



COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DAS PLACAS DE SILICATO DE CÁLCIO

Henrique de Lacerda Tinoco

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial

ramo Engenharia Mecânica

Setembro de 2020



COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DAS PLACAS DE SILICATO DE CÁLCIO

Henrique de Lacerda Tinoco

Dissertação apresentada à:

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

Para Obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Industrial

Área de especialização de Engenharia Mecânica

No âmbito da Dupla Diplomação com a

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientador (IPB):

Prof. Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita

Coorientador (UTFPR):

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves

Setembro de 2020

Dedico este trabalho primeiramente a Deus e
à minha esposa que esteve sempre comigo.

Agradecimentos

Este trabalho não seria possível concluir sem expressar minha gratidão por todos aqueles que me deram forças para continuar a batalhar por esta grande conquista.

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por ser o meu guia e iluminar os meus caminhos todos os dias. Nesse período de dupla diplomação, Ele me mostrou e me permitiu sentir o agir de Sua mão sobre a minha vida tanto nos momentos de grande alegria quanto em meio às adversidades.

À minha esposa, Raiane, por estar sempre ao meu lado, incondicionalmente. Que em todos os momentos difíceis, me fez acreditar que eu chegaria ao fim deste sonho desafiador que tanto me fez crescer e aprender. Sou grato por cada gesto de carinho, cada sorriso e por saber me fazer feliz.

Aos meus pais, Gerson e Cristina, que batalharam a vida toda para garantir uma educação de qualidade aos filhos. Por todo amor, carinho e apoio que me deram até hoje. Muito obrigado por acreditarem em mim e não medir esforços para me motivar a realizar os sonhos. Aos meus irmãos Daniel e Lucas por todo companheirismo e parceria nos momentos difíceis e também de alegria.

Um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Luís Mesquita que sempre esteve presente para garantir o bom desempenho deste trabalho. Sou muito grato pelos ensinamentos e pela seriedade que demonstrou durante todo período de supervisão desta dissertação, por acompanhar de perto e estar sempre disposto a me auxiliar em todas as vezes que busquei ajuda. Muito obrigado pela paciência, dedicação e incentivo.

Ao meu coorientador Prof. Thiago Antonini, que desde o princípio ajudou a escolher a proposta de trabalhar em conjunto com o IPB e se dispôs a acompanhar e auxiliar esta dissertação. O meu muito obrigado pelos ensinamentos e conselhos.

Meu agradecimento a comunidade UTFPR a qual foi extremamente importante para minha formação e possibilitou a conquista de uma dupla diplomação prestando os auxílios necessários durante a graduação e mestrado no IPB.

A toda comunidade do IPB, que acolheu os alunos da UTFPR, por proporcionar uma experiência bastante enriquecedora, tanto na área da educação quanto culturalmente em Bragança.

À engenheira Luísa Barreira, responsável pelo laboratório de ensaios e resistência dos materiais, o meu muito obrigado pelo auxílio e simpatia.

Um agradecimento especial a Promat International pelos materiais cedidos ao IPB para realização desta pesquisa e outras demais que estão a correr em outras linhas de pesquisa.

Também devo dar meus agradecimentos ao Brigantia Ecopark e Centro de Investigação da Montanha pela disponibilidade dos laboratórios e atenção dos seguranças e equipa durante o período que estava a realizar minha pesquisa experimental. A todos os demais que estiveram comigo e me ajudaram no desenvolvimento desta pesquisa, o meu muito obrigado.

Resumo

O método mais comum para obter a resistência ao fogo requerida regulamentarmente é através de sistemas passivos de proteção contra incêndio, nos quais os materiais mais comuns utilizados são os revestimentos intumescentes, placas de gesso e de silicato de cálcio e argamassas projetáveis. A aplicação destes materiais retarda o aumento da temperatura na superfície dos elementos estruturais em situações de incêndios, preservando as propriedades mecânicas da estrutura para evitar o colapso total durante a operação de resgate e o combate contra as chamas. Conhecer mais precisamente os efeitos que o envelhecimento causa na condutividade térmica e resistência mecânica dos materiais de proteção ao fogo é um requisito fundamental para desenvolver um projeto de engenharia de segurança contra incêndio. Assim, uma investigação com dois tipos de placas de silicato de cálcio usados como proteção passiva foi realizada para demonstrar como a condutividade térmica e resistência mecânica são afetadas quando o material de proteção é submetido a diferentes condições climáticas ao longo do tempo. É apresentada uma abordagem experimental para a determinação da condutividade térmica e resistência mecânica de placas de silicato de cálcio distintas utilizadas como material de proteção passiva contra incêndio. Foram utilizados as metodologias e os seus resultados para a determinação das propriedades: (i) Placa Quente Protegida; (ii) Flexão em Três Pontos. Os resultados obtidos revelam que a resistência mecânica se deteriora com o passar do tempo e a condutividade térmica aumenta, processo resultante do procedimento experimental de envelhecimento em uma câmara climática.

Palavras Chave: Condutividade térmica, materiais de proteção passiva, placas de gesso e de silicato de cálcio, Placa Quente Protegida, Flexão em Três Pontos.

Abstract

The most common method for obtaining the required fire resistance is through passive fire protection materials, in which the most common used materials are intumescent coatings, gypsum and calcium silicate boards and projectable mortars. The application of these materials delays the surface temperature rise of the structural elements in fire situations, preserving the mechanical properties of the structure to prevent total collapse during grouting and firefighting. Knowing more precisely the effects that aging has on the thermal conductivity and mechanical strength of fire protection materials is a fundamental requirement for developing a fire safety engineering project. Thus, an investigation with two types of calcium silicate plates used as passive protection was performed to demonstrate how thermal conductivity and mechanical resistance are affected when the protective material is subjected to different weather conditions over time. An experimental approach for the determination of thermal conductivity and mechanical resistance of distinct calcium silicate plates used as passive fire protection material is presented. The methodologies and their results were used to determine the properties: (i) Guarded Hot Plate (GHP); (ii) Three Point Bending (TPB). The results show that the mechanical resistance deteriorates over time and the thermal conductivity increases, a process resulting from the experimental aging procedure in a climate chamber.

Keywords: Thermal conductivity; Fire protection materials; gypsum and calcium silicate boards; Guarded Hot Plate (GHP); Three Point Bending (TPB).

Índice

| | |
|--|-------------|
| AGRADECIMENTOS | IV |
| RESUMO..... | VI |
| ABSTRACT..... | VII |
| ÍNDICE..... | VIII |
| LISTA DE FIGURAS..... | X |
| LISTA DE TABELAS | XIII |
| NOMENCLATURA | XIV |
| CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO (INTRODUÇÃO)..... | 1 |
| 1.2 OBJETIVO DA INVESTIGAÇÃO | 3 |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE | 3 |
| CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE | 5 |
| 2.1 INTRODUÇÃO..... | 5 |
| 2.2 MATERIAIS DE ISOLAMENTO DO TIPO PLACA | 7 |
| 2.3 ENVELHECIMENTO E CONDICIONAMENTO CLIMÁTICO | 19 |
| 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 22 |
| CAPÍTULO 3: TESTES EXPERIMENTAIS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS..... | 24 |
| 3.1 INTRODUÇÃO..... | 24 |
| 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS | 25 |
| 3.2.1 <i>Preparação dos corpos de prova</i> | 25 |
| 3.2.2 <i>Envelhecimento Artificial</i> | 26 |
| 3.3 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA ATRAVÉS DO EQUIPAMENTO DE PLACA QUENTE PROTEGIDA | 34 |
| 3.3.1 <i>Princípio de Funcionamento</i> | 34 |
| 3.3.2 <i>Procedimentos</i> | 36 |
| 3.3.3 <i>Execução do experimento</i> | 38 |
| 3.4 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS ATRAVÉS DO ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS | 42 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 3.4.1 | <i>Procedimentos</i> | 42 |
| 3.4.2 | <i>Execução do Experimento</i> | 45 |
| CAPÍTULO 4: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | | 56 |
| 4.1 | CONCLUSÕES GERAIS..... | 56 |
| 4.2 | LINHAS FUTURAS DE INVESTIGAÇÃO | 57 |
| REFERÊNCIAS | | 59 |
| ANEXOS | | 62 |
| | RESULTADOS DOS PROVETES UTILIZADOS NOS PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS | 62 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Comparação do comportamento da condutividade térmica do gesso em função da temperatura. a) Pesquisas feitas em 2002, [12]. b) Pesquisas feitas em 2011, [15]. | 8 |
| Figura 2 - Condutividade térmica e massa específica do gesso em função da temperatura, [10]. | 9 |
| Figura 3 - Variação da condutividade térmica efetiva do gesso em função da temperatura, [18]. | 9 |
| Figura 4 - Variação da condutividade térmica do gesso com a temperatura, [19]. | 10 |
| Figura 5 - Variação da condutividade térmica do gesso em função da desidratação, [19]. | 11 |
| Figura 6 - Variação do calor específico do gesso em função da temperatura. a) Estudo realizado por [5]. b) Estudo realizado por [18]. | 12 |
| Figura 7 - Variação da massa do silicato de cálcio em função da temperatura, [21]. | 13 |
| Figura 8 - Condutividade térmica de materiais a base de silicato de cálcio em função da densidade, [5]. | 14 |
| Figura 9 - Comparação da condutividade térmica das placas de silicato de cálcio com os dados da literatura, [5]. | 15 |
| Figura 10 - Variação da condutividade térmica em função da temperatura de placas a base de silicato de cálcio, [21]. | 17 |
| Figura 11 - Variação da condutividade térmica da placa de silicato de cálcio. a) placa de massa específica de 339 (Kg/m ³). b) massa específica de 506 (Kg/m ³), [23]. | 18 |
| Figura 12 - Imagem da placa de silicato de cálcio hidratado, escala de 100 µm, [23]. | 19 |
| Figura 13 - Alterações do módulo de elasticidade (Ed) durante tratamentos húmidos e secos para cada painel. Condicionamento por 2 semanas a 20 °C e 65% de humidade, [24]. | 20 |
| Figura 14 - Diferença no módulo de elasticidade (MOE) e de rutura (MOR) após repetição de testes de humidade e de tratamentos a seco, [24]. | 21 |
| Figura 15 – Condicionamento das amostras de silicato de cálcio | 28 |

| | |
|--|----|
| Figura 16 – Temperatura e Humidade para o procedimento de normalização..... | 29 |
| Figura 17 – Disposição das amostras durante o procedimento de normalização | 29 |
| Figura 18 – Medição de massa no procedimento de normalização | 30 |
| Figura 19 – Promat 200 visto lateralmente após o condicionamento climático..... | 31 |
| Figura 20 – Análise superficial do Promat 200 após o condicionamento climático | 32 |
| Figura 21 – Promatec H visto de cima antes do condicionamento climático..... | 33 |
| Figura 22 – Promatec H visto de cima após o condicionamento climático..... | 33 |
| Figura 23 – Equipamento de Placa Quente Protegida e seus Componentes | 35 |
| Figura 24 – Inserção do suporte e peça no equipamento GHP..... | 36 |
| Figura 25 - Configuração do software GHP | 37 |
| Figura 26 - Condutividade Térmica do Promat 200 | 39 |
| Figura 27 - Diferença da condutividade térmica do Promat 200 em relação à amostra inicial. | 40 |
| Figura 28 - Condutividade Térmica do Promatec H..... | 41 |
| Figura 29 - Diferença da condutividade de térmica do Promatec H em relação à amostra inicial. | 41 |
| Figura 30 - Representação gráfica do ensaio de flexão em três pontos..... | 42 |
| Figura 31 – Máquina Universal Instron 3382..... | 43 |
| Figura 32 – Teste de Flexão em 3 pontos, antes do teste a) e depois do teste b) | 44 |
| Figura 33 – Ajuste do Provete na Máquina Universal para o TPB | 45 |
| Figura 34 - Gráfico Carga x Deformação Promat 200 S02 | 46 |
| Figura 35 - Gráfico Carga x Deformação Promat 200 SR06 | 47 |
| Figura 36 - Força Máxima realizada durante os ensaios do Promat 200..... | 48 |
| Figura 37 - Módulo de Resistência e Módulo de Elasticidade do Promat 200 | 49 |
| Figura 38 - Diferença da Força Máxima, Módulo de Resistência e Módulo de Elasticidade do Promat 200 em relação à amostra inicial. | 50 |
| Figura 39 - Força Máxima realizada durante os ensaios do Promatec H | 51 |
| Figura 40 - Gráfico Carga x Deformação Promatec H S02..... | 52 |
| Figura 41 - Gráfico Carga x Deformação Promatec H S27..... | 53 |

Figura 42 - Módulo de Resistência e Módulo de Elasticidade do Promatec H..... 54

Figura 43 - Diferença da Força Máxima, Módulo de Resistência e Módulo de Elasticidade do Promatec H em relação à amostra inicial..... 55

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Etapas durante a degradação do silicato de cálcio, [21]. | 13 |
| Tabela 2 - Equações da condutividade térmica de alguns materiais de proteção, [5]. | 16 |
| Tabela 3 - Variação da condutividade térmica da placa de silicato de cálcio de baixa densidade pelo método Hotwire, [22]. | 16 |
| Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova | 26 |
| Tabela 5 – Parâmetros de Envelhecimento Artificial | 27 |
| Tabela 6 - Valores da condutividade térmica fornecida pelo fabricante. | 38 |
| Tabela 7 - Dimensões dos provetes para o ensaio de flexão | 43 |
| Tabela 8 - Condutividade Térmica dos corpos de prova do Promat 200 | 62 |
| Tabela 9 - Condutividade Térmica dos corpos de prova do Promatec H | 63 |
| Tabela 10 - Características Mecânicas do Promat 200. | 64 |
| Tabela 11 - Características Mecânicas do Promatec H | 65 |
| Tabela 12 - Levantamento geométrico dos corpos de prova do Promat 200 em milímetros para o Ensaio de Flexão em Três Pontos | 66 |
| Tabela 13 - Levantamento geométrico dos corpos de prova do Promatec H em milímetros para o Ensaio de Flexão em Três Pontos | 67 |
| Tabela 14 – Medição de massa durante o procedimento de normalização dos corpos de prova do Promat 200 utilizados no ensaio de flexão em três pontos. | 69 |
| Tabela 15 - Medição de massa durante o procedimento de normalização dos corpos de prova do Promat 200 utilizados no ensaio de placa quente protegida. | 69 |
| Tabela 16 - Medição de massa durante o procedimento de normalização dos corpos de prova do Promatec H utilizados no ensaio de flexão em três pontos | 70 |
| Tabela 17 - Medição de massa durante o procedimento de normalização dos corpos de prova do Promat 200 utilizados no ensaio de placa quente protegida. | 71 |

Nomenclatura

Abreviaturas

| | |
|-----|---------------------|
| GHP | Guarded Hot Plate |
| GPa | GigaPascal |
| MPa | MegaPascal |
| TPB | Three Point Bending |

Letras maiúsculas do alfabeto Latino

| | |
|-------|---|
| A_p | área apropriada do material de proteção |
| Ed | Módulo Dinâmico de Elasticidade |
| K_p | condutividade térmica do material de proteção |
| T_a | temperatura instantânea dos gases |
| T_g | temperatura instantânea do aço |
| T_s | temperatura do aço |

Letras minúsculas do alfabeto latino

| | |
|-------|---|
| b | largura da base de uma secção transversal |
| c | calor específico |
| c_a | calor específico do aço |

Letras minúsculas do alfabeto grego

| | |
|------------|--|
| α | fator de imperfeição em situação de incêndio, fator de conversão da reação |
| α_c | coeficiente de transferência de calor por convecção |
| ρ | massa específica |

Capítulo 1: Introdução

1.1 Contexto e motivação (introdução)

Quando o primeiro homem descobriu o fogo, aconteceu que ele ficou impressionado com este feito pois podia agora obter calor, esquentar-se nas noites frias e cozer alimentos. Com o aumento na utilização do fogo e o desenvolvimento da sociedade, começaram a surgir novas casas, edificações verticais e grandes estruturas feitas de diferentes materiais, principalmente de madeira.

Ocorre que a madeira é um material muito inflamável e se torna combustível para propagação da chama. Grandes incêndios foram registrados na história tendo como causa, uma pequena chama que não conseguiu ser controlada e terminou em destruição quase completa ou total de uma construção. No relato da associação internacional de incêndio e serviço de resgate, numa escala que representa 36% da população mundial, houveram 4,6 milhões de incêndios, 30,8 mil mortes e 51,3 mil feridos, [1].

Incêndio histórico como o que aconteceu recentemente no Museu Nacional, no Rio de Janeiro – Brasil, dia 2 de setembro de 2018 no qual foi extremamente danificado com rachaduras, desabamento de sua cobertura, além da queda de lajes internas.

Neste incêndio aproximadamente 18,5 milhões, ou 92,5%, dos 20 milhões de itens do museu foram destruídos, [2]. Esta edificação não utilizava proteção passiva de fogo e indícios da investigação da Polícia Federal do Brasil apontaram que o sistema de controle dos detetores de fumo não estava acionado, não havia portas corta-fogo e o sistema interno de câmaras de segurança era ineficiente.

Por este e outros acontecimentos, os países através de seus órgãos reguladores têm elaborado normas de segurança contra os incêndios que têm de ser cada vez mais presente nos projetos de edificações, pois observa-se com frequência grandes tragédias envolvendo

fogo nas construções. Sendo assim, torna-se indispensável a investigação de medidas protetivas contra incêndios, bem como a viabilidade técnica e econômica destas aplicações.

No geral as ferramentas de combate contra incêndios estão subdivididas em dois grandes grupos, os materiais de proteção ativa e passiva, nas quais visam conter o fogo e impedir que as chamas se propaguem. A grande diferença é que os materiais de proteção ativa necessitam da intervenção direta do homem, seja por acionamento manual ou automático, para que se inicie o combate contra a propagação do incêndio. Os materiais desta classe que são amplamente empregados são: chuveiros automáticos, sistemas de alarme e evacuação, incêndio extintor (APAR), caixa de hidrante, aspersores e detetores de incêndio, [3].

Já os materiais de proteção passiva não requerem nenhuma intervenção do homem, sua ação contra o fogo se baseia nas propriedades isolantes e/ou químicas intrínsecas a cada material, dentre os materiais mais utilizados estão as placas de silicato de cálcio e de gesso, as tintas intumescentes e as argamassas projetáveis. Estes materiais de proteção passiva são empregados para impedir a propagação das chamas e manter a temperatura mais baixa possível em um eventual ataque térmico, onde a temperatura da chama pode atingir valores entre 700 e 1000 [°C]. Porém, para alcançar bons resultados através deste método é necessário que o projeto seja realizado de forma racional no tocante ao tipo de material de proteção e espessura do mesmo, do contrário, pode-se perder a praticabilidade e/ou a eficácia na proteção das estruturas, as quais podem entrar em colapso devido à degradação da resistência mecânica dos metais em altas temperaturas, [4].

Outros tipos de proteção passiva contra incêndio incluem portas de emergência, escadas de emergência, saídas e pontos de encontro para evitar acidentes ou ferimentos evacuação em caso de emergência, [3].

Nos dias de hoje, a utilização dos materiais de proteção passiva é frequentemente requerida nos projetos estruturais, contudo, há grande dificuldade na obtenção plena dos benefícios que estes materiais são capazes de proporcionar devido à falta de informações sobre a variação das propriedades térmicas quando estes são expostos a altas temperaturas. Segundo Wang, a condutividade térmica é considerada a propriedade mais relevante ao analisar um fenômeno térmico, a compreensão do seu comportamento é crucial para realização satisfatória e plena dos projetos que envolvam sistemas de proteção passiva, [5].

Porém, os materiais que protegem a estrutura sofrem com a deterioração ao longo do tempo devido as variações cíclicas de humidade e temperatura, fazendo com que as suas propriedades deixem de ser as mesmas se comparadas ao da sua data de fabricação. Com isso, o objetivo deste trabalho é conhecer o comportamento dos elementos de proteção passiva ao longo do tempo de forma a determinar o nível de proteção que é dado a estrutura mesmo depois de anos de proteção.

1.2 Objetivo da Investigação

O objetivo do tema proposto respalda-se na verificação do comportamento dos materiais de proteção térmica e mecânica frente ao envelhecimento, com enfoque na caracterização destes parâmetros nas placas de silicato de cálcio. Será apresentada uma abordagem experimental, com o seguinte propósito: demonstrar a dependência da condutividade térmica e resistência mecânica com a temperatura e humidade ao longo do tempo. Os testes experimentais evidenciarão tal dependência mostrando como essas propriedades são influenciadas pelas características climáticas.

Portanto, a presente dissertação tem como meta demonstrar a importância de contabilizar a variação das propriedades térmicas nos projetos de proteção passiva e, adicionalmente, contribuir com dados experimentais e para o preenchimento desta lacuna de valores, os quais poderão ser usados para garantir a integridade dos edifícios em situação de incêndio e assim, preservar a vida humana e os bens materiais.

1.3 Organização da tese

Esta tese encontra-se dividida em quatro capítulos, no capítulo 1 está presente uma breve introdução ao tema que está sendo abordado, bem como a organização da tese.

No capítulo 2, denominado como Estado da Arte, são apresentados alguns estudos já realizados dos principais materiais de proteção usados na engenharia. Será apresentado a avaliação da durabilidade dos materiais tendo em vista as propriedades térmicas e propriedades mecânicas dos painéis de silicato de cálcio antes e após ao envelhecimento artificial, possibilitando ao leitor uma melhor compreensão de como estas propriedades são afetadas pelo condicionamento climático das amostras e a importância de contabilizar tal variação.

O capítulo 3 descreve as técnicas e os procedimentos experimentais que foram utilizados neste trabalho. Os testes têm o propósito de caracterizar a condutividade térmica e propriedades mecânicas de dois tipos de placas de silicato de cálcio antes e após o envelhecimento artificial. Inicialmente tem-se uma breve introdução sobre os equipamentos e uma descrição de como são feitas as medições. Os ensaios foram realizados pelo equipamento de Placa Quente Protegida e uma Máquina Universal para o Ensaio de Flexão em três pontos.

Por fim, o capítulo 4 permitirá relatar de forma conclusiva, todos os pontos relevantes que foram observados no caso em estudo e pontuará alguns tópicos que podem ser aprimorados nos trabalhos futuros.

Capítulo 2: Estado da arte

2.1 Introdução

A resistência do aço a temperaturas elevadas encontra-se definida e com grande nível de detalhe na comunidade científica e nos órgãos reguladores devido a larga utilização deste material. Sabe-se que a 550°C o aço estrutural perde aproximadamente 60% da sua resistência, ou seja, uma diminuição de 40% da sua resistência mecânica em relação à temperatura ambiente. Este valor é importante porque, no passado, o dimensionamento era baseado no método da tensão admissível, a tensão máxima admissível tinha um valor que era aproximadamente igual a 60% da resistência à temperatura ambiente. Essa hipótese justifica o valor definido como a temperatura máxima, ou crítica, que um elemento de uma estrutura suporta antes de atingir o colapso, [6].

Sob esta conceção surgiu uma nova técnica designada para proteger as estruturas metálicas, a partir da aplicação de sistemas passivos de proteção, que limita a propagação das chamas e evita o superaquecimento dos elementos estruturais. Todavia, o uso destes materiais era feito de maneira não racional, resultando em custo elevados e capaz de atingir até 23% do custo total da construção, [7]. No entanto, os estudos de investigação que deram origem aos códigos de projeto internacionais mostraram que a temperatura crítica depende essencialmente do grau de utilização do elemento estrutural.

Ao utilizar os elementos de proteção passivo ao fogo, o aquecimento dos elementos estruturais se dará somente por condução de calor, visto que esta estrutura não está em contato direto com a chama, ou seja, não recebe radiação térmica, [8]. O Eurocódigo 3, parte 1-2 (CEN, 2005b), [9], é utilizado para determinar o comportamento do conjunto estrutural em uma situação de incêndio quando envolvido por uma camada de proteção, equação (2.1). Porém esta norma não leva em consideração as condições reais de incêndio, pois a difusividade térmica, calor específico, condutividade térmica e resistência mecânica são

influenciados com a temperatura e são muito importantes para os cálculos de transferência de calor, capacidade energética e capacidade estrutural, [4, 5].

$$\Delta T_s = \frac{K_p A_p / V (T_g - T_s)}{c_s \rho_s d_p (1 + \frac{\emptyset}{3})} \Delta t - (e^{\frac{\emptyset}{10}} - 1) \Delta T_g \quad (2.1)$$

Onde ΔT_s representa o incremento de temperatura do aço casadas em curvas normalizadas de incêndio, K_p é a condutividade térmica do material de proteção, A_p é a área apropriada do material de proteção, c_s calor específico do aço, ρ_s massa específica do aço, d_p espessura do material de proteção, T_g e T_s representam as temperaturas instantâneas dos gases e do aço, respectivamente e A_p/V é o fator de massividade e $\emptyset = \frac{c_p \rho_p}{c_s \rho_s} d_p \frac{A_p}{V}$.

Temos no mercado diversos materiais de proteção passiva, com propriedades químicas e físicas distintas, interferindo cada um no comportamento de proteção ao fogo, na estética e principalmente nos custos de construção de edifícios. Como um exemplo, a marca Promat comercializa diversos tipos de isolamentos como os de alta performance oferecendo baixa densidade e baixa condutividade térmica, compósitos de materiais reforçados com folhas de metal, os estruturais que são funcionais à estrutura e os técnicos usados em baixa escala nos materiais não ferrosos.

Um modelo teórico representado pela equação (2.2), permite estimar o comportamento da condutividade térmica efetiva para os principais materiais de proteção passiva, como as tintas intumescentes, fibra de rocha, argamassa projetável, placas de gesso e de silicato de cálcio, [5].

$$K_p = \frac{K_s \zeta^{\frac{2}{3}} + (1 - \zeta^{\frac{2}{3}}) K_g}{K_g \left(\zeta^{\frac{2}{3}} - \zeta \right) + (1 - \zeta^{\frac{2}{3}} + \zeta) K_s} \quad (2.2)$$

A equação 2.2 representa a condutividade térmica efetiva, K_p , que depende de K_g e K_s que são as condutividades térmicas do gás e do sólido, respectivamente e ζ é a porosidade do material de proteção. É importante notar que o K_p varia de acordo com o fluxo, pois o fluxo de energia do calor varia com o tempo. Quanto menor o Δt , mais próximo o equacionamento de ΔT_s estará da condição real de propagação e temperatura de chama.

Atualmente, existem inúmeros materiais de proteção passiva e no mercado como o gesso, silicatos de cálcio, revestimentos intumescentes e argamassas projetáveis, cada um

com propriedades físicas e químicas distintas, apresentando diferentes aspectos que interferem nos custos de construção, quanto na estética de edifícios. O objetivo do presente tópico é abordar os principais estudos e comportamentos dos principais materiais de proteção, sem descrever o seu funcionamento, pois este é o objetivo de um capítulo subsequente.

2.2 *Materiais de isolamento do tipo placa*

Os materiais de isolamento do tipo placa são revestimentos do tipo passivo usados amplamente na indústria de edificações como um material de revestimento esteticamente agradável, de fácil aplicação e oferecendo resistência mecânica para parede, chão e teto oferecendo proteção de incêndio à estrutura.

Quando a placa é exposta a um ambiente de alta temperatura, moléculas de água, ligadas na rede cristalina, são liberadas e transferidas através de seu volume; este processo, conhecido como desidratação, reduz a temperatura da parede térmica, reduzindo a temperatura média da parede pela desaceleração da taxa de penetração, [10].

O comportamento térmico e químico da desidratação desses materiais é objetivo de estudo durante as últimas décadas pois irá caracterizar a forma como o incêndio se propaga nas estruturas na qual estão sendo protegidas, seja uma caracterização experimental [11, 12], ou por modelagem numérica, [13, 14].

Em 2002, Thomas comparou inúmeros estudos realizados sobre o comportamento da condutividade térmica do gesso disponíveis na literatura, Figura 1 a). Mais tarde em 2012, Hopkin et al. realizaram um trabalho mencionando as incertezas em torno das propriedades térmicas do gesso quando sujeitos a curva padrão do fogo. Segundo os autores, os estudos realizados no campo da transferência de calor através do gesso trazem informações contraditórias. Reconhecendo tal necessidade, desenvolveram um estudo numérico destacando as consequências da falta de informações sobre as propriedades térmicas do gesso, [12]. Na Figura 1 b) podemos comparar os resultados da condutividade térmica obtidas por vários pesquisadores e também que as propriedades das placas de gesso são dependentes da taxa de aquecimento, [15].

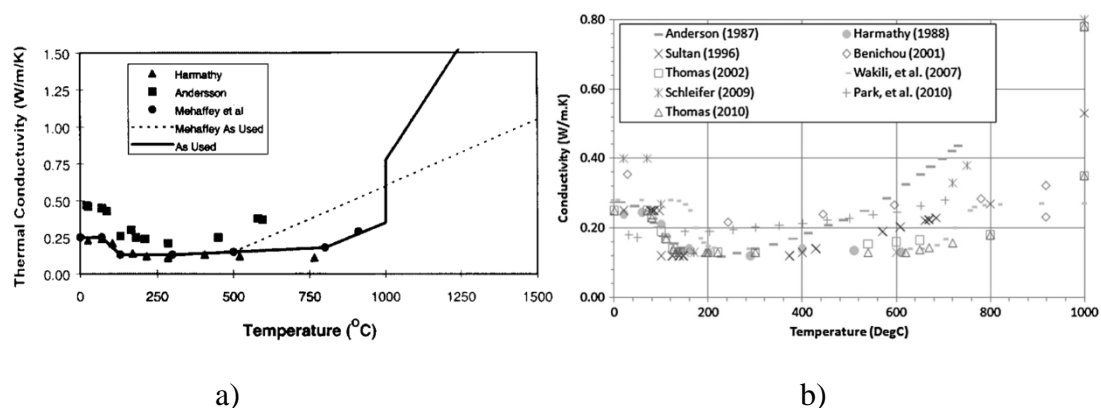


Figura 1 - Comparação do comportamento da condutividade térmica do gesso em função da temperatura. a) Pesquisas feitas em 2002, [12]. b) Pesquisas feitas em 2011, [15].

Em relação a estes resultados, Andersson os obteve utilizando a técnica *Transient Hot Strip* (THS), o método mede a condutividade térmica através da resistência de uma tira de metal embutida no material de interesse. Em 1994, Mehaffey et al., encontraram uma solução usando um medidor de condutividade térmica, o medidor usado é baseado na análise estacionária de transferência de calor, [12, 16].

Com o auxílio de uma correlação matemática disponível em [17], Kolaitis e Founti demonstraram a variação da condutividade térmica e da massa específica em função da temperatura, como retrata a Figura 2. A massa específica diminui assim que a condutividade térmica diminui, mostrando que o material terá perdido parte de sua composição devido ao aumento de temperatura. Um comportamento semelhante é identificado na obra numérica e experimental de Wang, neste caso, o autor determinou o comportamento da condutividade térmica efetiva através da equação (2.2), onde podemos observar que o valor da condutividade também diminui um pouco antes de 200°C devido a evaporação de água livre, [5].

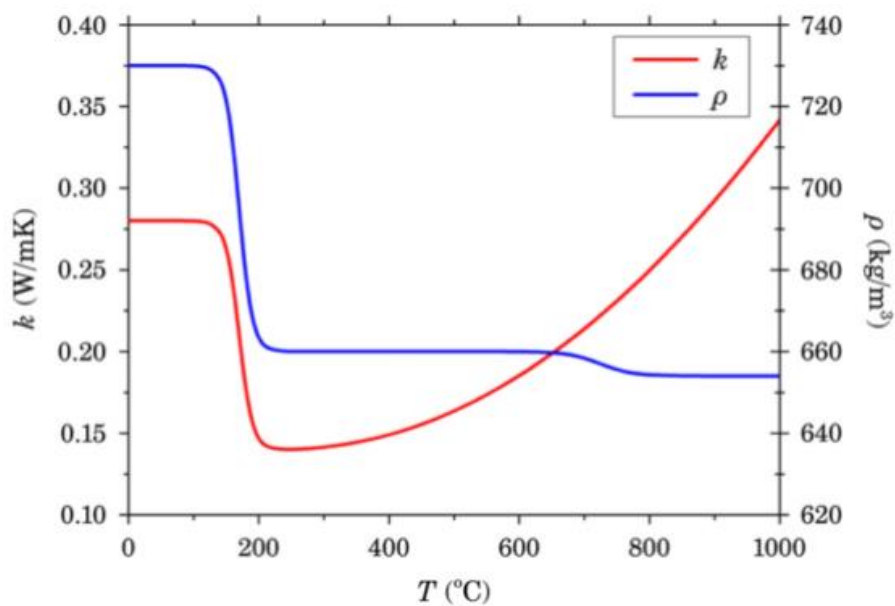


Figura 2 - Condutividade térmica e massa específica do gesso em função da temperatura, [10].

Neste estudo foram considerados os três modos de transferência de calor, radiação, convecção e condução bem como a condutividade térmica da placa de gesso e a condutividade térmica do ar no interior do gesso devido à sua porosidade, ver a Figura 3.

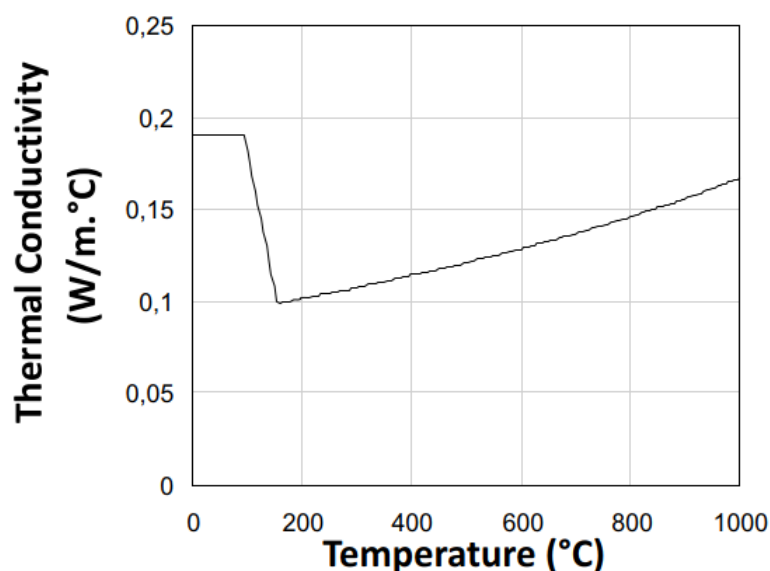


Figura 3 - Variação da condutividade térmica efetiva do gesso em função da temperatura, [18].

Em 2011, Kontogeorgos et al., investigaram o desempenho térmico da placa de gesso durante o processo de aquecimento e desidratação, os resultados obtidos sugerem que a condutividade térmica do gesso se altera durante a transformação química. A primeira reação observada foi a evaporação de água livre, antes dos 100°C começa a primeira reação de desidratação e após 150°C ocorre a segunda reação de desidratação, ver Figura 4.

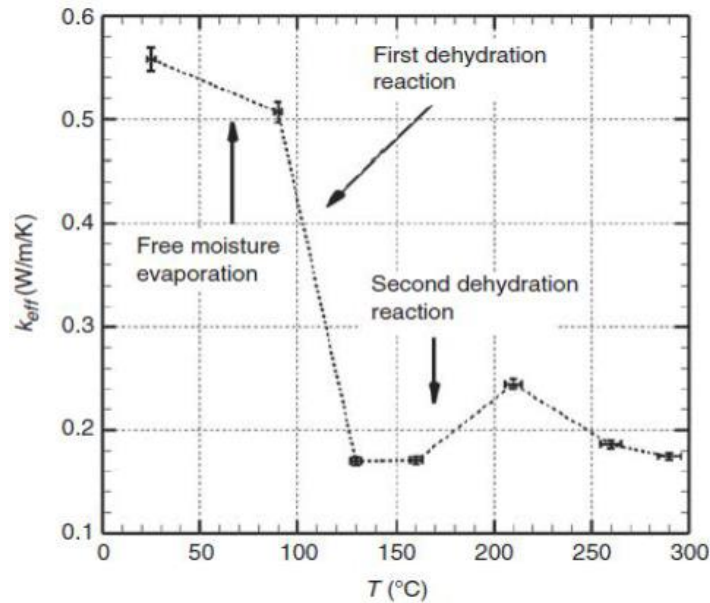


Figura 4 - Variação da condutividade térmica do gesso com a temperatura, [19].

Nesta obra os autores usaram os dados medidos experimentalmente para gerar um polinômio de quarta ordem que foi normalizado com base na condutividade térmica em temperatura ambiente e assim, expressaram a equação (2.3) em função da degradação do material. Este trabalho retrata como a condutividade térmica se altera com a perda de massa, resultante da desidratação, [19].

$$\frac{K_p}{K_{ref}} = \alpha_4 x^4 + \alpha_3 x^3 + \alpha_2 x^2 + \alpha_1 x + \alpha_0 \quad (2.3)$$

Sendo, $\alpha_4 = +2,172584 * 10^{-6}$, $\alpha_3 = +5,937607 * 10^{-6}$, $\alpha_2 = +1,458000 * 10^{-3}$, $\alpha_1 = -7,787834 * 10^{-2}$, $\alpha_0 = +9,997864 * 10^{-1}$ e $x = (1 - m/m_0) * 100$.

A Figura 5 retrata a variação da condutividade térmica do gesso em função da perda de massa causada pela desidratação. Pode-se observar que o gesso chega a perder 15% do valor total de sua massa chegando a 30% do valor de condutividade térmica antes da reação de desidratação.

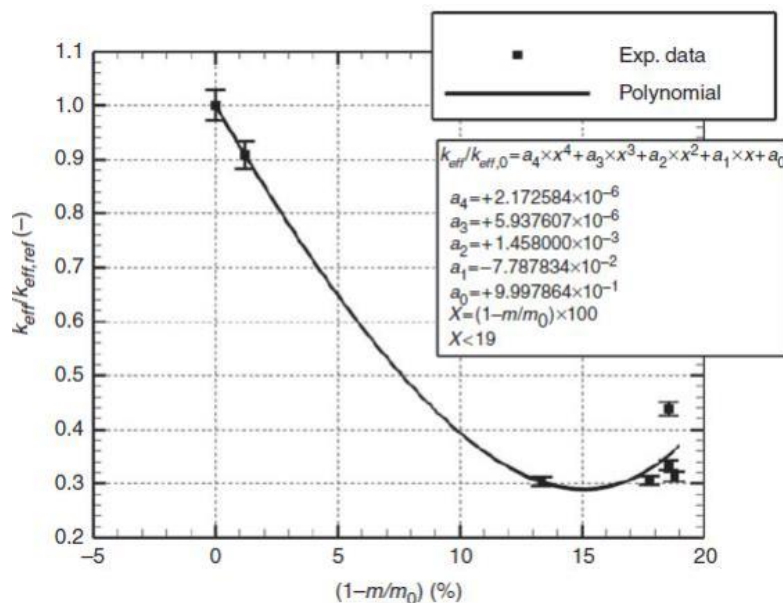


Figura 5 - Variação da condutividade térmica do gesso em função da desidratação, [19].

A medida que a condutividade térmica se altera com a temperatura, o calor específico do gesso também sofre modificações em determinados pontos durante o aquecimento, Wang também demonstrou a variação desta propriedade térmica utilizando a equação (2.4).

$$\Delta_c = \frac{2,26 \times 10^6}{\Delta T} (e_a f_1 + e_{free}) f_2 \quad (2.4)$$

Onde, Δ_c é a variação do calor específico, e_a representa o teor de desidratação da água, referente ao peso total, e_{free} é o teor de água livre, ΔT é a variação de temperatura e f_1, f_2 são fatores de correção.

Na Figura 6 a), Wang retrata o resultado obtido do comportamento do calor específico durante as reações químicas de desidratação do gesso, [5]. Analogamente, Rahmanian usou a mesma equação de Wang para estudar o comportamento do calor específico, contudo, os

resultados obtidos revelam uma discrepância relacionada com a temperatura que ocorre a segunda reação química durante a desidratação, ver Figura 6 b), [18].

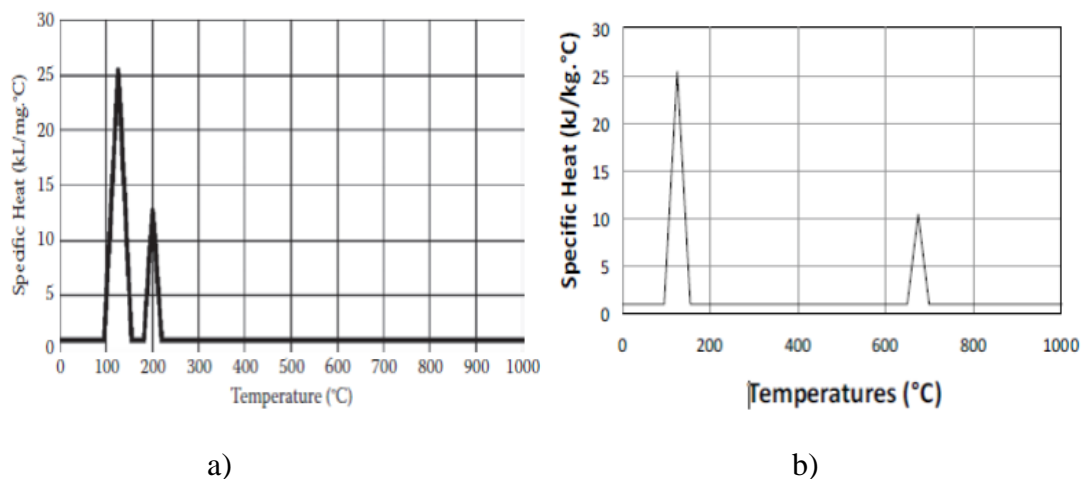


Figura 6 - Variação do calor específico do gesso em função da temperatura. a) Estudo realizado por [5]. b) Estudo realizado por [18].

Conforme a figura acima, nota-se que os dois picos de alteração do calor específico do gesso ocorrem durante as duas reações químicas no processo de desidratação. Evidentemente que durante estes fenômenos necessita-se de maiores quantidades de energia para romper as ligações químicas das moléculas de água e realizar a evaporação.

Por sua vez, as placas de silicato de cálcio apresentam comportamento muito semelhante a placas de gesso. Entretanto, em um projeto que requer maior capacidade de isolamento térmico e resistência mecânica, as placas a base de silicato de cálcio exercem melhor desempenho em termos de resistência mecânica, isolamento e durabilidade do que as placas de gesso. Inúmeras características dos silicatos de cálcio são responsáveis pelo bom desempenho térmico, dentre elas, destacam-se uma série de reações endotérmicas que decorrem em intervalos distintos de temperatura, em complemento, há água contida na composição deste material (cerca de 5%), fato que agrega maior resistência térmica devido a desidratação, [20].

Por consequência da desidratação, a água contida nos poros do interior do material sai destes poros e vão para a atmosfera, portanto a massa nas placas de silicato de cálcio sofre variação durante seu aquecimento.

Para verificar tal fenómeno, Dale e Kuldeep, submeteram alguns materiais de proteção em elevadas temperaturas. Os resultados da degradação são fornecidos na Figura 7 e as reações e perda de massa relativa foram subdivididas em 4 etapas que são descritas conforme a Tabela 1, [21].

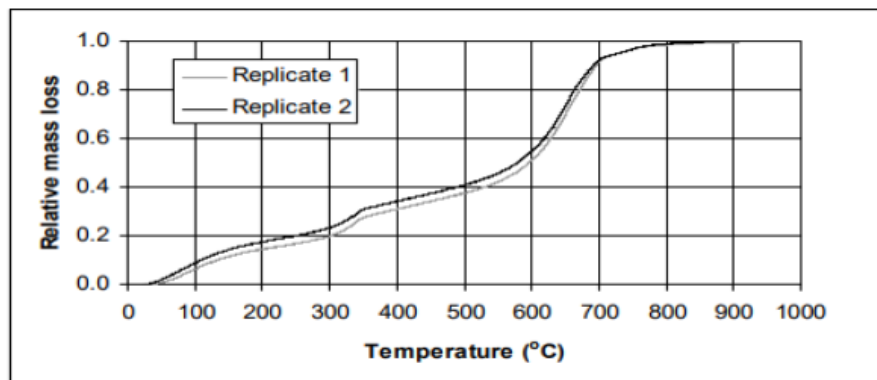


Figura 7 - Variação da massa do silicato de cálcio em função da temperatura, [21].

Tabela 1 - Etapas durante a degradação do silicato de cálcio, [21].

| Reação | Temperatura [°C] | Temperatura assumida da Reação [°C] | Perda de Massa [%] | Δm total [%] |
|--|------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Evaporação da água livre | 25 a 100 | 75 | 9 | |
| Primeira fase de desidratação (Hidrato) | 100 a 200 | 150 | 23,5 | 12 |
| Segunda fase de desidratação (Hidróxido) | 400 a 600 | 450 | 21,5 | |
| Descarbonatação | 600 a 1000 | 750 | 46 | |

Em conclusão, os autores afirmaram que recorreram a uma análise simplificada para estimar a degradação do material e ainda enfatizaram que existe a possibilidade de haver reações adicionais que podem cooperar com o fenómeno, [21].

A condutividade térmica das placas a base de silicato de cálcio é bastante influenciada pela massa específica, quanto maior a densidade do material menor será a quantidade de

poros no interior do material e maior será a condutividade térmica, como ilustra a Figura 8, [5].

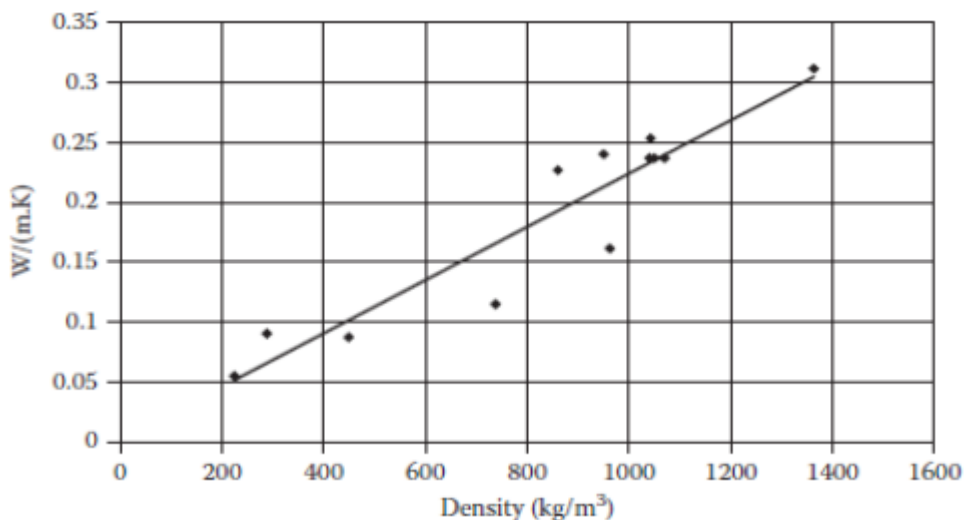


Figura 8 - Condutividade térmica de materiais a base de silicato de cálcio em função da densidade, [5].

Em conformidade com a Figura 8, é razoável admitir que esta propriedade térmica varia conforme uma função linear. Assim sendo, Wang et al., assumiram uma função de primeira ordem para estimar os valores da condutividade térmica com relação a massa específica, ver equação (2.5).

$$K^p = 0,23 \frac{\rho}{1000} \quad (2.5)$$

Onde, ρ é a massa específica.

Posteriormente, os autores compararam os valores da condutividade térmica obtidos com a equação (2.5) com os dados de densidade dos materiais encontrados na literatura, ver Figura 9.

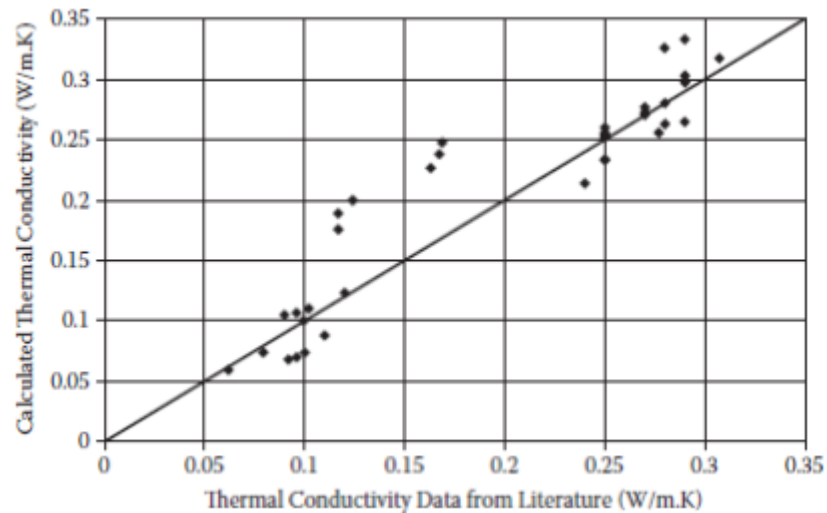


Figura 9 - Comparação da condutividade térmica das placas de silicato de cálcio com os dados da literatura, [5].

Pode-se observar que o resultado dos pontos dados pela literatura nesta figura é bastante próximo aos resultados esperados através do cálculo de condutividade térmica proposto por Wang.

Conhecer a condutividade térmica para os materiais de isolamento é de extrema importância para dimensionamento nos projetos de revestimento interno e proteção contra incêndio. A Tabela 2 apresenta o resumo de alguns dados teóricos e correlações que podem ser empregadas para projetos de engenharia contra incêndio, excetuando os casos que os fabricantes dos materiais de proteção disponibilizam as propriedades necessárias em altas temperaturas.

Tabela 2 - Equações da condutividade térmica de alguns materiais de proteção, [5].

| Material | Massa específica [Kg/m ³] | Calor específico [J/Kg °C] | Condutividade térmica [W/mK] |
|--------------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Fibra de rocha | 155-180 | 900 | $K=0,022+0,1475x(T/1000)^3$ |
| Lã mineral | 165 | 840 | $K=0,03+0,2438x(T/1000)^3$ |
| Silicato de cálcio | Variada | 900 | $K=K^*+C(T^3)$ |
| | | | $K^*=0,23x(\rho/1000)$ |
| | | | $C=0,08x(2540-\rho)/1000$ |
| Vermiculite | Variada | 900 | $K=K^*+C(T^3)$ |
| | | | $K^*=0,27x(\rho/1000)$ |
| | | | $C=0,18x(1000-\rho)/1000$ |

Ao longo dos anos, vários laboratórios e pesquisadores desenvolveram testes experimentais para caracterizar a condutividade térmica das placas de silicato de cálcio em função da temperatura através de diferentes técnicas, tais como: o *Guarded Hot Plate* e *Hotwire*. Porém, de acordo com Salmon, em virtude das divergências e incertezas a cerca dos dados sobre a condutividade térmica disponível na literatura, tem-se bastante dificuldade em validar os resultados, a Tabela 3 resume os resultados obtidos pelo autor através do *Hotwire*, [22].

Tabela 3 - Variação da condutividade térmica da placa de silicato de cálcio de baixa densidade pelo método Hotwire, [22].

| Temperatura [°C] | Condutividade térmica [mW/mK] | Desvio padrão [mW/mK] |
|------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 25 | 97 | 8 |
| 250 | 108 | 7 |
| 500 | 132 | 9 |
| 700 | 155 | 10 |
| 900 | 184 | 12 |

A condutividade térmica, portanto, varia com a temperatura, apresentando um comportamento crescente consoante o delta positivo de temperatura.

Em 2007, Dale e Kuldeep desenvolveram pesquisas com foco no desempenho e caracterização dos materiais de proteção passiva. A fim de determinar a condutividade térmica efetiva das placas de silicato de cálcio, os autores utilizaram um calorímetro de cone e o resultado é representado pela Figura 10. Nesta figura podemos observar o mesmo comportamento crescente da condutividade térmica com a temperatura.

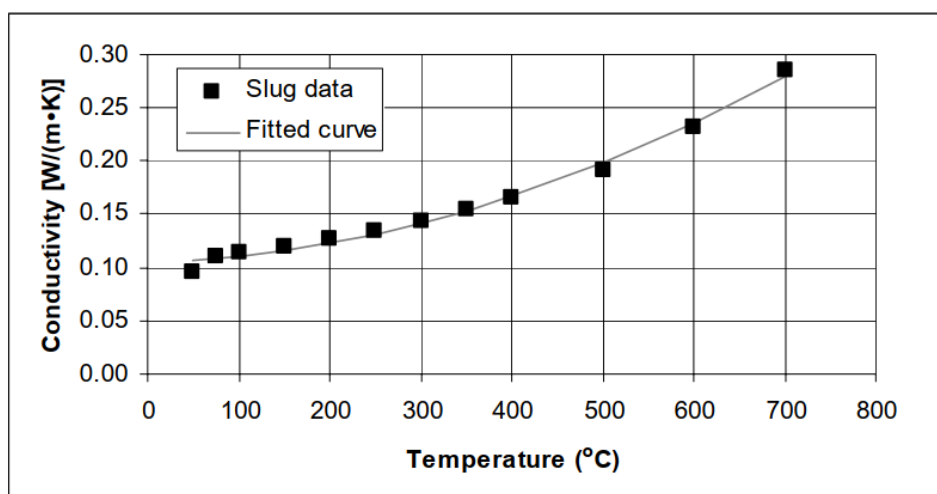


Figura 10 - Variação da condutividade térmica em função da temperatura de placas a base de silicato de cálcio, [21].

Diante das leituras obtidas pelo experimento, os autores expressaram a equação (2.6), que estabelece esta relação entre a condutividade térmica efetiva e a temperatura (T), [21].

$$K^* = 0,119 - 0,00014T + (3,13 * 10^{-7})T^2 \quad (2.6)$$

Dale, Chi e Paul desenvolveram pesquisas com o intuito de verificar a variação da condutividade térmica em função da temperatura, considerando a massa específica e a porosidade do material. Os testes foram conduzidos pela técnica do *Transient Plane Source*, ou TPS. Os autores utilizaram o modelo teórico de Russell e resultados de outras pesquisas para efeitos de comparação. A Figura 11 a) ilustra a variação da condutividade térmica para uma placa de silicato de cálcio de 339 Kg/m³ e a Figura 11 b) diz respeito à mesma análise, porém, com uma placa de massa específica de 506 Kg/m³. Como já era esperado, o material com maior massa específica possui maior condutividade térmica devido a menor quantidade

de poros, pois estes apresentam efeitos com impacto direto na transferência de calor e consequentemente na condutividade térmica efetiva, [23].

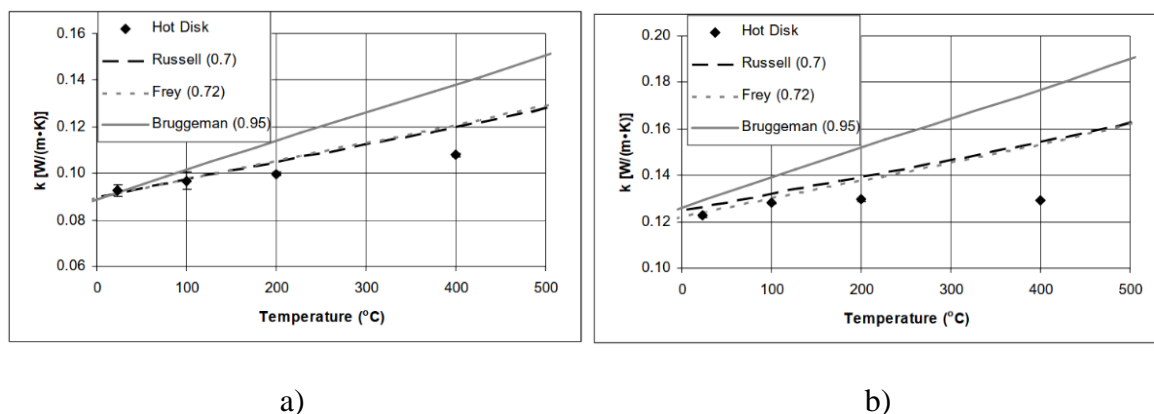


Figura 11 - Variação da condutividade térmica da placa de silicato de cálcio. a) placa de massa específica de 339 (Kg/m³). b) massa específica de 506 (Kg/m³), [23].

As propriedades, como a condutividade térmica, de um material poroso é controlada pelas condutividades térmicas de seus componentes e seu arranjo espacial dentro da estrutura composta, por exemplo, a microestrutura do material. Dale, Chi e Paul apresentam uma imagem, Figura 12, em que o material é visto de cima como constituído por um arranjo aleatoriamente estruturado de estruturas fibrosas de células fechadas. As “células” individuais são claramente de forma elipsoidal em oposição a serem esferas simples. As regiões mais brilhantes correspondem aos sólidos de silicato de cálcio, enquanto as regiões mais escuras correspondem aos poros cheios de ar ou epóxi, [23].

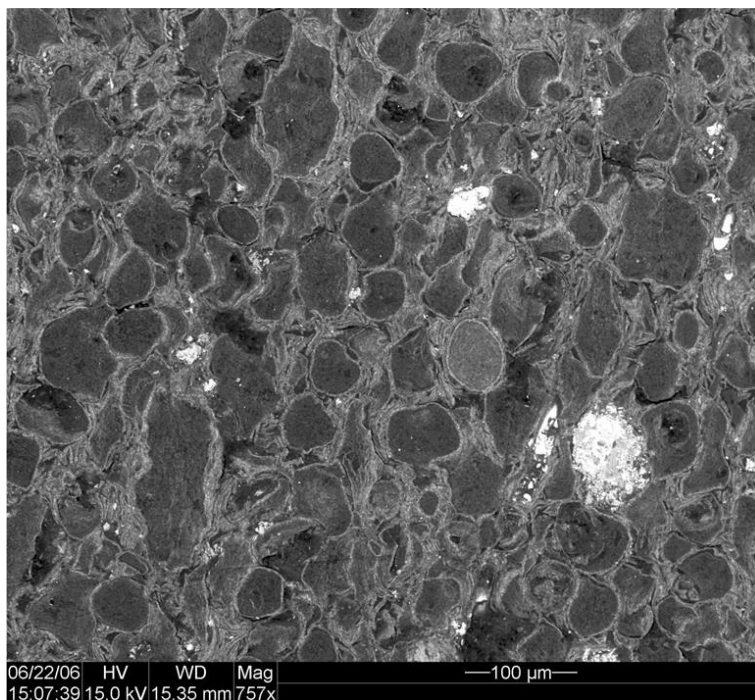


Figura 12 - Imagem da placa de silicato de cálcio hidratado, escala de 100 µm, [23]

2.3 Envelhecimento e Condicionamento climático

Na literatura, há poucas evidências específicas aos silicatos de cálcio. Entretanto, há alguns estudos relevantes na área de Particulados, Placa de Fibra de Média Densidade, Painel de Tiras de Madeiras Orientadas e Madeira Compensada.

Em 2016, Kojima avaliou a durabilidade dos painéis à base de madeira comparando seu módulo dinâmico de elasticidade (Ed) quando submetidos a tratamentos húmidos e secos repetitivos. Kojima utilizou painéis de OSB (Oriented Strand Board), PB (Particle Board) e PW (PlyWood). Os painéis experimentaram períodos de exposição ao ar livre de 1 e 3 meses na Cidade de Shizuoka, Japão. À medida que a temperatura aumentava, diminuía o módulo de elasticidade, como pode-se observar para os diferentes materiais na Figura 13, [24].

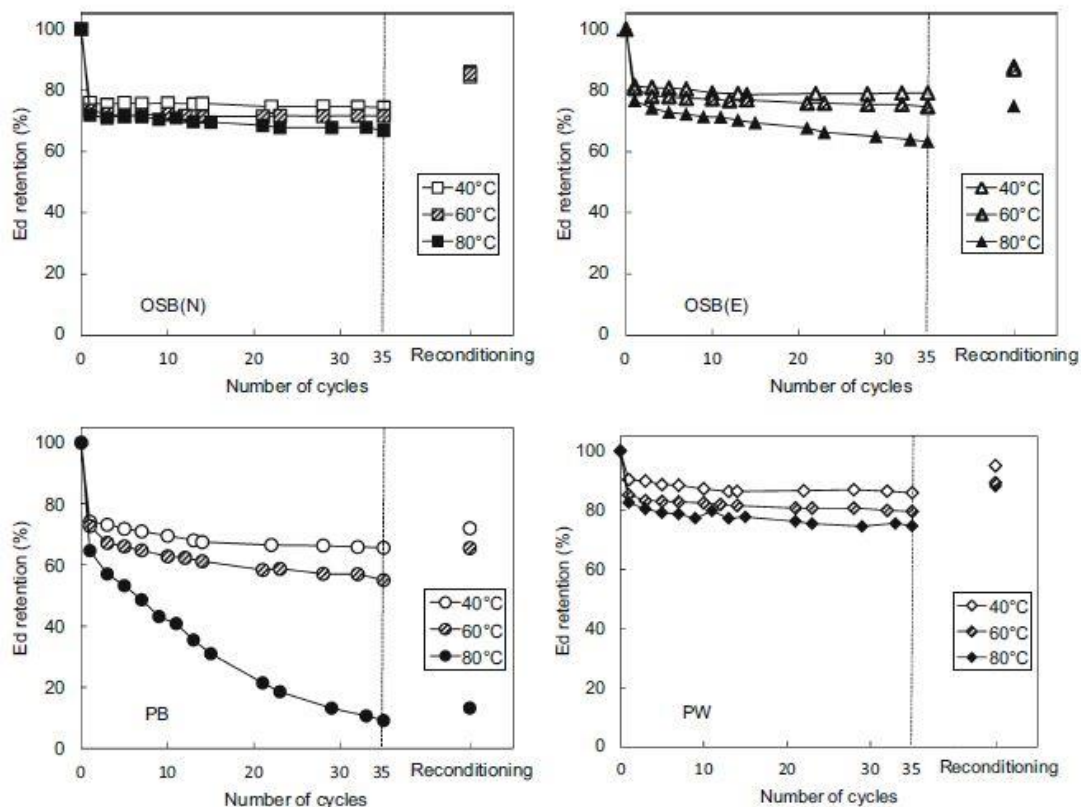


Figura 13 - Alterações do módulo de elasticidade (E_d) durante tratamentos húmidos e secos para cada painel. Condicionamento por 2 semanas a 20 °C e 65% de humidade, [24].

Para a mesma condição de umidade, a deterioração dos painéis à base de madeira aumentou com o aumento da temperatura. O mais alto módulo de rutura (MOR), ou tensão de rutura, para todos os painéis foi para o tratamento a 40 °C. Na Figura 14 podemos observar o Módulo de Elasticidade e Rutura em diferentes materiais e temperaturas, [24].

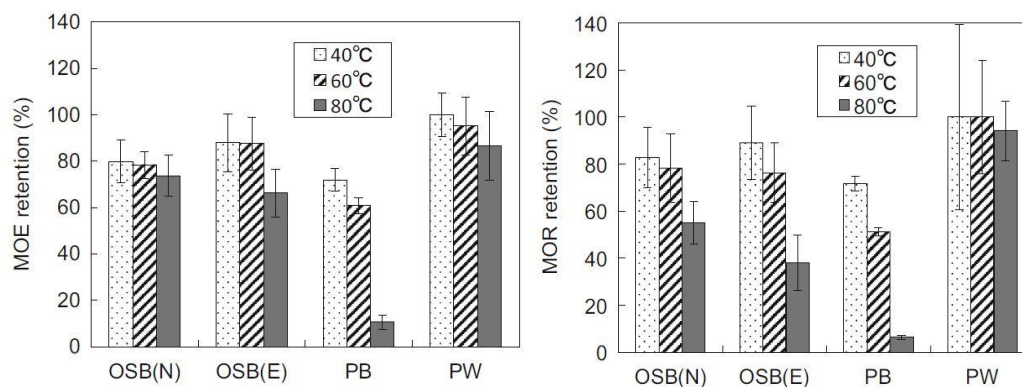


Figura 14 - Diferença no módulo de elasticidade (MOE) e de rutura (MOR) após repetição de testes de humidade e de tratamentos a seco, [24].

Sabemos que a durabilidade dos produtos sofre influência direta do meio que o circunda. A utilização dos painéis de silicato de cálcio ou gesso na construção tem aumentado nos últimos anos devido o avanço nos estudos, diminuição dos custos e necessidades de atingir maiores níveis de eficiência energética em construções, mas para isso faz-se necessário o conhecimento das variáveis que podem influenciar na sua durabilidade e desempenho.

Com o passar do tempo, os produtos sofrem degradação das suas propriedades físicas e químicas gerando fragilidade das propriedades mecânicas e alterações na condutividade térmica. Os materiais usados na construção podem ser expostos a condições climáticas tais como a humidade, chuva, temperatura, radiação ultravioleta (UV) passando por leves, moderadas e agressivas modificações nas suas propriedades físico-químicas, [25].

A principal forma de avaliar a durabilidade desses produtos é através do envelhecimento, sendo este dividido em: envelhecimento natural e artificial.

O envelhecimento é entendido como sendo uma mudança irreversível das propriedades físicas, químicas e mecânicas de um determinado material num intervalo de tempo, durante o armazenamento ou uso prolongado, causando a deterioração destes materiais. Assim, essa deterioração pode ocorrer devido a fatores climáticos, ambientais além de sofrer influência direta ao ataque de fungos, bactérias ou insetos. As alterações nas propriedades físicas e mecânicas devido ao envelhecimento se originam de alterações na microestrutura e de alterações químicas nos componentes. As condições de armazenamento determinam que tipo de processos químicos podem ocorrer e têm um efeito significativo no processo de envelhecimento, [26].

Envelhecimento Natural é aquele que o material sofre as ações do ambiente sem ação do homem, desta forma não se utilizam máquinas pois a temperatura e a humidade serão sempre do ambiente natural, muito mais próximo do uso real do material. Porém o envelhecimento natural demora muito tempo para ser realizado, pois para atestar as propriedades de um material após 20 anos de fabricação seria necessário esperar o material envelhecer naturalmente este tempo. O envelhecimento artificial busca obter a equivalência destes 20 anos, causando reações aceleradas em atmosfera controlada de acordo com as reações que se espera que aquele material resista. A depender da máquina que é utilizada pode ser controlada a temperatura e a humidade, além da precipitação de chuva e raios ultravioleta (UV).

Os edifícios e componentes de construção são expostos constantemente a uma ampla variedade de condições ambientais, pois sofrem constantemente essas degradações quando expostos a condições naturais ao longo de sua vida útil causando degradações devido à exposição UV e ambientes húmidos, [26].

O problema principal dos testes de envelhecimento natural é o tempo de exposição dos painéis para a avaliação da durabilidade e a não coerência destas condições climáticas com a aplicabilidade real dos painéis, uma vez que a maioria dos painéis são expostos a condições interiores, com variações apenas de temperatura e humidade. Essas condições variam com o lugar que o material está sendo instalado e a correta aplicação no interior das construções. Devido a isso, os métodos de envelhecimento artificial foram desenvolvidos para a realização dos experimentos que intensificam e aceleram através de ciclos de condicionamentos climáticos pré-determinados, [25].

Como todo material, as placas de silicato de cálcio são suscetíveis à degradação ambiental, pois uma combinação complexa de fatores químicos, mecânicos e de energia livre contribuem para sua degradação ocasionando uma perda de durabilidade e diminuição da vida útil.

2.4 Considerações Finais

De acordo com a revisão do estado atual de conhecimentos acerca do comportamento dos materiais de proteção passiva em elevadas temperaturas, percebe-se que todas as propriedades térmicas variam extensivamente com a temperatura. Ficou evidenciado a

necessidade de realizar mais testes e pesquisas sobre estes materiais devido a incompatibilidade dos resultados comparados na literatura. Ademais têm-se a importância e benefícios que a aplicação desta ferramenta de proteção é capaz de proporcionar. Para isto, é importante fazer uso correto de suas propriedades térmicas para evitar as grandes catástrofes e prejuízos decorrentes de incêndios, os quais poderiam ser evitados se os projetistas considerassem tais variações em função da temperatura.

Além desta análise, se torna difícil prever a durabilidade dos materiais aqui tratados pois os estudos se concentram na variação da condutividade térmica em temperaturas elevadas. Procurou-se colocar em evidência a dependência da concentração de água no interior das placas de revestimento interno com a condutividade térmica e a resistência mecânica, pois esta concentração irá definir o nível de desidratação do material e por consequência a diferença nos valores de condutividade térmica.

Por fim, devido a escassez de maiores informações sobre o comportamento das propriedades térmicas dos silicatos de cálcio em situações extremas de envelhecimento torna-se difícil encontrar soluções otimizadas de projeto, no que tange os fenômenos térmicos, mecânicos e a sua durabilidade, resultando muitas vezes em projetos sobre dimensionados que geram custos desnecessários ou em projetos subdimensionados que colocam em risco a segurança dos que estão nessas edificações.

Capítulo 3: Testes Experimentais para caracterização das propriedades térmicas e mecânicas

3.1 Introdução

A verificação da segurança contra o risco de incêndio é parte essencial do projeto de elementos estruturais. Esta é o garante da segurança dos ocupantes do edifício e da equipa. Vimos nos capítulos anteriores que as propriedades térmicas são muito importantes no desenvolvimento de projetos de engenharia contra incêndio e dependendo do material, as propriedades variam em função da estrutura celular, massa específica, humidade e, sobretudo a condutividade térmica, que manifesta bastante dependência com a temperatura, [27].

Por consequência, numerosas técnicas experimentais, estacionárias e transientes foram desenvolvidas com o intuito de medir o valor efetivo de algumas propriedades térmicas em diferentes condições experimentais e assim verificar o comportamento dos materiais de proteção sob à ação do fogo.

Normalmente os métodos de caracterização térmica são divididos em dois tipos: ensaios de reação ao fogo e resistência ao fogo.

A reação ao fogo está associada com a velocidade que o material entra em combustão em situação de incêndio, no qual os parâmetros observados são: inflamabilidade, propagação da chama, liberação de calor e combustibilidade. Além destes, é possível quantificar e qualificar os gases tóxicos resultante do processo. O método de verificação da resistência ao fogo é aplicado para analisar as características específicas dos elementos de construção, como paredes, portas e mecanismos de proteção passiva, os quais são destinados a atuarem como barreiras térmicas, [28].

Efetivamente, não existe um método ideal para analisar as propriedades térmicas. A escolha do método sempre vai depender de fatores como, a precisão esperada do experimento, o tipo e estado do material a ser estudado entre outras condições externas.

Na prática, para medir qualquer propriedade térmica, seja pelo modelo estacionário ou pelo regime transiente, a técnica experimental escolhida deve ser capaz de encontrar a solução para a equação básica da difusão de calor, representada pela equação (3.1), [29].

$$\frac{\partial(\rho \cdot cp \cdot T)}{\partial t} = \frac{d}{dx} \left(\frac{K(T)dT}{dx} \right) \quad (3.1)$$

Foram realizados neste estudo 2 tipos de ensaio para caracterização tanto térmica quanto mecânica dos Silicatos de Cálcio. Um dos testes é realizado no equipamento de Placa Quente Protegida, no qual podemos obter a condutividade térmica em até três temperaturas. Outro teste realizado foi o de Flexão em Três Pontos, na qual o provete foi flexionado até a ruptura para obtenção das propriedades mecânicas do material.

3.2 *Materiais e Métodos*

3.2.1 *Preparação dos corpos de prova*

Para analisar o comportamento dos silicatos de cálcio utilizaram-se dois tipos de placas de silicato de cálcio, Promatec H (humidade~10%) e Promat 200 (humidade~2%). As amostras concedidas pela empresa Promat foram cortadas com auxílio de uma serra Tico-Tico de marca RYOBI JS500QEO e foi realizado uma marcação no painel com as medidas desejadas para os materiais.

É apresentado na Tabela 4 a quantidade, o tamanho e o material de cada uma das amostras utilizadas para os ensaios de Flexão de Três Pontos e condutividade térmica no equipamento de Placa Quente Protegida.

Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova

| Quantidade | Medidas (Comprimento x Largura x Espessura) [mm] | Material |
|-------------------|---|-----------------|
| 30 | 326,4 x 50 x 15 | Promat 200 |
| 30 | 150 x 150 x 15 | Promat 200 |
| 30 | 240 x 50 x 20 | Promatec H |
| 30 | 150 x 150 x 20 | Promatec H |

As amostras foram dimensionadas de acordo com a capacidade da máquina de Ensaio de Placa Quente Protegida utilizando a versão C do suporte fornecido pelo fabricante e para o ensaio de flexão em três pontos foi utilizado a norma ASTM D790-03 para dimensionamento quanto ao comprimento consoante a espessura dos provetes e procedimento de ensaio.

Nesta pesquisa foi utilizado o Envelhecimento Artificial Acelerado para condicionamento das amostras para obtermos o comportamento do material em situação de diferentes humidades e diferentes temperaturas face aquilo que os materiais estão sujeitos ao longo do tempo de vida útil.

3.2.2 Envelhecimento Artificial

Após o corte, é necessário que uma certa quantidade predefinida de amostras sofra condições específicas de temperatura e umidade durante um período de tempo. Para isso foram separadas 3 amostras para cada uma das 10 condições. A primeira condição é o estado inicial, na qual foi definida o estado que se encontrava cada uma das amostras. As restantes das 9 condições se derivam das combinações possíveis das temperaturas de 10°C, 50°C e 80°C e humidades de 30%, 50% e 70%, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de Envelhecimento Artificial

| Ensaio | Temperatura [°C] | Humidade[%] |
|---------------|-------------------------|--------------------|
| #0 | 23 | 50 |
| #1 | 10 | 30 |
| #2 | 10 | 60 |
| #3 | 10 | 70 |
| #4 | 50 | 30 |
| #5 | 50 | 60 |
| #6 | 50 | 70 |
| #7 | 80 | 30 |
| #8 | 80 | 60 |
| #9 | 80 | 70 |

Estas temperaturas foram escolhidas pois a água congela a 0°C e evapora a 100°C, portanto utilizou-se o tempo disponível para etapa dos procedimentos experimentais para planejar a quantidade de condições possíveis e realizá-las para traçar o comportamento do material nas condições planeadas. As humidades escolhidas levam em conta haver uma concentração próxima do que é encontrado na temperatura e humidade de conforto térmico que é o que também se busca para o interior das construções. O Ensaio 0 são todas as amostras que não sofreram envelhecimento, ou seja, não passaram por nenhum tipo de condicionamento climático.

A ETAG 028:2012 especifica alguns tipos de condicionamentos climáticos, dentre eles os tipos Z1 e Z2 são usados para produtos de revestimento interno. Para ambos, o teste é conduzido em 10 ciclos de 24h, [30]. Portanto, as amostras permaneceram durante 10 dias em cada condição, no total de 90 dias, conforme descrito acima e foram organizadas no interior da câmara climática da forma apresentada na Figura 15 para um bom espaçamento entre as amostras.

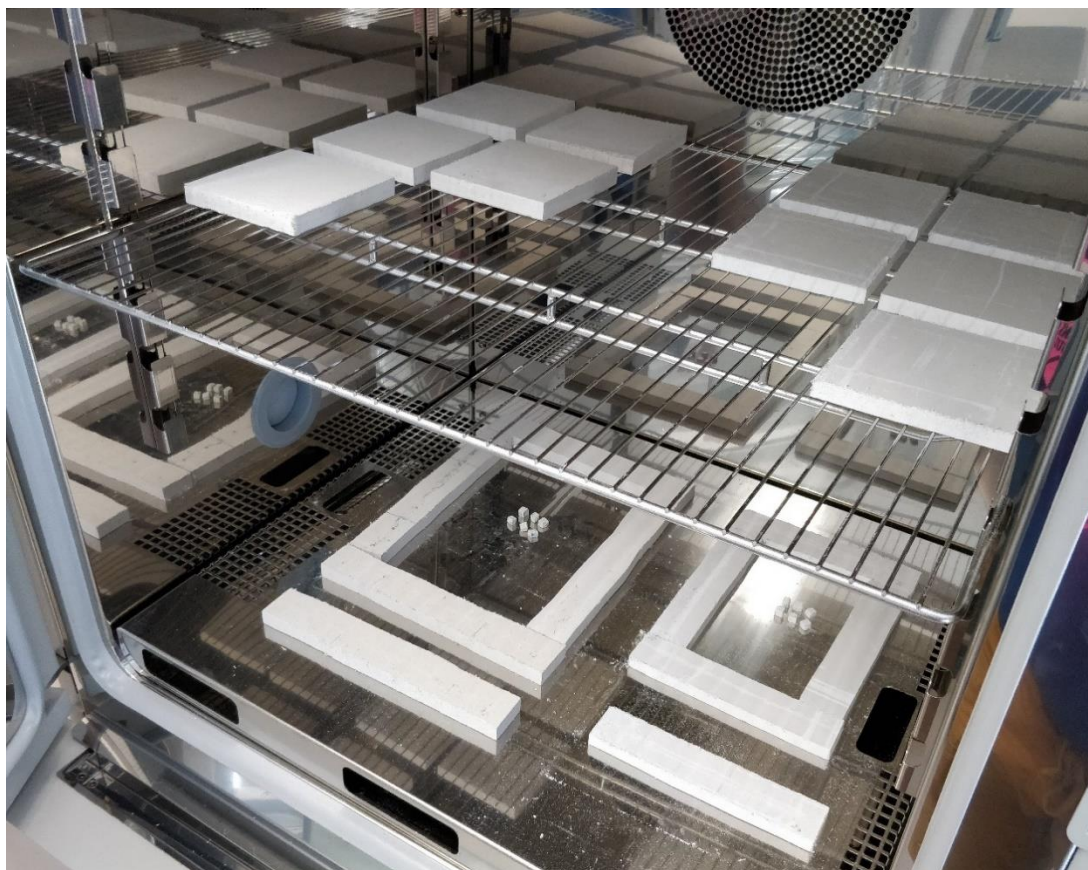


Figura 15 – Condicionamento das amostras de silicato de cálcio

Após completar os 9 condicionamentos na camara climática, foi realizado um procedimento de normalização a 23°C e 50% de umidade segundo a EN310, de modo a tornar os resultados comparáveis nos testes a serem realizados posteriormente atingindo o equilíbrio higroscópico. Na Figura 16 podemos observar as condições climáticas dentro da câmara. Na Figura 17 é apresentado a forma como foi disposto os provetes no interior da camara climática durante o procedimento de normalização.



Figura 16 – Temperatura e Humidade para o procedimento de normalização.

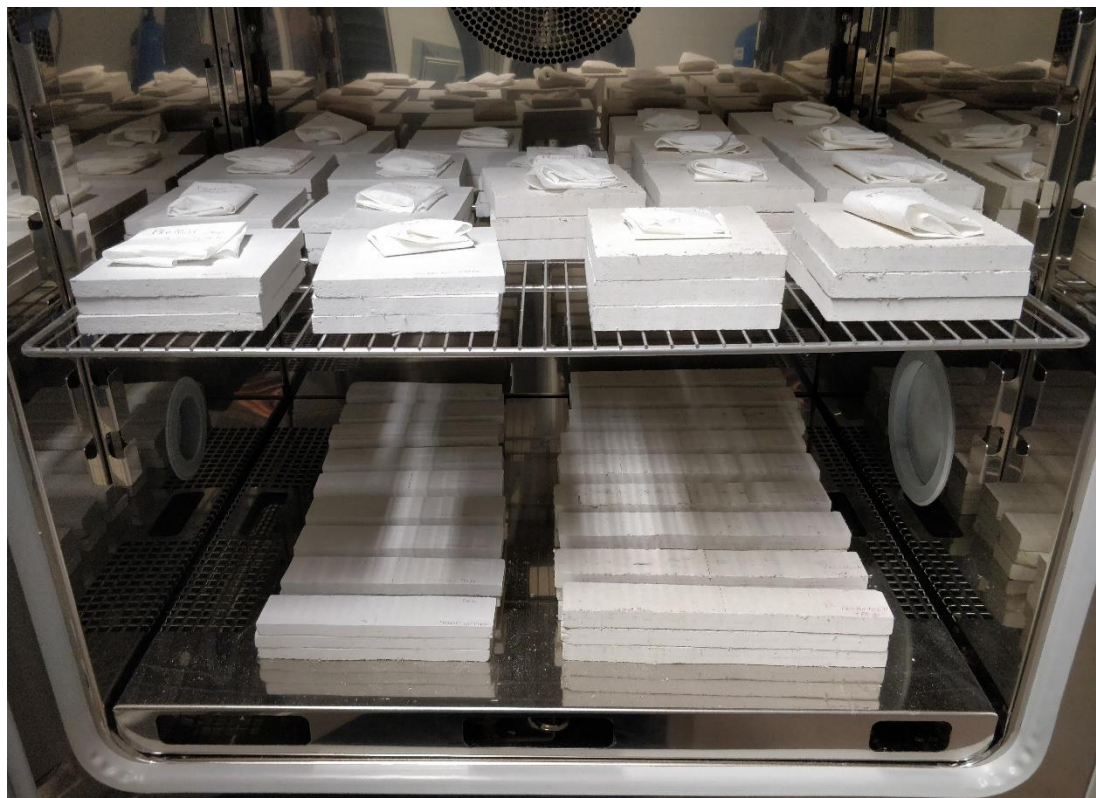


Figura 17 – Disposição das amostras durante o procedimento de normalização

Durante a normalização, é necessário verificar a massa de cada uma das amostras e verificar quando este procedimento se prova por encerrado quando a diferença de massa não é superior a 0,1% em um período de 24 horas, Figura 18. Foram necessários três dias para

todos os provetes atingissem o equilíbrio higroscópico. Os valores obtidos para a massa de cada provete estão dispostos nos anexos no final desta dissertação.

Para essa etapa foi realizado a medição da massa antes do procedimento e mais uma vez após 24 horas depois da normalização e repetir esse processo mais duas vezes para garantir o equilíbrio higroscópico. As amostras foram alternadas no interior da câmara com o intuito de que fossem contempladas as condições estabelecidas igualmente.

A balança utilizada foi cedida pelo Centro de Investigação da Montanha da mara Kern-Sohn e modelo PLJ. Possui uma capacidade de pesar até 3500 gramas, legibilidade de 10 miligramas, reprodutibilidade de 10 miligramas, valor de verificação de 10 miligramas, e tempo de estabilização de 4 segundos.



Figura 18 – Medição de massa no procedimento de normalização

Na figura acima, a esquerda pode-se observar a massa do Specimen 11 do Promat 200 para o GHP antes do procedimento de normalização e a direita massa do Specimen 11 do Promatec H para o TPB antes do procedimento de normalização.

Após o envelhecimento natural acelerado, Figura 19, é perceptível o quanto sofre com a desidratação pois o material começa a apresentar um comportamento de se esfarelar e quebrar em pedaços exigindo um maior cuidado ao manusear este material.



Figura 19 – Promat 200 visto lateralmente após o condicionamento climático

Observou-se também a formação de micro-poros mais escuros formados após a evaporação de água livre do interior do material, como pode ser visto na Figura 20.

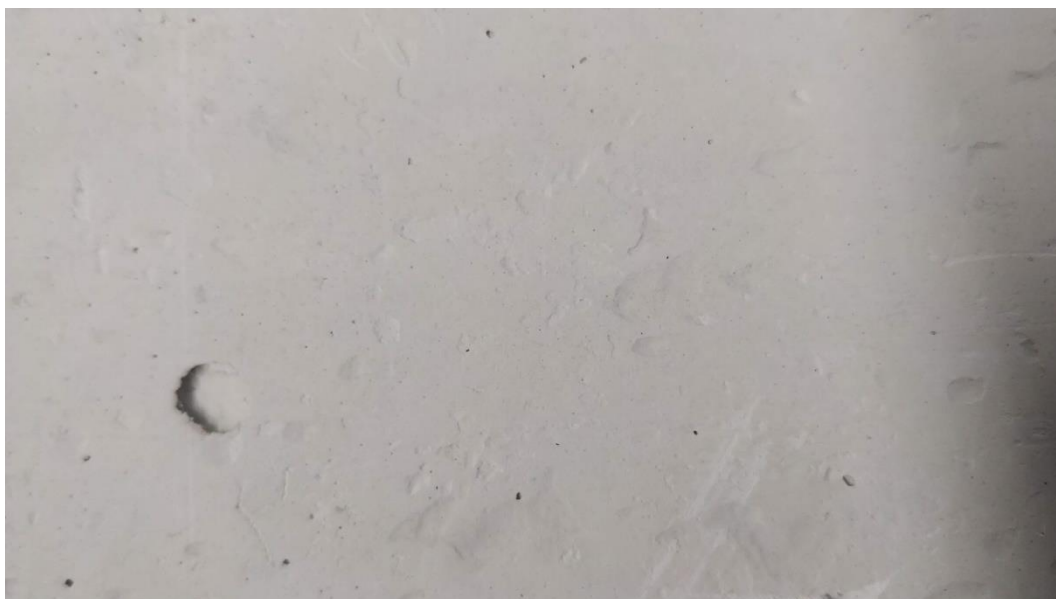


Figura 20 – Análise superficial do Promat 200 após o condicionamento climático

Na Figura 21 e na Figura 22, é visto de cima as 3 amostras do ensaio 0 e 3 amostras do ensaio 8, respectivamente. Não foram observadas diferenças visualmente relevantes tanto na lateral como nas partes de cima ou de baixo do material. O Promatec H manteve a sua resistência ao manuseio durante o período de testes experimentais e não apresentou fissuras, nem quebras ou fissuras na superfície do material.

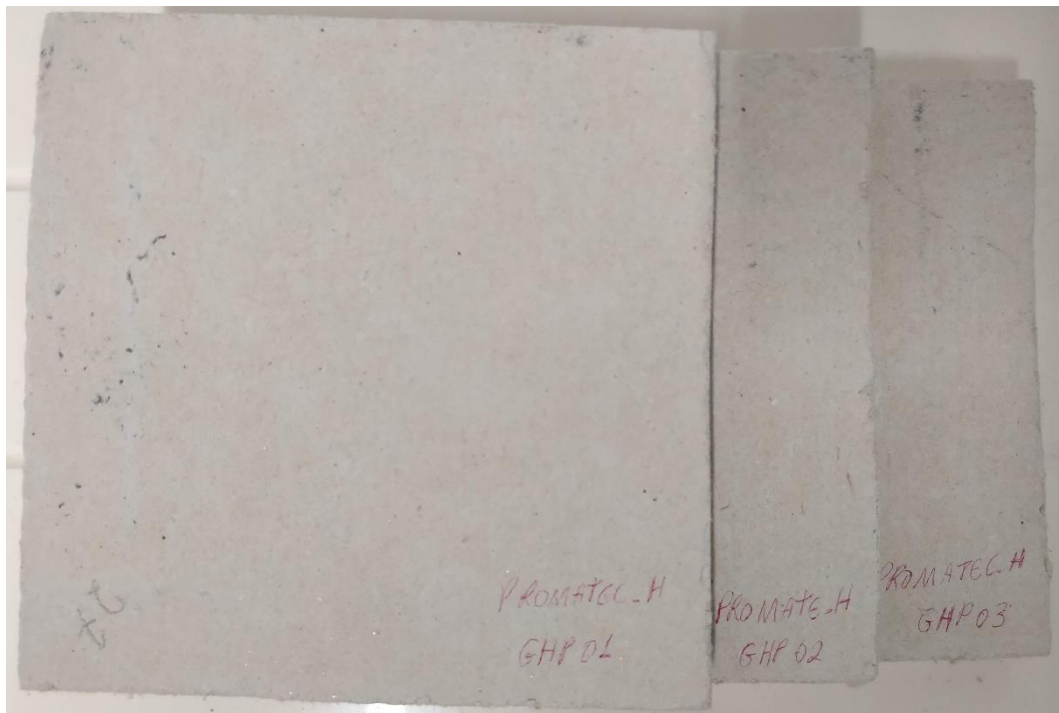


Figura 21 – Promatec H visto de cima antes do condicionamento climático

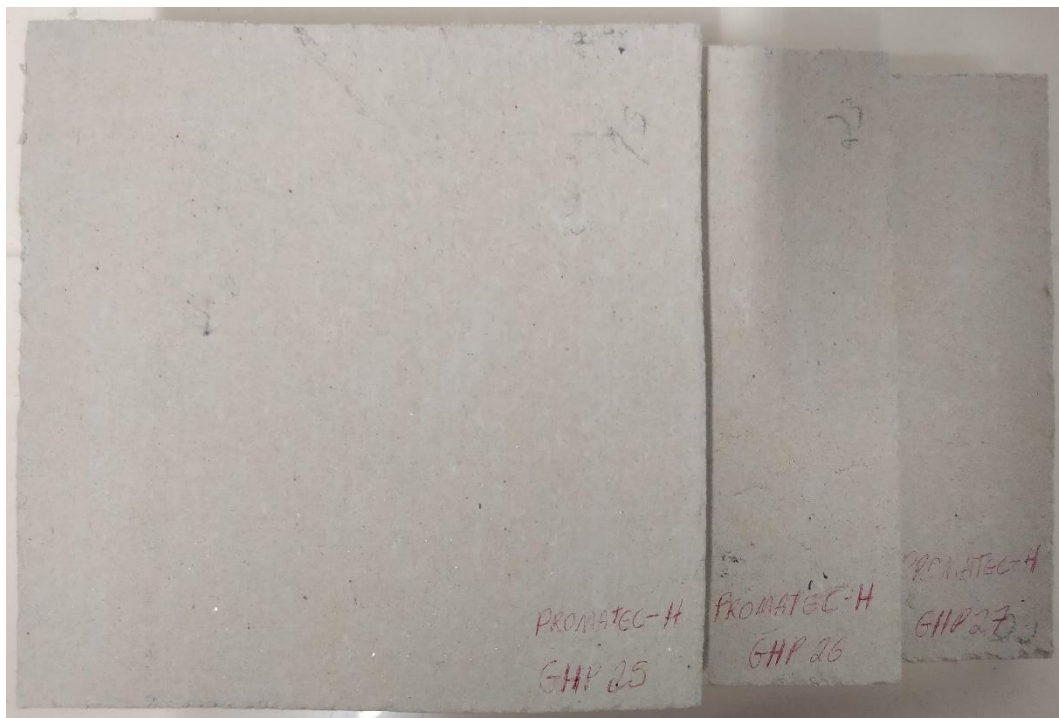


Figura 22 – Promatec H visto de cima após o condicionamento climático

3.3 Determinação Experimental da Condutividade Térmica através do equipamento de Placa Quente Protegida

3.3.1 Princípio de Funcionamento

Basicamente, a operação do equipamento de Placa Quente Protegida consiste em estabelecer o estado estacionário do gradiente de temperatura sobre um material de espessura conhecida, isto é possível devido ao controle do fluxo de calor originado pelo prato quente que flui para prato frio através do material a ser observado, [31].

Neste método de medição da condutividade térmica considera-se que o calor é transferido por condução unidimensional e o sistema é caracterizado por um regime estacionário, no qual a temperatura, em cada ponto do sistema é independente do tempo. Sendo assim, para o fluxo de calor longitudinal, sem perda de energia radial, nem geração de energia no interior do sólido a lei de Fourier pode ser usada para determinar a condutividade térmica, ver equação (3.2).

$$K = \frac{Ql}{A(T_2 - T_1)} \quad (3.2)$$

O equipamento utilizado para a medição da condutividade térmica pode ser aplicado para materiais que possuam condutividade térmica de 0.01 até 6 [W/mK]. Os materiais que estiverem dentro desta tolerância podem ser submetidos a temperaturas extremas, que vai desde o ponto de fusão do nitrogênio [~78 K] até o ponto de fusão do aço [~1810 K], dependendo do tipo do equipamento. O equipamento permite realizar os ensaios dentro dos padrões internacionais como a ISO 8302, EN 1946-2, EN12667, EN 12664, EN12939, ASTM C177 e DIN 52612, [31].

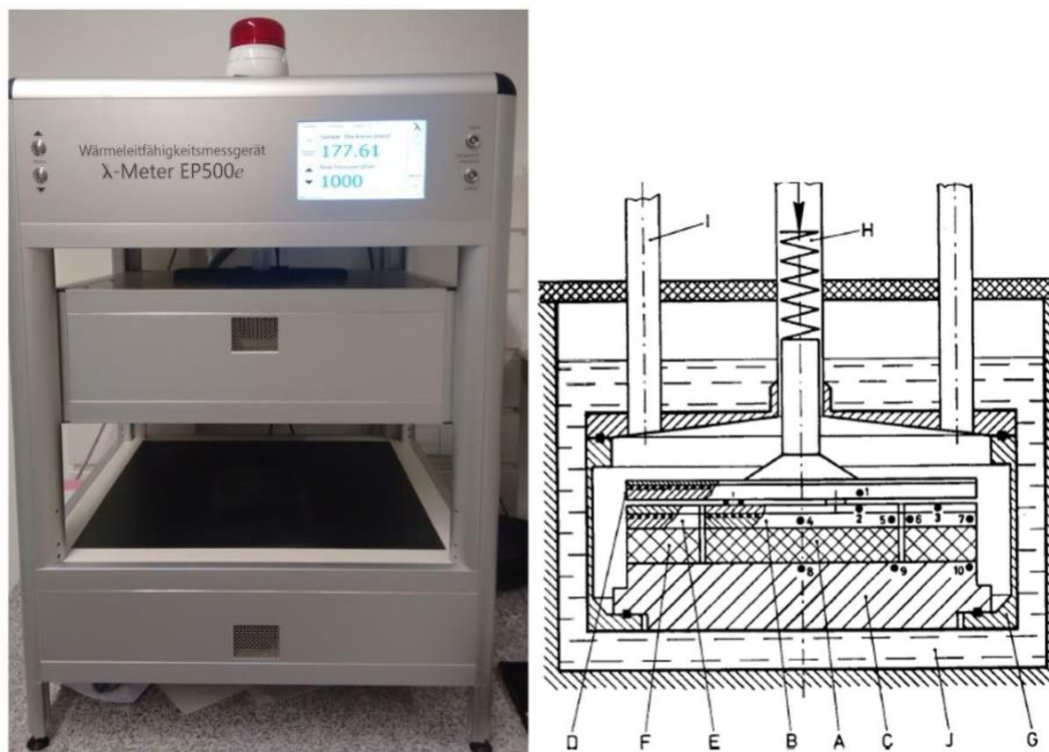


Figura 23 – Equipamento de Placa Quente Protegida e seus Componentes

A Figura 23 ilustra os principais componentes do equipamento que funcionam simultaneamente para realizar as medições. O provete (A) é posicionado no centro de um suporte apropriado e inserido entre o prato quente (B) e o prato frio (C). O prato quente dissipa uma potência elétrica constante $P = UI$, na qual flui para o prato frio através da amostra da maneira mais homogênea possível. Com isso, o fluxo térmico conhecido resulta na variação de temperatura da amostra, o que permite realizar a medição da condutividade térmica. Dois aquecedores de proteção, a placa (D) e o anel (E) que cercam a placa quente, são responsáveis por estabelecer um fluxo de calor uniforme e unidimensional, tal fluxo é protegido por uma camada de material isolante (G). A haste (H) é empregada para proporcionar o movimento vertical da placa quente bem como aplicar a pressão configurada pelo software. Por fim, toda temperatura de trabalho é rigorosamente controlada por sensores de temperaturas (J) que são distribuídos em vários pontos do equipamento. Toda a instrumentação é integrado a um computador que recolhe os dados relevantes para executar a medição da condutividade térmica, [31].

A versão do equipamento utilizado nos testes é λ -METER EP500E. Com esta versão é possível realizar até três medições por testes em temperaturas arbitrárias, a gama de temperatura contemplada por esse equipamento deve estar entre -10°C até 50°C . Qualquer

material no estado sólido pode ser ensaiado, desde que possua valores de condutividade térmica contida no intervalo de 0,25 até 2 [W/mK].

3.3.2 Procedimentos

De acordo com o fabricante, para medir a condutividade térmica de materiais isolantes, as amostras devem ser preparadas com área de 500 [mm²], porém, há 3 tipos de suportes, versão A (200x200 [mm²]), versão B (250x250 [mm²]) e versão C (150x150 [mm²]), que podem ser utilizados para os casos em que haja necessidade de utilizar amostras com dimensões inferiores. A Figura 24 demonstra o provete na máquina com o devido suporte versão C.



Figura 24 – Inserção do suporte e peça no equipamento GHP

Inicialmente, a primeira etapa do procedimento é a calibração do equipamento, esse passo fornece à máquina a coordenada vertical zero e deve ser feita com o suporte fora do equipamento. Em seguida, é necessário tirar medidas da área e espessura da amostra, pois estes valores são requeridos na interface do *software*. Então, é necessário ajustar o suporte na posição adequada, e antes de executar o teste, é necessário verificar se a espessura do suporte é ligeiramente superior à espessura da amostra para garantir a aplicação correta da pressão entre as partes superior e inferior no entorno da amostra. Há várias espessuras de

suportes disponíveis que podem ser combinadas e usadas como calço para atingir a altura necessária entre o suporte e a amostra.

Finalmente, a última etapa é a configuração do *software*, onde é atribuído alguns parâmetros de entrada, como: massa, dimensões e temperaturas que se deseja obter os valores da condutividade térmica, ver Figura 25.

The screenshot shows the 'Prepare test' window with the following configuration details:

- Test Parameters:**
 - Test no.: 20-08-2020_15-59
 - Specimen designation: Henrique_Promat200_S01
 - Spec. thickness: 15.42 mm
 - Spec. dimensions: 150 mm x 150 mm
 - Specimen mass: (empty)
 - Pressure: 1000 Pa
 - Raw density: (empty) kg / m³
 - Temp. coeff.: (empty) mW/(m * K²)
 - Database: \ABRIGANTIA03\Desktop\HENRIQUE\GHP\DB\ Promat200.DBF
- Test configuration:**
 - Number of test temperatures: Three test temperatures
 - Thickness selection: Nominal thickness (15 mm), Thickn. at 250 Pa
 - EPS (thickn. effect) acc. to EN 13163:
 - Test will be ended if change of lambda is less than 1.0 % over time of 180 min.
- Temperatures:**
 - 1. test temp.: 10 °C
 - 2. test temp.: 25 °C
 - 3. test temp.: 40 °C
 - Temp. difference between sensor plates: 15 K
 - Temperature for subsequent test:
- Notes:** (empty text area)
- Buttons:** Load, Save, Start

Figura 25 - Configuração do software GHP

No caso das placas Promatec H, o fabricante fornece os valores da condutividade térmica em função da temperatura, ver Tabela 6, cujos valores serão utilizados para efeitos de comparação.

Tabela 6 - Valores da condutividade térmica fornecida pelo fabricante.

| K Fabricante | |
|---------------------|----------|
| T [°C] | K [W/mK] |
| 20 | 0,17 |
| 100 | 0,19 |
| 200 | 0,21 |

No caso do Promat 200, o fabricante fornece um valor de condutividade térmica de 0,189 W/mK, sem dizer a qual temperatura fora submetido a leitura da condutividade.

3.3.3 Execução do experimento

A condutividade térmica das placas de silicato de cálcio foi verificada mediante a tecnologia do equipamento de Placa Quente Protegida. Os testes foram conduzidos em um conjunto de três amostras para cada tipo de placa antes e após as reações do envelhecimento artificial na camara climática. Os resultados foram obtidos para as temperaturas de 10°C, 25°C e 40°C. A medição da condutividade térmica para estas 3 condições de temperatura levou entre 12 a 14 horas para cada provete.

Nos gráficos dos tópicos a seguir serão apresentadas as médias dos resultados obtidos, os resultados de condutividade térmica de cada provete estão nos anexos no final desta dissertação.

Sabe-se que a sensibilidade da condutividade térmica em relação ao calor ocorre proporcionalmente ao valor do gradiente de temperatura. No entanto, mesmo com esta pequena variação é possível identificar a tendência gradual do comportamento da condutividade térmica à medida que a temperatura aumenta.

3.3.3.1 Promat 200

O material que se submeteu ao envelhecimento demonstrado pela Figura 26 está apresentando um comportamento em que a condutividade térmica aumenta à medida que a temperatura aumenta.

Utilizando como base a temperatura de 25°C no equipamento GHP, no ensaio 0, foi medido uma condutividade 201,03 mW/mK e no caso do ensaio 6, o maior número de condutividade térmica, foi medido um valor de 228,07 mW/mK. Esses valores representam uma condutividade térmica 13,45% maior em relação ao estado inicial.

No caso dos ensaios 7, 8 e 9, podemos observar que a condutividade térmica diminuiu consideravelmente para valores de 90,83 mW/mK no caso do ensaio 8. Uma diminuição de 54,82% no valor comparado ao estado inicial. O silicato de cálcio começou a perder massa por evaporação de água livre e esses espaços que antes eram preenchidos por água passaram a ser preenchido por ar, [21]. Sabemos que o ar possui uma condutividade térmica menor do que a água, portanto o comportamento do Promat 200 começa a ser mais eficiente no quesito comportamento térmico.

Devido ao aumento da humidade em 10%, podemos observar que a condutividade térmica no caso do ensaio 9 também aumenta. Esse comportamento evidencia o fenómeno de evaporação de água livre, pois a maior humidade dificulta a realização desse processo.

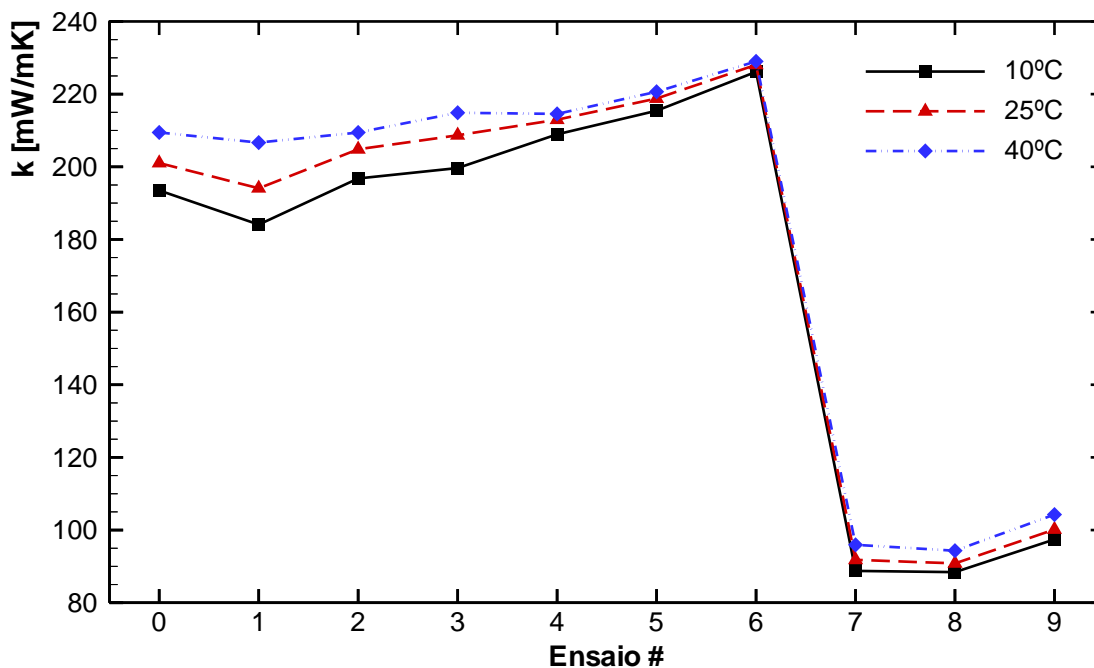


Figura 26 - Condutividade Térmica do Promat 200

A Figura 27 mostra o quanto cada amostra variou a sua condutividade térmica em relação a amostra inicial. Nesses gráficos fica evidenciado o decréscimo da condutividade térmica nos ensaios 7, 8 e 9 em relação aos outros testes com outras condições de temperatura e humidade.

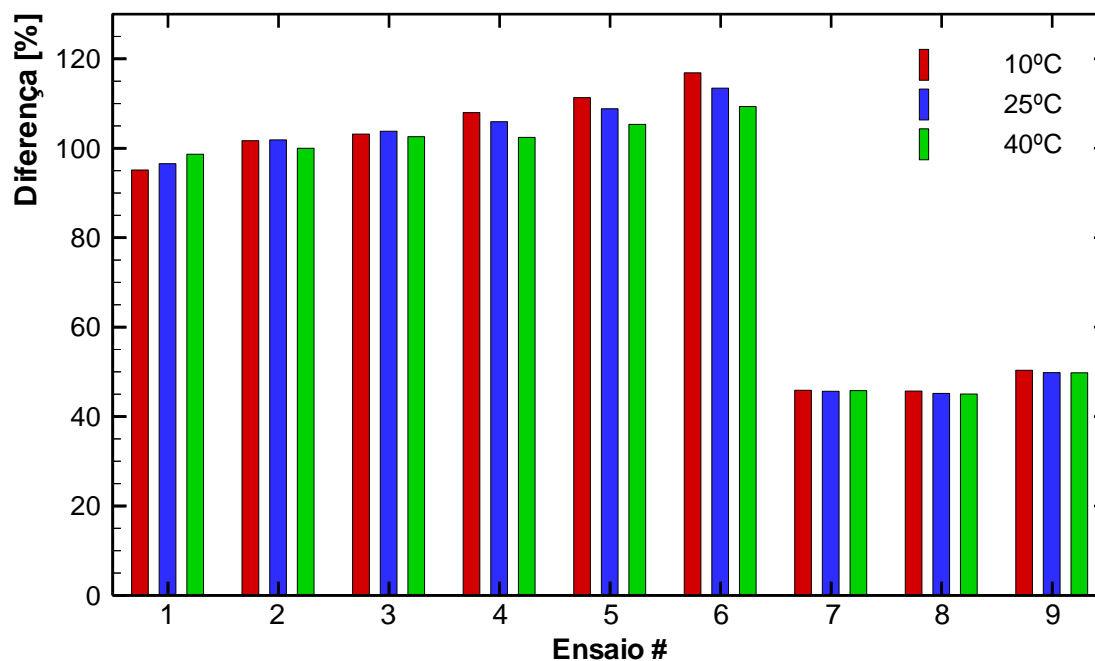


Figura 27 - Diferença da condutividade térmica do Promat 200 em relação à amostra inicial.

3.3.3.2 Promatec H

Na Figura 28 é apresentado o comportamento da condutividade térmica no Promatec H no qual demonstra um comportamento mais homogêneo, pois as diferenças em várias condições climáticas são menos acentuadas do que no Promat 200. Porém podemos observar um comportamento parecido se formos comparar o estado inicial com os resultados na maior temperatura utilizada. O aumento da condutividade térmica é de 6%. Na condição climática do ensaio 1, a condutividade térmica chega a ter uma diferença de 12,9% nas condições de teste de 10°C no GHP.

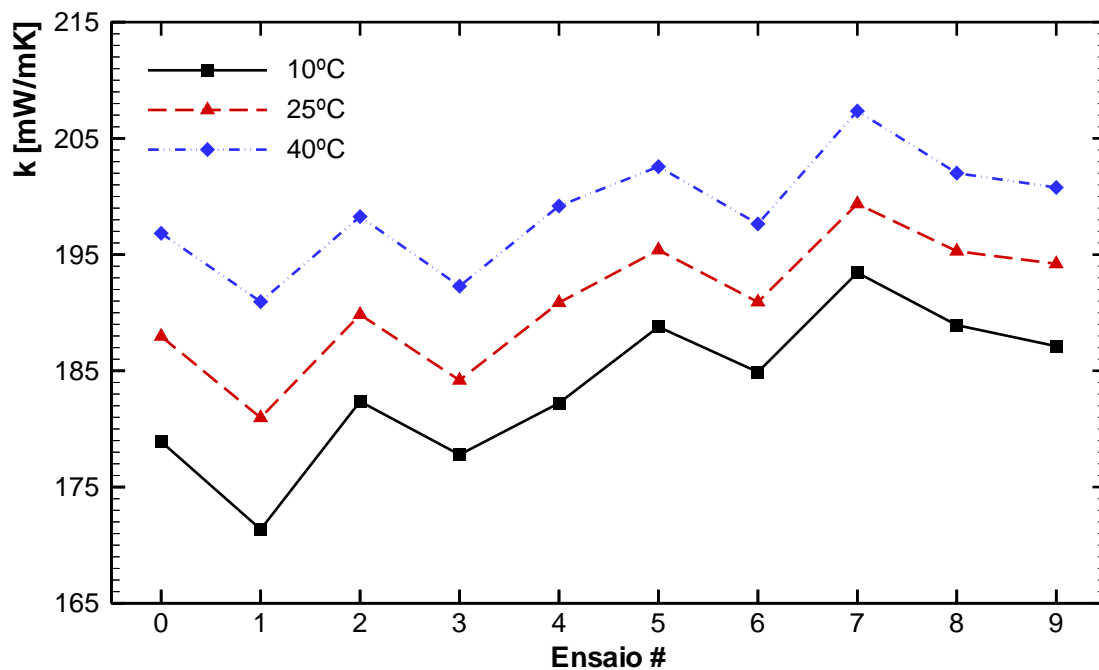


Figura 28 - Condutividade Térmica do Promatec H

Essa diferença é menor do que observada no Promat 200, por esse motivo podemos dizer que a evaporação de água livre do Promatec H acentua-se em uma temperatura ligeiramente superior a 80°C, para os ensaios 7, 8 e 9. Pode-se observar na Figura 29 a diferença em termos percentuais das amostras envelhecidas com as amostras iniciais.

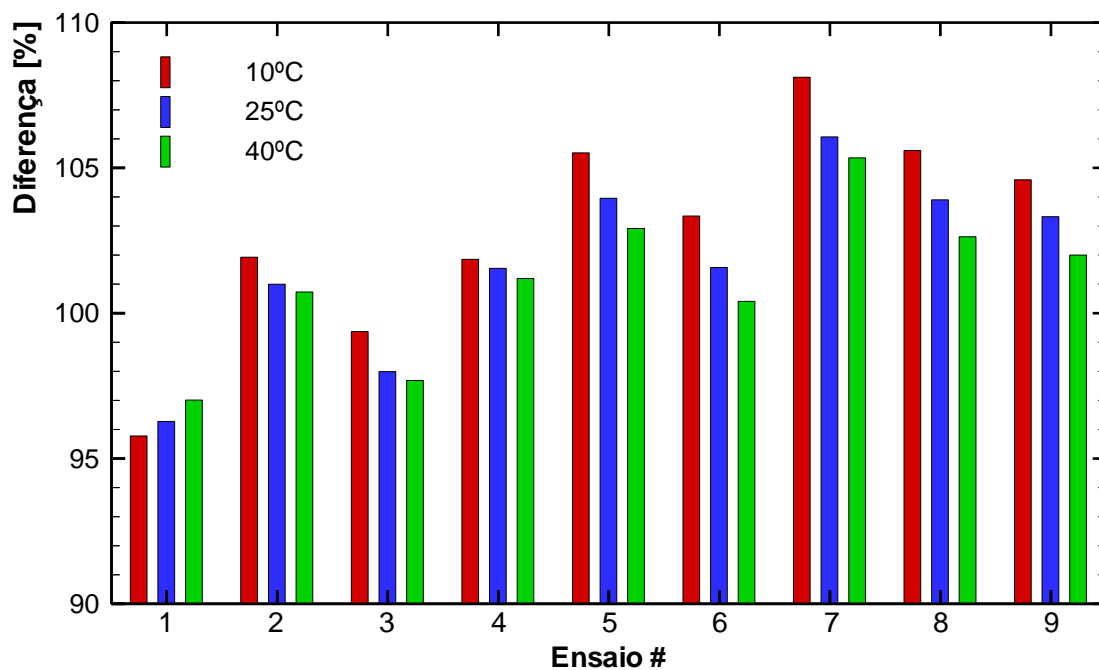


Figura 29 - Diferença da condutividade de térmica do Promatec H em relação à amostra inicial.

3.4 Determinação Experimental das Características Mecânicas através do Ensaio de Flexão em Três Pontos

3.4.1 Procedimentos

Com o intuito de avaliar a durabilidade das propriedades mecânicas das placas de silicato de cálcio, foi utilizado a ASTM D790-03, [32], que determina a utilização do ensaio de flexão em três pontos e para o cálculo da resistência à flexão (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e força máxima na flexão. Esta norma prescreve as amostras para que tenham comprimento 16 vezes a sua espessura nominal, com uma distância de 50 mm para a extremidade do provete, como mostra a Figura 30.

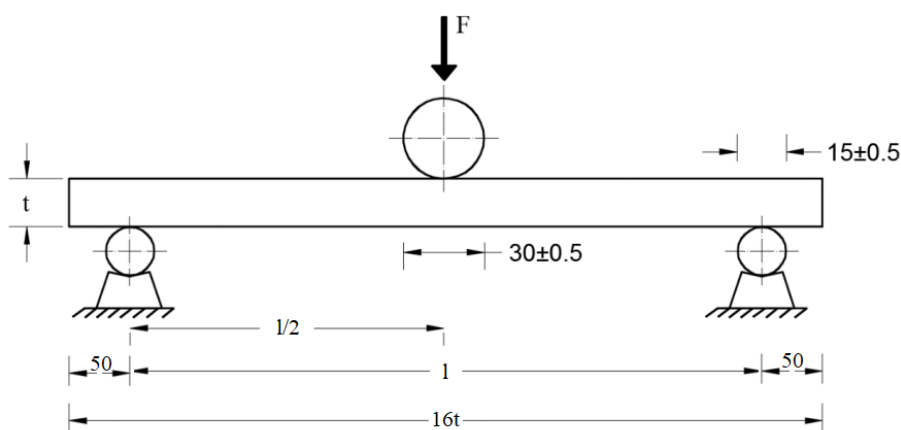


Figura 30 - Representação gráfica do ensaio de flexão em três pontos

Foram produzidos e ensaiados 72 provetes, cada ensaio com uma repetibilidade de 3 amostras para melhor observar o comportamento e analisar os resultados corretamente e eliminando o erro que poderiam acontecer os ensaios tanto de manuseio como do próprio defeito do provete. A Tabela 7 mostra as dimensões utilizadas para cada material durante o ensaio de flexão e a distância entre suportes utilizadas em cada ensaio.

Para cálculo posterior das propriedades mecânicas de cada provete, foi necessário realizar um levantamento geométrico de cada provete utilizado no ensaio de flexão em três pontos. Por mais que a largura definida na Tabela 4 seja 50 mm, a variação durante o procedimento de corte não daria a certeza de que todas as amostras tivessem as mesmas dimensões de largura. Os resultados deste procedimento estão nos anexos no final desta dissertação.

Tabela 7 - Dimensões dos provetes para o ensaio de flexão

| Painel | Espessura (t) [mm] | Distancia entre os suportes (l) [mm] | Comprimento Total (16t) [mm] |
|------------|--------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Promat 200 | 15 | 140 | 240 |
| Promatec H | 20,4 | 220 | 326,4 |

Na Figura 31 é apresentado a máquina universal de ensaios configurada para um ensaio de três pontos, com um provete do Promat 200 para exemplificar as condições de teste.



Figura 31 – Máquina Universal Instron 3382

Foi utilizado como base a norma EN310:1993, para cálculo do módulo de elasticidade, resistência a flexão e força máxima de cada um dos provetes, [32]. Para começar os testes foram considerados os valores de resistência à flexão existentes na ficha técnica dos produtos, e considerando as dimensões geométricas reais dos provetes, a velocidade de avanço foi de 10mm/min, [33].

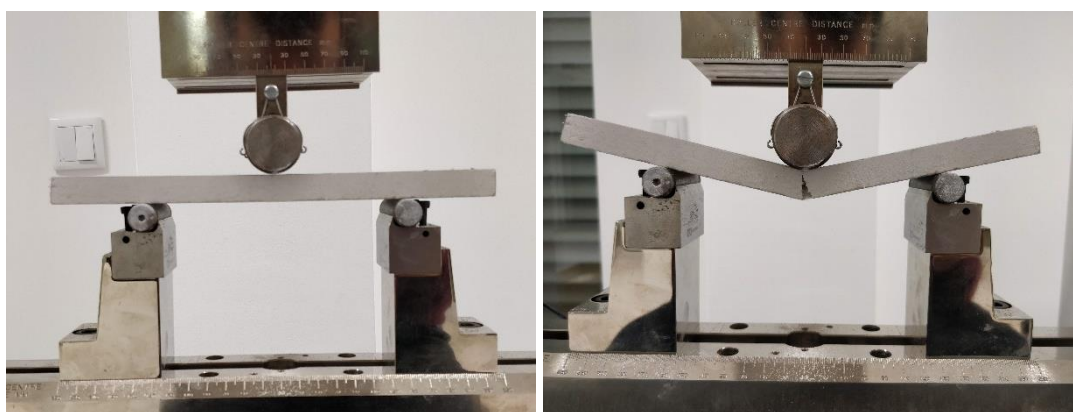
A resistência à flexão, tensão, foi calculada considerando a carga máxima localizada no meio do provete $F_{máx}$, a distancia l entre os apoios, a largura b do provete, a espessura do provete t de acordo com a Equação 3.3.

$$MOR = \frac{3 \times F_{max} \times l}{2 \times b \times t^2} \quad (3.3)$$

O módulo de elasticidade (MOE) foi calculado, utilizando-se a região linear da curva de leituras de carga versus deformação, levando em conta a força F_2 com seu incremento de deformação a_2 e a força F_1 e seu incremento a_1 , ambos presentes no regime elástico, de forma que F_2 equivale a 40% da $F_{máx}$ e F_1 10% da $F_{máx}$, de acordo com a Equação 3.4.

$$MOE = \frac{l^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times b \times t^3 \times (\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (3.4)$$

Na Figura 32, podemos observar o Promat 200 antes e depois do teste, com a rutura ocorrendo no meio do provete.



a)

b)

Figura 32 – Teste de Flexão em 3 pontos, antes do teste a) e depois do teste b)

Para que o teste possa ser realizado com a menor possibilidade de erro possível é necessário garantir o posicionamento dos provetes onde a aplicação da força seja no meio do provete e que os apoios estejam na posição determinada pelo tipo de ensaio a ser realizado, sendo exemplificado pela Figura 33.

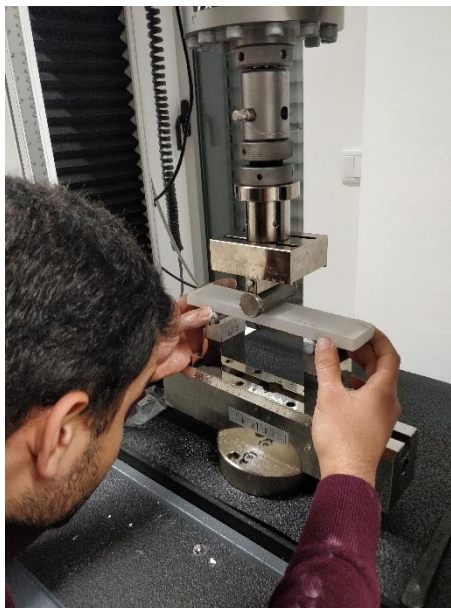


Figura 33 – Ajuste do Provete na Máquina Universal para o TPB

Nos subtópicos a seguir será discutido o comportamento das placas de silicato de cálcio sob a perspectiva das forças no sentido longitudinal, sendo elas o módulo de resistência, módulo de elasticidade e força máxima do ensaio.

3.4.2 *Execução do Experimento*

3.4.2.1 *Promat 200*

Apresento a seguir o gráfico gerado pelo software do Instron para o specimen 02 relativo ao estado inicial, Figura 34, e logo após o specimen retest 06 relativo ao ensaio 8, Figura 35.

Pode-se observar que a amostra envelhecida apresenta uma curva muito acentuada em relação as amostras iniciais, o pico de força máxima ocorre com cerca de 1mm de extensão enquanto que na amostra inicial a essa mesma extensão já suporta cerca de 300N e sua força máxima está nos 2mm de extensão com um valor de 342,18N.

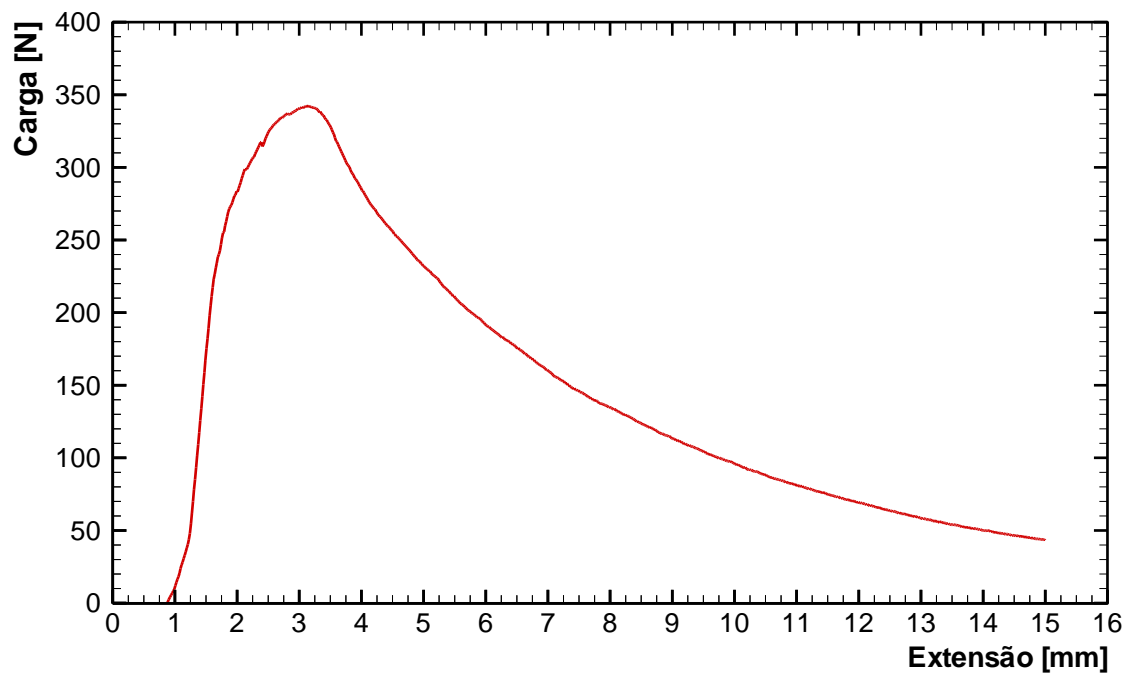


Figura 34 - Gráfico Carga x Deformação Promat 200 S02

O condicionamento climático na temperatura de 80°C se mostrou muito prejudicial para o Promat 200 no quesito Força Máxima, pois depois que se passa o limite de força máxima o material já não deve ser reutilizado e sim substituído. A quantidade de fissuras existentes nos corpos de prova tornou evidente que o material já não cumpriria com as funções pela qual ele foi desenvolvido do ponto de vista do comportamento mecânico.

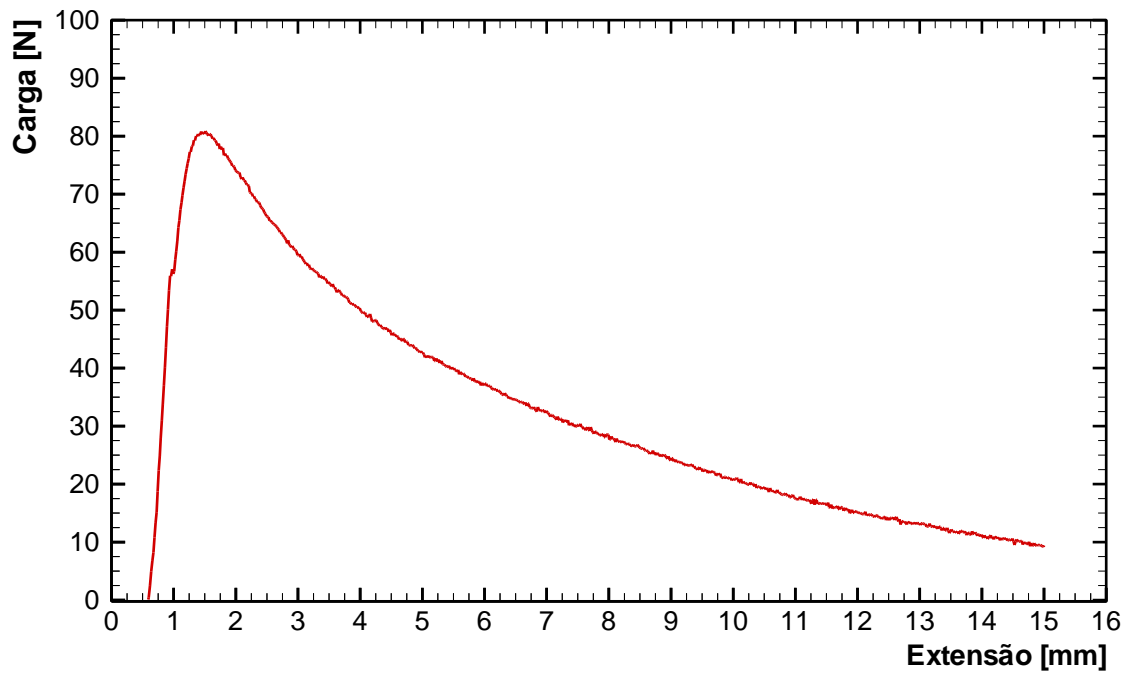


Figura 35 - Gráfico Carga x Deformação Promat 200 SR06

Para o Promat 200, o fabricante disponibiliza o módulo de resistência no sentido longitudinal da placa de 3 MPa, disponibiliza também dados de resistência a tração de 1,2 MPa e resistência a compressão de 4,7 MPa.

A Figura 36, representa a média dos valores de força máxima para cada condição de ensaio e os valores de força máxima, assim como as propriedades mecânicas de cada amostra estão dispostos no anexo no final desta dissertação.

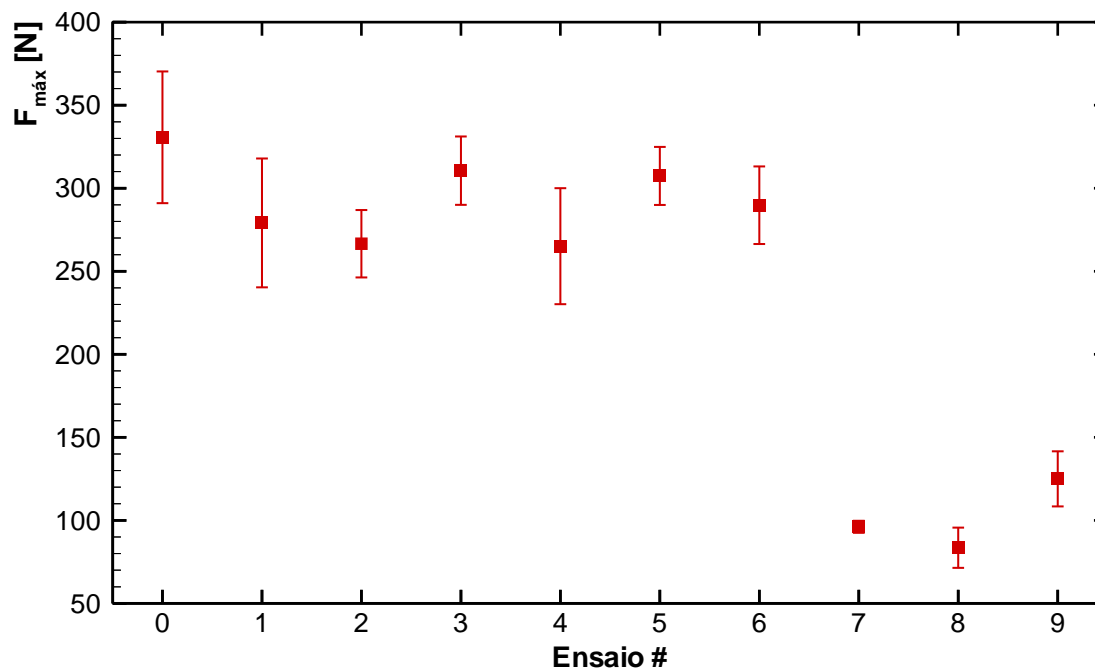


Figura 36 - Força Máxima realizada durante os ensaios do Promat 200

Nos testes realizados observou-se um comportamento de maior resistência para os provetes no estado inicial e os outros resultados derivados do envelhecimento artificial apresentaram uma diminuição considerável da Força Máxima suportada. Durante a realização dos testes era possível escutar alguns estalos e quando ocorria a primeira fissura logo após a força aplicada pela máquina universal diminuía consideravelmente.

Será feita uma análise do ponto de vista do Módulo de Resistência e Módulo de elasticidade (MOR e MOE), propriedades importantes pois nos dão uma noção da resistência e máxima condição pela qual o material retorna a seu estado inicial sem apresentar danos.

Através dos dados apresentados na Figura 37, observou-se que o MOR se mantém sem diferenças grandes até os testes onde os corpos de provas estavam condicionados a uma temperatura de 50°C. Uma leve diminuição foi observada nos ensaios 1 e 2 nos quais as moléculas de água estavam se expandindo devido a menor temperatura, causando uma rutura dos espaços em volta dos poros de água no interior do material. Devido a uma elevada humidade e, portanto, uma dificuldade do material de absorver maior quantidade de água esse comportamento não ocorreu no ensaio 3.

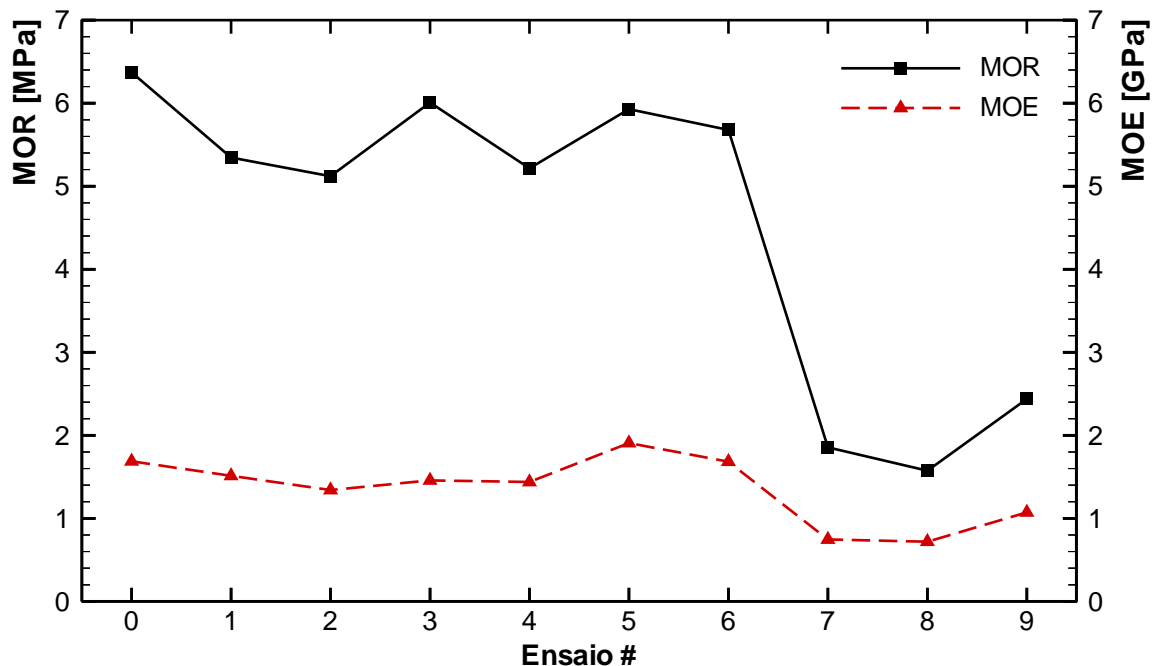


Figura 37 - Módulo de Resistência e Módulo de Elasticidade do Promat 200

O Módulo de elasticidade manteve-se praticamente inalterado até a condição de temperatura de 50°C, esse comportamento nos mostra que o material suporta menos a temperaturas altas e condições de temperatura superiores e iguais aos 80°C tornam o material menos resistente e perde as características originais do produto.

Na Figura 38, é apresentado uma comparação dos valores de Força Máxima, Módulo de Resistência e Módulo de Elasticidade em relação as amostras que não foram condicionadas climaticamente, portanto consideradas amostras no estado inicial.

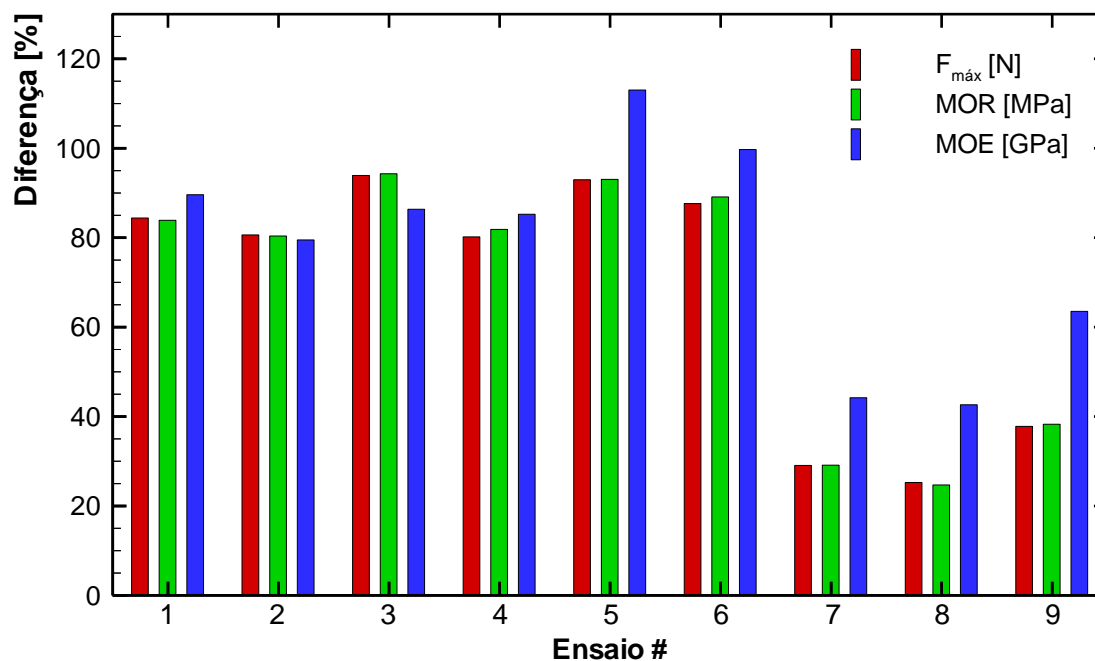


Figura 38 - Diferença da Força Máxima, Módulo de Resistência e Módulo de Elasticidade do Promat 200 em relação à amostra inicial.

De acordo com o fabricante o módulo de resistência para esse material é de 3MPa, portanto para todos os testes a menos de 50°C o material supera os limites pelo qual foi projetado, porém para a temperatura de 80°C isso já não acontece, pois, o menor valor é no ensaio 8 a 1,57MPa e o maior valor a 2,44MPa no ensaio 9.

Conclui-se que do ponto de vista da resistência mecânica, a desidratação do Promat 200 acarreta uma degradação das propriedades mecânicas em temperaturas superiores a 50°C e com humidades inferiores a 60%.

3.4.2.2 Promatec H

A Figura 39, representa a média dos valores de força máxima para cada condição de teste e os valores de força máxima e as propriedades mecânicas de cada amostra estão dispostos no anexo no final desta dissertação.

O fabricante das placas de silicato de cálcio disponibiliza os valores para o Módulo de Elasticidade e Módulo de Resistência para o Promatec H. O módulo de elasticidade no sentido Longitudinal e Latitudinal são de 4,2 e 2,9 GPa respectivamente e para o módulo de resistência os valores são de 7,6 e 4,8 MPa.

O Promatec H resiste a maiores valores de forças longitudinais do que o material Promat 200 pois esta diferença chega a até 20% se compararmos os melhores corpos de prova de cada material. Podemos observar este fenómeno na Figura 39, onde nas amostras do estado inicial apresentam uma capacidade de suportar uma força acima de 390N nos ensaios realizados. Outro ponto a se destacar é a baixa diferença de valores entre o mais baixo resultado e o maior resultado, sendo apenas uma diferença de aproximadamente 100N.

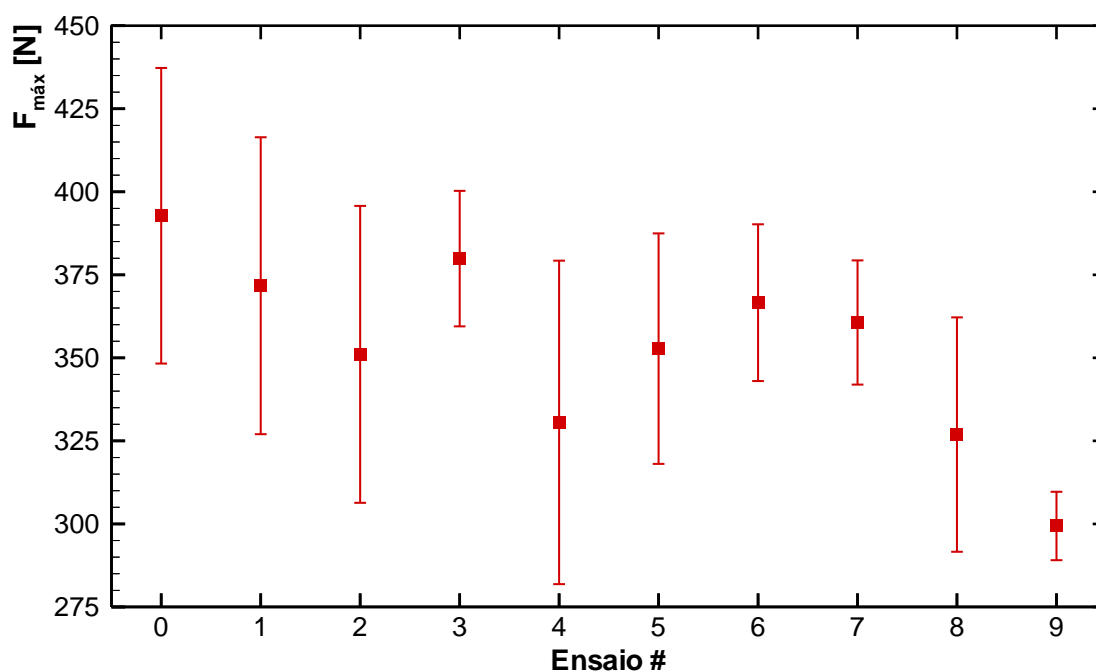


Figura 39 - Força Máxima realizada durante os ensaios do Promatec H

Este material não apresentou fissuras ou quebras durante os ensaios, demonstrando maior confiabilidade e repetibilidade nos resultados.

Assim como no Promat 200, nos testes realizados observou-se um comportamento de maior resistência para os provetes no estado inicial e os outros resultados derivados do envelhecimento artificial apresentaram uma diminuição considerável da Força Máxima suportada.

Em seguida apresento o gráfico gerado pelo software do Instron para o specimen 02 relativo ao estado inicial, Figura 40, e logo após o specimen 27 relativo ao ensaio 8, Figura 41.

Pode-se observar que o pico de força máxima ocorre com cerca de 1mm de extensão enquanto que na amostra inicial já suporta cerca de 370N, a amostra envelhecida obtém um valor de aproximadamente 300N.

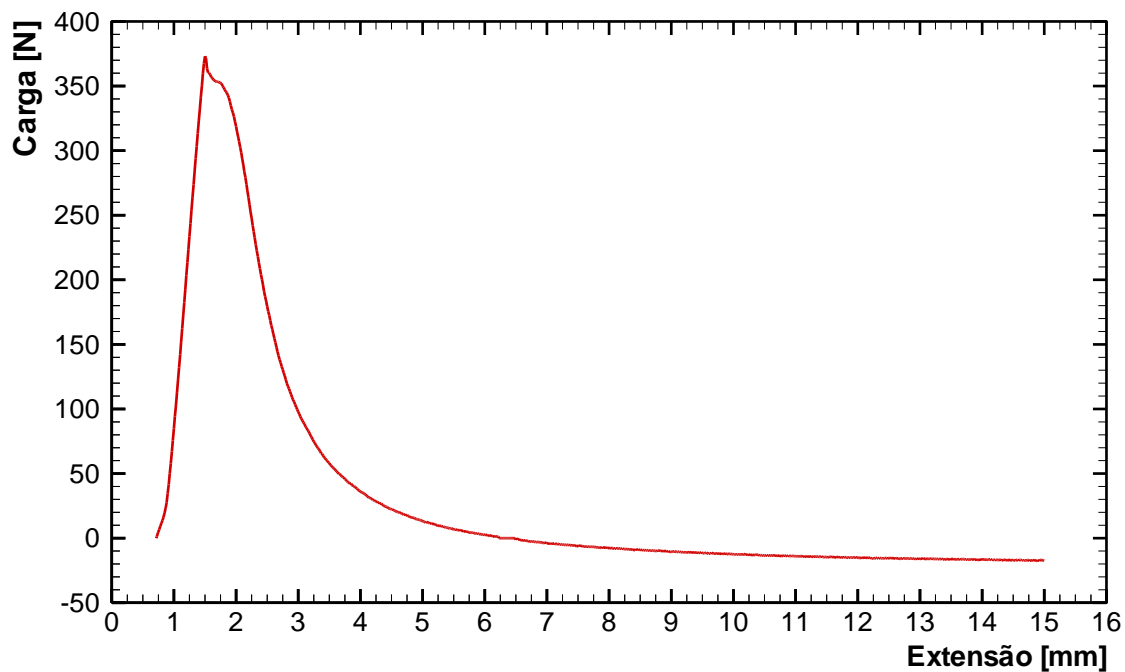


Figura 40 - Gráfico Carga x Deformação Promatec H S02

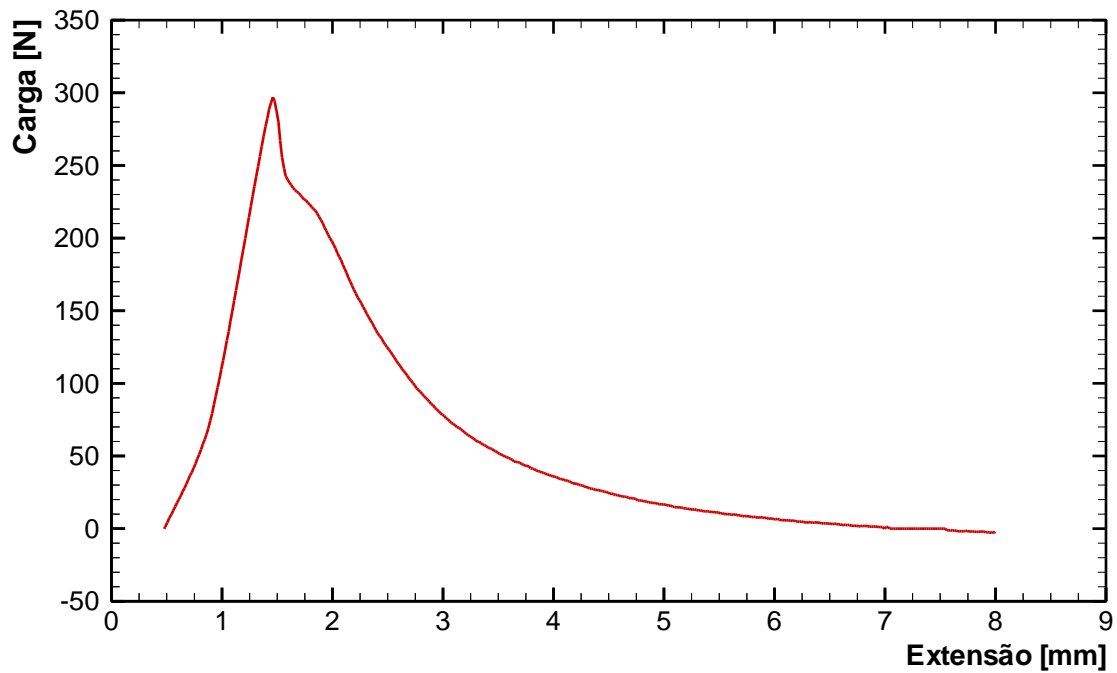


Figura 41 - Gráfico Carga x Deformação Promatec H S27

Para o módulo de resistência e o módulo de elasticidade temos valores acima do especificado pelo fabricante no sentido latitudinal. Na Figura 42 vemos que o módulo de Resistência se mantém entre aproximadamente 6,5 e 5 MPa e o Módulo de Elasticidade entre 2 e 3,5 GPa. O MOR não sofre grandes alterações, porém podemos observar uma degradação dos resultados em cada condição de teste, pois a tendência é diminuir com a temperatura.

O Módulo de Elasticidade, devido a ordem de grandeza, é o maior afetado pois no ensaio 8 temos valores de 1,98 GPa, muito menor do que o valor especificado pelo fabricante de 2,9 GPa, gerando uma diferença de aproximadamente 1000 MPa.

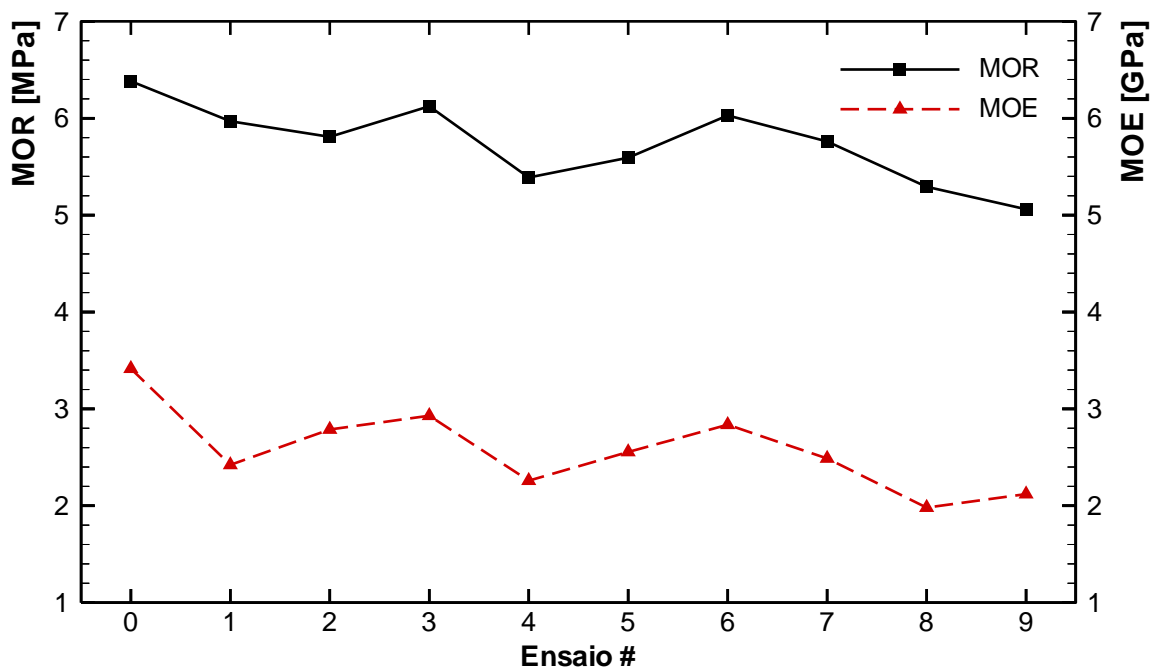


Figura 42 - Módulo de Resistência e Módulo de Elasticidade do Promatec H

Na Figura 43, é apresentado uma comparação dos valores de Força Máxima, Módulo de Resistência e Módulo de Elasticidade em relação as amostras que não foram condicionadas climaticamente, portanto consideradas amostras no estado inicial.

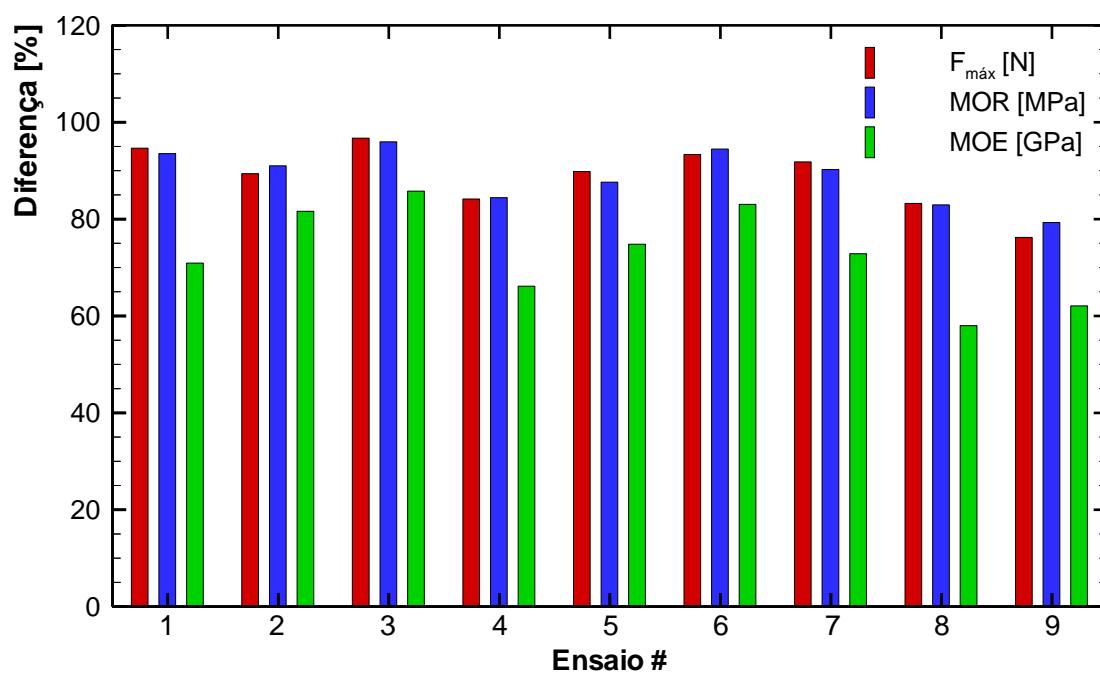


Figura 43 - Diferença da Força Máxima, Módulo de Resistência e Módulo de Elasticidade do Promatec H em relação à amostra inicial.

Conclui-se que o Promatec H é um material mais resistente do que o Promat 200 pois nas mesmas condições de teste apresenta um equilíbrio maior de resultados e um comportamento mais confiável do ponto de vista da resistência mecânica na aplicação como revestimento interno nos projetos de edificações.

Capítulo 4: Conclusões e trabalhos futuros

4.1 Conclusões gerais

Esta pesquisa propõe um modelo de análise da durabilidade de dois materiais de silicato de cálcio para fins de uso em ambientes internos e assim, com o apoio de demais pesquisas na área, avaliar a durabilidade das propriedades térmicas e mecânicas dos produtos usados em ambientes internos.

Os materiais utilizados para analisar o tema proposto foram o Promat 200 e o Promatec H, ambos cedidos pela mesma empresa de revestimentos Promatect. Esses dois materiais tiveram amostras em cada combinação de Envelhecimento Acelerado.

Com o intuito de proteger contra a ação climática e melhorar a reação ao fogo dos materiais, o uso de produtos retardantes do fogo tem se desenvolvido. Portanto, para avaliar o comportamento destes materiais foi necessário utilizar uma gama de temperaturas e humidades para obter um panorama de como os materiais se comportam. Uma contribuição maior para o desenvolvimento dos produtos retardantes do fogo foi realizada neste trabalho, de modo a demonstrar a durabilidade dos materiais após condicionamentos climáticos usando envelhecimento artificial.

O envelhecimento acelerado utilizado desta dissertação envolveu o uso de várias temperaturas e humidades para simular artificialmente a degradação do material. Os resultados mostram que a temperatura é um fator mais relevante para que o material apresente uma degradação mais expressiva.

Para construção residencial, a durabilidade é uma das propriedades mais importantes para os painéis de revestimento interno. Foi avaliado a durabilidade de dois tipos de silicato de cálcio, o Promat 200 e o Promatec H sob tratamentos de condicionamento em temperaturas baixas e altas, mais húmidos e secos usando uma câmara climática no Brigantia Ecopark na cidade de Bragança em Portugal. Rastreou-se a deterioração de algumas

amostras durante os testes. Com o aumento da temperatura de condicionamento climático, os valores de Força Máxima, assim como MOR e MOE diminuem, porém, a condutividade térmica aumenta.

No material Promat 200 a uma temperatura de 80°C, foi observado uma condutividade térmica de em média 53% menor se comparado com as amostras iniciais. Do ponto de vista da condutividade térmica este é um ponto positivo pois o material está a isolar mais do que a amostra inicial, porém ao analisar do ponto de vista do comportamento mecânico observou-se em média uma diminuição de 69% da força máxima suportada, além de um módulo de ruptura em média 69% menor e um módulo de elasticidade com 50% do valor das amostras iniciais, em média.

Já no Promatec H, à mesma temperatura de 80°C observou-se em média um aumento de 5% da condutividade térmica, enquanto que a força máxima sofreu um decréscimo de 16%, o módulo de ruptura um decréscimo de 16% e o módulo de elasticidade um decréscimo de 36% em média em relação as amostras iniciais.

As médias apresentadas acima, são das condições de todas as condições de humidade a uma mesma temperatura, pois a diferentes temperaturas não foi achada nos resultados obtidos uma relação que afete o comportamento dos materiais em diferentes humidades.

Com esses resultados podemos concluir que o fator determinante para a degradação tanto mecânica quanto térmica de ambos os materiais está ligada ao incremento de temperatura. Ao fim das comparações o Promatec H se saiu melhor nos resultados pois a evaporação de água livre foi menos intensa. Dessa forma, pode-se concluir que para esse material é necessária uma maior temperatura para que o fenómeno ocorra com mais intensidade.

4.2 Linhas futuras de investigação

Devido ao crescente interesse em ampliar o conhecimento a respeito de prevenção de incêndio em edificações, e ao grande risco a vida humana e aos patrimônios que esses eventos causam, as normas europeias continuam a ser investigadas e aprimoradas, como por exemplo, o Eurocódigo 2-1-2 e a EN 16755. O conhecimento de como se comportam os materiais de proteção ao fogo continua a ser aprimorado, não apenas da reação da madeira e

aço, mas também dos produtos utilizados para melhorar seu desempenho durante o incêndio e assim ampliar sua vida útil.

Sabemos que a condutividade térmica dos materiais de isolamento não depende apenas da temperatura, densidade e humidade. Existem outros fatores que precisam ser melhor explorados, como a anisotropia, estrutura molecular e demais reações termoquímicas que ocorrem durante o aquecimento do material.

Comparar a influência de diferentes ciclos de envelhecimento artificial nas propriedades de reação ao fogo, na condutividade térmica e nas propriedades mecânicas dos painéis ignífugos. Utilizar ciclos de envelhecimento artificial em painéis para ambientes internos e externos, submetidos também a condições externas expondo os painéis a radiação U.V e chuva, além de temperaturas superiores a 80°C para determinar o ponto de evaporação de água livre do Promatec H.

Estabelecer uma relação entre os testes de envelhecimento artificial e a real degradação do material se ele estivesse exposto a uma condição de envelhecimento natural.

Referências

1. Nikolai Brushlinsky, M.A., Sergei Sokolov, Peter Wagner, *World Fire Statistics*. 2020, Center for Fire Statistics. p. 67.
2. Wikipédia, a.e.l. *Incêndio no Museu Nacional do Rio de Janeiro*. 2018 [cited 2019; Available from: https://pt.wikipedia.org/wiki/Inc%C3%AAndio_no_Museu_Nacional_do_Rio_de_Janeiro.
3. Djunaidi, Z., N. Tuah, and G. Rafifa, *Analysis of the Active and Passive Fire Protection Systems in the Government Building, Depok City, Indonesia*. KnE Life Sciences, 2018. **4**: p. 384.
4. Pastureau, N., *Fire protection material*, U.S. Patent, Editor. 1992, Aerospatiale Societe Nationale Industrielle, Paris, France: USA.
5. Wang, Y., et al., *Performance-Based Fire Engineering of Structures*. 2012, London: CRC Press.
6. Corus, *Fire resistance of steel-framed buildings*. 2006: Corus Construction & Industrial.
7. Bailey, C.G., I.W. Burgess, and R.J. Plank, *Analyses of the effects of cooling and fire spread on steel-framed buildings*. Fire Safety Journal, 1996. **26**(4): p. 273-293.
8. Lewis, K.R., *Fire Design of Steel Members*, in *Fire Engineering Research Report*, F.E.R. Report, Editor. 2000, University of Canterbury: Canterbury.
9. CEN, *Eurocode 3 EN 1993-1-2, in Design of steel structures - Part 1-2: general rules - Structural fire design*. 2005.
10. Kolaitis, D.I. and M.A. Founti, *Development of a solid reaction kinetics gypsum dehydration model appropriate for CFD simulation of gypsum plasterboard wall assemblies exposed to fire*. Fire Safety Journal, 2013. **58**: p. 151-159.
11. Ghazi Wakili, K., et al., *Gypsum Board in Fire — Modeling and Experimental Validation*. Journal of Fire Sciences, 2007. **25**(3): p. 267-282.
12. Thomas, G., *Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures*. Fire and Materials, 2002. **26**(1): p. 37-45.
13. Kontogeorgos, D. and M. Founti, *Numerical investigation of simultaneous heat and mass transfer mechanisms occurring in a gypsum board exposed to fire conditions*. Applied Thermal Engineering, 2010. **30**(11): p. 1461-1469.
14. Kontogeorgos, D., et al., *Heat and moisture transfer through a steel stud gypsum board assembly exposed to fire*. Construction and Building Materials, 2012. **26**(1): p. 746-754.

15. Hopkin, D., et al., *A numerical study of gypsum plasterboard behaviour under standard and natural fire conditions*. Fire and Materials, 2012. **36**: p. 107-126.
16. Mehaffey, J.R., P. Cuerrier, and G. Carisse, *A model for predicting heat transfer through gypsum-board/wood-stud walls exposed to fire*. Fire and Materials, 1994. **18**(5): p. 297-305.
17. Ghazi Wakili, K. and E. Hugi, *Four Types of Gypsum Plaster Boards and their Thermophysical Properties Under Fire Condition*. Journal of Fire Sciences - J FIRE SCI, 2009. **27**: p. 27-43.
18. Rahmanian, I.W., Yong Chang. *Thermal Conductivity of Gypsum at High Temperatures – A Combined Experimental and Numerical Approach*. 2009.
19. Kontogeorgos, D., I. Mandilaras, and M. Founti, *Scrutinizing Gypsum Board Thermal Performance at Dehydration Temperatures*. Journal of Fire Sciences - J FIRE SCI, 2011. **29**: p. 111-130.
20. Silva, L.D.P.d., *Sistemas de proteção ao fogo de elementos de betão reforçados com CFRP*. 2016.
21. Bentz, D. and K. Prasad, *Thermal Performance of Fire Resistive Materials I. Characterization with Respect to Thermal Performance Models*. 2007.
22. Salmon, D., *Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials*. Vol. 12. 2001. R89.
23. Do, C., D. Bentz, and P. Stutzman, *Microstructure and Thermal Conductivity of Hydrated Calcium Silicate Board Materials*. Journal of Building Physics, 2007. **31**: p. 55-67.
24. Kojima, Y., et al., *Evaluating the durability performance of wood-based panels by a non-destructive bending test*. Journal of Wood Science, 2016. **62**(3): p. 263-269.
25. Barrero, N.M.G., *Estudo da durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana de açúcar e resina poliuretana a base de óleo de mamona para aplicação na construção civil*. 2015, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga.
26. Kranitz, K., et al., *Effects of aging on wood: a literature review*. Wood Science and Technology, 2015. **50**.
27. Almanza, O., M. Rodríguez-Pérez, and J.A. De Saja, *Applicability of the Transient Plane Source Method To Measure the Thermal Conductivity of Low-Density Polyethylene Foams*. Vol. 42. 2004. 1226-1234.
28. Mesquita, L.M.R.D., *Estudo Experimental E Numérico Do Comportamento De Um Material Intumescente Na Proteção Passiva De Elementos Estruturais Submetidos A Incêndio*. 2015, Faculdade de engenharia da universidade do Porto: Porto.
29. He, Y., *Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1. Theoretical considerations*. Thermochemica Acta, 2005. **436**(1): p. 122-129.
30. Approvals, E.O.f.T., *GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF FIRE RETARDANT PRODUCTS*. 2012, ETAG 028.
31. Hammerschmidt, U., *Guarded Hot-Plate (GHP) Method: Uncertainty Assessment*. International Journal of Thermophysics, 2002. **23**: p. 1551-1570.

32. 310:1993, B.E., *Wood-based panels — Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength*. 1993.
33. Souza, A., et al., *Modulus of Elasticity in Static Bending for Oriented Strand Board (OSB)*. International Journal of Composite Materials, 2014. **4**: p. 56-62.

Anexos

Resultados dos provetes utilizados nos procedimentos dos ensaios experimentais

As propriedades térmicas obtidas para os provetes através do equipamento de Placa Quente Protegida estão dispostas na Tabela 8 e na Tabela 9, para as características mecânicas foi realizado em uma máquina universal o ensaio de flexão em três pontos em cada provete e os resultados são apresentados na Tabela 10 e na Tabela 11.

Foi necessário realizar um levantamento geométrico nos provetes para o ensaio de flexão em três pontos, com isso entrou-se com os valores de largura da secção central nos provetes em cada ensaio destrutivo. Os dados estão dispostos na Tabela 12 e na Tabela 13.

Os provetes que passaram por um procedimento de envelhecimento acelerado, foram submetidos a um procedimento de normalização no qual era necessário medir a massa a cada 24 horas. Os resultados destas medições estão na Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16 e na Tabela 17.

Tabela 8 - Condutividade Térmica dos corpos de prova do Promat 200

| Ensaio | Temp. GHP[°C] | Specimens[mW/mK] | | | Média [mW/mK] | Desv Pad [mW/mK] |
|--------|---------------|------------------|--------|--------|---------------|------------------|
| 0 | 10 | 169,6 | 201,14 | 209,75 | 193,50 | 17,26 |
| | 25 | 180,97 | 211,73 | 210,38 | 201,03 | 14,19 |
| | 40 | 196,44 | 219,27 | 212,64 | 209,45 | 9,59 |
| 1 | 10 | 177,4 | 185,97 | 188,93 | 184,10 | 4,89 |
| | 25 | 189,51 | 195,35 | 197,37 | 194,08 | 3,33 |
| | 40 | 204,94 | 207,88 | 207,16 | 206,66 | 1,25 |
| 2 | 10 | 200,38 | 194,73 | 195,25 | 196,79 | 2,55 |
| | 25 | 206,43 | 203,04 | 204,97 | 204,81 | 1,39 |
| | 40 | 208,28 | 209,45 | 210,59 | 209,44 | 0,94 |
| 3 | 10 | 209,59 | 201,26 | 188,11 | 199,65 | 8,84 |
| | 25 | 219,16 | 211,02 | 195,83 | 208,67 | 9,67 |
| | 40 | 222,42 | 217,3 | 204,9 | 214,87 | 7,36 |
| 4 | 10 | 203,15 | 205,49 | 218,13 | 208,92 | 6,58 |
| | 25 | 206,86 | 208,33 | 223,71 | 212,97 | 7,62 |
| | 40 | 207,31 | 209,87 | 226,48 | 214,55 | 8,50 |

| | | | | | | | |
|---|----|--------|--------|--------|-------|--------|-------|
| 5 | 10 | 214,36 | 223,48 | 208,46 | | 215,43 | 6,18 |
| | 25 | 219,18 | 221,7 | 215,49 | | 218,79 | 2,55 |
| | 40 | 220,5 | 222,31 | 219,15 | | 220,65 | 1,29 |
| 6 | 10 | 232,58 | 210,02 | 235,79 | | 226,13 | 11,47 |
| | 25 | 230,66 | 215,49 | 238,06 | | 228,07 | 9,39 |
| | 40 | 230,83 | 218,7 | 237,52 | | 229,02 | 7,79 |
| 7 | 10 | 85,43 | 87,64 | 89,27 | 92,67 | 88,75 | 2,64 |
| | 25 | 90,04 | 91,3 | 91,06 | 94,81 | 91,80 | 1,80 |
| | 40 | 95,77 | 95,13 | 94,53 | 98,32 | 95,94 | 1,44 |
| 8 | 10 | 88,35 | 88,82 | 88,09 | 88,41 | 88,42 | 0,26 |
| | 25 | 90,91 | 91,78 | 90,29 | 90,33 | 90,83 | 0,60 |
| | 40 | 94,62 | 94,94 | 93,82 | 93,91 | 94,32 | 0,47 |
| 9 | 10 | 99,48 | 97,33 | 94,86 | 98,01 | 97,42 | 1,67 |
| | 25 | 102,28 | 99,18 | 98,63 | 100,5 | 100,15 | 1,41 |
| | 40 | 105,99 | 103,49 | 102,7 | 104,9 | 104,27 | 1,27 |

Tabela 9 - Condutividade Térmica dos corpos de prova do Promatec H

| Ensaio | Temp. GHP[°C] | Specimens[mW/mK] | | | Média [mW/mK] | Desv Pad [mW/mK] |
|--------|---------------|------------------|--------|--------|---------------|------------------|
| 0 | 10 | 179,45 | 173,26 | 184,03 | 178,91 | 4,41 |
| | 25 | 187,69 | 182,63 | 193,57 | 187,96 | 4,47 |
| | 40 | 195,36 | 193,01 | 202,13 | 196,83 | 3,87 |
| 1 | 10 | 166,97 | 184,78 | 162,32 | 171,36 | 9,68 |
| | 25 | 175,22 | 195,19 | 172,48 | 180,96 | 10,12 |
| | 40 | 183,02 | 205,56 | 184,27 | 190,95 | 10,34 |
| 2 | 10 | 185,12 | 184,56 | 177,41 | 182,36 | 3,51 |
| | 25 | 190,01 | 192,03 | 187,47 | 189,84 | 1,87 |
| | 40 | 198,63 | 199,1 | 197,08 | 198,27 | 0,86 |
| 3 | 10 | 167,95 | 182,5 | 182,9 | 177,78 | 6,96 |
| | 25 | 176,87 | 187,65 | 188,04 | 184,19 | 5,18 |
| | 40 | 186,52 | 194,5 | 195,83 | 192,28 | 4,11 |
| 4 | 10 | 185,09 | 177,94 | 183,66 | 182,23 | 3,09 |
| | 25 | 194,93 | 186,65 | 191,01 | 190,86 | 3,38 |
| | 40 | 204,5 | 194,51 | 198,54 | 199,18 | 4,10 |
| 5 | 10 | 194,19 | 182,16 | 190 | 188,78 | 4,99 |
| | 25 | 202,76 | 187,31 | 196,13 | 195,40 | 6,33 |
| | 40 | 210,45 | 194,16 | 203,1 | 202,57 | 6,66 |
| 6 | 10 | 194,31 | 176,03 | 184,35 | 184,90 | 7,47 |
| | 25 | 199,74 | 184,59 | 188,43 | 190,92 | 6,43 |
| | 40 | 206,54 | 192,47 | 193,91 | 197,64 | 6,32 |
| 7 | 10 | 189,26 | 194,42 | 196,64 | 193,44 | 3,09 |
| | 25 | 195,49 | 200,42 | 202,19 | 199,37 | 2,83 |
| | 40 | 202,77 | 208,74 | 210,56 | 207,36 | 3,33 |

| | | | | | | |
|---|----|--------|--------|--------|--------|------|
| 8 | 10 | 190,99 | 186,36 | 189,44 | 188,93 | 1,92 |
| | 25 | 196,63 | 193,83 | 195,42 | 195,29 | 1,15 |
| | 40 | 204,17 | 199,86 | 202 | 202,01 | 1,76 |
| 9 | 10 | 181,03 | 186,08 | 194,26 | 187,12 | 5,45 |
| | 25 | 188,66 | 191,9 | 202,05 | 194,20 | 5,70 |
| | 40 | 195,8 | 197,45 | 209,07 | 200,77 | 5,91 |

Tabela 10 - Características Mecânicas do Promat 200

| Ensaio | Largura [mm] | Dist. Apoios [mm] | Espessura [mm] | A2(40%) | A1(10%) | F2(40%) | F1(10%) | Fmax[N] | MOR [MPa] | MOE [GPa] |
|--------|--------------|-------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| 0 | 49,85 | 140,00 | 15,00 | 0,47 | 0,24 | 125,00 | 31,25 | 312,49 | 5,85 | 1,61 |
| | 47,88 | 140,00 | 15,00 | 0,55 | 0,30 | 133,79 | 35,28 | 342,18 | 6,67 | 1,67 |
| | 47,75 | 140,00 | 15,00 | 0,50 | 0,25 | 138,14 | 33,70 | 337,32 | 6,59 | 1,78 |
| 1 | 48,56 | 140,00 | 15,00 | 0,37 | 0,17 | 112,11 | 27,94 | 286,51 | 5,51 | 1,76 |
| | 49,11 | 140,00 | 15,00 | 0,57 | 0,30 | 99,69 | 23,66 | 240,96 | 4,58 | 1,18 |
| | 48,61 | 140,00 | 15,00 | 0,67 | 0,43 | 118,14 | 29,20 | 309,86 | 5,95 | 1,59 |
| 2 | 48,19 | 140,00 | 15,00 | 0,47 | 0,22 | 114,23 | 28,25 | 292,57 | 5,67 | 1,45 |
| | 47,75 | 140,00 | 15,00 | 0,42 | 0,18 | 87,78 | 22,51 | 218,41 | 4,27 | 1,19 |
| | 49,66 | 140,00 | 15,00 | 0,57 | 0,30 | 118,75 | 28,68 | 288,76 | 5,43 | 1,38 |
| 3 | 48,74 | 140,00 | 15,00 | 0,48 | 0,20 | 97,20 | 24,27 | 247,42 | 4,74 | 1,07 |
| | 47,68 | 140,00 | 15,00 | 0,48 | 0,23 | 148,85 | 35,87 | 366,84 | 7,18 | 1,93 |
| | 48,52 | 140,00 | 15,00 | 0,50 | 0,22 | 123,98 | 31,22 | 317,46 | 6,11 | 1,37 |
| 4 | 47,86 | 140,00 | 15,00 | 0,42 | 0,18 | 99,22 | 24,65 | 249,96 | 4,87 | 1,36 |
| | 46,95 | 140,00 | 15,00 | 0,43 | 0,20 | 130,27 | 31,19 | 313,39 | 6,23 | 1,84 |
| | 47,67 | 140,00 | 15,00 | 0,45 | 0,18 | 94,07 | 24,07 | 231,97 | 4,54 | 1,12 |
| 5 | 46,57 | 140,00 | 15,00 | 0,47 | 0,23 | 136,11 | 32,89 | 332,03 | 6,65 | 1,93 |
| | 52,37 | 140,00 | 15,00 | 0,35 | 0,20 | 115,12 | 28,59 | 296,98 | 5,29 | 2,24 |
| | 46,89 | 140,00 | 15,00 | 0,43 | 0,20 | 112,62 | 28,89 | 293,25 | 5,84 | 1,56 |
| 6 | 47,99 | 140,00 | 15,00 | 0,40 | 0,18 | 114,11 | 28,42 | 286,68 | 5,58 | 1,67 |
| | 47,61 | 140,00 | 15,00 | 0,71 | 0,50 | 106,12 | 25,55 | 264,07 | 5,18 | 1,59 |
| | 47,33 | 140,00 | 15,00 | 0,45 | 0,23 | 122,47 | 32,41 | 318,60 | 6,28 | 1,79 |
| 7 | 47,28 | 140,00 | 15,00 | 0,85 | 0,58 | 40,86 | 9,53 | 98,44 | 1,94 | 0,51 |
| | 48,27 | 140,00 | 15,00 | 0,20 | 0,08 | 32,91 | 9,27 | 80,68 | 1,56 | 0,85 |
| | 48,35 | 140,00 | 15,00 | 0,30 | 0,17 | 31,30 | 8,61 | 81,83 | 1,58 | 0,72 |
| 8 | 49,32 | 140,00 | 15,00 | 0,30 | 0,13 | 50,28 | 13,27 | 123,58 | 2,34 | 0,91 |
| | 49,72 | 140,00 | 15,00 | 0,28 | 0,13 | 34,73 | 8,91 | 84,24 | 1,58 | 0,70 |
| | 49,49 | 140,00 | 15,00 | 0,23 | 0,08 | 33,81 | 8,21 | 80,87 | 1,53 | 0,70 |
| 9 | 49,20 | 140,00 | 15,00 | 0,25 | 0,10 | 36,32 | 9,28 | 86,75 | 1,65 | 0,74 |
| | 49,66 | 140,00 | 15,00 | 0,23 | 0,10 | 32,62 | 8,66 | 82,18 | 1,54 | 0,73 |
| | 45,19 | 140,00 | 15,00 | 0,23 | 0,08 | 49,91 | 13,26 | 123,43 | 2,55 | 1,09 |
| 9 | 47,79 | 140,00 | 15,00 | 0,20 | 0,06 | 45,48 | 11,38 | 113,56 | 2,22 | 1,07 |
| | 49,45 | 140,00 | 15,00 | 0,25 | 0,06 | 65,79 | 14,85 | 158,16 | 2,99 | 1,13 |
| | 48,89 | 140,00 | 15,00 | 0,22 | 0,08 | 41,83 | 9,95 | 104,91 | 2,00 | 0,99 |

Tabela 11 - Características Mecânicas do Promatec H

| Ensaio | Largura [mm] | Dist. Apoios [mm] | Espessura [mm] | A2(40%) | A1(10%) | F2(40%) | F1(10%) | Fmax[N] | MOR [MPa] | MOE [GPa] |
|--------|--------------|-------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| 0 | 49,98 | 220,00 | 20,40 | 0,43 | 0,18 | 155,53 | 35,50 | 385,62 | 6,12 | 3,01 |
| | 47,26 | 220,00 | 20,40 | 0,40 | 0,18 | 151,75 | 34,53 | 373,12 | 6,26 | 3,59 |
| | 49,16 | 220,00 | 20,40 | 0,42 | 0,18 | 170,62 | 37,12 | 419,61 | 6,77 | 3,65 |
| 1 | 49,69 | 220,00 | 20,40 | 0,80 | 0,53 | 152,78 | 42,97 | 413,79 | 6,60 | 2,60 |
| | 47,92 | 220,00 | 20,40 | 0,70 | 0,38 | 123,11 | 32,58 | 310,09 | 5,13 | 1,87 |
| | 50,27 | 220,00 | 20,40 | 0,47 | 0,20 | 157,05 | 37,43 | 391,32 | 6,17 | 2,80 |
| 2 | 48,23 | 220,00 | 20,40 | 0,42 | 0,20 | 128,58 | 31,95 | 334,72 | 5,50 | 2,90 |
| | 47,61 | 220,00 | 20,40 | 0,62 | 0,33 | 121,61 | 29,27 | 306,33 | 5,10 | 2,15 |
| | 47,92 | 220,00 | 20,40 | 0,45 | 0,20 | 167,67 | 41,03 | 412,10 | 6,82 | 3,31 |
| 3 | 50,18 | 220,00 | 20,40 | 0,45 | 0,22 | 139,28 | 35,39 | 342,27 | 5,41 | 2,78 |
| | 48,44 | 220,00 | 20,40 | 0,53 | 0,27 | 144,13 | 37,24 | 354,71 | 5,81 | 2,60 |
| | 49,05 | 220,00 | 20,40 | 0,48 | 0,23 | 178,20 | 44,94 | 442,64 | 7,16 | 3,41 |
| 4 | 47,85 | 220,00 | 20,40 | 0,53 | 0,28 | 156,63 | 42,81 | 399,39 | 6,62 | 2,99 |
| | 48,52 | 220,00 | 20,40 | 0,47 | 0,18 | 119,69 | 30,69 | 297,78 | 4,87 | 2,03 |
| | 49,91 | 220,00 | 20,40 | 0,53 | 0,22 | 117,82 | 29,15 | 294,56 | 4,68 | 1,76 |
| 5 | 50,37 | 220,00 | 20,40 | 0,57 | 0,32 | 156,16 | 37,28 | 395,26 | 6,22 | 2,96 |
| | 50,39 | 220,00 | 20,40 | 0,77 | 0,47 | 144,19 | 34,81 | 352,92 | 5,55 | 2,27 |
| | 49,17 | 220,00 | 20,40 | 0,47 | 0,22 | 125,94 | 30,39 | 310,19 | 5,00 | 2,44 |
| 6 | 47,20 | 220,00 | 20,40 | 0,60 | 0,33 | 156,36 | 41,70 | 384,40 | 6,46 | 2,86 |
| | 48,43 | 220,00 | 20,40 | 0,48 | 0,23 | 135,33 | 34,53 | 333,34 | 5,46 | 2,61 |
| | 49,11 | 220,00 | 20,40 | 0,47 | 0,22 | 154,56 | 35,42 | 382,15 | 6,17 | 3,04 |
| 7 | 49,46 | 220,00 | 20,40 | 0,52 | 0,25 | 138,04 | 34,28 | 350,81 | 5,62 | 2,47 |
| | 48,98 | 220,00 | 20,40 | 0,50 | 0,25 | 152,57 | 39,70 | 386,79 | 6,26 | 2,89 |
| | 50,62 | 220,00 | 20,40 | 0,53 | 0,25 | 134,04 | 37,65 | 344,33 | 5,39 | 2,11 |
| 8 | 49,77 | 220,00 | 20,40 | 0,52 | 0,23 | 151,16 | 40,24 | 376,43 | 6,00 | 2,47 |
| | 49,13 | 220,00 | 20,40 | 0,58 | 0,27 | 120,04 | 30,78 | 307,30 | 4,96 | 1,80 |
| | 47,85 | 220,00 | 20,40 | 0,53 | 0,20 | 115,92 | 30,59 | 296,98 | 4,92 | 1,68 |
| 9 | 47,77 | 220,00 | 20,40 | 0,43 | 0,15 | 117,01 | 30,26 | 298,79 | 4,96 | 2,01 |
| | 47,75 | 220,00 | 20,40 | 0,43 | 0,17 | 112,77 | 29,34 | 287,09 | 4,77 | 2,05 |
| | 45,39 | 220,00 | 20,40 | 0,50 | 0,22 | 123,62 | 29,44 | 312,27 | 5,46 | 2,30 |

Tabela 12 - Levantamento geométrico dos corpos de prova do Promat 200 em milímetros para o Ensaio de Flexão em Três Pontos

| Specimen | Extremidade Direita | | | | | Centro [mm] | | | | | Extremidade Esquerda | | | | |
|----------|---------------------|-------|------------|--------------------|------|-------------|-------|------------|--------------------|------|----------------------|-------|------------|--------------------|------|
| | [mm] | | Média [mm] | Desvio Padrão [mm] | | [mm] | | Média [mm] | Desvio Padrão [mm] | | [mm] | | Média [mm] | Desvio Padrão [mm] | |
| 1 | 48,67 | 48,65 | 48,64 | 48,65 | 0,01 | 48,56 | 48,59 | 48,55 | 48,57 | 0,02 | 48,42 | 48,26 | 48,32 | 48,33 | 0,07 |
| 2 | 49,78 | 49,76 | 49,80 | 49,78 | 0,02 | 49,85 | 49,84 | 49,87 | 49,85 | 0,01 | 49,28 | 49,31 | 49,32 | 49,30 | 0,02 |
| 3 | 48,41 | 48,42 | 48,42 | 48,42 | 0,00 | 49,14 | 49,10 | 49,09 | 49,11 | 0,02 | 49,02 | 49,12 | 49,08 | 49,07 | 0,04 |
| 4 | 49,32 | 49,35 | 49,37 | 49,35 | 0,02 | 48,60 | 48,62 | 48,61 | 48,61 | 0,01 | 49,31 | 49,39 | 49,42 | 49,37 | 0,05 |
| 5 | 48,23 | 48,17 | 48,18 | 48,19 | 0,03 | 48,17 | 48,21 | 48,18 | 48,19 | 0,02 | 47,29 | 47,28 | 47,25 | 47,27 | 0,02 |
| 6 | 48,69 | 48,76 | 48,71 | 48,72 | 0,03 | 47,74 | 47,72 | 47,78 | 47,75 | 0,02 | 48,20 | 48,15 | 48,24 | 48,20 | 0,04 |
| 7 | 47,08 | 47,27 | 47,13 | 47,16 | 0,08 | 49,66 | 49,64 | 49,68 | 49,66 | 0,02 | 49,16 | 48,93 | 49,05 | 49,05 | 0,09 |
| 8 | 49,19 | 49,04 | 49,12 | 49,12 | 0,06 | 48,75 | 48,77 | 48,71 | 48,74 | 0,02 | 49,50 | 49,47 | 49,52 | 49,50 | 0,02 |
| 9 | 50,08 | 50,06 | 50,05 | 50,06 | 0,01 | 47,91 | 47,86 | 47,88 | 47,88 | 0,02 | 47,88 | 47,87 | 47,93 | 47,89 | 0,03 |
| 10 | 48,40 | 48,32 | 48,40 | 48,37 | 0,04 | 47,78 | 47,72 | 47,75 | 47,75 | 0,02 | 49,07 | 49,34 | 49,24 | 49,22 | 0,11 |
| 11 | 48,40 | 48,35 | 48,43 | 48,39 | 0,03 | 47,63 | 47,74 | 47,68 | 47,68 | 0,04 | 47,02 | 46,93 | 47,01 | 46,99 | 0,04 |
| 12 | 47,38 | 47,16 | 47,46 | 47,33 | 0,13 | 48,52 | 48,51 | 48,54 | 48,52 | 0,01 | 49,34 | 49,37 | 49,32 | 49,34 | 0,02 |
| 13 | 48,55 | 48,58 | 48,52 | 48,55 | 0,02 | 47,85 | 47,86 | 47,87 | 47,86 | 0,01 | 47,88 | 47,79 | 47,86 | 47,84 | 0,04 |
| 14 | 47,17 | 47,21 | 47,30 | 47,23 | 0,05 | 46,93 | 46,98 | 46,95 | 46,95 | 0,02 | 48,22 | 48,27 | 48,17 | 48,22 | 0,04 |
| 15 | 48,82 | 48,91 | 48,90 | 48,88 | 0,04 | 47,68 | 47,65 | 47,69 | 47,67 | 0,02 | 49,01 | 49,04 | 49,08 | 49,04 | 0,03 |
| 16 | 45,39 | 45,38 | 45,34 | 45,37 | 0,02 | 46,57 | 46,60 | 46,54 | 46,57 | 0,02 | 48,70 | 48,60 | 48,32 | 48,54 | 0,16 |
| 17 | 49,48 | 49,25 | 49,44 | 49,39 | 0,10 | 52,39 | 52,38 | 52,35 | 52,37 | 0,02 | 53,13 | 53,12 | 53,05 | 53,10 | 0,04 |
| 18 | 46,21 | 46,10 | 46,13 | 46,15 | 0,05 | 46,97 | 46,82 | 46,87 | 46,89 | 0,06 | 48,14 | 48,03 | 48,06 | 48,08 | 0,05 |
| 19 | 49,04 | 49,10 | 49,08 | 49,07 | 0,02 | 48,05 | 47,94 | 47,98 | 47,99 | 0,05 | 47,10 | 47,07 | 47,13 | 47,10 | 0,02 |
| 20 | 48,47 | 48,43 | 48,48 | 48,46 | 0,02 | 47,26 | 47,31 | 48,26 | 47,61 | 0,46 | 48,81 | 48,76 | 48,84 | 48,80 | 0,03 |
| 21 | 48,45 | 48,52 | 48,49 | 48,49 | 0,03 | 47,34 | 47,36 | 47,30 | 47,33 | 0,02 | 48,22 | 48,23 | 48,20 | 48,22 | 0,01 |
| R1 | 48,79 | 48,74 | 48,76 | 48,76 | 0,02 | 47,38 | 47,27 | 47,18 | 47,28 | 0,08 | 46,91 | 46,88 | 46,92 | 46,90 | 0,02 |
| R2 | 47,78 | 47,77 | 47,31 | 47,62 | 0,22 | 48,27 | 48,24 | 48,31 | 48,27 | 0,03 | 50,03 | 50,07 | 50,06 | 50,05 | 0,02 |
| R3 | 47,48 | 47,49 | 47,46 | 47,48 | 0,01 | 48,35 | 48,33 | 48,36 | 48,35 | 0,01 | 48,11 | 48,09 | 48,13 | 48,11 | 0,02 |
| R4 | 47,85 | 47,77 | 47,87 | 47,83 | 0,04 | 49,31 | 49,36 | 49,29 | 49,32 | 0,03 | 49,24 | 49,22 | 49,35 | 49,27 | 0,06 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| R5 | 50,09 | 50,03 | 50,05 | 50,06 | 0,02 | 49,69 | 49,84 | 49,62 | 49,72 | 0,09 | 49,53 | 49,65 | 49,69 | 49,62 | 0,07 |
| R6 | 49,53 | 49,56 | 49,51 | 49,53 | 0,02 | 49,44 | 49,49 | 49,54 | 49,49 | 0,04 | 49,62 | 49,57 | 49,56 | 49,58 | 0,03 |
| R7 | 49,64 | 49,71 | 49,68 | 49,68 | 0,03 | 49,25 | 49,21 | 49,14 | 49,20 | 0,05 | 48,59 | 48,62 | 48,56 | 48,59 | 0,02 |
| R8 | 49,51 | 49,54 | 49,53 | 49,53 | 0,01 | 49,61 | 49,63 | 49,73 | 49,66 | 0,05 | 48,89 | 48,87 | 48,86 | 48,87 | 0,01 |
| R9 | 45,51 | 45,54 | 45,57 | 45,54 | 0,02 | 45,12 | 45,28 | 45,18 | 45,19 | 0,07 | 44,39 | 44,32 | 44,13 | 44,28 | 0,11 |
| R10 | 48,19 | 48,09 | 48,07 | 48,12 | 0,05 | 47,69 | 47,89 | 47,78 | 47,79 | 0,08 | 47,77 | 47,85 | 47,89 | 47,84 | 0,05 |
| R11 | 49,97 | 49,76 | 49,92 | 49,88 | 0,09 | 49,42 | 49,47 | 49,45 | 49,45 | 0,02 | 50,38 | 50,52 | 50,28 | 50,39 | 0,10 |
| R12 | 48,59 | 48,51 | 48,58 | 48,56 | 0,04 | 48,84 | 48,81 | 49,01 | 48,89 | 0,09 | 50,49 | 50,58 | 50,55 | 50,54 | 0,04 |

Tabela 13 - Levantamento geométrico dos corpos de prova do Promatec H em milímetros para o Ensaio de Flexão em Três Pontos

| Specimen | Extremidade Direita [mm] | | | | | Centro [mm] | | | | | Extremidade Esquerda [mm] | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|---------------------------|--------------------|------------|--------------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | Média [mm] | Desvio Padrão [mm] | Média [mm] | Desvio Padrão [mm] | Média [mm] | Desvio Padrão [mm] | Média [mm] | Desvio Padrão [mm] | Média [mm] | Desvio Padrão [mm] | Média [mm] | Desvio Padrão [mm] | Média [mm] | Desvio Padrão [mm] | | | | | | | | |
| 1 | 47,97 | 0,04 | 47,87 | 0,04 | 47,92 | 0,04 | 50,01 | 0,04 | 49,98 | 0,04 | 49,97 | 0,02 | 49,99 | 0,02 | 48,23 | 0,04 | 48,29 | 0,04 | 48,34 | 0,04 | 48,29 | 0,04 |
| 2 | 48,89 | 0,03 | 48,92 | 0,03 | 48,97 | 0,03 | 47,32 | 0,03 | 47,27 | 0,03 | 47,19 | 0,05 | 47,26 | 0,05 | 49,23 | 0,04 | 49,24 | 0,04 | 49,15 | 0,04 | 49,21 | 0,04 |
| 3 | 48,61 | 0,07 | 48,73 | 0,07 | 48,79 | 0,07 | 49,17 | 0,07 | 49,15 | 0,07 | 49,17 | 0,01 | 49,16 | 0,01 | 48,36 | 0,03 | 48,29 | 0,03 | 48,35 | 0,03 | 48,33 | 0,03 |
| 4 | 51,35 | 0,05 | 51,32 | 0,05 | 51,23 | 0,05 | 49,73 | 0,05 | 49,70 | 0,05 | 49,65 | 0,03 | 49,69 | 0,03 | 48,23 | 0,02 | 48,18 | 0,02 | 48,21 | 0,02 | 48,21 | 0,02 |
| 5 | 48,21 | 0,04 | 48,29 | 0,04 | 48,20 | 0,04 | 47,93 | 0,04 | 47,92 | 0,04 | 47,90 | 0,01 | 47,92 | 0,01 | 51,09 | 0,02 | 51,15 | 0,02 | 51,13 | 0,02 | 51,12 | 0,02 |
| 6 | 48,10 | 0,08 | 48,20 | 0,08 | 48,01 | 0,08 | 50,25 | 0,08 | 50,30 | 0,08 | 50,26 | 0,02 | 50,27 | 0,02 | 47,97 | 0,02 | 48,01 | 0,02 | 48,02 | 0,02 | 48,00 | 0,02 |
| 7 | 48,99 | 0,01 | 49,01 | 0,01 | 48,98 | 0,01 | 48,24 | 0,01 | 48,20 | 0,01 | 48,24 | 0,02 | 48,23 | 0,02 | 49,17 | 0,03 | 49,16 | 0,03 | 49,23 | 0,03 | 49,19 | 0,03 |
| 8 | 47,46 | 0,03 | 47,45 | 0,03 | 47,39 | 0,03 | 47,65 | 0,03 | 47,61 | 0,03 | 47,57 | 0,03 | 47,61 | 0,03 | 48,85 | 0,09 | 48,97 | 0,09 | 48,75 | 0,09 | 48,86 | 0,09 |
| 9 | 48,02 | 0,03 | 48,03 | 0,03 | 47,97 | 0,03 | 47,89 | 0,03 | 47,92 | 0,03 | 47,95 | 0,02 | 47,92 | 0,02 | 48,56 | 0,04 | 48,48 | 0,04 | 48,46 | 0,04 | 48,50 | 0,04 |
| 10 | 49,74 | 0,02 | 49,69 | 0,02 | 49,73 | 0,02 | 50,17 | 0,02 | 50,20 | 0,02 | 50,17 | 0,01 | 50,18 | 0,01 | 52,01 | 0,02 | 51,97 | 0,02 | 51,95 | 0,02 | 51,98 | 0,02 |
| 11 | 47,48 | 0,02 | 47,46 | 0,02 | 47,52 | 0,02 | 48,44 | 0,02 | 48,46 | 0,02 | 48,43 | 0,01 | 48,44 | 0,01 | 49,10 | 0,03 | 49,08 | 0,03 | 49,15 | 0,03 | 49,11 | 0,03 |
| 12 | 48,82 | 0,05 | 48,75 | 0,05 | 48,71 | 0,05 | 49,02 | 0,05 | 49,05 | 0,05 | 49,08 | 0,02 | 49,05 | 0,02 | 46,79 | 0,01 | 46,78 | 0,01 | 46,80 | 0,01 | 46,79 | 0,01 |
| 13 | 50,64 | 0,02 | 50,68 | 0,02 | 50,67 | 0,02 | 47,85 | 0,02 | 47,84 | 0,02 | 47,85 | 0,00 | 47,85 | 0,00 | 47,41 | 0,01 | 47,44 | 0,01 | 47,42 | 0,01 | 47,42 | 0,01 |
| 14 | 50,43 | 0,06 | 50,40 | 0,06 | 50,28 | 0,06 | 48,53 | 0,06 | 48,52 | 0,06 | 48,52 | 0,00 | 48,52 | 0,00 | 48,90 | 0,01 | 48,92 | 0,01 | 48,93 | 0,01 | 48,92 | 0,01 |
| 15 | 47,73 | 0,02 | 47,70 | 0,02 | 47,76 | 0,02 | 49,88 | 0,02 | 49,93 | 0,02 | 49,91 | 0,02 | 49,91 | 0,02 | 49,46 | 0,09 | 49,66 | 0,09 | 49,64 | 0,09 | 49,59 | 0,09 |
| 16 | 48,99 | 0,02 | 49,03 | 0,02 | 49,04 | 0,02 | 50,37 | 0,02 | 50,36 | 0,02 | 50,37 | 0,00 | 50,37 | 0,00 | 50,10 | 0,02 | 50,13 | 0,02 | 50,09 | 0,02 | 50,11 | 0,02 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 17 | 48,94 | 48,92 | 48,96 | 48,94 | 0,02 | 50,39 | 50,39 | 50,40 | 50,39 | 0,00 | 49,11 | 49,22 | 49,21 | 49,18 | 0,05 |
| 18 | 49,26 | 49,34 | 49,14 | 49,25 | 0,08 | 49,17 | 49,19 | 49,16 | 49,17 | 0,01 | 50,13 | 50,16 | 50,13 | 50,14 | 0,01 |
| 19 | 47,57 | 47,62 | 47,58 | 47,59 | 0,02 | 47,22 | 47,16 | 47,22 | 47,20 | 0,03 | 46,77 | 46,76 | 46,71 | 46,75 | 0,03 |
| 20 | 48,82 | 48,81 | 48,77 | 48,80 | 0,02 | 48,46 | 48,42 | 48,40 | 48,43 | 0,02 | 48,84 | 48,78 | 48,83 | 48,82 | 0,03 |
| 21 | 49,91 | 50,05 | 49,99 | 49,98 | 0,06 | 49,09 | 49,13 | 49,12 | 49,11 | 0,02 | 50,18 | 50,23 | 50,22 | 50,21 | 0,02 |
| 22 | 49,16 | 49,15 | 49,17 | 49,16 | 0,01 | 49,43 | 49,48 | 49,47 | 49,46 | 0,02 | 48,17 | 48,19 | 48,29 | 48,22 | 0,05 |
| 23 | 48,60 | 48,56 | 48,57 | 48,58 | 0,02 | 48,96 | 48,99 | 48,98 | 48,98 | 0,01 | 50,51 | 50,59 | 50,55 | 50,55 | 0,03 |
| 24 | 50,55 | 50,56 | 50,59 | 50,57 | 0,02 | 50,65 | 50,58 | 50,63 | 50,62 | 0,03 | 47,77 | 47,60 | 47,76 | 47,71 | 0,08 |
| 25 | 48,42 | 48,44 | 48,51 | 48,46 | 0,04 | 49,79 | 49,76 | 49,75 | 49,77 | 0,02 | 49,33 | 49,40 | 49,27 | 49,33 | 0,05 |
| 26 | 51,42 | 51,45 | 51,27 | 51,38 | 0,08 | 49,10 | 49,16 | 49,12 | 49,13 | 0,02 | 47,33 | 47,33 | 47,51 | 47,39 | 0,08 |
| 27 | 47,84 | 47,83 | 47,85 | 47,84 | 0,01 | 47,83 | 47,88 | 47,85 | 47,85 | 0,02 | 46,82 | 46,93 | 46,99 | 46,91 | 0,07 |
| 28 | 48,13 | 48,19 | 48,17 | 48,16 | 0,02 | 47,78 | 47,77 | 47,77 | 47,77 | 0,00 | 47,48 | 47,46 | 47,47 | 47,47 | 0,01 |
| 29 | 48,40 | 48,42 | 48,45 | 48,42 | 0,02 | 47,75 | 47,76 | 47,74 | 47,75 | 0,01 | 46,82 | 46,98 | 46,87 | 46,89 | 0,07 |
| 30 | 47,08 | 47,11 | 47,08 | 47,09 | 0,01 | 45,40 | 45,39 | 45,39 | 45,39 | 0,00 | 48,24 | 48,10 | 47,88 | 48,07 | 0,15 |

Tabela 14 – Medição de massa durante o procedimento de normalização dos corpos de prova do Promat 200 utilizados no ensaio de flexão em três pontos

| Specimen | 00 horas [g] | 24 horas [g] | 48 horas [g] | 72 horas [g] |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 4 | 135,12 | 135,07 | 135,06 | 135,06 |
| 5 | 133,13 | 133,09 | 133,08 | 133,06 |
| 6 | 134,88 | 134,88 | 134,89 | 134,85 |
| 7 | 136,39 | 136,38 | 136,36 | 136,33 |
| 8 | 136,46 | 136,43 | 136,43 | 136,42 |
| 9 | 134,64 | 134,61 | 134,61 | 134,6 |
| 10 | 133,32 | 133,27 | 133,24 | 133,21 |
| 11 | 134,24 | 134,18 | 134,19 | 134,17 |
| 12 | 135,69 | 135,64 | 135,63 | 135,61 |
| 13 | 132,42 | 132,34 | 132,33 | 132,32 |
| 14 | 131,51 | 131,46 | 131,44 | 131,43 |
| 15 | 132,35 | 132,27 | 132,26 | 132,25 |
| 16 | 130,39 | 130,32 | 130,32 | 130,31 |
| 17 | 140,93 | 140,84 | 140,83 | 140,81 |
| 18 | 128,99 | 128,95 | 128,94 | 128,93 |
| 19 | 132,95 | 132,92 | 132,89 | 132,87 |
| 20 | 133,65 | 133,62 | 133,62 | 133,62 |
| 21 | 134,32 | 134,28 | 134,28 | 134,26 |
| 22 | 119,08 | 118,79 | 118,73 | 118,71 |
| 23 | 116,56 | 116,31 | 116,27 | 116,25 |
| 24 | 119,41 | 119,16 | 119,13 | 119,11 |
| 25 | 136,61 | 136,59 | 136,56 | 136,56 |
| 26 | 134,91 | 134,89 | 134,86 | 134,86 |
| 27 | 134,01 | 133,96 | 133,95 | 133,94 |
| 28 | 116,54 | 116,23 | 116,23 | 116,21 |
| 29 | 121,36 | 121,04 | 121,03 | 121,04 |
| 30 | 120,75 | 120,47 | 120,47 | 120,46 |

Tabela 15 - Medição de massa durante o procedimento de normalização dos corpos de prova do Promat 200 utilizados no ensaio de placa quente protegida

| Specimen | 00 horas [g] | 24 horas [g] | 48 horas [g] | 72 horas [g] |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 4 | 256,56 | 256,52 | 256,49 | 256,47 |
| 5 | 261,43 | 261,42 | 261,39 | 261,37 |
| 6 | 256,78 | 256,77 | 256,75 | 256,72 |
| 7 | 258,29 | 258,22 | 258,21 | 258,16 |
| 8 | 259,75 | 259,72 | 259,74 | 259,71 |
| 9 | 262,31 | 262,29 | 262,31 | 262,28 |
| 10 | 250,42 | 250,26 | 250,22 | 250,17 |
| 11 | 259,64 | 259,54 | 259,51 | 259,48 |

| | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 12 | 260,29 | 260,18 | 260,17 | 260,15 |
| 13 | 260,73 | 260,63 | 260,59 | 260,54 |
| 14 | 255,52 | 255,41 | 255,41 | 255,38 |
| 15 | 251,01 | 250,81 | 250,83 | 250,79 |
| 16 | 260,69 | 260,58 | 260,59 | 260,55 |
| 17 | 266,86 | 266,79 | 266,81 | 266,77 |
| 18 | 248,01 | 247,94 | 247,93 | 247,91 |
| 19 | 255,78 | 255,73 | 255,69 | 255,65 |
| 20 | 251,09 | 251,09 | 251,06 | 251,04 |
| 21 | 257,78 | 257,81 | 257,78 | 257,76 |
| 22 | 229,33 | 228,84 | 228,76 | 228,62 |
| 23 | 235,43 | 235,03 | 235,01 | 234,95 |
| 24 | 225,56 | 225,13 | 225,13 | 225,05 |
| 25 | 256,98 | 256,98 | 256,97 | 256,95 |
| 26 | 260,83 | 260,82 | 260,82 | 260,81 |
| 27 | 258,38 | 258,33 | 258,33 | 258,31 |
| 28 | 227,15 | 226,63 | 226,56 | 226,49 |
| 29 | 229,34 | 228,88 | 228,82 | 228,77 |
| 30 | 233,26 | 232,77 | 232,73 | 232,68 |

Tabela 16 - Medição de massa durante o procedimento de normalização dos corpos de prova do Promatec H utilizados no ensaio de flexão em três pontos

| Specimen | 00 horas [g] | 24 horas [g] | 48 horas [g] | 72 horas [g] |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 4 | 284,21 | 284,01 | 283,99 | 283,95 |
| 5 | 286,24 | 286,07 | 286,11 | 286,07 |
| 6 | 289,92 | 289,79 | 289,85 | 289,78 |
| 7 | 280,92 | 280,83 | 280,88 | 280,87 |
| 8 | 252,55 | 252,53 | 252,54 | 252,53 |
| 9 | 298,78 | 298,78 | 298,82 | 298,81 |
| 10 | 283,95 | 283,34 | 283,33 | 283,31 |
| 11 | 270,91 | 270,46 | 270,47 | 270,42 |
| 12 | 294,55 | 294,06 | 294,09 | 294,01 |
| 13 | 295,98 | 295,38 | 295,32 | 295,31 |
| 14 | 256,45 | 255,97 | 255,94 | 255,93 |
| 15 | 256,37 | 255,79 | 255,78 | 255,74 |
| 16 | 305,11 | 304,71 | 304,71 | 304,73 |
| 17 | 283,95 | 283,62 | 283,64 | 283,62 |
| 18 | 270,47 | 270,19 | 270,18 | 270,18 |
| 19 | 288,51 | 288,41 | 288,41 | 288,38 |
| 20 | 279,49 | 279,41 | 279,43 | 279,38 |
| 21 | 297,09 | 297,01 | 297,02 | 297,03 |
| 22 | 278,68 | 278,25 | 278,22 | 278,26 |
| 23 | 298,44 | 298,02 | 297,99 | 297,96 |
| 24 | 284,71 | 284,42 | 284,42 | 284,41 |

| | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 25 | 277,37 | 277,32 | 277,34 | 277,31 |
| 26 | 257,67 | 257,65 | 257,67 | 257,61 |
| 27 | 263,24 | 263,22 | 263,25 | 263,23 |
| 28 | 261,53 | 261,08 | 261,09 | 261,07 |
| 29 | 252,35 | 251,95 | 251,99 | 251,99 |
| 30 | 264,29 | 263,94 | 263,98 | 263,92 |

Tabela 17 - Medição de massa durante o procedimento de normalização dos corpos de prova do Promat 200 utilizados no ensaio de placa quente protegida

| Specimen | 00 horas [g] | 24 horas [g] | 48 horas [g] | 72 horas [g] |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 4 | 419,96 | 420,07 | 420,17 | 420,17 |
| 5 | 435,28 | 435,66 | 435,84 | 435,94 |
| 6 | 422,41 | 423,07 | 423,19 | 423,25 |
| 7 | 413,35 | 413,54 | 413,59 | 413,72 |
| 8 | 405,57 | 405,99 | 406,17 | 406,23 |
| 9 | 407,23 | 407,89 | 408,03 | 408,15 |
| 10 | 402,99 | 402,34 | 402,29 | 402,34 |
| 11 | 403,17 | 403,01 | 402,96 | 403,01 |
| 12 | 409,41 | 409,23 | 409,19 | 409,24 |
| 13 | 425,89 | 425,25 | 425,19 | 425,29 |
| 14 | 397,32 | 396,99 | 396,94 | 396,97 |
| 15 | 409,97 | 409,26 | 409,21 | 409,25 |
| 16 | 430,14 | 430,01 | 430,07 | 430,19 |
| 17 | 404,58 | 404,84 | 404,96 | 405,08 |
| 18 | 427,56 | 427,99 | 428,11 | 428,21 |
| 19 | 421,79 | 421,92 | 422,06 | 422,15 |
| 20 | 407,47 | 407,91 | 408,09 | 408,21 |
| 21 | 411,93 | 412,69 | 412,88 | 412,98 |
| 22 | 414,28 | 413,88 | 413,88 | 413,96 |
| 23 | 428,62 | 427,99 | 427,95 | 427,96 |
| 24 | 428,69 | 428,04 | 428,08 | 428,09 |
| 25 | 412,72 | 412,96 | 413,14 | 413,15 |
| 26 | 408,02 | 408,46 | 408,69 | 408,79 |
| 27 | 405,19 | 405,86 | 406,11 | 406,16 |
| 28 | 416,25 | 416,39 | 416,45 | 416,42 |
| 29 | 410,87 | 412,22 | 412,65 | 412,81 |
| 30 | 426,54 | 426,74 | 426,97 | 427,05 |