto a alvenaria rebocada, de 2h. Desta forma, a alvenaria rebocada apresentou valores mais acentuados tanto de atraso térmico, quanto de amortecimento, o que é devido, provavelmente, a sua maior capacidade térmica, portanto sua maior inércia térmica.

A tabela 37 apresenta os valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, amortecimento térmico e atraso térmico obtidos nos ensaios de fluxo térmico. Vale alertar, que os valores de amortecimento e atraso térmico considerados para classificar as alvenarias são os referentes aos calculados através das temperaturas internas e externas (setor 1 e 3) e estão marcados de verde nas tabelas que serão apresentadas, sendo que os valores entre a câmara de ar (setor 2) e setor 1(temperatura externa) são apresentados para melhor análise do comportamento térmico das alvenarias.

Tabela 37: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, amortecimento e atraso térmico referente as alvenarias OLã rebocadas e não rebocadas.

Alvenarias	Text			Tcâmara			μ (%)	φ (h)	Tint			μ (%)	φ (h)
	Tmáx	Tmín	Ae	Tmáx	Tmín	AiCAM	CAM E EXT	CAM E EXT	Tmáx	Tmín	Ai	INTE EXT	INTE EXT
OLã	48	28,6	19,4	39,9	35,8	10,8	44	1h	34,3	28	6,3	68	1h
OLã rebocadas	47,7	27,9	19,8	35,8	28,4	7,4	62	1h	31	27,6	3,4	83	2h

Fonte: A autora.

Santos et al. (2015) realizou estudo de caso, que teve como objetivo principal avaliar comparativamente o comportamento térmico de dois materiais utilizados nos fechamentos em alvenaria estrutural, o bloco de concreto e o bloco cerâmico. Foram estudados dois edifícios que possuem a mesma planta baixa, cada qual construído com os dois tipos de blocos,

edificados em um mesmo condomínio habitacional, com a mesma posição de implantação, na cidade de São Leopoldo/RS, situada na Zona Bioclimática 2 brasileira.

O comportamento térmico foi avaliado a partir da análise comparativa entre as temperaturas internas e externas medidas nas duas edificações, sendo verificadas separadamente as influências do tipo de bloco, da orientação solar dos fechamentos dos ambientes monitorados. As medições foram realizadas por um período de 15 dias em apartamentos desocupados e fechados, para avaliar o desempenho térmico sem a interferência da variação de outras variáveis, como a ventilação e ganhos internos de calor. O bloco de concreto utilizado na edificação e foco de estudo foi o de 14x19x39cm, igual ao da presente pesquisa, possuindo acabamento interno e externo de argamassa de revestimento de 2cm. Os valores de amortecimento e atraso térmico encontrados e calculados através das medições in loco, são apresentados na tabela 38 para o período de inverno e para o período de verão.

Tabela 38: Amortecimento e atraso térmico do bloco de concreto, encontrados através de medição in loco.

Bloco de concreto	Inverno	Verão
Amortecimento - μ (%)	63,3	78,1
Atraso térmico - ϕ (h)	01:30	02:35

Fonte: kappaun (2015).

Os valores apresentados na tabela 40, quando comparados aos valores obtidos pela presente pesquisa para a alvenaria 0Lã rebocada, são muito próximos, fato que revela a autenticidade através da compatibilidade de resultados alcançados através da metodologia utilizada nesta dissertação, fato bastante significativo para validação dos mesmos.

Os resultados obtidos na presente pesquisa para as alvenarias 0Lã (rebocadas e não rebocadas) servirão de parâmetro para análise dos demais resultados referentes as alvenarias 10Lã, 20Lã e 30Lã, de forma a estabelecer uma base comparativa para investigar a influência da lâ de rocha no desempenho térmico das alvenarias. A seguir serão apresentados os demais resultados.

10%

No ensaio de fluxo térmico da alvenaria 10Lã não rebocada, a temperatura do ar máxima (44,9°C) no setor 1, foi registrada após as 3 horas iniciais, permanecendo estável durante 1 hora, e após o desligamento da fonte de calor (4,5h após o início do ensaio), a temperatura começou a reduzir; Momento em que a temperatura do ar máxima (39,9°C) foi

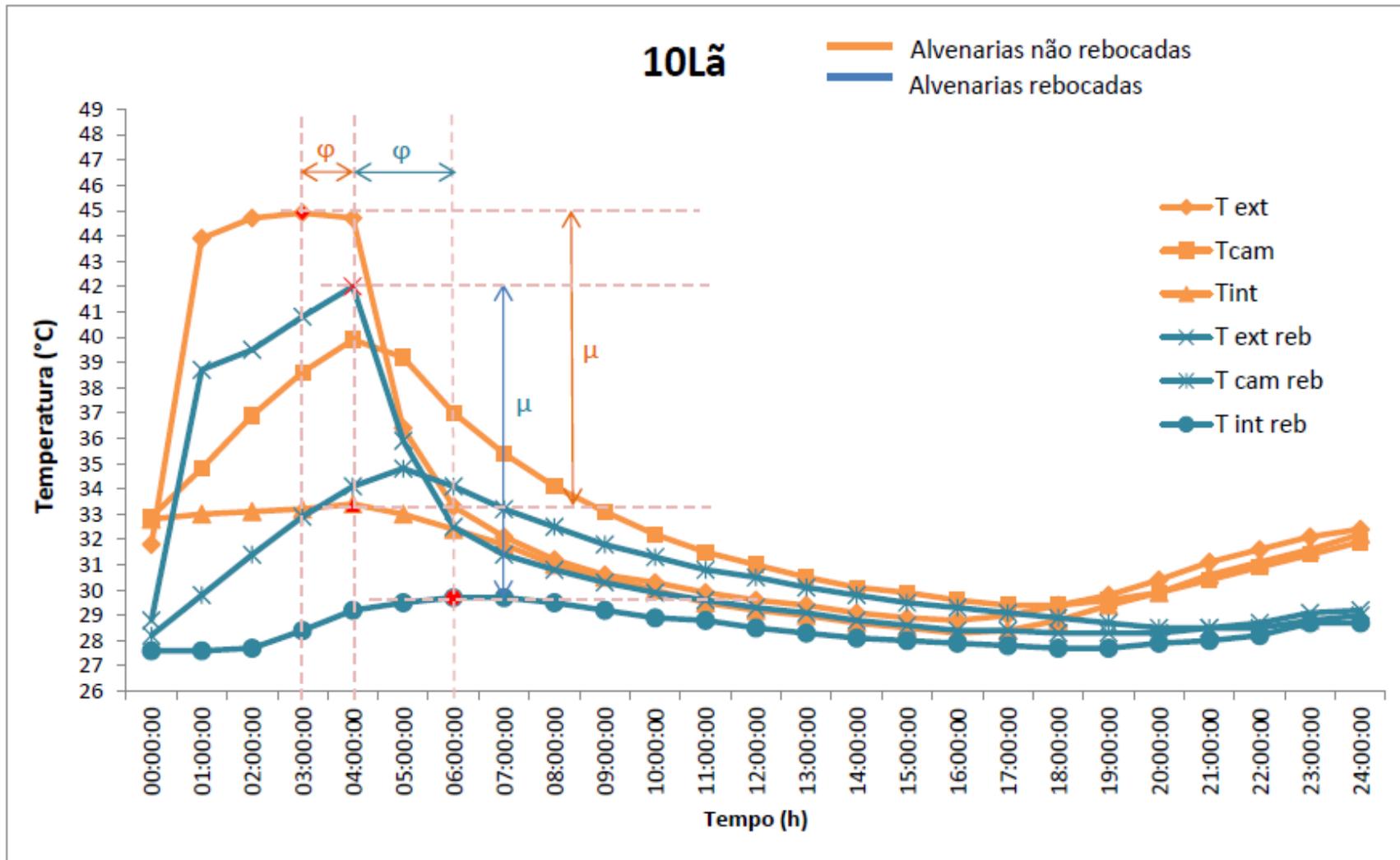
registrada no setor 2, bem como no setor 3 (33,4°C). A amplitude térmica nos três setores foi de, respectivamente, 16,1°C, 10,5°C e 5,1°C.

Já a temperatura do ar máxima foi atingida durante o ensaio da alvenaria rebocada, no setor 1 (42°C) nas 4 horas iniciais, e no setor 2 (34,8°C) e no setor 3(29,7°C) uma hora após este momento. A amplitude térmica nos três setores foi de, respectivamente, 13,7°C, 6,6°C e 2,1°C.

Na figura 71 e tabela 39, é possível visualizar os valores obtidos através do ensaio, como a temperatura máxima, amplitude térmica, o atraso e o amortecimento térmico.

O comportamento térmico observado da alvenaria 10Lã foi semelhante ao da 0Lã, tanto para a alvenaria não rebocada quanto para a rebocada (vide figura 74 e tabela 41). Os valores do amortecimento e atraso térmico da alvenaria não rebocada 10Lã, foram os mesmos apresentados pela 0Lã, cujos valores foram respectivamente 68% e 1h; e, para a alvenaria rebocada, o amortecimento térmico foi de 85%, apresentando um pequeno acréscimo em relação ao da 0Lã, cujo valor foi de 83%; e o atraso térmico apresentado foi o mesmo, 2h.

Figura 71: Gráfico do ensaio de fluxo térmico da alvenaria 10Lã rebocada e não rebocada.



Fonte: A autora.

Tabela 39: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, amortecimento e atraso térmico referente às alvenarias 10Lã rebocadas e não rebocadas.

Alvenarias	Text			Tcâmara			μ (%) CAM E EXT	φ (h) CAM E EXT	Tint			μ (%) INT E EXT	φ (h) INT E EXT
	Tmáx	Tmín	Ae	Tmáx	Tmín	AiCAM			Tmáx	Tmín	Ai		
10Lã	44,9	28,8	16,1	39,9	29,4	10,5	34	1h	33,4	28,3	5,1	68	1h
10Lã rebocadas	42	28,3	13,7	34,8	28,2	6,6	51	1h	29,7	27,6	2,1	85	2h

Fonte: Autora (2017).

Portanto pode-se concluir que o desempenho térmico apresentado pelas alvenarias 0Lã e 10Lã foi o mesmo. Nota-se que a argamassa de revestimento proporciona melhor desempenho térmico ao sistema construtivo, enquanto que a incorporação da lâ de rocha não representou significativa interferência.

20%

A temperatura do ar máxima (44,8°C) no setor 1, no ensaio de fluxo térmico da alvenaria 20Lã não rebocada, foi registrada após as 3 horas iniciais, e após o desligamento da fonte de calor (4,5h após o início do ensaio), a temperatura começou a reduzir; Nos setores 2 e 3 a temperatura do ar máxima foi registrada às 5 horas iniciais, atingindo o valor de 39,5°C e 34,5°C, respectivamente. A amplitude térmica nos três setores foi de, respectivamente, 16,3°C, 10,3°C e 5,9°C, valores muito semelhantes aos da 10Lã não rebocada. Nota-se que o valor do atraso térmico foi 2h, superior ao das alvenarias não rebocadas 0Lã e 10Lã.

Na figura 72 e tabela 40, é possível visualizar os valores obtidos através do ensaio, como a temperatura máxima, amplitude térmica, o atraso e o amortecimento térmico.

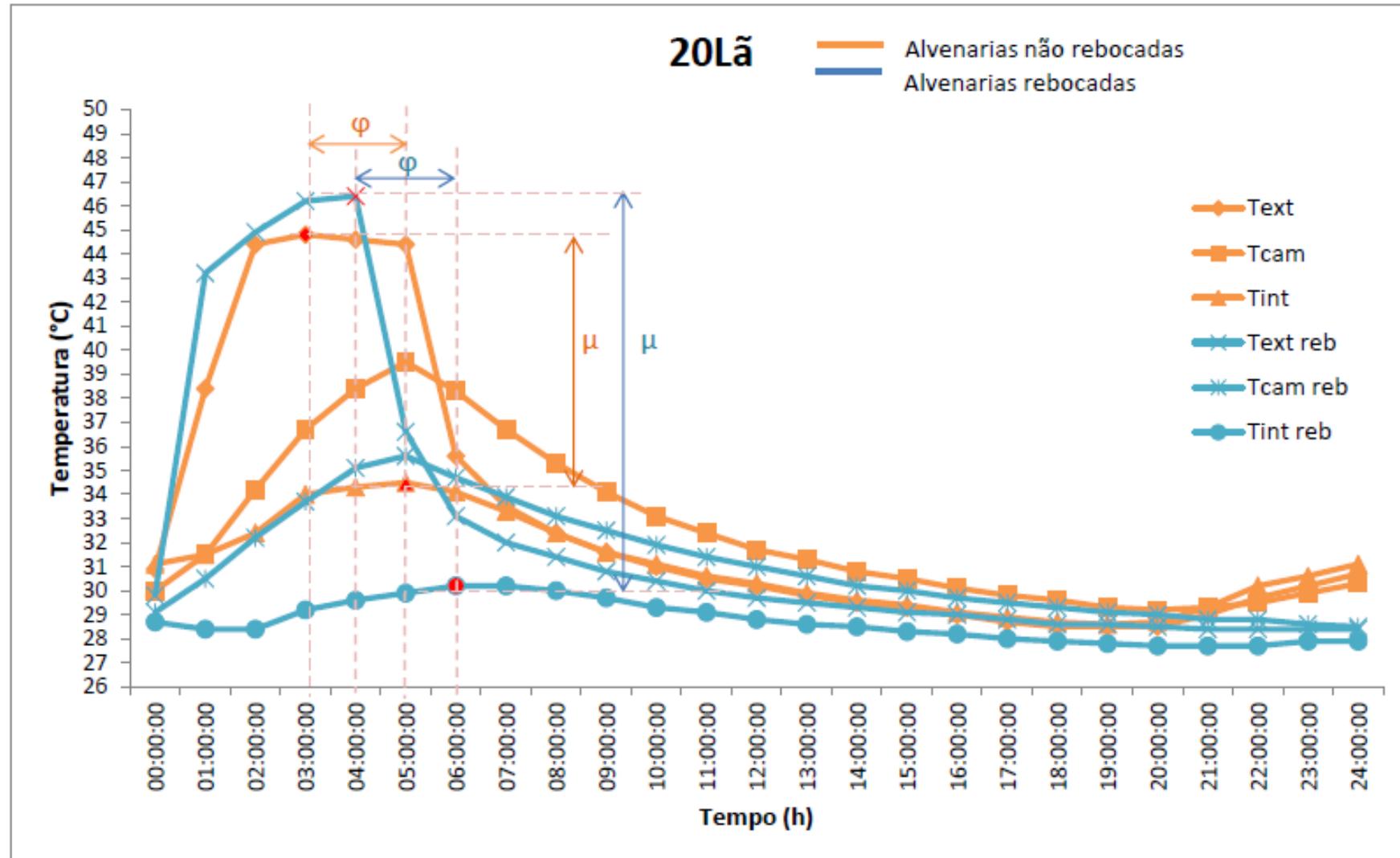
Já a temperatura do ar máxima foi atingida durante o ensaio da alvenaria rebocada 20Lã, no setor 1 (46,4°C) nas 4 horas iniciais, e no setor 2 (35,6°C) e no setor 3(30,2°C) uma hora e duas horas, após este momento. A amplitude térmica nos três setores foi de, respectivamente, 18°C, 7,1°C e 2,5°C. Valores muito próximos aos da 10Lã rebocada. O valor do atraso térmico foi 2h, assim como se repetiu nas alvenarias rebocadas anteriormente analisadas.

O comportamento térmico observado da alvenaria 20Lã foi semelhante ao da 10Lã, tanto para a alvenaria não rebocada quanto para a rebocada (vide figura 72 e tabela 40). Os valores do amortecimento e atraso térmico da alvenaria não rebocada 20Lã, foram, respectivamente 64% e 2h; Pode-se notar que, diferente do que aconteceu nas alvenarias 0Lã e 10Lã onde os valores de amortecimento foram iguais (68%), na alvenaria de 20Lã houve uma pequena redução, de 4%, fato que não há como ser melhor detalhado, em razão de que contraria, mediante os valores das demais alvenarias, o comportamento térmico esperado, que

seria de igual ou maior valor de amortecimento térmico, visto que a alvenaria 30Lã, portanto com maior teor de lã, segue o percurso esperado, apresentando o valor de 71%, o que demonstra que é possível que a lã de rocha tende a melhorar o desempenho térmico da alvenaria.

Porém, este valor díspar acima relatado da alvenaria de 20Lã, que mesmo que seja pequena a diferença representa algo a ser analisado, pode ser um reflexo da não homogeneidade da lã de rocha no arranjo espacial dos blocos, sendo que no momento da produção dos blocos, não há como estabelecer que, por exemplo, em cada cm^2 do bloco haja “x” gramas de lã de rocha, não há a possibilidade de haver esta uniformidade, o que pode resultar em mesmo que os blocos sejam produzidos com determinado teor de lã, acredita-se que uns contenham maior teor de lã de rocha que outros, o que pode vir a alterar, mesmo que de forma não tão significativa, o comportamento térmico apresentado pela alvenaria em questão.

Figura 72: Gráfico do ensaio de fluxo térmico da alvenaria 20Lã rebocada e não rebocada.



Fonte: A autora.

Tabela 40: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, amortecimento e atraso térmico referente às alvenarias 20Lã rebocadas e não rebocadas.

Alvenarias	Text			Tcâmara			μ (%) CAM E EXT	φ (h) CAM E EXT	Tint			μ (%) INT E EXT	φ (h) INT E EXT
	Tmáx	Tmín	Ae	Tmáx	Tmín	AiCAM			Tmáx	Tmín	Ai		
20Lã	44,8	28,5	16,3	39,5	29,2	10,3	37	2h	34,5	28,6	5,9	64	2h
20Lã rebocadas	46,4	28,4	18	35,6	28,5	7,1	60	1h	30,2	27,7	2,5	86	2h

Fonte: A autora.

O amortecimento térmico da alvenaria rebocada foi de 86%, nota-se um pequeno acréscimo de 1% quando refere-se a de 10Lã, e de 3% quando refere-se a de 0Lã. Quanto ao atraso térmico, seu valor de 2h foi o mesmo apresentado pelas demais alvenarias.

Desta forma, nota-se que o desempenho térmico da alvenaria 20Lã foi semelhante aos apresentados pelas alvenarias 0Lã e 10Lã; onde a influência do teor de lã de rocha, não pode ser mensurada, porém pode-se concluir que não há interferência negativa, tendendo sim, a ser positiva. Ressalta-se mais uma vez o melhor desempenho da alvenaria rebocada quando comparada a não rebocada.

30%

No ensaio de fluxo térmico da alvenaria 30Lã não rebocada a temperatura do ar máxima (46,1°C) no setor 1, foi registrada após as 3 horas iniciais, e nos setores 2 e 3 as 5 horas iniciais, atingindo o valor de 39,2°C e 33,2°C, respectivamente. Revelando atraso térmico de 2h. A amplitude térmica nos três setores foi de, respectivamente, 17,5°C, 10,2°C e 5,1°C, valores muito semelhantes aos da 10Lã e 20Lã.

Já quanto à alvenaria rebocada 30Lã, a temperatura do ar máxima foi atingida, no setor 1 (47,5°C) nas 3 horas iniciais, e às 5 horas iniciais no setor 2 (35,8°C) e no setor 3 (30,3°C). A amplitude térmica nos três setores foi de, respectivamente, 19,4°C, 7,3°C e 2,6°C. Diante dos resultados expostos, pode-se considerar que os mesmos foram iguais aos da 20Lã rebocada. O valor do atraso térmico foi 2h, assim como se repetiu nas alvenarias rebocadas anteriormente analisadas.

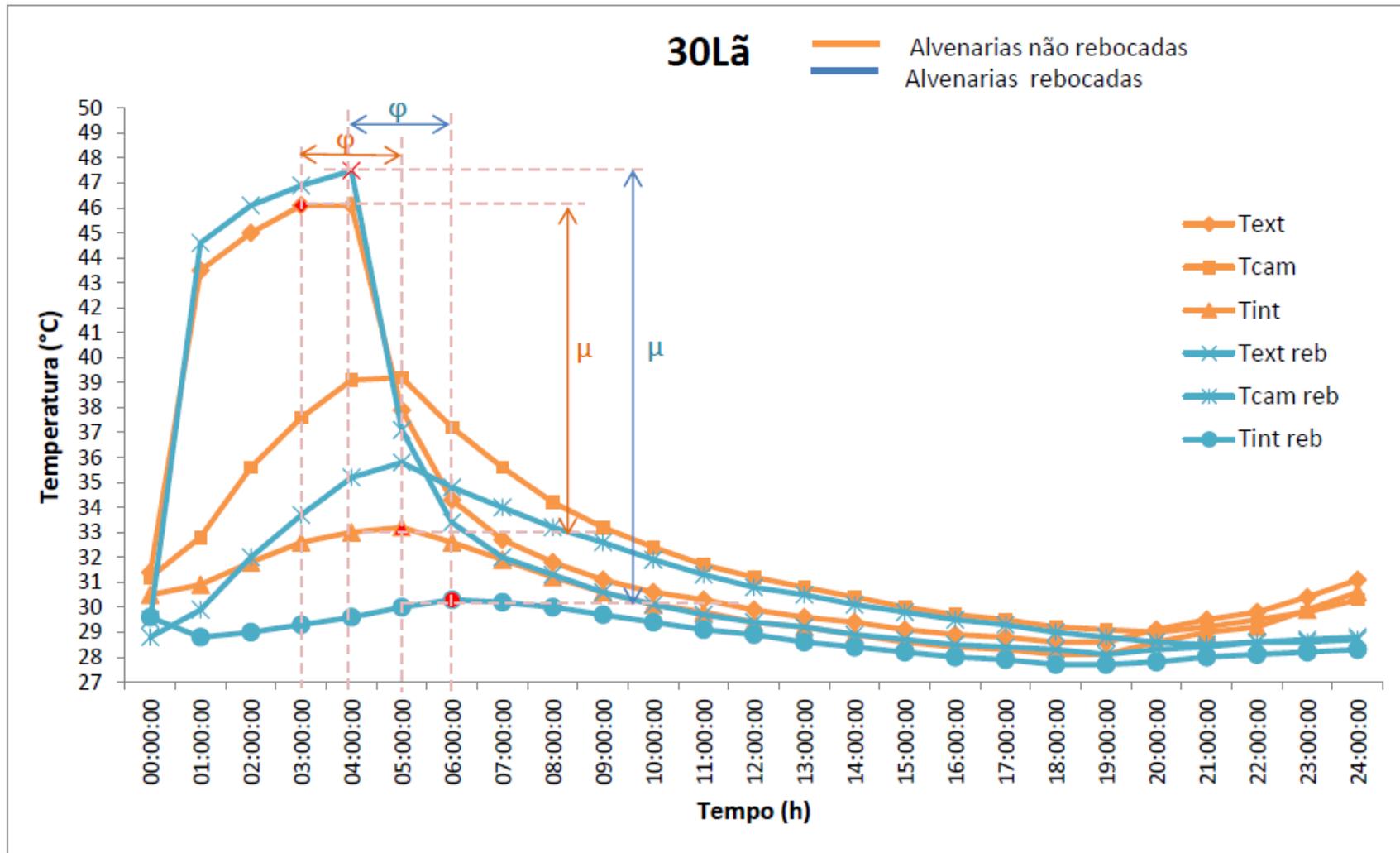
Na figura 73 e tabela 41, é possível visualizar os valores obtidos através do ensaio, como a temperatura máxima, amplitude térmica, o atraso e o amortecimento térmico.

Tabela 41: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, amortecimento e atraso térmico referente às alvenarias 30Lã rebocadas e não rebocadas.

Alvenarias	Text			Tcâmara			μ (%)	φ (h)	Tint			μ (%)	φ (h)
	Tmáx	Tmín	Ae	Tmáx	Tmín	AiCAM	CAM E EXT	CAM E EXT	Tmáx	Tmín	Ai	INTE EXT	INTE EXT
30Lã	46,1	28,6	17,5	39,2	29	10,2	42	2h	33,2	28,1	5,1	71	2h
30Lã rebocadas	47,5	28,1	19,4	35,8	28,5	7,3	62	2h	30,3	27,7	2,6	87	2h

Fonte: A autora.

Figura 73: Gráfico do ensaio de fluxo térmico da alvenaria 30Lã rebocada e não rebocada.



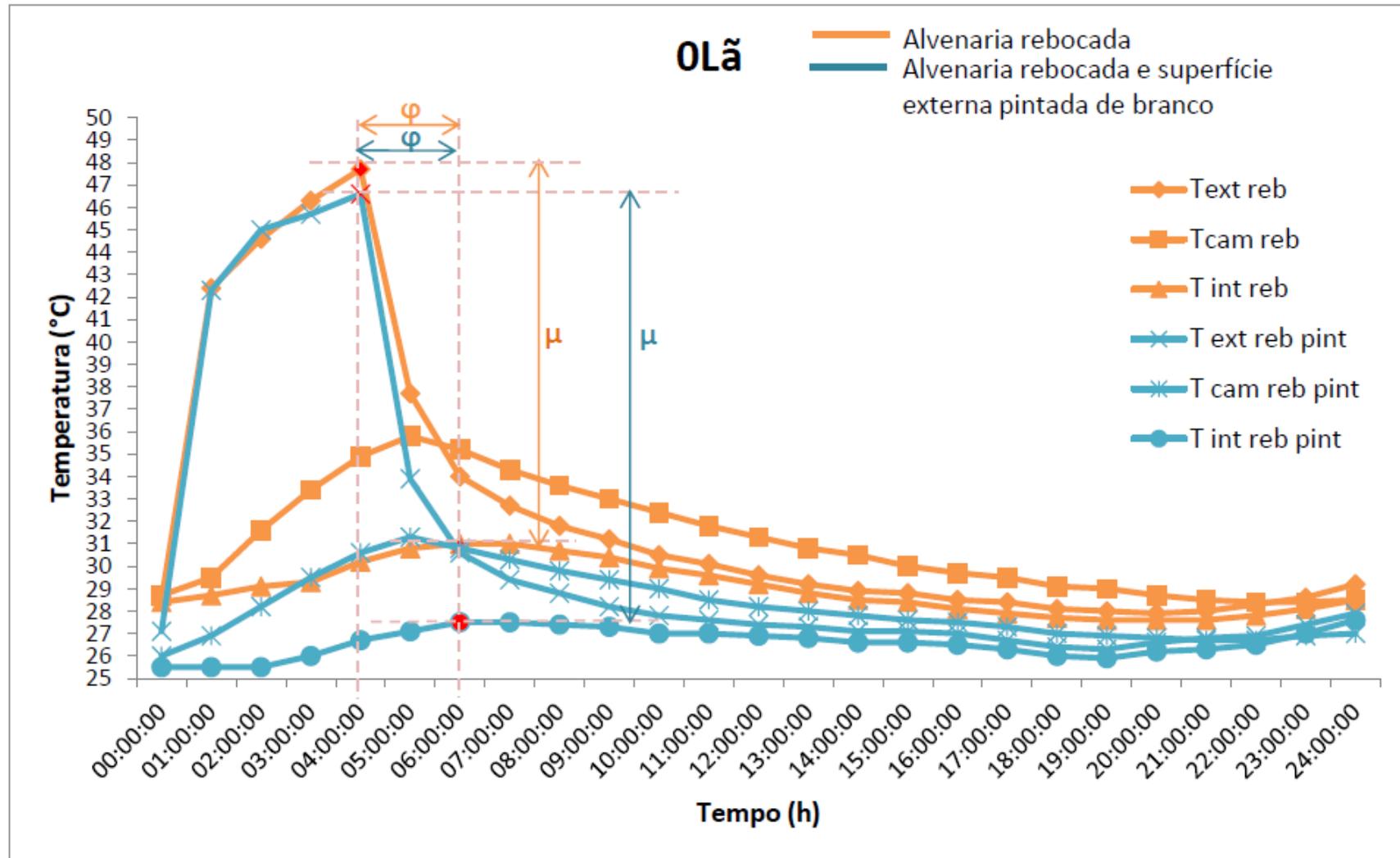
Fonte: A autora.

Os valores do amortecimento e atraso térmico da alvenaria não rebocada 30Lã, foram, respectivamente 71% e 2h, e da alvenaria rebocada, 87% e 2h; Estes valores de amortecimento térmico foram os maiores quando comparados as outras alvenarias. O que pode revelar, como já foi anteriormente mencionado, que é possível que a lã de rocha tende a melhorar o desempenho térmico do sistema construtivo.

Assim como, nota-se que no ensaio de fluxo térmico das alvenarias não rebocadas 20Lã e 30Lã, o atraso térmico foi maior do que o registrado na 0Lã e 10Lã; Tal fato pode ser em função da menor transmitância térmica (U) conforme maior teor de lã de rocha incorporado.

Conforme dito anteriormente na metodologia, foi realizado ensaio com a superfície externa da alvenaria 0Lã rebocada, pintada de branco, para investigar se a cor, e portanto a absorvância, tem influência direta no desempenho térmico do sistema construtivo, assim como relata a literatura pesquisada. Na figura 77 e na tabela 42 são os valores obtidos através do ensaio, como a temperatura máxima, amplitude térmica, o atraso e o amortecimento térmico, em comparação com a 0Lã rebocada.

Figura 74: Gráfico do ensaio de fluxo térmico da alvenaria OLã rebocada e OLã rebocada e pintada sua superfície externa pintada de branco.



Fonte: A autora.

Tabela 42: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, amortecimento e atraso térmico referente às alvenarias 30Lã rebocadas e não rebocadas.

Alvenarias	Text			Tcâmara			μ (%) CAM E EXT	φ (h) CAM E EXT	Tint			μ (%) INT E EXT	φ (h) INT E EXT
	Tmáx	Tmín	Ae	Tmáx	Tmín	Ai _{CAM}			Tmáx	Tmín	Ai		
0Lã rebocada	47,7	27,9	19,8	35,8	28,4	7,4	62	1h	31	27,6	3,4	83	2h
0Lã rebocada e pintada de	46,6	26,3	20,3	31,3	26	5,3	74	1h	27,6	25,5	2,1	90	2h

Fonte: A autora.

Inicialmente, um dado importante a ser analisado é a amplitude térmica da câmara de ar, que devido ao sentido do fluxo de calor, a primeira camada (externa) do bloco tem expressiva influência, e que como a análise feita é decorrente sobre a mesma alvenaria, porém não pintada (reboco aparente) e pintada sua superfície externa de branco, sob as mesmas condições de ensaio, ressalta-se que a amplitude térmica, no interior da câmara de ar, da alvenaria não pintada, foi 7,4 e da pintada foi 5,4, apresentando significativa redução; Pode notar-se também que o amortecimento térmico da alvenaria não pintada foi de 62%, enquanto na pintada foi de 74%, desta forma é comprovada a influência significativa e positiva da superfície externa com a cor branca no desempenho térmico do sistema construtivo alvenaria em blocos de concreto.

Através da tabela 43 são apresentados todos os dados relativos aos ensaios de fluxo térmico com todas as alvenarias, rebocadas e não rebocadas, bem como pintadas.

Tabela 43: Valores de temperatura mínima, temperatura máxima, e amplitudes térmicas internas e externas, e amortecimento térmico referente às alvenarias rebocadas e não rebocadas.

Alvenarias	Text			Tint			μ (%)	φ (h)
	Tmáx	Tmín	Ae	Tmáx	Tmín	Ai		
0Lã	48	28,6	19,4	34,3	28	6,3	68	1h
0Lã reb	47,7	27,9	19,8	31	27,6	3,4	83	2h
0Lã reb pint	46,6	26,3	20,3	27,6	25,5	2,1	90	2h
10Lã	44,9	28,8	16,1	33,4	28,3	5,1	68	1h
10Lã reb	42	28,3	13,7	29,7	27,6	2,1	85	2h
20Lã	44,8	28,5	16,3	34,5	28,6	5,9	64	2h
20Lã reb	46,4	28,4	18	30,2	27,7	2,5	86	2h
30Lã	46,1	28,6	17,5	33,2	28,1	5,1	71	2h
30Lã reb	47,5	28,1	19,4	30,3	27,7	2,6	87	2h

Fonte: A autora.

Pode ser ainda evidenciado, que o valor do amortecimento térmico de 90% da alvenaria pintada de branco, foi o maior registrado mediante todos os ensaios de fluxo térmico

realizados com as alvenarias, o que demonstrando a significativa influência da absorvância e do fator solar frente ao comportamento térmico da alvenaria.

4.3.2.1 Considerações finais

Como pode ser visualizado através das figuras 24,25,26 e 27 e tabela 7, é constatado que as alvenarias rebocadas apresentam características otimizadas quanto ao desempenho térmico, quando comparadas às não rebocadas. Bem como, mesmo que apresentando pequenas diferenças, nota-se que quanto maior o teor de lã de rocha incorporado, melhor comportamento térmico das alvenarias, o que já foi comprovado através das propriedades térmicas calculadas, fatores resultantes da influência física provocada pela incorporação da lã de rocha aos concretos dos blocos de concreto, alterando suas características de empacotamento, e dentre outras ocorrências, aumentando a sua porosidade.

Os maiores valores de amortecimento térmico (μ) encontrados entre as alvenarias não pintadas, tanto para as não rebocadas, quanto para as rebocadas, foram os referentes a 30Lã, cujos valores foram respectivamente 71% e 87%. Tal fato pode revelar que a lã de rocha quando incorporada ao concreto, tende a melhorar o desempenho térmico da alvenaria.

Assim como, nota-se que, no ensaio de fluxo térmico, para as alvenarias não rebocadas, o atraso térmico (θ) registrado, foi maior nas alvenarias 20Lã e 30Lã, quando comparados a 0Lã e 10Lã; Tal fato pode ser em função da menor transmitância térmica (U) conforme maior teor de lã de rocha incorporado.

Pode ser ainda evidenciado, que o valor do amortecimento térmico de 90% da alvenaria 0Lã rebocada com a superfície externa pintada com a cor branca, foi o maior registrado mediante todos os ensaios de fluxo térmico realizados com as alvenarias, o que demonstra a significativa influência da pintura, e portanto das propriedades absorvância e fator solar, frente ao comportamento térmico da alvenaria.

5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foram avaliados o desempenho térmico de alvenarias em blocos de concreto produzidos com lã de rocha, e a influência do acréscimo do reboco e da pintura externa. O método, realizado em quatro etapas, permitiu correlacionar estas intervenções no bloco de concreto e nas vedações, aos impactos causados sobre o desempenho térmico do sistema construtivo.

Os resultados indicam que conforme o aumento do teor de lã de rocha incorporado ao concreto que compõe o bloco de concreto, quanto as suas propriedades físicas e mecânicas, houve significativa redução da resistência à compressão, bem como houve aumento do índice de vazios e dos valores de absorção de água dos blocos, redução da densidade de massa aparente, e nota-se que em menor proporção a condutividade térmica teve seus valores reduzidos. Tais ocorrências são justificadas pela modificação que a lã de rocha causa às características de empacotamento da matriz cimentícia, com possível redução dos produtos hidratados, causando o aumento de sua porosidade.

Porém, apesar da adição da lã de rocha ter causado significativa influência nas propriedades físicas e mecânicas, devido ao aumento da porosidade da matriz cimentícia, estas alterações não foram suficientes para causar maiores alterações nas propriedades térmicas, o que pode ter sido causado pelo pequeno teor de lã de rocha incorporado em relação ao demais componentes. No entanto, apesar de apresentar pequenas diferenças é possível perceber que as propriedades térmicas do componente tendem a ter seus valores otimizados quando incorporada a lã de rocha, o que pode também ser refletido ao observar a alteração ocorrida nos valores de amortecimento e atraso térmico referentes ao comportamento térmico das alvenarias.

Quanto à influência do acréscimo da argamassa de revestimento às alvenarias, nota-se que houve significativa melhoria do desempenho térmico, quando comparada às alvenarias não rebocadas, em razão do aumento da massa térmica, refletindo na otimização das propriedades térmicas, a exemplo do aumento da resistência térmica, acarretando em menor ganho de calor pela vedação, de forma a proporcionar melhores condições de conforto térmico. O mesmo pode ser notado quando a alvenaria rebocada tem sua superfície externa pintada com a cor branca, causando a redução do fator de calor solar em torno de 75% quando comparado ao valor da alvenaria não rebocada e de aproximadamente 60% em relação à alvenaria rebocada não pintada, o que reflete na redução de ganhos de calor para o interior da

edificação. Portanto a pintura exerce impactos significativos e positivos no desempenho térmico das alvenarias.

Os resultados desta pesquisa indicam que para climas quentes, caso da ZB-8, para garantir melhores condições de conforto térmico, melhor que a alvenaria em blocos de concreto seja revestida, e ter a sua superfície externa pintada com cores claras.

É necessária a observação que diante dos resultados obtidos nesta pesquisa seria de valiosa importância que, estudos futuros incorporassem maior teor de lã de rocha aos concretos, o que mediante ao estudo do traço, podem vir a ser desenvolvidos blocos de elevado desempenho térmico.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Maior teor de lã de rocha incorporado aos blocos de concreto;
- Estudo/alteração do traço para a produção dos blocos;
- Estudo com a lã de rocha processada para incorporação aos blocos de concreto e análise do desempenho térmico da alvenaria;
- Medição in loco em edificações, localizadas em Salvador, cuja vedação é em alvenaria estrutural em blocos de concreto, para análise do seu desempenho térmico;
- Análise do desempenho acústico dos blocos de concreto com adição de lã de rocha;

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKUTSU, M.; VITTORINO, F. **A tendência atual dos métodos de avaliação do desempenho térmico e energético de edificações.** In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 1997, Salvador. Anais...Salvador,1997.

ASASUTJARIT, C.; HIRUNLABH, J.; KHEDARI, J.; CHAROENVAI, S.; ZEGHMATI, B.; CHEUL SHIN, U. **Development of coconut coirbased lightweight cement board,** Construction and Building Materials, v.21, p.277-288, 2007.

ASHRAE. ASHRAE 90.1-1989: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers 1989.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. Handbook of fundamentals. Atlanta, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118:** blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270:** parte 3: blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2009. 27p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA - ABCI. **Manual Técnico de Alvenaria.** São Paulo. ABCI. 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.. **Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades.** ABNT NBR15220-1. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações.** ABNT NBR15220-2. Rio de Janeiro. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** ABNT NBR 15220-3. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.. **Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais.** ABNT NBR 15575-1. Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.. **Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas.** ABNT NBR 15575-4. Rio de Janeiro. 2013.

Avanços em Tecnologia e Gestão de Edificações: anais. São Paulo: ANTAC, 2001.

BARBOSA, M. J.; LAMBERTS, R..; **Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares, aplicada a Londrina-PR.** ANTAC, Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 15-28, jan./mar. 2002.

BECKER, M.F.M. **Análise de desempenho térmico de uma habitação unifamiliar térrea** In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1993, São Paulo. Avanços em Tecnologia e Gestão de Edificações: anais. São Paulo: ANTAC, 1993. p. 825-834.

BITTENCOURT, L. **Meu, dele ou de outros? Especulações sobre o desejo no projeto arquitetônico**. In: Leitão, L.; AMORIM, L. (Org.). A casa nossa de cada dia. Recife: UFPE, 2007.

BITTENCOURT, L.; MONTEIRO, L.M.; YANNAS, S. **Arquitetura da Adaptação - Edifício Ambiental**. 1ª ed. Joana Carla Soares Gonçalves, Klaus Bode (Org.). São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Vários autores.

BUSTOS ROMERO, M. **Arquitetura Bioclimática do Espaço Público**. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 2001.

BUSTOS ROMERO, M. **Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano**. São Paulo: Projeto, 1988.

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

CARLO, J.C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-Residenciais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

CHENG, A.; WEI-TING, L.; HUANG, R. **Application of rock wool waste in cement-based composites**. *Materials and Design*. V.32, p. 636-642. 2011.

CHICHERCHIO, L. C.; FROTA, A. B. **Proposta para Abordagem e Organização do Estudo sobre Normalização Ligada ao Uso Racional de Energia e ao Conforto Térmico em Edificações**. In: Encontro nacional de normalização ligada ao uso racional de energia e ao conforto ambiental em edificações, 1991.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS. **Apresentação do programa ACV-M de blocos de concreto**. CBCS. 2012.

CORNER, V.; CORBELLA, O.; ROMERO, A. **Determinação do conforto térmico em habitações eficientes: sobre os softwares de simulação disponíveis para arquitetos**. Brasil - Fortaleza, CE. 2007. 10 p. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2007, Fortaleza, CE.

COSTA, E.B.C.; KUROKAWA, F.A.; JOHN, V.M.; **Modelagem simplificada para estimativa do potencial de penetração de partículas em substratos porosos**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 25-34, jan./mar. 2013.

COUTINHO, A.S. **Conforto e Insalubridade Térmica em Ambientes de Trabalho, 2ª edição** – Editora Universitária/UFPB/PPGEP. João Pessoa, PB, 2005.

Desempenho de edificações habitacionais: Guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575, 2013. Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC).—Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

DEVENTER, E. N.; **Climatic and Other Design Data for Evaluating Heating and Cooling Requirements of Buildings**. Pretoria, National Building Research Institute, (Research Report, 300). 1971.

DORNELLES, K. A. **Estudo de casos sobre a inércia térmica de edificações na cidade de São Carlos, SP.** 2004. 152 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

DORNELLES, K.A.; **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e pva.** Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós- Graduação da Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, São Paulo, 2008.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. *Thermal Inertia, Comfort and Energy Consumption in Buildings: A Case Study in São Paulo State – Brazil.* INTERNATIONAL JOURNAL FOR HOUSING SCIENCE AND ITS APPLICATIONS. Ed. Ural & Associates. Great Britain. 2004. VOL 28; PART 2, pages 153-162.

FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção.** Vol 1 e 2, São Paulo, LTC, 2000.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering.** New York: Mc Graw Hill Book Company, 1972.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. de; ASSIS, E. S. de. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 183- 200, jan./mar. 2017.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico.** 6. ed. São Paulo: Nobel, 2001.

FROTA, A.B.; SHIFFER, S.R. **Manual de Conforto Térmico.** São Paulo: Studio Nobel, 2003.

GIVONI, B. **Comfort, climate analysis and building design guideline.** *Energy and Buildings*, v. 18, p. 11-23, 1992.

GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1994.

GONÇALVES, J.C.S; **Edifício Ambiental.** 1ª ed. Joana Carla Soares Gonçalves, Klaus Bode (Org.). São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Vários autores.

GOULART, S. V. G. **Thermal inertia and natural ventilation** – optimisation of thermal storage as a cooling technique for residential buildings in Southern Brazil. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Energia) – Architectural Association School of Architecture, Londres, 2004.

GRABARZ, R., SOUZA, L., PARSEKIAN, G. A. “Análise teórica do comportamento térmico do bloco e da alvenaria estrutural cerâmica e de concreto em habitações de interesse social – HIS” In *III Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído*, pp 12, Campinas, 2013.

GRAF, H. F. **Transmitância Térmica & Energia Incorporada na Arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a Norma NBR 12721.** 167 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011

GOMES, E. G. S. **Desempenho Térmico de Alvenarias: Uma Alternativa com o uso de Blocos Eva.** 2013. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal da Paraíba (UFPB,PB), 2013.

GOULART, S. **Thermal inertia and natural ventilation: optimization of thermal**

storage as a cooling technique for residential buildings in Southern Brazil. 2004. 196f. Thesis (Doctor of Philosophy) Architectural Association School of Architecture Graduate School. London.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasil.

JOHANSEN, V.; ANDERSEN, P. J.; “**Particle Packing and Concrete Properties**” Materials Science of Concrete II, pp. 111-147, 1995.

KAPPAUN, K. **Avaliação do desempenho térmico em edificações de blocos estruturais cerâmicos e de blocos estruturais de concreto para a zona bioclimática 2 brasileira.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), 2012.

KUMAR, D.; CHANDRA, P.; Development of Thermal Conductivity Measurement Test Rig for Engineering Material. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v.8, n.2, 2013.

LAMBERTS, R. *et al.* (Ed.). **Casa eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico.** v.1. Florianópolis: UFSC/LabEEE. 2010.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura _3ª edição.** São Paulo: Editora: Eletrobras/Procel, 2014.

LEÃO, M. **Desempenho Térmico em Habitações Populares para Regiões de Clima Tropical: Estudo de Caso em Cuiabá-MT.** 2006. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Departamento de Física. Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2006.

Manual de Desempenho – Alvenaria com Blocos de Concreto. Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto- BlocoBrasil e Associação Cimento Portland, 2014.

MARQUES, T.H.T.; **Influência das propriedades térmicas da envolvente opaca no desempenho de habitações de interesse social em São Carlos, SP.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

KOENIGSBERGER, O. H.; MAHONEY, C.; EVANS, J. M. **Climate and House Design.** New York: United Nations, 1970.

MEDEIROS, M.G.; CASTILHO, A.B.; ROCHA, J.C.; OLIVEIRA, K.A.; **Caracterização e classificação do resíduo de lã de rocha para utilização em indústria cimenteira.** São Leopoldo, RS. 5º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. 2014.

MELO, Ana Paula. **Análise da influência da transmitância térmica no consumo de energia de edificações comerciais.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Copyright Editora Pini Ltda., 1994.

MENDES, N; WESTPHAL, F.S.; LAMBERTS, R.; NETO, J.A.B.C; **Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005.

MENEZES, M. S. **Avaliação do desempenho térmico de habitações sociais de**

Passo Fundo – RS. 2006. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia). Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

NERY, J. M. F. G; *et al.* **Primeira Aproximação para Estudo de Clima Urbano em Salvador.** In: IV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Salvador. Anais. FAUFBA/LACAM-ANTAC, p 124-128. 1997.

NERY, J. M. F. G; ANDRADE, T. C. Q. de. **Metodologia de Investigação dos Fatores Microclimáticos.** In: VI Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído / III Encontro Latino Americano sobre Conforto no Ambiente Construído / Seminário PLEA, 2001, São Pedro - SP. Anais do VI Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído / III Encontro Latino Americano sobre Conforto no Ambiente Construído / Seminário PLEA, 2001.

OKE, T. R. *Boundary Layer Climates.* 2ª ed. London: Routledge, 1978.

OLIVEIRA, W.L.; XAVIER, A.A.B.; SOUZA, P.M.S; CHAVES, R.C.F.; SILVA, L.O.; **Determinação do coeficiente de condutividade térmica de compósitos constituídos a partir da fibra de coco.** In Anais do VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Porto Alegre, 2015.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia Utilizada na Elaboração da Biblioteca de Materiais e Componentes Construtivos Brasileiros para Simulações no Visualdoe-3.1.** Relatório Interno – Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2003.

ORTENZI, Altibano (2007). **Glass Fiber in Polymeric or Cementitious Matrix and their Structural Use in Civil Construction – The State-of-Art.** Dissertation (M.Sc.). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2007.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural.** São Paulo: Pini, 2003.

RORIZ, M. **Arquivos climáticos de municípios brasileiros.** São Carlos: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2012a.

RORIZ, M. **Uma proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro.** São Carlos: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2012b.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A. **Habitações térreas e multipavimentos de interesse social: avaliação de desempenho térmico para tipologias com vedações em alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto.** Pesquisa em Arquitetura e Construção, UNICAMP. 2009

SALVADOR FILHO, J. A. A; **Blocos de concreto para alvenaria em construções industrializadas;** São Carlos, 2007.

SANSÃO, J. H.; AGUILAR, M. T.P; MARQUES, A. C.; **Análise ambiental de alvenarias em blocos: uma discussão baseada na avaliação do ciclo de vida e no desempenho térmico de envoltórias.** ENTAC, 2012.

SANTOS, J.C.P; KAPPAUN, K.K; MOHAMAD, G.; Vagheti, M.A.O.; Rizzatti, E. **Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para a Zona Bioclimática 2 brasileira.** Revista matéria, ISSN 1517-7076 artigo 11671, pp.1030-1047, 2015.

SILVA, C. O. **Manual de Desempenho – Alvenaria com Blocos de Concreto.** Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto – BlocoBrasil. São Paulo, 2014.

SIMPSON, J.R; McPHERSON, E.G. **The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona.** Energy and Buildings 25 (1997) 127-137.

SORGATO, M. J. et al. **Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública.** Universidade Federal de Santa Catarina. LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. 2012.

SOUZA, S.H.M. de. **Avaliação do desempenho térmico nos microclimas das praças: Piedade e Visconde de Cayrú.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) , Universidade Federal da Bahia (UFBA, BA), 2010.

THOMAZ, E., HELENE, P. R. S., “Qualidade no projeto e na execução de alvenaria estrutural e de alvenarias de vedação em edifícios”, *Boletim Técnico, Dept. Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: BT/PCC/252, 2000*, pp. 36.

RORIZ, M. **Conforto Térmico em Edificações: um Modelo Matemático e uma Aplicação.** Tese (Doutorado em Arquitetura). Universidade de Sao Paulo. Sao Paulo, 1996.

YANNAS, S., MALDONADO, E.; eds. PASCOOL handbook - Designing for summer comfort. Architectural Association Graduate School, Londres, 1995. Cap. 4: Thermal Inertia

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural.** São Paulo: Pini, 2003.

RAMOS, J. G. L.; **Efeito da inércia térmica em edifícios de escritórios : estudo de caso em Belo Horizonte, MG.** Dissertação (Mestrado) - 2010. Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

RIVERO, Roberto. *Arquitetura e Clima: Acondicionamento Térmico Natural.* 2a ed. rev. e ampl. – Porto Alegre: D. C. Luzzatto Editores, 1986. 204 p.

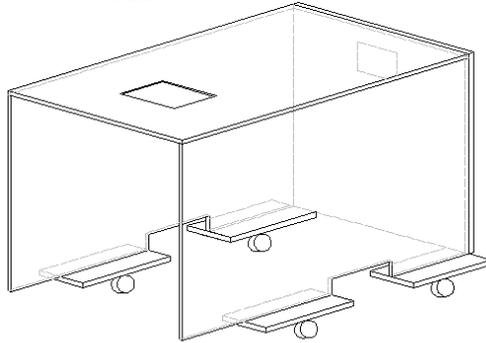
ROMAN, H. R.; MUTTI, C. N.; ARAÚJO, H. N. de. **Construindo em alvenaria estrutural.** Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1999.

VERSAGE, R.S. **Equações prescritivas para o regulamento de etiquetagem de eficiência energética de edificações residenciais.** Relatório técnico: RT_LabEEE – 2011/03. Florianópolis, jun. 2011.

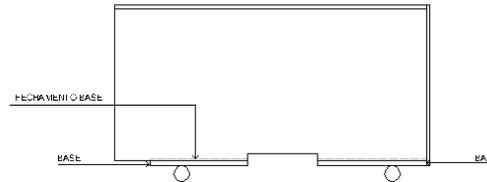
ANEXO

- MADEIRA UTILIZADA PARA FAZER A CAIXA : 1,5 CM
- MADEIRA UTILIZADA PARA FAZER A BASE: 2,0 CM

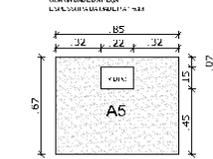
PERSPECTIVA CAIXA
SEM ESCALA



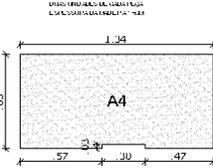
VISTA LATERAL CAIXA
SEM ESCALA



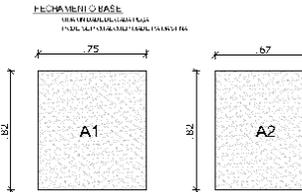
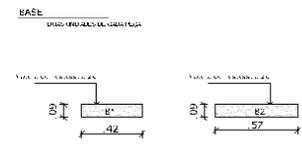
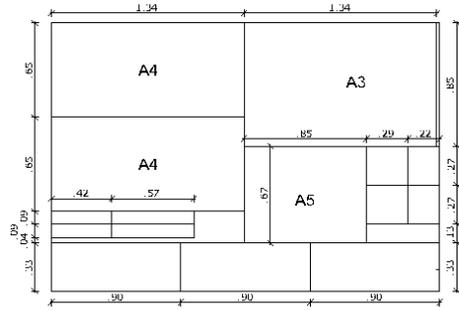
FURTO DA CAIXA



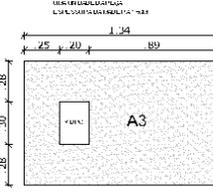
LATERAL CAIXA



PLANO DE CORTE MARCENARIA
SEM ESCALA



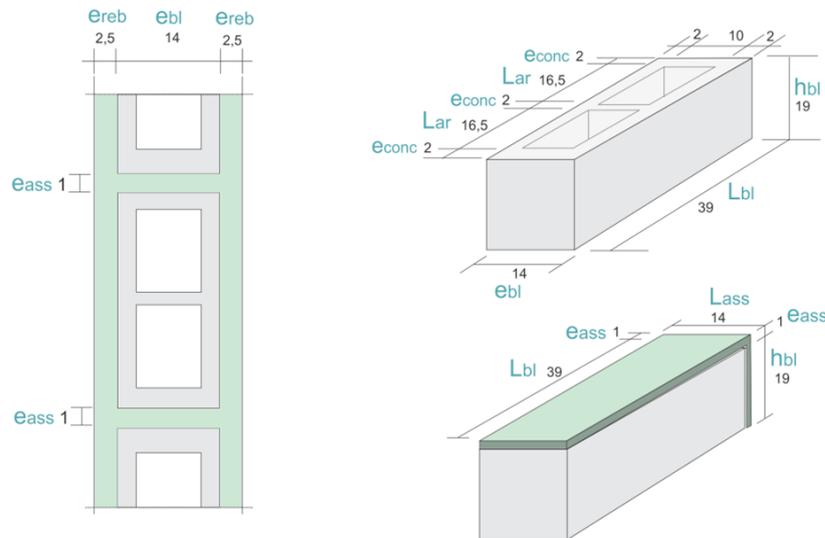
PARTE DE CIMA DA CAIXA



1.LEGENDA	3.QUADRO DE REVISÃO				CAMILA ROCHA	MESTRADO	
						CAIXA DE MADEIRA MESTRADO	R#: 01A
2.OBSERVAÇÃO	00	EMISSÃO		CAMILA	PROJUNO:RE - FOLIO 03		
	REVISÃO	DESCRIÇÃO	DATA	RESP.	PROJETIST: CAMILA ROCHA		
					DESENHO: CAMILA ROCHA		
					O PROFISSIONAL QUE EXECUTAR OS SERVIÇOS DEVERÁ CONFIRMAR MEDIDAS NO LOCAL		

CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DA ALVENARIA EM BLOCOS DE CONCRETO

Figura 75: Características físicas do bloco de concreto – rebocado e não rebocado.



Fonte: A autora.

ANEXO

ALVENARIAS NÃO REBOCADAS

Olã

Variáveis	Legenda	Valores	Unidades
econc	Espessura das paredes do bloco	0,02	m
λconc	Condutividade térmica do concreto	1,11	W/m.K
Cconc	Calor específico do concreto	1,00	kJ/kg.K
ρconc	Densidade de massa aparente do concreto	2215	kg/m ³
ebl	Espessura do bloco de concreto	0,14	m
hbl	Altura do bloco de concreto	0,19	m
Lbl	Comprimento do bloco de concreto	0,39	m
Lar	Comprimento da câmara de ar	0,165	m
Rar	Resistência térmica do ar	0,17	m ² .K/W
Rsint	Resistência térmica superficial interna	0,13	m ² .K/W
Rsext	Resistência térmica superficial externa	0,04	m ² .K/W
α	Absortância a radiação solar para superfícies externas. Utilizado o valor de α=0,65 para concreto aparente, conforme estabelecido pela	0,65	-

	NBR 15220(2003).		
--	------------------	--	--

a) Resistência Térmica da parede (R_t)

SEÇÃO A (concreto):

$$A_a = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{bl}}{\lambda_{conc}} = \frac{0,14}{1,83} = 0,0765 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

SEÇÃO B (concreto + câmara de ar + concreto):

$$A_b = L_{ar} \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 \text{ m}^2$$

$$R_b = \left(2 \times \frac{e_{conc}}{\lambda_{conc}} \right) + R_{ar} = 2x \frac{0,02}{1,83} + 0,17 = 0,1919 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Portanto, a resistência da parede será:

$$R_t = \frac{(3 \times A_a) + (2 \times A_b)}{\frac{(3 \times A_a)}{R_a} + \frac{(2 \times A_b)}{R_b}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{(3 \times 0,0038)}{0,0765} + \frac{(2 \times 0,03135)}{0,1919}} = 0,1557 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

b) Resistência Térmica total (RT):

$$RT = R_{sint} + R_{sext} + R_t = 0,13 + 0,04 + 0,1557 = 0,3257 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

c) Transmitância Térmica (U):

$$U = \frac{1}{RT} = \frac{1}{0,3257} = 3,07 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

d) Capacidade Térmica da Parede(C_t):

SEÇÃO 1 (concreto):

$$A_1 = 0,02 \times 0,19 = 0,0038$$

$$C_{t1} = (e \times \rho \times c)_{concreto} = 0,14 \times 2215 \times 1,00 = 310,1 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{k)}$$

SEÇÃO 2 (concreto+câmara de ar+concreto):

$$A_2 = 0,165 \times 0,19 = 0,03135$$

$$C_{t2} = 2x(e \times \rho \times c)_{concreto} + (e \times \rho \times c)_{ar} =$$

Desprezando a capacidade térmica da câmara de ar, tem-se:

$$= 2 \times (0,02 \times 2215 \times 1,00) = 88,6 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$$

Portanto, a capacidade térmica da parede será:

$$Ct = \frac{(3 \times A_1) + (2 \times A_2)}{\frac{(3 \times A_1)}{Ct_1} + \frac{(2 \times A_2)}{Ct_2}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{(3 \times 0,0038)}{310,1} + \frac{(2 \times 0,03135)}{88,6}} = \mathbf{99,5383 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

e) Fator Solar:

$$FSO = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FSO = 4 \times 3,07 \times 0,65 = \mathbf{7,98\%}$$

f) Atraso térmico:

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2}$$

$$Rt = 0,1557$$

$$R_{ext} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,02}{1,83} = 0,0109$$

$$Bo = Ct - Ct_{ext} = 99,53 - (0,02 \times 1,00 \times 2215) = 55,23$$

$$B1 = 0,226 \cdot \frac{Bo}{Rt} = 0,226 \cdot \frac{55,23}{0,1557} = 80,16$$

$$B2 = 0,205 \times \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{Rt} \right) \times \left(R_{ext} - \frac{Rt - R_{ext}}{10} \right) = 0,205 \times \left(\frac{(1,83 \times 2215 \times 1,0)_{ext}}{0,1557} \right) \times \left(0,0109 - \frac{0,1557 - 0,0109}{10} \right) = -18,9491$$

B2 é desconsiderado, pois resultou em valor negativo.

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2} = 1,382 \times 0,1557 \times 8,95 = \mathbf{1,93 \text{ horas}}$$

10Lã

Variáveis	Legenda	Valores	Unidades
econc	Espessura das paredes do bloco	0,02	m
λconc	Condutividade térmica do concreto	1,11	W/m.K
Cconc	Calor específico do concreto	1,00	kJ/kg.K
ρconc	Densidade de massa aparente do concreto	2151	kg/m ³
ebl	Espessura do bloco de concreto	0,14	m
hbl	Altura do bloco de concreto	0,19	m
Lbl	Comprimento do bloco de concreto	0,39	m
Lar	Comprimento da câmara de ar	0,165	m
Rar	Resistência térmica do ar	0,17	m ² .K/W
Rsint	Resistência térmica superficial interna	0,13	m ² .K/W

R_{sext}	Resistência térmica superficial externa	0,04	m ² .K/W
α	Absortância a radiação solar para superfícies externas. Utilizado o valor de α=0,65 para concreto aparente, conforme estabelecido pela NBR 15220(2003).	0,65	-

a) Resistência Térmica da parede (R_t)

SEÇÃO A (concreto):

$$A_a = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{bl}}{\lambda_{conc}} = \frac{0,14}{1,55} = 0,0903 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

SEÇÃO B (concreto + câmara de ar + concreto):

$$A_b = L_{ar} \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 \text{ m}^2$$

$$R_b = \left(2 \times \frac{e_{conc}}{\lambda_{conc}} \right) + R_{ar} = 2 \times \frac{0,02}{1,55} + 0,17 = 0,1958 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

Portanto, a resistência da parede será:

$$R_t = \frac{(3 \times A_a) + (2 \times A_b)}{\frac{(3 \times A_a)}{R_a} + \frac{(2 \times A_b)}{R_b}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{(3 \times 0,0038)}{0,0903} + \frac{(2 \times 0,03135)}{0,1958}} = 0,1659 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

b) Resistência Térmica total (RT):

$$RT = R_{sint} + R_{sext} + R_t = 0,13 + 0,04 + 0,1659 = 0,3359 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

c) Transmitância Térmica (U):

$$U = \frac{1}{RT} = \frac{1}{0,3359} = 2,98 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

d) Capacidade Térmica da Parede (C_T):

SEÇÃO 1 (concreto):

$$A_1 = 0,02 \times 0,19 = 0,0038$$

$$C_{t1} = (e \times \rho \times c)_{concreto} = 0,14 \times 2151 \times 1,00 = 301,1 \text{ kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{k})$$

SEÇÃO 2 (concreto+câmara de ar+concreto):

$$A_2 = 0,165 \times 0,19 = 0,03135$$

$$Ct_2 = 2x(e \times \rho \times c)_{\text{concreto}} + (e \times \rho \times c)_{\text{ar}}$$

Desprezando a capacidade térmica da câmara de ar, tem-se:

$$= 2x(0,02 \times 2151 \times 1,00) = 86,04 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$$

Portanto, a capacidade térmica da parede será:

$$Ct = \frac{(3 \times A_1) + (2 \times A_2)}{\frac{Ct_1}{301,1} + \frac{Ct_2}{86,04}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{(3 \times 0,0038)}{301,1} + \frac{(2 \times 0,03135)}{86,04}} = 96,66 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

e) **Fator Solar:**

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4 \times 2,98 \times 0,4 = 7,75\%$$

f) **Atraso térmico:**

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2}$$

$$Rt = 0,1659$$

$$R_{ext} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,02}{1,55} = 0,0129$$

$$Bo = Ct - Ct_{ext} = 96,66 - (0,02 \times 1,00 \times 2151) = 53,64$$

$$B1 = 0,226 \cdot \frac{Bo}{Rt} = 0,226 \cdot \frac{53,64}{0,1659} = 73,04$$

$$B2 = 0,205x \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{Rt} \right) x \left(R_{ext} - \frac{Rt - R_{ext}}{10} \right) = 0,205x \left(\frac{(1,55 \times 2151 \times 1,00)_{ext}}{0,1659} \right) x \left(0,0129 - \frac{0,1659 - 0,0129}{10} \right) = -9,9026$$

B2 é desconsiderado, pois resultou em valor negativo.

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2} = 1,382 \times 0,1659 \times 8,54 = 1,96 \text{ horas}$$

20Lã

Variáveis	Legenda	Valores	Unidades
econc	Espessura das paredes do bloco	0,02	m
λconc	Condutividade térmica do concreto	1,11	W/m.K
Cconc	Calor específico do concreto	1,00	kJ/kg.K
ρconc	Densidade de massa aparente do concreto	2049	kg/m ³
ebl	Espessura do bloco de concreto	0,14	m
hbl	Altura do bloco de concreto	0,19	m
Lbl	Comprimento do bloco de concreto	0,39	m

Lar	Comprimento da câmara de ar	0,165	m
Rar	Resistência térmica do ar	0,17	m ² .K/W
Rsint	Resistência térmica superficial interna	0,13	m ² .K/W
Rsext	Resistência térmica superficial externa	0,04	m ² .K/W
α	Absortância a radiação solar para superfícies externas. Utilizado o valor de α=0,65 para concreto aparente, conforme estabelecido pela NBR 15220(2003).	0,65	-

a) Resistência Térmica da parede (Rt)

SEÇÃO A (concreto):

$$Aa = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$Ra = \frac{e_{bl}}{\lambda_{conc}} = \frac{0,14}{1,11} = 0,1261 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

SEÇÃO B (concreto + câmara de ar + concreto):

$$Ab = L_{ar} \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 \text{ m}^2$$

$$Rb = \left(2 \times \frac{e_{conc}}{\lambda_{conc}} \right) + R_{ar} = 2 \times \frac{0,02}{1,11} + 0,17 = 0,2060 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Portanto, a resistência da parede será:

$$Rt = \frac{(3 \times Aa) + (2 \times Ab)}{\frac{(3 \times Aa)}{Ra} + \frac{(2 \times Ab)}{Rb}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{(3 \times 0,0038)}{0,1261} + \frac{(2 \times 0,03135)}{0,2060}} = 0,1877 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

b) Resistência Térmica total (RT):

$$RT = R_{sint} + R_{sext} + Rt = 0,13 + 0,04 + 0,1877 = 0,3577 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

c) Transmitância Térmica (U):

$$U = \frac{1}{RT} = \frac{1}{0,3359} = 2,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

d) Capacidade Térmica da Parede(Ct):

SEÇÃO 1 (concreto):

$$A_1 = 0,02 \times 0,19 = 0,0038$$

$$Ct_1 = (e \times \rho \times c)_{concreto} = 0,14 \times 2049 \times 1,00 = 286,86 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$$

SEÇÃO 2 (concreto+câmara de ar+concreto):

$$A_2 = 0,165 \times 0,19 = 0,03135$$

$$Ct_2 = 2x(e \times \rho \times c)_{\text{concreto}} + (e \times \rho \times c)_{\text{ar}}$$

Desprezando a capacidade térmica da câmara de ar, tem-se:

$$= 2x(0,02 \times 2049 \times 1,00) = 81,96 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$$

Portanto, a capacidade térmica da parede será:

$$Ct = \frac{(3 \times A_1) + (2 \times A_2)}{\frac{(3 \times A_1)}{Ct_1} + \frac{(2 \times A_2)}{Ct_2}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{(3 \times 0,0038)}{286,86} + \frac{(2 \times 0,03135)}{81,96}} = 92,08 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

e) **Fator Solar:**

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4 \times 2,80 \times 0,65 = 7,28\%$$

f) **Atraso térmico:**

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2}$$

$$Rt = 0,1877$$

$$R_{ext} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,02}{1,11} = 0,018$$

$$B_o = Ct - Ct_{ext} = 92,08 - (0,02 \times 1,00 \times 2049) = 51,10$$

$$B1 = 0,226 \cdot \frac{B_o}{Rt} = 0,226 \cdot \frac{51,10}{0,1877} = 61,51$$

$$B2 = 0,205x \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{Rt} \right) x \left(R_{ext} - \frac{Rt - R_{ext}}{10} \right) = 0,205x \left(\frac{(1,11 \times 2049 \times 1,00)_{ext}}{0,1877} \right) x \left(0,018 - \frac{0,1877 - 0,018}{10} \right) = 2,60$$

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2} = 1,382 \times 0,1877 \times 8,00 = 2,08 \text{ horas}$$

30Lã

Variáveis	Legenda	Valores	Unidades
econc	Espessura das paredes do bloco	0,02	m
λconc	Condutividade térmica do concreto	1,11	W/m.K
Cconc	Calor específico do concreto	1,00	kJ/kg.K
ρconc	Densidade de massa aparente do concreto	2025	kg/m ³
ebl	Espessura do bloco de concreto	0,14	m
hbl	Altura do bloco de concreto	0,19	m
Lbl	Comprimento do bloco de concreto	0,39	m
Lar	Comprimento da câmara de ar	0,165	m

R_{ar}	Resistência térmica do ar	0,17	m ² .K/W
R_{sint}	Resistência térmica superficial interna	0,13	m ² .K/W
R_{sext}	Resistência térmica superficial externa	0,04	m ² .K/W
α	Absortância a radiação solar para superfícies externas. Utilizado o valor de α=0,65 para concreto aparente, conforme estabelecido pela NBR 15220(2003).	0,65	-

a) Resistência Térmica da parede (R_t)

SEÇÃO A (concreto):

$$A_a = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{bl}}{\lambda_{conc}} = \frac{0,14}{1,06} = 0,1320 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

SEÇÃO B (concreto + câmara de ar + concreto):

$$A_b = L_{ar} \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 \text{ m}^2$$

$$R_b = \left(2 \times \frac{e_{conc}}{\lambda_{conc}} \right) + R_{ar} = 2 \times \frac{0,02}{1,06} + 0,17 = 0,2077 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

Portanto, a resistência da parede será:

$$R_t = \frac{(3 \times A_a) + (2 \times A_b)}{\frac{(3 \times A_a)}{R_a} + \frac{(2 \times A_b)}{R_b}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{(3 \times 0,0038)}{0,1320} + \frac{(2 \times 0,03135)}{0,2077}} = \mathbf{0,1909 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}}$$

b) Resistência Térmica total (RT):

$$RT = R_{sint} + R_{sext} + R_t = 0,13 + 0,04 + 0,1909 = \mathbf{0,3609 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}}$$

c) Transmitância Térmica (U):

$$U = \frac{1}{RT} = \frac{1}{0,3609} = \mathbf{2,77 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

d) Capacidade Térmica da Parede (C_T):

SEÇÃO 1 (concreto):

$$A_1 = 0,02 \times 0,19 = 0,0038$$

$$C_{t1} = (e \times \rho \times c)_{concreto} = 0,14 \times 2025 \times 1,00 = 283,36 \text{ kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{k})$$

SEÇÃO 2 (concreto+câmara de ar+concreto):

$$A_2 = 0,165 \times 0,19 = 0,03135$$

$$Ct_2 = 2x(e \times \rho \times c)_{\text{concreto}} + (e \times \rho \times c)_{\text{ar}}$$

Desprezando a capacidade térmica da câmara de ar, tem-se:

$$= 2x(0,02 \times 2025 \times 1,00) = 80,96 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$$

Portanto, a capacidade térmica da parede será:

$$Ct = \frac{(3 \times A_1) + (2 \times A_2)}{\frac{(3 \times A_1)}{Ct_1} + \frac{(2 \times A_2)}{Ct_2}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{(3 \times 0,0038)}{283,36} + \frac{(2 \times 0,03135)}{80,96}} = \mathbf{90,95 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

e) **Fator Solar:**

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4 \times 2,77 \times 0,65 = \mathbf{7,20\%}$$

f) **Atraso térmico:**

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2}$$

$$Rt = 0,1909$$

$$R_{ext} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,02}{1,06} = 0,0189$$

$$Bo = Ct - Ct_{ext} = 92,08 - (0,02 \times 1,00 \times 2049) = 50,47$$

$$B1 = 0,226 \cdot \frac{Bo}{Rt} = 0,226 \cdot \frac{50,47}{0,1909} = 59,75$$

$$B2 = 0,205 \times \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{Rt} \right) \times \left(R_{ext} - \frac{Rt - R_{ext}}{10} \right) = 0,205 \times \left(\frac{(1,06 \times 2025 \times 1,00)_{ext}}{0,1909} \right) \times \left(0,0189 - \frac{0,1909 - 0,0189}{10} \right) = 3,83$$

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2} = 1,382 \times 0,1909 \times 7,97 = \mathbf{2,10 \text{ horas}}$$

ALVENARIAS REBOCADAS

OLã

Tabela 44: Dados dos componentes construtivos para simulação – OLã.

Variáveis	Legenda	Valores	Unidades
econc	Espessura das paredes do bloco	0,02	m
λconc	Condutividade térmica do concreto	1,83	W/m.K
Cconc	Calor específico do concreto	1,00	kJ/kg.K
ρconc	Densidade de massa aparente do concreto	2215	kg/m ³
ereb	Espessura do reboco	0,025	m
λarg	Condutividade térmica da argamassa	1,15	W/m.K
Carg	Calor específico da argamassa	1,00	kJ/kg.K
ρarg	Densidade de massa aparente da argamassa	2000	kg/m ³
ebl	Espessura do bloco de concreto	0,14	m
hbl	Altura do bloco de concreto	0,19	m
Lbl	Comprimento do bloco de concreto	0,39	m
Lar	Comprimento da câmara de ar	0,165	m
Rar	Resistência térmica do ar	0,17	m ² .K/W
eass	Espessura da argamassa de assentamento	0,01	m
Lass	Largura da camada de argamassa de assentamento	0,14	m
Rsint	Resistência térmica superficial interna	0,13	m ² .K/W
Rsext	Resistência térmica superficial externa	0,04	m ² .K/W
α	Absortância a radiação solar para superfícies externas. Utilizado o valor de α=0,5 para reboco claro, conforme estabelecido pela NBR 15220(2003).	0,5	-

Fonte: A autora.

a) Resistência Térmica do Bloco de Concreto (Rbl)

SEÇÃO A (bloco):

$$Aa = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$Ra = \frac{e_{bl}}{\lambda_{conc}} = \frac{0,14}{1,83} = 0,0765 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

SEÇÃO B (bloco + câmara de ar + bloco):

$$Ab = Lar \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 \text{ m}^2$$

$$Rb = \left(2 \times \frac{e_{conc}}{\lambda_{conc}} \right) + R_{ar} = \frac{0,02}{1,83} + 0,17 = 0,192 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$Rbl = \frac{(3 \times Aa) + (2 \times Ab)}{\frac{(3 \times Aa)}{Ra} + \frac{(2 \times Ab)}{Rb}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{(3 \times 0,0038)}{0,076} + \frac{(2 \times 0,03135)}{0,192}} = 0,156 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

b) Resistência Térmica da Parede (Rt):**SEÇÃO 1 (reboco + argamassa + reboco):**

$$A_1 = (e_{ass} \times L_{bl}) + e_{ass} \times (e_{ass} + h_{bl}) = (0,02 \times 0,39) + 0,02 \times (0,02 + 0,19) = 0,012 \text{ m}^2$$

$$R_1 = \left(2 \times \frac{e_{reb}}{\lambda_{arg}}\right) + \left(\frac{L_{ass}}{\lambda_{arg}}\right) = \left(2 \times \frac{0,025}{1,15}\right) + \left(\frac{0,14}{1,15}\right) = 0,165 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

SEÇÃO 2 (reboco + bloco + reboco):

$$A_2 = (h_{bl} \times L_{bl}) = (0,19 \times 0,39) = 0,0741 \text{ m}^2$$

$$R_2 = \left(2 \times \frac{e_{reb}}{\lambda_{arg}}\right) + R_{bl} = \left(2 \times \frac{0,025}{1,15}\right) + 0,15573 = 0,199 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

Portanto, a resistência térmica total da parede será:

$$R_t = \frac{A_1 + A_2}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2}} = \frac{0,012 + 0,0741}{\frac{0,012}{0,165} + \frac{0,0741}{0,199}} = 0,1937 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

c) Resistência Térmica Final (Rf):

$$R_f = R_{sint} + R_{sext} + R_t = 0,3636 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

d) Transmitância Térmica (U):

$$U = \frac{1}{R_f} = \frac{1}{0,3636} = 2,74 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

e) Capacidade Térmica da Parede (Ct):**SEÇÃO 1 (reboco + argamassa + reboco):**

$$A_1 = 0,02 \times 0,39 + 0,02 \times (0,02 + 0,19) = 0,012 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} Ct_1 &= 2x(e_{reb} \times \rho_{arg} \times c_{arg}) + (e_{arg} \times \rho_{arg} \times c_{arg}) \\ &= 2x(0,025 \times 2000 \times 1) + (0,02 \times 2000 \times 1) = 380 \text{ kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{k}) \end{aligned}$$

SEÇÃO 2 (reboco + bloco + reboco):

$$A_2 = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} Ct_2 &= (2 \times e_{reb} \times \rho_{arg} \times C_{arg}) + (e_{bl} \times \rho_{conc} \times C_{conc}) \\ &= (2 \times 0,025 \times 2000 \times 1) + (0,14 \times 2215 \times 1) = 410,1 \text{ kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

SEÇÃO 3 (reboco + bloco + câmara de ar + bloco + reboco):

$$A_3 = L_{ar} \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 \text{ m}^2$$

$$Ct_3 = (2 \times e_{conc} \times \rho_{conc} \times C_{conc}) + (2 \times e_{reb} \times \rho_{arg} \times C_{arg})$$

$$= (2 \times 0,02 \times 2215 \times 1) + (2 \times 0,025 \times 2000 \times 1) = 188,6 \text{ kJ}/(m^2 \cdot K)$$

$$Ct = \frac{A_1 + (3 \times A_2) + (2 \times A_3)}{\frac{A_1}{Ct_1} + \frac{(3 \times A_2)}{Ct_2} + \frac{(2 \times A_3)}{Ct_3}} = \frac{0,012 + (3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{0,012}{380} + \frac{(3 \times 0,0038)}{410,1} + \frac{(2 \times 0,03135)}{188,6}}$$

$$= 219,74 \text{ kJ}/(m^2 \cdot K)$$

f) **Fator Solar(Cr):**

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4 \cdot 2,74 \cdot 0,5 = 5,48\%$$

g) **Atraso térmico:**

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2}$$

$$Rt = 0,1936$$

$$R_{ext} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,025}{1,15} = 0,0217$$

$$Bo = Ct - C_{text} = 169,74$$

$$B1 = 0,226 \cdot \frac{Bo}{Rt} = 0,226 \cdot \frac{169,74}{0,1936} = 198,08$$

$$B2 = 0,205x \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{Rt} \right) x \left(R_{ext} - \frac{Rt - R_{ext}}{10} \right) = 0,205x \left(\frac{(1,15 \times 2000 \times 1,0)_{ext}}{0,1936} \right) x \left(0,0217 - \frac{0,1936 - 0,0217}{10} \right) = 11,07$$

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2} = 1,382 \times 0,1936 \times 14,46 = 3,87 \text{ horas}$$

10Lã

Tabela 45: Dados dos componentes construtivos para simulação – 10Lã.

Variáveis	Legenda	Valores	Unidades
econc	Espessura das paredes do bloco	0,02	m
λconc	Condutividade térmica do concreto	1,83	W/m.K
Cconc	Calor específico do concreto	1,00	kJ/kg.K
ρconc	Densidade de massa aparente do concreto	2151	kg/m ³
ereb	Espessura do reboco	0,025	m
λarg	Condutividade térmica da argamassa	1,15	W/m.K
Carg	Calor específico da argamassa	1,00	kJ/kg.K
ρarg	Densidade de massa aparente da argamassa	2000	kg/m ³
ebl	Espessura do bloco de concreto	0,14	m
hbl	Altura do bloco de concreto	0,19	m

Lbl	Comprimento do bloco de concreto	0,39	m
Lar	Comprimento da câmara de ar	0,165	m
Rar	Resistência térmica do ar	0,17	m ² .K/W
eass	Espessura da argamassa de assentamento	0,01	m
Lass	Largura da camada de argamassa de assentamento	0,14	m
Rsint	Resistência térmica superficial interna	0,13	m ² .K/W
Rsext	Resistência térmica superficial externa	0,04	m ² .K/W
α	Absortância a radiação solar para superfícies externas. Utilizado o valor de α=0,5 para reboco claro, conforme estabelecido pela NBR 15220(2003).	0,5	-

Fonte: A autora.

a) Resistência Térmica do Bloco de Concreto (Rbl)

SEÇÃO A (bloco):

$$Aa = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$Ra = \frac{e_{bl}}{\lambda_{conc}} = \frac{0,14}{1,55} = 0,090 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

SEÇÃO B (bloco + câmara de ar + bloco):

$$Ab = L_{ar} \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 \text{ m}^2$$

$$Rb = \left(2 \times \frac{e_{conc}}{\lambda_{conc}} \right) + R_{ar} = \frac{0,02}{1,55} + 0,17 = 0,196 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$Rbl = \frac{(3 \times Aa) + (2 \times Ab)}{\frac{3 \times Aa}{Ra} + \frac{2 \times Ab}{Rb}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{3 \times 0,0038}{0,090} + \frac{2 \times 0,03135}{0,196}} = 0,166 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

b) Resistência Térmica da Parede (Rt):

SEÇÃO 1 (reboco + argamassa + reboco):

$$A_1 = (e_{ass} \times L_{bl}) + e_{ass} \times (e_{ass} + h_{bl}) = (0,02 \times 0,39) + 0,02 \times (0,02 + 0,19) = 0,012 \text{ m}^2$$

$$R_1 = \left(2 \times \frac{e_{reb}}{\lambda_{arg}} \right) + \left(\frac{L_{ass}}{\lambda_{arg}} \right) = \left(2 \times \frac{0,025}{1,15} \right) + \left(\frac{0,14}{1,15} \right) = 0,165 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

SEÇÃO 2 (reboco + bloco + reboco):

$$A_2 = (h_{bl} \times L_{bl}) = (0,19 \times 0,39) = 0,0741 \text{ m}^2$$

$$R_2 = \left(2 \times \frac{e_{reb}}{\lambda_{arg}} \right) + Rbl = \left(2 \times \frac{0,025}{1,15} \right) + 0,166 = 0,209 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Portanto, a resistência térmica total da parede será:

$$R_t = \frac{A_1 + A_2}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2}} = \frac{0,012 + 0,0741}{\frac{0,012}{0,165} + \frac{0,0741}{0,209}} = 0,2019(m^2 \cdot K)/W$$

c) **Resistência Térmica Final (Rf):**

$$R_f = R_{sint} + R_{sext} + R_t = 0,3719 (m^2 \cdot K)/W$$

d) **Transmitância Térmica (U):**

$$U = \frac{1}{R_f} = \frac{1}{0,3719} = 2,69 W/(m^2 \cdot K)$$

e) **Capacidade Térmica da Parede(Ct):**

SEÇÃO 1 (reboco + argamassa + reboco):

$$A_1 = 0,02 \times 0,39 + 0,02 \times (0,02 + 0,19) = 0,012 m^2$$

$$\begin{aligned} Ct_1 &= 2x(e_{reb} \times \rho_{arg} \times c_{arg}) + (e_{arg} \times \rho_{arg} \times c_{arg}) \\ &= 2x(0,025 \times 2000 \times 1) + (0,02 \times 2000 \times 1) = 380 kJ/(m^2 \cdot k) \end{aligned}$$

SEÇÃO 2 (reboco + bloco + reboco):

$$A_2 = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 m^2$$

$$\begin{aligned} Ct_2 &= (2 \times e_{reb} \times \rho_{arg} \times C_{arg}) + (e_{bl} \times \rho_{conc} \times C_{conc}) \\ &= (2 \times 0,025 \times 2000 \times 1) + (0,14 \times 2151 \times 1) = 401,14 kJ/(m^2 \cdot K) \end{aligned}$$

SEÇÃO 3 (reboco + bloco + câmara de ar + bloco + reboco):

$$A_3 = L_{ar} \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 m^2$$

$$\begin{aligned} Ct_3 &= (2 \times e_{conc} \times \rho_{conc} \times C_{conc}) + (2 \times e_{reb} \times \rho_{arg} \times C_{arg}) \\ &= (2 \times 0,02 \times 2151 \times 1) + (2 \times 0,025 \times 2000 \times 1) = 186,04 kJ/(m^2 \cdot K) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ct &= \frac{A_1 + (3 \times A_2) + (2 \times A_3)}{\frac{A_1}{Ct_1} + \frac{(3 \times A_2)}{Ct_2} + \frac{(2 \times A_3)}{Ct_3}} = \frac{0,012 + (3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{0,012}{380} + \frac{(3 \times 0,0038)}{401,14} + \frac{(2 \times 0,03135)}{186,04}} \\ &= 216,86 kJ/(m^2 \cdot K) \end{aligned}$$

f) **Fator Solar(Ct):**

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4 \cdot 2,69 \cdot 0,5 = 5,38\%$$

g) **Atraso térmico:**

$$\omega = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2}$$

$$R_t = 0,2019$$

$$R_{ext} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,025}{1,15} = 0,0217$$

$$B_o = C_t - C_{text} = 166,86$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_o}{R_t} = 0,226 \cdot \frac{166,86}{0,2019} = 186,76$$

$$B_2 = 0,205x \left(\frac{(\lambda, \rho, c)_{ext}}{R_t} \right) x \left(R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right) = 0,205x \left(\frac{(1,15 x 2000 x 1,0)_{ext}}{0,2019} \right) x \left(0,0217 - \frac{0,2019 - 0,0217}{10} \right) = 8,68$$

$$\omega = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2} = 1,382 x 0,2019 x 13,98 = \mathbf{3,90 \text{ horas}}$$

20Lã

Tabela 46: Dados dos componentes construtivos para simulação – 20Lã.

Variáveis	Legenda	Valores	Unidades
econc	Espessura das paredes do bloco	0,02	m
λconc	Condutividade térmica do concreto	1,83	W/m.K
Cconc	Calor específico do concreto	1,00	kJ/kg.K
ρconc	Densidade de massa aparente do concreto	2049	kg/m ³
ereb	Espessura do reboco	0,025	m
λarg	Condutividade térmica da argamassa	1,15	W/m.K
Carg	Calor específico da argamassa	1,00	kJ/kg.K
ρarg	Densidade de massa aparente da argamassa	2000	kg/m ³
ebl	Espessura do bloco de concreto	0,14	m
hbl	Altura do bloco de concreto	0,19	m
Lbl	Comprimento do bloco de concreto	0,39	m
Lar	Comprimento da câmara de ar	0,165	m
Rar	Resistência térmica do ar	0,17	m ² .K/W
eass	Espessura da argamassa de assentamento	0,01	m
Lass	Largura da camada de argamassa de assentamento	0,14	m
Rsint	Resistência térmica superficial interna	0,13	m ² .K/W
Rsext	Resistência térmica superficial externa	0,04	m ² .K/W
α	Absortância a radiação solar para superfícies externas. Utilizado o valor de α=0,5 para reboco claro, conforme estabelecido pela NBR 15220(2003).	0,5	-

Fonte: A autora.

a) Resistência Térmica do Bloco de Concreto (Rbl)

SEÇÃO A (bloco):

$$Aa = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{bl}}{\lambda_{conc}} = \frac{0,14}{1,11} = 0,1261 (m^2 \cdot K)/W$$

SEÇÃO B (bloco + câmara de ar + bloco):

$$A_b = L_{ar} \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 m^2$$

$$R_b = \left(2 \times \frac{e_{conc}}{\lambda_{conc}}\right) + R_{ar} = \frac{0,02}{1,11} + 0,17 = 0,206(m^2 \cdot K)/W$$

$$R_{bl} = \frac{(3 \times A_a) + (2 \times A_b)}{\frac{3 \times A_a}{R_a} + \frac{2 \times A_b}{R_b}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{3 \times 0,0038}{0,1261} + \frac{2 \times 0,03135}{0,206}} = 0,1877 (m^2 \cdot K)/W$$

b) Resistência Térmica da Parede (Rt):

SEÇÃO 1 (reboco + argamassa + reboco):

$$A_1 = (e_{ass} \times L_{bl}) + e_{ass} \times (e_{ass} + h_{bl}) = (0,02 \times 0,39) + 0,02 \times (0,02 + 0,19) = 0,012 m^2$$

$$R_1 = \left(2 \times \frac{e_{reb}}{\lambda_{arg}}\right) + \left(\frac{L_{ass}}{\lambda_{arg}}\right) = \left(2 \times \frac{0,025}{1,15}\right) + \left(\frac{0,14}{1,15}\right) = 0,165(m^2 \cdot K)/W$$

SEÇÃO 2 (reboco + bloco + reboco):

$$A_2 = (h_{bl} \times L_{bl}) = (0,19 \times 0,39) = 0,0741 m^2$$

$$R_2 = \left(2 \times \frac{e_{reb}}{\lambda_{arg}}\right) + R_{bl} = \left(2 \times \frac{0,025}{1,15}\right) + 0,1877 = 0,231 (m^2 \cdot K)/W$$

Portanto, a resistência térmica total da parede será:

$$R_t = \frac{A_1 + A_2}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2}} = \frac{0,012 + 0,0741}{\frac{0,012}{0,165} + \frac{0,0741}{0,231}} = \mathbf{0,219(m^2 \cdot K)/W}$$

c) Resistência Térmica Final (Rf):

$$R_f = R_{sint} + R_{sext} + R_t = \mathbf{0,3890 (m^2 \cdot K)/W}$$

d) Transmitância Térmica (U):

$$U = \frac{1}{R_f} = \frac{1}{0,3890} = \mathbf{2,57 W/(m^2 \cdot K)}$$

e) Capacidade Térmica da Parede(Cr):

SEÇÃO 1 (reboco + argamassa + reboco):

$$A_1 = 0,02 \times 0,39 + 0,02 \times (0,02 + 0,19) = 0,012 m^2$$

$$Ct_1 = 2x(e_{reb} \times \rho_{arg} \times c_{arg}) + (e_{arg} \times \rho_{arg} \times c_{arg})$$

$$= 2x(0,025 \times 2000 \times 1) + (0,02 \times 2000 \times 1) = 380 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$$

SEÇÃO 2 (reboco + bloco + reboco):

$$A_2 = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$Ct_2 = (2 \times e_{reb} \times \rho_{arg} \times C_{arg}) + (e_{bl} \times \rho_{conc} \times C_{conc}) \\ = (2 \times 0,025 \times 2000 \times 1) + (0,14 \times 2049 \times 1) = 386,86 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

SEÇÃO 3 (reboco + bloco + câmara de ar + bloco + reboco):

$$A_3 = L_{ar} \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 \text{ m}^2$$

$$Ct_3 = (2 \times e_{conc} \times \rho_{conc} \times C_{conc}) + (2 \times e_{reb} \times \rho_{arg} \times C_{arg}) \\ = (2 \times 0,02 \times 2049 \times 1) + (2 \times 0,025 \times 2000 \times 1) = 181,96 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$Ct = \frac{A_1 + (3 \times A_2) + (2 \times A_3)}{\frac{A_1}{Ct_1} + \frac{(3 \times A_2)}{Ct_2} + \frac{(2 \times A_3)}{Ct_3}} = \frac{0,012 + (3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{0,012}{380} + \frac{(3 \times 0,0038)}{386,86} + \frac{(2 \times 0,03135)}{181,96}} \\ = 212,26 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

f) Fator Solar(Cr):

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4 \cdot 2,57 \cdot 0,5 = 5,14\%$$

g) Atraso térmico:

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2}$$

$$Rt = 0,2190$$

$$R_{ext} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,025}{1,15} = 0,0217$$

$$Bo = Ct - Ct_{ext} = 162,26$$

$$B1 = 0,226 \cdot \frac{Bo}{Rt} = 0,226 \cdot \frac{162,26}{0,2190} = 167,43$$

$$B2 = 0,205x \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{Rt} \right) x \left(R_{ext} - \frac{Rt - R_{ext}}{10} \right) = 0,205x \left(\frac{(1,15 \times 2000 \times 1,0)_{ext}}{0,2190} \right) x \left(0,0217 - \frac{0,2190 - 0,0217}{10} \right) = 4,329$$

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2} = 1,382 \times 0,2190 \times 13,10 = 3,97 \text{ horas}$$

30Lã

Tabela 47: Dados dos componentes construtivos para simulação – 30Lã.

Variáveis	Legenda	Valores	Unidades
econc	Espessura das paredes do bloco	0,02	m
λconc	Condutividade térmica do concreto	1,83	W/m.K
Cconc	Calor específico do concreto	1,00	kJ/kg.K
ρconc	Densidade de massa aparente do concreto	2025	kg/m ³
ereb	Espessura do reboco	0,025	m
λarg	Condutividade térmica da argamassa	1,15	W/m.K
Carg	Calor específico da argamassa	1,00	kJ/kg.K
ρarg	Densidade de massa aparente da argamassa	2000	kg/m ³
ebl	Espessura do bloco de concreto	0,14	m
hbl	Altura do bloco de concreto	0,19	m
Lbl	Comprimento do bloco de concreto	0,39	m
Lar	Comprimento da câmara de ar	0,165	m
Rar	Resistência térmica do ar	0,17	m ² .K/W
eass	Espessura da argamassa de assentamento	0,01	m
Lass	Largura da camada de argamassa de assentamento	0,14	m
Rsint	Resistência térmica superficial interna	0,13	m ² .K/W
Rsext	Resistência térmica superficial externa	0,04	m ² .K/W
α	Absortância a radiação solar para superfícies externas. Utilizado o valor de α=0,5 para reboco claro, conforme estabelecido pela NBR 15220(2003).	0,5	-

Fonte: A autora.

a) Resistência Térmica do Bloco de Concreto (Rbl)

SEÇÃO A (bloco):

$$Aa = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$Ra = \frac{e_{bl}}{\lambda_{conc}} = \frac{0,14}{1,06} = 0,1320 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

SEÇÃO B (bloco + câmara de ar + bloco):

$$Ab = Lar \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 \text{ m}^2$$

$$Rb = \left(2 \times \frac{e_{conc}}{\lambda_{conc}} \right) + R_{ar} = \frac{0,02}{1,06} + 0,17 = 0,207 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$Rbl = \frac{(3 \times Aa) + (2 \times Ab)}{\frac{(3 \times Aa)}{Ra} + \frac{(2 \times Ab)}{Rb}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{(3 \times 0,0038)}{0,132} + \frac{(2 \times 0,03135)}{0,207}} = 0,1909 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

b) Resistência Térmica da Parede (Rt):

SEÇÃO 1 (reboco + argamassa + reboco):

$$A_1 = (e_{ass} \times L_{bl}) + e_{ass} \times (e_{ass} + h_{bl}) = (0,02 \times 0,39) + 0,02 \times (0,02 + 0,19) = 0,012 \text{ m}^2$$

$$R_1 = \left(2 \times \frac{e_{reb}}{\lambda_{arg}}\right) + \left(\frac{L_{ass}}{\lambda_{arg}}\right) = \left(2 \times \frac{0,025}{1,15}\right) + \left(\frac{0,14}{1,15}\right) = 0,165 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

SEÇÃO 2 (reboco + bloco + reboco):

$$A_2 = (h_{bl} \times L_{bl}) = (0,19 \times 0,39) = 0,0741 \text{ m}^2$$

$$R_2 = \left(2 \times \frac{e_{reb}}{\lambda_{arg}}\right) + R_{bl} = \left(2 \times \frac{0,025}{1,15}\right) + 0,1909 = 0,234 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

Portanto, a resistência térmica total da parede será:

$$R_t = \frac{A_1 + A_2}{\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2}} = \frac{0,012 + 0,0741}{\frac{0,012}{0,165} + \frac{0,0741}{0,234}} = 0,2215 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

c) Resistência Térmica Final (Rf):

$$R_f = R_{sint} + R_{sext} + R_t = 0,3915 (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

d) Transmitância Térmica (U):

$$U = \frac{1}{R_f} = \frac{1}{0,3915} = 2,55 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

e) Capacidade Térmica da Parede (Ct):

SEÇÃO 1 (reboco + argamassa + reboco):

$$A_1 = 0,02 \times 0,39 + 0,02 \times (0,02 + 0,19) = 0,012 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} Ct_1 &= 2x(e_{reb} \times \rho_{arg} \times c_{arg}) + (e_{arg} \times \rho_{arg} \times c_{arg}) \\ &= 2x(0,025 \times 2000 \times 1) + (0,02 \times 2000 \times 1) = 380 \text{ kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

SEÇÃO 2 (reboco + bloco + reboco):

$$A_2 = e_{conc} \times h_{bl} = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} Ct_2 &= (2 \times e_{reb} \times \rho_{arg} \times C_{arg}) + (e_{bl} \times \rho_{conc} \times C_{conc}) \\ &= (2 \times 0,025 \times 2000 \times 1) + (0,14 \times 2025 \times 1) = 383,5 \text{ kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

SEÇÃO 3 (reboco + bloco + câmara de ar + bloco + reboco):

$$A_3 = L_{ar} \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} Ct_3 &= (2 \times e_{conc} \times \rho_{conc} \times C_{conc}) + (2 \times e_{reb} \times \rho_{arg} \times C_{arg}) \\ &= (2 \times 0,02 \times 2025 \times 1) + (2 \times 0,025 \times 2000 \times 1) = 181 \text{ kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

$$Ct = \frac{A_1 + (3 \times A_2) + (2 \times A_3)}{\frac{A_1}{Ct_1} + \frac{(3 \times A_2)}{Ct_2} + \frac{(2 \times A_3)}{Ct_3}} = \frac{0,012 + (3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{0,012}{380} + \frac{(3 \times 0,0038)}{383,5} + \frac{(2 \times 0,03135)}{181}}$$

$$= 211,17 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

f) **Fator Solar(Cr):**

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4,255 \cdot 0,5 = 5,10\%$$

g) **Atraso térmico:**

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2}$$

$$Rt = 0,2215$$

$$R_{ext} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,025}{1,15} = 0,0217$$

$$Bo = Ct - Ct_{ext} = 161,17$$

$$B1 = 0,226 \cdot \frac{Bo}{Rt} = 0,226 \cdot \frac{161,17}{0,2215} = 164,48$$

$$B2 = 0,205x \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{Rt} \right) x \left(R_{ext} - \frac{Rt - R_{ext}}{10} \right) = 0,205x \left(\frac{(1,15 \times 2000 \times 1,0)_{ext}}{0,2215} \right) x \left(0,0217 - \frac{0,2215 - 0,0217}{10} \right) = 3,76$$

$$\omega = 1,382 \cdot Rt \cdot \sqrt{B1 + B2} = 1,382 \times 0,2215 \times 12,97 = 3,96 \text{ horas}$$

Para a alvenaria 0Lã pintada de branco

Fator Solar(Cr):

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4,275 \cdot 0,2 = 2,02\%$$

Para a alvenaria 10Lã pintada de branco

Fator Solar(Cr):

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4,215 \cdot 0,2 = 2,15\%$$

Para a alvenaria 20Lã pintada de branco

Fator Solar(Cr):

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4 \cdot 2,056 \cdot 0,2 = 2,05\%$$

Para a alvenaria 30Lã pintada de branco**Fator Solar(Cr):**

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4 \cdot 2,04 \cdot 0,2 = 2,04\%$$

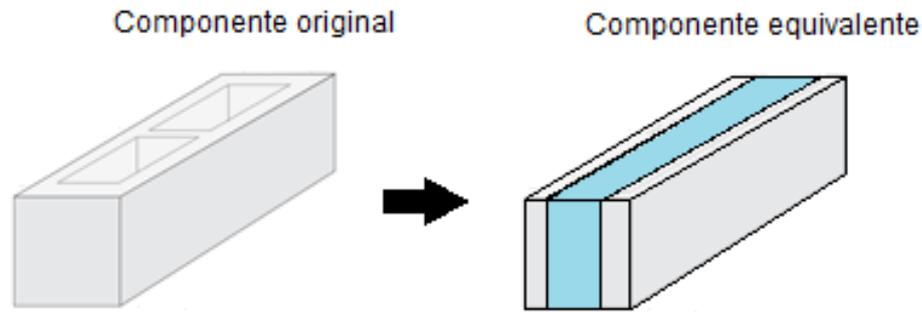
DADOS PARA A SIMULAÇÃO

Para a inserção dos dados referentes à espessura e densidade dos blocos de concreto, é necessário um cálculo de equivalência, pois o software Energy Plus apenas considera componentes formados por camadas homogêneas, dispostas transversalmente ao fluxo de calor, não sendo possível a definição de uma geometria complexa, tal como a de blocos vazados. Dessa forma, o cálculo de equivalência dará como resposta valores de espessura e densidade de um componente “fictício” de forma que ele responda termicamente da mesma maneira que o bloco vazado de concreto (ORDENES et al., 2003).

CÁLCULO DA ESPESSURA E DENSIDADE EQUIVALENTES

Ordenes (2003) recomenda que, para o cálculo da espessura e densidade equivalentes do bloco cerâmico, a solução é substituir a parte de tijolo e argamassa de assentamento por uma única camada de ar entre duas camadas de material cerâmico com espessura e densidade tais que proporcionem as mesmas propriedades térmicas da parede. Para o bloco de concreto o processo é feito de forma análoga, como é apresentado na figura 77.

Figura 76: Alternativa de solução para um componente equivalente, no caso do bloco de concreto.



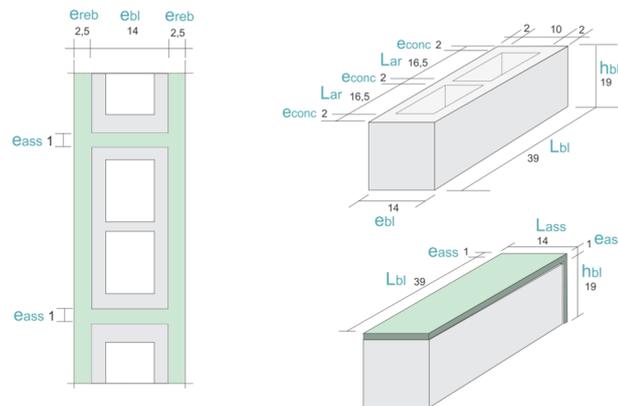
Fonte: A autora.

O cálculo da densidade e espessura equivalentes ocorreu da seguinte forma:

Cálculo de R_{ar-eq} :

Cálculo utilizado para determinar a resistência do ar utilizada nos cálculos de equivalência. O cálculo é o mesmo utilizado para a determinação da resistência térmica do bloco de concreto (R_{bl}), só que nesse caso o valor da resistência do ar (R_{ar}) é levado a 0, para que assim possa ser determinada a influência, em termos de valores, dessa resistência na resistência térmica total do bloco de concreto (R_{bl}).

Figura 77: Bloco de concreto 14 cm.



Fonte: A autora.

$$Ab = L_{ar} \times h_{bl} = 0,165 \times 0,19 = 0,03135 \text{ m}^2$$

$$R_{b-eq} = \left(2 \times \frac{e_{conc}}{\lambda_{conc}} \right) + R_{ar} = \frac{0,02}{1,75} + 0,00 = 0,02286 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$R_{bl-eq} = \frac{(3 \times Aa) + (2 \times Ab)}{\frac{(3 \times Aa)}{Ra} + \frac{(2 \times Ab)}{R_{b-eq}}} = \frac{(3 \times 0,0038) + (2 \times 0,03135)}{\frac{(3 \times 0,0038)}{0,08} + \frac{(2 \times 0,03135)}{0,02286}} = 0,02568 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Portanto, para determinar R_{ar-eq} , basta subtrair do R_{bl} original, calculado com a resistência do ar de $0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, o R_{bl-eq} calculado considerando essa resistência nula. Logo:

$$R_{ar-eq} = R_{bl} - R_{bl-eq} = 0,15847 - 0,02568 = 0,13279(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

a) Espessura equivalente:

$$e_{eq} = \frac{Rt - \left(2 \times \frac{e_{reb}}{\lambda_{arg}}\right) - R_{ar-eq}}{\frac{2}{\lambda_{conc}}} = \frac{0,19869 - \left(2 \times \frac{0,025}{1,15}\right) - 0,13279}{\frac{2}{1,75}} = 0,01962 \text{ m}$$

b) Densidade equivalente:

$$\rho_{eq} = \frac{Ct - (2 \times e_{reb} \times \rho_{arg} \times C_{arg})}{2 \times e_{eq} \times C_{conc}} = \frac{221,257 - (2 \times 0,025 \times 2000 \times 1)}{2 \times 0,01962 \times 1} = 3090,27 \text{ kg}/\text{m}^3$$

ENSAIO FLUXO TÉRMICO: TEMPERATURAS REGISTRADAS EM CADA SETOR

Tabela 48: Registros temperaturas ensaio de fluxo térmico 0Lã.

		0%					
		SETOR 1 : EXTERNA		SETOR 2: CÂMARA DE AR		SETOR 3 : INTERNA	
		NÃO REBOCADA	REBOCADA	NÃO REBOCADA	REBOCADA	NÃO REBOCADA	REBOCADA
Tempo(h)							
FONTE DE CALOR LIGADA	00:00:00	30,6	28,5	30,1	28,7	30,9	28,4
	01:00:00	44,5	42,4	34	29,5	31,4	28,7
	02:00:00	46,1	44,6	36,6	31,6	33	29,1
	03:00:00	47,5	46,3	38,6	33,4	33,6	29,3
	04:00:00	48	47,7	39,9	34,9	34	30,2
	05:00:00	38,9	37,7	39,9	35,8	34,3	30,8
	06:00:00	35,3	34	38,3	35,2	33,8	31
	07:00:00	33,6	32,7	36,6	34,3	32,6	31
	08:00:00	32,6	31,8	35,3	33,6	31,9	30,7
	09:00:00	31,9	31,2	34,1	33	31,2	30,4
	10:00:00	31,3	30,5	33,2	32,4	30,5	29,9
	11:00:00	30,8	30,1	32,4	31,8	30,1	29,6
	12:00:00	30,4	29,6	31,7	31,3	29,7	29,2
	13:00:00	30	29,2	31,1	30,8	29,4	28,8
	14:00:00	29,7	28,9	30,6	30,5	29	28,5
	15:00:00	29,4	28,8	30,3	30	28,7	28,4
	16:00:00	29,1	28,5	30	29,7	28,5	28,1
	17:00:00	28,9	28,4	29,6	29,5	28,2	27,9
	18:00:00	28,6	28,1	29,3	29,1	28	27,7
	19:00:00	28,6	28	29,1	29	28	27,6
	20:00:00	29,1	27,9	29,1	28,7	28,6	27,6
	21:00:00	29,8	28	29,2	28,5	29,4	27,6
	22:00:00	30,5	28,3	29,7	28,4	30,1	27,8
	23:00:00	31,1	28,6	30,1	28,4	30,7	28,1
	24:00:00	31,6	29,2	31	28,5	31,2	28,5
	Tmáx	48	47,7	39,9	35,8	34,3	31
	Tmín	28,6	27,9	29,1	28,4	28	27,6

Fonte: A autora.

Tabela 49: Registros temperaturas ensaio de fluxo térmico 10Lã.

		10%					
		SETOR 1 : EXTERNA		SETOR 2: CÂMARA DE AR		SETOR 3 : INTERNA	
		NÃO REBOCAD	REBOCADA	NÃO REBOCAD	REBOCADA	NÃO REBOCAD	REBOCADA
FONTE DE CALOR LIGADA	Tempo (h)						
	00:00:00	31,8	28,8	32,9	28,2	32,8	27,6
	01:00:00	43,9	38,7	34,8	29,8	33	27,6
	02:00:00	44,7	39,5	36,9	31,4	33,1	27,7
	03:00:00	44,9	40,8	38,6	32,9	33,2	28,4
	04:00:00	44,7	42	39,9	34,1	33,4	29,2
	05:00:00	36,4	35,9	39,2	34,8	33	29,5
	06:00:00	33,3	32,5	37	34,1	32,4	29,7
	07:00:00	32,1	31,4	35,4	33,2	31,8	29,7
	08:00:00	31,2	30,8	34,1	32,5	31	29,5
	09:00:00	30,6	30,3	33,1	31,8	30,5	29,2
	10:00:00	30,3	29,9	32,2	31,3	30	28,9
	11:00:00	29,9	29,6	31,5	30,8	29,5	28,8
	12:00:00	29,6	29,3	31	30,5	29,2	28,5
	13:00:00	29,4	29,1	30,5	30,1	29	28,3
	14:00:00	29,1	28,8	30,1	29,8	28,7	28,1
	15:00:00	28,9	28,6	29,9	29,5	28,5	28
	16:00:00	28,8	28,4	29,6	29,3	28,3	27,9
	17:00:00	29	28,4	29,4	29,1	28,4	27,8
	18:00:00	29,4	28,3	29,4	28,9	28,8	27,7
	19:00:00	29,8	28,3	29,6	28,7	29,4	27,7
	20:00:00	30,4	28,3	29,9	28,5	29,9	27,9
	21:00:00	31,1	28,5	30,4	28,5	30,6	28
	22:00:00	31,6	28,7	30,9	28,5	31,1	28,2
	23:00:00	32,1	29,1	31,4	28,8	31,6	28,7
24:00:00	32,4	29,2	31,9	29	32,2	28,7	
	Tmáx	44,9	42	39,9	34,8	33,4	29,7
	Tmín	28,8	28,3	29,4	28,2	28,3	27,6

Fonte: A autora.

Tabela 50: Registros temperaturas ensaio de fluxo térmico 20Lã.

		20%					
		SETOR 1 : EXTERNA		SETOR 2: CÂMARA DE AR		SETOR 3 : INTERNA	
		NÃO REBOCADA	REBOCADA	NÃO REBOCADA	REBOCADA	NÃO REBOCADA	REBOCADA
Tempo (h)							
FONTE DE CALOR LIGADA	00:00:00	30,9	29,8	30	29,1	31,1	28,7
	01:00:00	38,4	43,2	31,5	30,5	31,5	28,4
	02:00:00	44,4	44,9	34,2	32,2	32,4	28,4
	03:00:00	44,8	46,2	36,7	33,7	34	29,2
	04:00:00	44,6	46,4	38,4	35,1	34,3	29,6
	05:00:00	44,4	36,6	39,5	35,6	34,5	29,9
	06:00:00	35,6	33,1	38,3	34,7	34,1	30,2
	07:00:00	33,5	32	36,7	33,9	33,3	30,2
	08:00:00	32,4	31,4	35,3	33,1	32,4	30
	09:00:00	31,6	30,8	34,1	32,5	31,6	29,7
	10:00:00	31	30,4	33,1	31,9	31,1	29,3
	11:00:00	30,5	30	32,4	31,4	30,6	29,1
	12:00:00	30,2	29,7	31,7	31	30,3	28,8
	13:00:00	29,8	29,5	31,3	30,6	29,9	28,6
	14:00:00	29,5	29,3	30,8	30,2	29,6	28,5
	15:00:00	29,3	29,1	30,5	30	29,4	28,3
	16:00:00	29	29	30,1	29,7	29,1	28,2
	17:00:00	28,7	28,8	29,8	29,5	28,9	28
	18:00:00	28,5	28,6	29,6	29,3	28,7	27,9
	19:00:00	28,5	28,6	29,3	29,1	28,6	27,8
	20:00:00	28,5	28,5	29,2	29	28,7	27,7
	21:00:00	29	28,4	29,3	28,8	29,3	27,7
	22:00:00	29,7	28,4	29,5	28,8	30,2	27,7
	23:00:00	30,2	28,4	29,9	28,6	30,6	27,9
	24:00:00	30,7	28,4	30,3	28,5	31,1	27,9
		Tmáx	44,8	46,4	39,5	35,6	34,5
	Tmín	28,5	28,4	29,2	28,5	28,6	27,7

Fonte: A autora.

Tabela 51: Registros temperaturas ensaio de fluxo térmico 30Lã.

		30%					
		SETOR 1 : EXTERNA NÃO		SETOR 2: CÂMARA DE AR NÃO		SETOR 3 : INTERNA NÃO	
		REBOCADA	REBOCADA	REBOCADA	REBOCADA	REBOCADA	REBOCADA
Tempo(h)							
FONTE DE CALOR LIGADA	00:00:00	31,4	29,5	31,2	28,8	30,5	29,6
	01:00:00	43,5	44,6	32,8	29,9	30,9	28,8
	02:00:00	45	46,1	35,6	32	31,8	29
	03:00:00	46,1	46,9	37,6	33,7	32,6	29,3
	04:00:00	46,1	47,5	39,1	35,2	33	29,6
	05:00:00	37,9	37,1	39,2	35,8	33,2	30
	06:00:00	34,3	33,4	37,2	34,8	32,6	30,3
	07:00:00	32,7	32	35,6	34	31,9	30,2
	08:00:00	31,8	31,3	34,2	33,2	31,2	30
	09:00:00	31,1	30,6	33,2	32,6	30,6	29,7
	10:00:00	30,6	30,1	32,4	31,9	30,1	29,4
	11:00:00	30,3	29,7	31,7	31,3	29,8	29,1
	12:00:00	29,9	29,4	31,2	30,8	29,4	28,9
	13:00:00	29,6	29,2	30,8	30,5	29,2	28,6
	14:00:00	29,4	28,9	30,4	30,1	28,9	28,4
	15:00:00	29,1	28,7	30	29,8	28,6	28,2
	16:00:00	28,9	28,5	29,7	29,5	28,4	28
	17:00:00	28,8	28,4	29,5	29,3	28,3	27,9
	18:00:00	28,6	28,3	29,2	29	28,1	27,7
	19:00:00	28,6	28,1	29,1	28,8	28,1	27,7
	20:00:00	29,1	28,3	29	28,6	28,6	27,8
	21:00:00	29,5	28,4	29,2	28,5	29	28
	22:00:00	29,8	28,6	29,5	28,6	29,2	28,1
	23:00:00	30,4	28,7	29,8	28,6	29,9	28,2
24:00:00	31,1	28,8	30,3	28,7	30,6	28,3	
	Tmáx	46,1	47,5	39,2	35,8	33,2	30,3
	Tmín	28,6	28,1	29	28,5	28,1	27,7

Fonte: A autora.