

## Ensaio de resistência termomecânica em regime estacionário em Bloco de Terra Compactada (BTC)

Diogo Pedro de Lima

*Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia da Construção*

Orientado por

Prof.<sup>a</sup> Dra. Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira

Prof. Dr. Luís Manuel Ribeiro de Mesquita

Prof. Dr. Mario Arlindo Paz Irrigaray

Bragança  
2017



*Para minha mãe Elena,  
meu irmão e para o meu pai, com saudades.*



*“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”*

-Simone de Beauvoir



## **AGRADECIMENTOS**

A realização desta Dissertação de Mestrado só foi possível graças à colaboração e ao contributo, de forma direta ou indireta, de várias pessoas, sem as quais essa investigação não teria sido possível.

À minha orientadora, Professora Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira, da Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, e orientador, Luís Manuel Ribeiro de Mesquita do Instituto Politécnico de Bragança, obrigado pela orientação deste trabalho, disposição da sua atenção, pela capacidade científica, sanção das dúvidas que surgiram assim como por toda a força e incentivo ao longo da realização deste. Todas essas disposições fazem fortalecer o vosso profissionalismo.

À Engenheira Luísa Barreira, do Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão, do Instituto Politécnico de Bragança, pela disponibilidade, pelo apoio, pelo precioso contributo prestado nas tarefas elaboradas no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da ESTIG.

Ao orientador Mario Arlindo Paz Irrigaray, e coordenador Marcelo Guelbert da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Brasil, só tenho a agradecer pelo tempo em que disponibilizou, muitas das vezes, para auxiliar com conhecimento e orientação.

Ao Edgar Soares da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, pelo excelente espírito de equipa, dedicação e incansável ajuda prestada nos trabalhos experimentais realizados.

O aprendizado repassado por vocês foi excepcional, o companheirismo fez os dias de realização deste trabalho se tornarem únicos, volto a casa com a certeza de que conheci boas pessoas, com foco e determinação.

Aos meus professores da UTFPR de Campo Mourão, em especial a todo o núcleo de Engenharia Civil, que deram base e auxiliaram, nos fornecendo a grande oportunidade de estudar em um ótimo instituto. Obrigado por todo o apoio, de muito valeu todo o empenho de vocês e é por isso que buscamos sempre o melhor.

As pessoas excepcionais que tive o prazer em conhecer em Portugal: Adriano Lima e Rafaela Prata agradeço sobretudo pela paciência, incentivo, boa disposição, pela boa energia transmitida, pelos conselhos e companhia, sobretudo pela amizade que cultivamos. Serei eternamente grato. Aos verdadeiros amigos, que sempre me apoiaram na concretização deste sonho, sobretudo aos amigos que me incentivaram da UTFPR,

Ana Carla Moreira, Aline Lima e Jhenifer Mesquita. Vocês fizeram dos meus dias, dias mais claros, muitas das vezes dias de ânimo, dias de sentir saudade, dias de se sentir especial por ter alguém com quem pudéssemos contar. Com toda certeza vocês fizeram a maior diferença, tanto aqueles que estão no Brasil dando força e incentivo como aqueles que fizeram parte, intimamente, da minha caminhada por Portugal.

Ao meu pai Nivaldo e ao meu irmão Tiago, vocês me deram sustento, base para esse sonho, sempre me apoiando e dando votos de confiança, saiba que cada lugar que passei e tudo o que aprendi, assim como cada etapa conquistada, eu deixo claro, que é por vocês e para vocês.

Por fim, o meu eterno agradecimento a todos, em especial a minha mãe Elena que sempre me apoiou. Mesmo quando tudo parecia impossível, ela me deu força e amor para continuar, para tentar sempre mais ao longo de toda a minha vida. Se sou forte, hoje, é por você ter confiado em mim. Eu amo vocês incondicionalmente e sou eternamente grato.



# ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
ÍNDICE DE TABELAS .....	xv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT .....	xix
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONCEITOS GERAIS .....	3
1.2. OBJETIVOS .....	4
1.3. ESTRUTURAÇÃO DA TESE.....	5
<b>CAPÍTULO 2. BLOCO DE TERRA COMPACTADA ..</b>	<b>7</b>
2.1. A CONSTRUÇÃO EM TERRA .....	9
2.2. CARATERIZAÇÃO DO BTC .....	15
2.2.1. Composição .....	16
2.2.2. Técnicas de Estabilização .....	18
2.2.3. Cura.....	20
2.2.4. Geometria do BTC.....	20
2.2.5. Processo de fabricação .....	22
2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO BTC.....	23
2.3.1. Vantagens.....	23
2.3.2. Desvantagens .....	25
2.4. NORMAS DISPONÍVEIS PARA O USO DOS BTC .....	27
2.5. NORMAS E REGULAMENTOS ENVOLVIDOS NO ESTUDO DA REAÇÃO AO FOGO.....	29
2.5.1. Parâmetros a avaliar na resistência ao fogo .....	30
2.5.2. Portaria nº 1532/2008 .....	31
2.5.3. EN 1363-1 – Ensaios de Resistência ao Fogo: Requisitos Gerais ...	32
2.5.3.1. Equipamentos de ensaio .....	32
2.5.3.2. Forno	33
2.5.3.3. Termopares .....	33

**CAPÍTULO 3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS ..... 35**

3.2.	MATERIAIS UTILIZADOS NO BTC .....	37
3.2.2.	Cal.....	39
3.2.3.	Cimento.....	40
3.2.4.	Quantidade de material utilizado na composição do BTC .....	40
3.3.	PROCESSO DE FABRICO DOS CILINDROS DE BTC.....	41
3.4.	IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	43
3.5.	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA TEMPERATURA ....	46
3.6.	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO ENSAIO A COMPRESSÃO .....	49
3.7.	ENSAIO DE COMPRESSÃO RESIDUAL.....	52
3.8.	TRATAMENTO DE DADOS .....	53

**CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 55**

4.1.	INTRODUÇÃO.....	57
4.2.	APRESENTAÇÃO DOS DADOS .....	57
4.3.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS POR TEMPERATURA ...	59
4.3.1.	Ensaio de compressão à temperatura de 20°C.....	59
4.3.2.	Ensaio de compressão à temperatura de 100°C.....	61
4.3.3.	Ensaio de compressão à temperatura de 200°C.....	62
4.3.4.	Ensaio de compressão à temperatura de 400°C.....	63
4.3.5.	Ensaio de compressão à temperatura de 600°C.....	64
4.3.6.	Ensaio de compressão à temperatura de 800°C.....	65
4.4.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS POR AMOSTRA .....	67
4.4.1.	Análise de resultados da amostra M1 .....	67
4.4.2.	Análise de resultados da amostra M2 .....	68
4.4.3.	Análise de resultados da amostra M3 .....	69
4.4.4.	Análise de resultados da amostra M4 .....	70
4.4.5.	Análise de resultados da amostra M5 .....	71
4.5.	RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO RESIDUAL DA AMOSTRA M2.....	72
4.6.	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	74

4.7.	ANÁLISE GLOBAL DE TODAS AS AMOSTRAS .....	77
<b>CAPÍTULO 5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>79</b>
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	81
5.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	82
<b>CAPÍTULO 6.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo I</b>	<b>.....</b>	<b>91</b>
<b>Anexo II</b>	<b>.....</b>	<b>95</b>



**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1 – Construção com terra a nível mundial (Gomes, 2013). .....	11
Figura 2 - Diferentes famílias de sistema de construção antigo e moderno, que utilizam a terra como matéria-prima (Houben & Guillaud, 1989).....	12
Figura 3 - (a) Taipa, (b) Adobe e (c) Tabique. ....	13
Figura 4 - Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra (adaptado de Meneses, 2010). ....	14
Figura 5 - Construção com BTC em andamento. ....	15
Figura 6 - Composição do BTC.....	16
Figura 7 - Exemplo de um traço 1:12 para obtenção de BTC's (Adaptado de Neves & Cuna, 2007). ....	18
Figura 8 - Geometria dos BTC (mm) (Sturm et al., 2013). ....	21
Figura 9 - Processo de fabricação dos blocos (Neves & Cuna, 2007). ....	22
Figura 10 - Comparação da emissão do carbono em diferentes materiais (Jalali & Torgal, 2009).....	23
Figura 11 - Percentagem de absorção de água dos diferentes materiais (Jalali & Torgal, 2009).....	25
Figura 12 - Representação esquemática de um termopar (Jesus, 2008).....	33
Figura 13 - Amostras M1, M2, M3, M4 e M5. ....	44
Figura 14 - Amostra (a) “M3.2.P0” antes do ensaio e (b) depois do ensaio de compressão a temperatura ambiente.....	45
Figura 15 - Multicanal MGC Plus. ....	46
Figura 16 - Localização dos termopares 1.2 (Superfície da amostra) e termopares 1.3 (Vão do forno). ....	47
Figura 17 - Interface do Software CalmanEasy.....	48
Figura 18 - Aparelhos para captação da temperatura: (a) PID, (b) MGC Plus e (c) Sistema MGC plus e computador. ....	48
Figura 19 - Forno fixado na base do sistemas de ensaios mecânicos da Instron® série 4485. ....	49
Figura 20 - Medição (a) e pesagem (b) dos provetes. ....	50
Figura 21 - Sistemas de ensaios mecânicos da Instron® série 4485. ....	51
Figura 22 - Sistema mecânico de compressão junto ao forno após o ensaio.....	51
Figura 23 - Provetes da composição “M2” do ensaio residual de compressão. ....	53

Figura 24 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 20°C.....	60
Figura 25 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 100°C.....	61
Figura 26 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 200°C.....	62
Figura 27 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 400°C.....	64
Figura 28 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 600°C.....	65
Figura 29 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 800°C.....	66
Figura 30 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a amostra M1.67	
Figura 31 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a amostra M2.68	
Figura 32 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a amostra M3.70	
Figura 33 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a Amostra M.71	
Figura 34 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a Amostra M5.72	
Figura 35 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a amostra M2 no ensaio de compressão residual.....	73
Figura 36 - Variância da tensão média de rotura dos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário em MPa. ....	75
Figura 37 - Tensão média de rotura dos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário (média±desvio padrão).....	77

**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1 - Diferentes famílias de sistema de construção antigo e moderno, que utilizam a terra como matéria-prima. ....	12
Tabela 2 - Diferentes tipos de Estabilizadores. ....	19
Tabela 3 - Dimensões do BTC. ....	22
Tabela 4 - Denominação das características da resistência ao fogo. ....	29
Tabela 5 - Resistência ao fogo de produtos de construção. ....	31
Tabela 6 - Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios. ..	31
Tabela 7 - Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos de envoltente. ....	32
Tabela 8 - Resumo dos resultados obtidos com a análise do solo residual granítico do Minho. ....	38
Tabela 9 - Composição da fração sólida, em percentagem, de cada mistura estudada. .	41
Tabela 10 - Quantidade de material de fabrico para cada provete (g). ....	41
Tabela 11 - Característica físicas médias dos provetes de BTC. ....	41
Tabela 12 - Quantidade em percentagem de cada Estabilizador por amostra. ....	43
Tabela 13 - Patamar de temperatura dos ensaios. ....	44
Tabela 14 - Patamar da temperatura do ensaio de compressão residual. ....	52
Tabela 15 - Legenda de cores e percentagens de composição por amostra. ....	58
Tabela 16 - Tensão média de rotura dos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário em MPa. ....	59
Tabela 17 - Resultado da tensão máxima do ensaio de resistência termomecânica em regime estacionário e do ensaio de compressão residual (ECR) da amostra M2 em MPa. 73	
Tabela 18 - Comparação estatística das resistências máximas das amostras em diferentes patamares de temperatura. ....	76





**RESUMO**

A construção em terra assume-se como um método construtivo fundamental para o crescimento do fator sustentabilidade no setor da construção. A terra pode ter inúmeras vantagens no que se refere a sua capacidade e acessibilidade, assim como ao seu impacto mínimo no ambiente. Sendo assim, este método vem conquistando progressivamente o mercado da construção civil, principalmente nos países denominados “desenvolvidos”, devido ao melhoramento dos processos de construção com este material e à industrialização da produção.

O bloco de terra compactada (BTC) é uma das técnicas de construção em terra com maior perspectiva de aceitação pelas sociedades atuais, dado que a sua tecnologia permite a padronização dos blocos, um maior controlo de qualidade no seu processo de produção com uma boa capacidade de resistência. No entanto, as incertezas normativas associadas ao comportamento dos BTC são as maiores barreiras para a sua aceitação universal, justificando, e com elevada importância, os estudos realizados.

Este estudo baseia-se num conjunto de ensaios experimentais de resistência à compressão conduzidos em provetes cilíndricos de BTC. São analisadas cinco amostras com percentagens distintas de estabilizantes, cal e cimento, em relação às diferentes temperaturas, onde, para além de comparar os seus comportamentos, se pretende, compreender a influência dos estabilizadores e da temperatura na resistência mecânica do BTC. Os testes a temperaturas elevadas são realizados em regime estacionário. Adicionalmente, é analisada a resistência residual dos provetes da amostra M2 após exposição a temperaturas elevadas. Os resultados permitem aferir qual a melhor mistura, ao nível do desempenho, considerando a resistência máxima, comportamento mecânico, economia e sustentabilidade. Seguindo esses fatores, a composição M2 com 5.0% cal e 7.5% cimento apresenta-se como a melhor opção.

Com este estudo a segurança de estruturas em BTC quando sujeitas a situações de incêndio ficam mais claras através dos resultados de resistência atingida antes do seu colapso, com objetivo de garantir a segurança de pessoas e bens.

**Palavras-chave:** BTC, Bloco de Terra Compactada, Ensaio de Resistência, Temperaturas elevadas; Resistência residual, Incêndio, Fogo, Aquecimento.



**ABSTRACT**

The Earth Construction as a constructive critical method for the growth of sustainability factor in the construction sector. The earth has numerous advantages when it comes to its ability and accessibility, as well as to its minimal impact on the environment. Therefore, this method has won steadily the construction market, particularly in the so-called "developed" countries, due to the improvement of construction processes with this material and the industrialization of production.

The compressed earth block (CEB), is one of the techniques of Earth construction with greater perspective of acceptance by current societies, given that its technology enables standardization of blocks, greater control of quality in your production process with a good ability to resistance. However, regulatory uncertainties associated with the behavior of CEB are the major difficulties for the universal acceptance, justifying the high importance of the studies carried out.

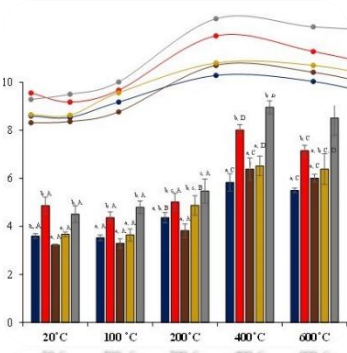
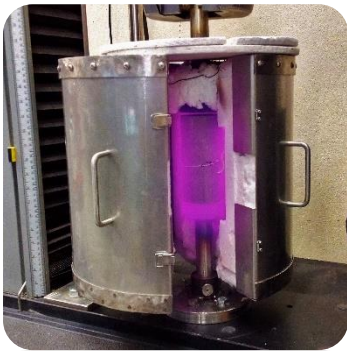
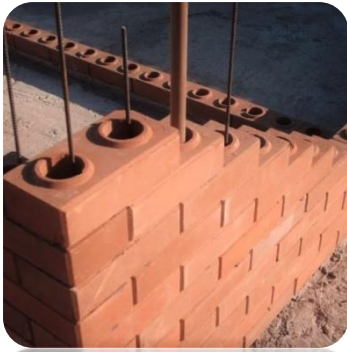
This study is based on a set of compressive strength tests conducted on cylindrical specimens CEB. Five samples are analyzed with different percentages of stabilizers, between lime and cement, at different temperatures, in addition to compare their behavior, in order to understand the influence of stabilizers and temperatures on mechanical strength of CEB.

The tests at elevated temperatures are held in stationary regime. Besides, the residual resistance of sample specimens M2 after exposure to high temperatures is also analyzed. The results allow to determine the best mixture of performance level, whereas the maximum resistance, mechanical behaviour, economy and sustainability. Following these factors, the composition M2 with 7.5% cement and 5.0% lime is the best option.

With this study the safety of CEB structures when subjected to fire situations, become clearer through the results of resistance reached before any collapse, in order to ensure the safety of people and materials.

**Keywords:** CEB, Compressed Earth Block, Mechanical Resistance, High temperatures; Residual resistance, Fire, Heating.





# CAPÍTULO 1.

## Introdução e objetivos



## 1.1. CONCEITOS GERAIS

A construção em terra está presente em todo o mundo, além das inúmeras vantagens a nível social, económicas e ambientais é considerado um método construtivo sustentável.

Considera-se que a sustentabilidade do planeta se traduz na procura e utilização de materiais e técnicas construtivas mais adaptadas ao ambiente, representando assim uma diminuição do consumo de recursos, elevando a construção em terra e o interesse no estudos sobre os materiais contidos na alvenaria em terra.

As técnicas de construção em terra são inúmeras e variam de região para região, conforme as características do solo e da temperatura do local. Em Portugal, as mais comuns são: a taipa, o tabique, a alvenaria de adobe e mais recentemente a alvenaria de Bloco de Terra Compactada (BTC).

Os blocos de terra compactada apresentam um controle de produção mais rigoroso, apresentam valores de resistência mais elevados, comparativamente às outras técnicas enumeradas e são facilmente adaptáveis às necessidades técnicas e à arquitetura de cada local, podem ser utilizados como elementos estruturais ou apenas como elementos de enchimento (Oliveira, 2014).

A técnica de BTC é incombustível, não exala gases tóxicos e por isso os produtos da combustão não são prejudiciais à saúde humana; é um mau condutor de calor (possui baixa condutividade térmica a temperatura ambiente). Estas características concedem ao BTC uma boa resistência ao fogo.

Entretanto, a deterioração do BTC, ao ser sujeito a temperaturas elevadas, manifesta-se de forma desconhecida, modificando o seu comportamento conforme o estabilizante contido em sua composição. O aquecimento do BTC conduz à degradação diferencial afetando as propriedades mecânicas por meio da redução e mudança na resistência e no módulo de elasticidade dos materiais conforme a temperatura exposta. Há perda de rigidez da estrutura podendo levar os elementos estruturais ao colapso, tanto na fase de aquecimento quer na fase de arrefecimento.

O desenvolvimento destas investigações, focam-se essencialmente na segurança, analisando o comportamento mecânico do BTC. Atualmente presume-se que aproximadamente metade da população mundial habite em edifícios construído em terra (Gomes, 2013), daí a necessidade deste estudo detalhado sobre este “novo” material de construção.

No presente estudo, pretende-se, compreender a influência dos estabilizadores e da temperatura na resistência termomecânica em regime estacionário em provetes cilíndricos de BTC, analisando diferentes percentagens de estabilizantes, entre cal e cimento, respondendo o comportamento do material sobre a ação do fogo. Também é realizada uma análise dos ensaios de compressão residual com a amostra que obteve melhor desempenho.

Para colocar em prática a implementação de novas técnicas e tecnologias cada vez mais eficientes e eficazes, é necessário a exigência de empenho e dedicação constante na atualização dos conhecimentos que envolvem novos processos construtivos.

Com o objetivo de seleção da melhor composição, também será realizado uma análise de variância estatística onde será possível afirmar qual a melhor composição por patamar de temperatura, assim como em qual patamar de temperatura cada composição tem a maior resistência.

Assim, e com o objetivo de dar resposta à necessidade de estudar e caracterizar a construção em BTC, a Universidade do Minho junto ao Instituto Politécnico de Bragança tem desenvolvido vários projetos nesse sentido, desde a caracterização do bloco, ao estudo das formas de estabilização, passando pela caracterização térmica e acústica do BTC, como a resistência mecânica em ação ao fogo.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do IPB. A construção dos cilindros de BTC até sua cura, foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

## 1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho de dissertação pretende dar um contributo na compreensão do comportamento do BTC submetido ao ensaio de compressão sob ação do fogo. Pela falta de investigação nesta área, pretende-se contribuir com novos elementos que ajudem a compreender e analisar a resistência termomecânica em regime estacionário do BTC, com o objetivo de avaliar a sua resistência à compressão sob o efeito do aumento de temperatura.

Serão analisadas 5 amostras com percentagens distintas de estabilizantes, cal e cimento, em relação as diferentes temperaturas, onde, para além de comparar os seus



comportamentos, se pretende, compreender a influência dos estabilizadores e da temperatura na resistência mecânica do BTC.

Serão realizados também ensaios de compressão residual, sendo analisado o comportamento mecânico à compressão do provete após ele ser exposto a temperatura e deixado arrefecer até atingir a temperatura ambiente. A amostra “M2” foi selecionada para estes ensaios devido a obtenção dos melhores resultados nos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário.

De forma mais pormenorizada, os objetivos que levam ao desenvolvimento deste trabalho, são apresentados pelas seguintes ordens:

- Fazer referência geral a história da construção em terra e caracterização do que é BTC;
- Regulamentações respeitantes ao BTC, os materiais e estabilizantes utilizados, assim como as normas sobre o fogo na construção;
- Descrever o tipo de BTC a ensaiar e suas composições, assim como os patamares de temperatura a ser ensaiado;
- Descrever detalhadamente os Ensaios experimentais;
- Analisar o comportamento mecânico dos BTC por amostra;
- Analisar o comportamento mecânico dos BTC por patamar de temperatura;
- Comparação e discussão de resultados obtidos em todos os ensaios;
- Sugerir a melhor composição, visando a economia, sustentabilidade e a resistência máxima.

### 1.3. ESTRUTURAÇÃO DA TESE

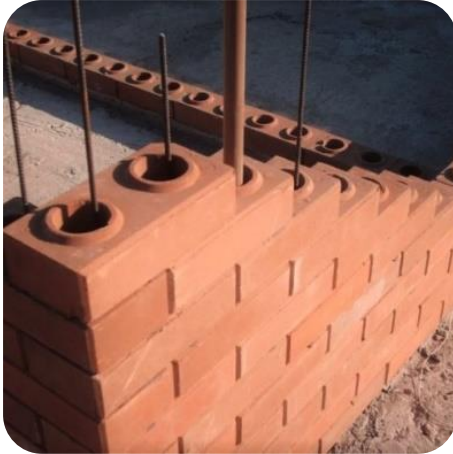
Este trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos. O CAPÍTULO 1 dedica-se ao enquadramento geral do trabalho realizado, fazendo-se referência aos objetivos que se pretendem atingir, a partir dos ensaios mecânicos e das análises realizadas sobre o comportamento e resistência máxima das 5 composições estudadas

O CAPÍTULO 2 refere-se ao estado do conhecimento do BTC, passando-se em revista o enquadramento histórico geral deste tipo de construção, suas características e materiais constituintes, bem como a sua principal área de incidência. Serão ainda focados os principais pontos regulamentares referentes à ação do fogo.

Relativamente ao CAPÍTULO 3, apresenta-se descrito o procedimento dos ensaios experimentais. Os ensaios realizados serão ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário, com o objetivo de avaliar a sua resistência à compressão sob o efeito do aumento de temperatura e relacioná-la entre ambos, assim como será realizado um ensaio de compressão residual com a amostra que obteve melhor desempenho.

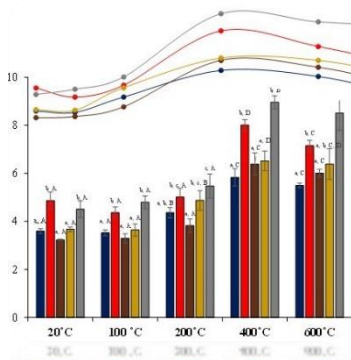
No CAPÍTULO 4 são apresentados os resultados experimentais e numéricos dos ensaios, com uma comparação desses mesmos resultados em forma de gráfico, apresentando-se uma análise crítica. O objetivo desta análise é verificar e responder qual a melhor composição em diferentes temperaturas, assim como em qual temperatura cada amostra se comporta melhor.

Finalmente, apresenta-se no CAPÍTULO 5, as principais conclusões a reter do presente trabalho e sugerem-se futuros desenvolvimentos sobre as construções em BTC.



# CAPÍTULO 2.

## Bloco de terra compactada





## 2.1. A CONSTRUÇÃO EM TERRA

A construção tem um papel fundamental para o desenvolvimento sustentável, devido ao seu grande consumo de energia. Segundo Beltrame (2013), as edificações consomem 34% do fornecimento mundial de água, 66% de toda a madeira extraída, e sua operação consome mais de 40% de toda a energia produzida no mundo.

Wines (2000) exemplifica o caso da Europa, onde aproximadamente 50% da energia consumida é usada para a construção e manutenção de edifícios e outros 25% são gastos em transporte.

De fato, em Portugal 50% dos recursos extraídos da natureza são direcionados para a construção, e 50% dos resíduos produzidos resultam do setor da construção (Braga & Rocheta, 2008). Sendo de grande importância, observar a construção civil dentro de um ciclo de vida, tentando reaproveitar o máximo de materiais possíveis.

A prática da construção em terra utiliza uma matéria-prima ecológica, abundante e reutilizável, que possibilita ademais, um excelente comportamento térmico, designadamente através da inércia térmica que proporciona. (Braga e Rocheta, 2008).

A terra é uma matéria prima ecológica, abundante, acessível, económica e reutilizável (Murta et al., 2010), é um dos materiais mais utilizados na construção, para além de ter associada uma menor energia incorporada, proporciona edifícios mais sustentáveis e com um baixo impacto ambiental em relação aos outros materiais.

Além disso, a terra é um material que não causa poluição, assim como não necessita de processos avançados que utilizam de meios energéticos de alto custo para a transformação da matéria-prima. Quanto ao fim-de-vida do material, quando utilizado sem qualquer aditivo, tem a vantagem de se poder reutilizar sem criar qualquer resíduo prejudicial ao meio ambiente após a sua demolição. Caso este solo seja misturado com cal ou cimento, poderá, mesmo assim, voltar a ser empregado neste tipo de construção (Neves, 2011).

No caso da construção utilizando a técnica de BTC, todo o solo pode ser reutilizado novamente, devido a sua composição.

Apesar da grande vantagem da utilização da terra como matéria-prima, todo o seu potencial como material para a construção de edifícios ambientalmente mais saudáveis é subaproveitado, pois é necessário complementar o saber empírico do passado, com a arquitetura e os conhecimentos científicos e tecnológicos da atualidade (Braga e Rocheta, 2008).

Desta forma, com base nos benefícios da reciclagem da construção civil citados abaixo, o uso de BTC pode minimizar muitos impactos ambientais, entre eles:

- Redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados (John, 2000). Sendo possível a reutilização da terra.

- Redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de resíduos pela reciclagem. Destaca-se aqui a necessidade da própria reciclagem dos resíduos de construção e demolição, que representam mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (Pinto, 1999).

- Redução da poluição; por exemplo para a indústria de cimento, que reduz a emissão de gás carbônico utilizando escória de alto forno em substituição ao cimento portland (John, 1999).

Estudos efetuados por Murta et al., (2010) demonstraram que a habitação que utiliza os BTC como paredes resistentes apresenta uma redução de custos de 40% da construção e uma redução de gastos energéticos e de emissões de CO<sub>2</sub> superior a 75%. O estudo foi realizado em 3 tipos de habitações unifamiliares diferentes, nomeadamente:

i) Uma solução com estrutura porticada de betão armado e lajes aligeiradas pré-fabricadas;

ii) Uma solução à base de materiais naturais, nomeadamente com paredes resistentes em blocos de terra comprimida;

iii) Uma solução que contempla a reutilização de madeira proveniente de demolições habitacionais.

Como todo o processo de fabrico do BTC é feito sem necessidade de queima, não existe emissão de gases, desmatamento para obtenção de lenha e o grande consumo de energia que se dá no processo de produção convencional.

Sendo assim, destaca-se a importância da investigação e desenvolvimento contínuos sobre este tema, pois a simplicidade e a inesgotabilidade da terra como material de construção contribuem para dissipar as incertezas energéticas futuras tanto para países em desenvolvimento como para países desenvolvidos (Correia, 2006).

A construção em terra está presente em várias partes do mundo, principalmente devido a disponibilidade e facilidade da terra como material da construção. Não se sabe dizer exatamente qual a data exata em que surgiram as primeiras construções em terra, porém, estima-se que existem há cerca de 10000 anos tendo surgido de uma forma natural através da necessidade básica do ser humano se proteger do clima, animais e pessoas.

Na Figura 1 está apresentado a localização das construções em terra segundo Gomes (2013), onde pode-se observar a América do sul, África e Ásia como os continentes com maior quantidade de construção em terra.



Figura 1 – Construção com terra a nível mundial (Gomes, 2013).

Atualmente, de acordo com as estatísticas da UNCHS (United Nations Center for Human Settlements), verifica-se que o número de pessoas que vivem em habitações edificadas recorrendo a técnicas de construção em terra continua sendo bastante significativa, sendo que 40% da população mundial vive em habitações de terra (Auroville Earth Institute, 2014).

A variabilidade da técnica da construção em terra é diferente de região para região, associada ao uso de solo local, que naturalmente possui características próprias, no entanto existem na generalidade de todas as técnicas dois constituintes fundamentais: terra e água.

Houben e Guillaud (2008) identificaram 18 métodos principais sobre construção em terra, estes 18 métodos podem ser divididos em três grupos distintos, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Diferentes famílias de sistema de construção antigo e moderno, que utilizam a terra como matéria-prima.

A Utilização da terra sob a forma monolítica e portante	B Utilização da terra sob a forma de alvenaria portante	C Utilização da terra como enchimento numa estrutura de suporte
1.Terra escavada 2.Terra plástica 3.Terra empilhada 4.Terra modelada 5.Terra prensada:Taipa	6.Blocos apilados 7.Blocos prensados 8.Blocos cortados 9.Torrões de terra 10.Terra extrudida 11.Adobe Mecânico 12.Adobe Manual 13.Adobe Moldado	14.Terra de recobrimento 15.Terra sobre engradado 16.Terra palha 17.Terra de enchimento 18.Terra de cobertura

Fonte: Adaptado de Houben & Guillaud (1989).

Na Figura 2 estão representados os métodos mencionados na Tabela 1, onde é possível visualizar todos os métodos da construção em terra.

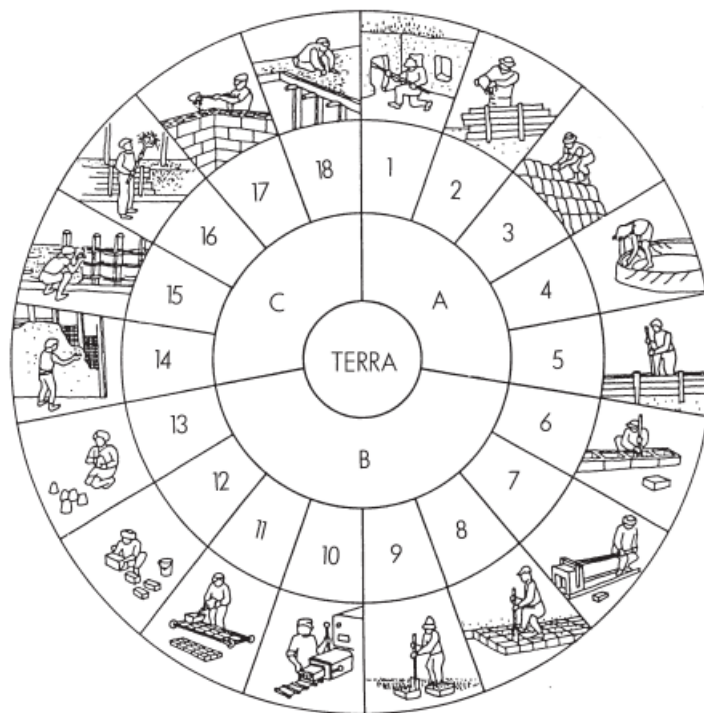


Figura 2 - Diferentes famílias de sistema de construção antigo e moderno, que utilizam a terra como matéria-prima (Houben & Guillaud, 1989), *Traité de construction en Terre*, Marseille: Editions Parenthèses – p.15

A economia, a cultura e o clima da região são os principais fatores da escolha da técnica a ser utilizada podendo ser adicionados outros materiais, de forma a facilitar todo o processo de produção e melhorar as propriedades do material terra.



Existindo no mundo diversificadas técnicas construtivas em que a matéria-prima é a terra crua, são particularmente significativas em Portugal, três principais métodos construtivos: a construção em Taipa, Adobe e Tabique, como pode visualizar na Figura 3, onde estão representadas algumas construções atuais utilizando a terra.

São particularmente significativas em Portugal a Taipa, na zona sul do país, mais propriamente no Algarve e Alentejo, o adobe na zona centro, e o tabique com maior existência na zona do Alto Douro e Trás-os-Montes, em pequenas construções espalhadas por estas regiões ou em construção militar de muralhas defensivas.

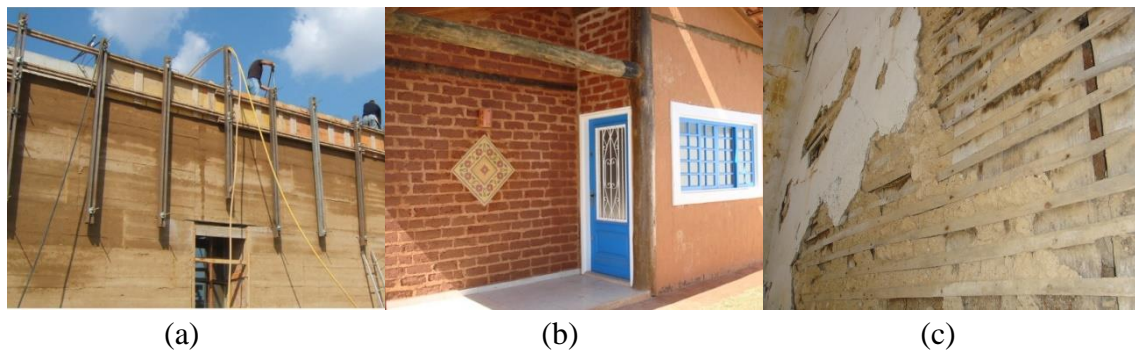


Figura 3 - (a) Taipa, (b) Adobe e (c) Tabique.

A construção em Taipa, se baseia na técnica onde o barro, mistura de água e terra, é compactado horizontalmente num trançado de madeira para formar a parede, a terra crua é colocada na cofragem e é prensada ou compactada com um pilão ou um compressor pneumático.

Os blocos de adobe são fabricados à base de terra crua, trata-se de um bloco maciço, resultante da mistura de terra crua, areia e palha cortada, são moldados em moldes de madeira e secados ao sol, não sendo comprimidos. O adobe foi amplamente utilizado por ser uma alternativa viável aos tijolos cerâmicos cozidos, permitindo um fabrico de baixo custo, um melhor comportamento térmico e acústico e um número muito variável de dimensões das peças.

O tabique é constituído por uma estrutura de madeira, basicamente revestida por um material de revestimento/enchimento à base de terra crua, podendo em casos pontuais possuir carolos de espigas de milho ou palha como enchimento. Um elemento construtivo de tabique, é construído através da prega de ripas de madeira sobre tábuas de madeira colocadas na vertical, sendo o conjunto revestido em ambas as faces, com material à base de terra crua, formando uma parede.

A distribuição geográfica apresentada na Figura 4 demonstra a localização das técnicas construtivas em terra em Portugal, também permite verificar que a construção em terra existente na Região de Bragança é a técnica em Tabique, principalmente em construções antigas, sendo as outras praticamente inexistente.

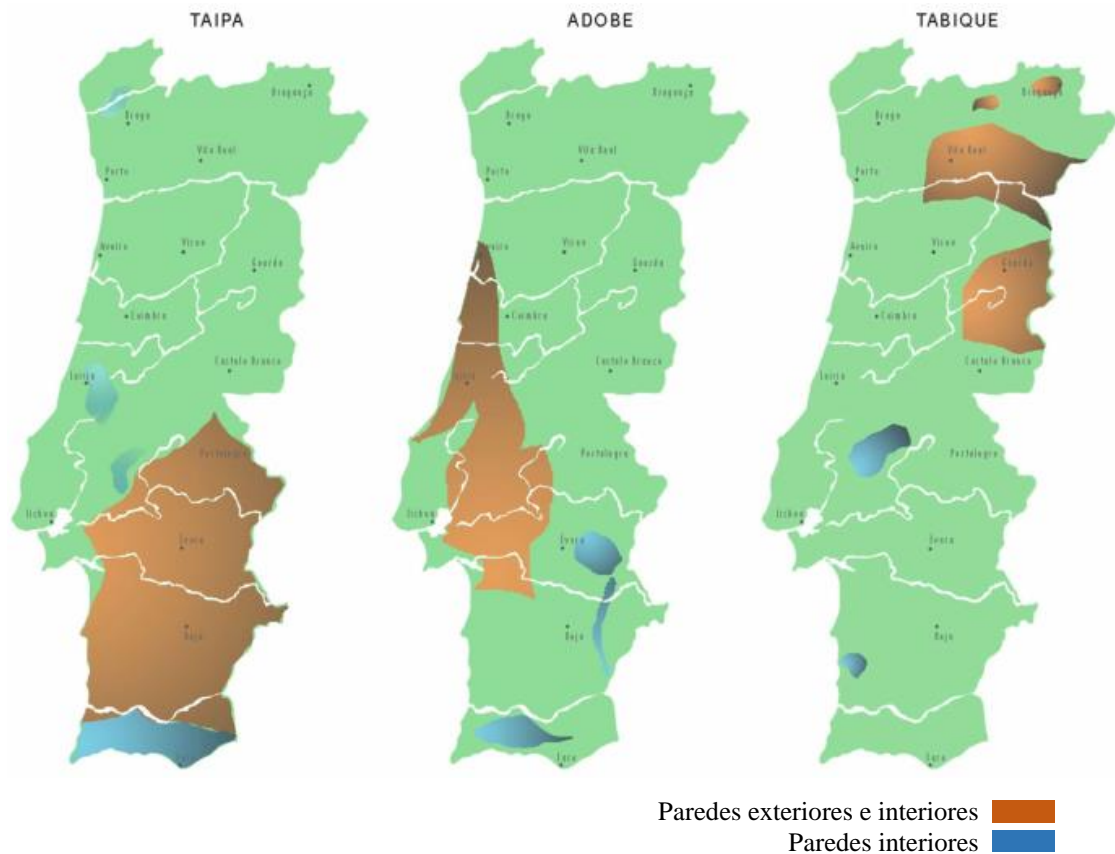


Figura 4 - Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra (adaptado de Meneses, 2010).

Com o intuito de melhorar o método construtivo em adobe, foi conferido em blocos características semelhantes a pequenos blocos de taipa, acarretando o surgimento do BTC. Sendo o bloco de terra compactada um dos métodos construtivos em terra mais utilizado na atualidade.

O volume de vazios do solo diminui através da prensagem do solo, deixando os BTC mais duráveis e resistentes do que o adobe. A técnica de BTC teve origem por volta do século XVIII, pelo Francês Francois Cointeraux, mas foi somente no ano de 1952 que foi inventado a primeira prensa, criada pelo Colombiano Raul Ramirez.

Entre os anos 70 e 80 surgiram diferentes máquinas para a produção dos blocos, sendo manuais e hidráulicas, com o objetivo de aumentar a produtividade. Nesta técnica a consistência da terra é semelhante à necessária para execução da taipa, já em análise

com o material utilizado no adobe, o BTC tem um teor de água bastante inferior. Uma das principais vantagens da utilização de BTC é a sua produção, os blocos podem ser fabricados com o solo do próprio local, diminuindo a locomoção de material, que utiliza de veículos, imitando CO<sub>2</sub>. Com a ajuda de estabilizantes o solo pode alcançar um melhor desempenho e uma maior resistência.

Na Figura 5 está apresentado uma construção em andamento utilizando o método construtivo em terra com BTC, ou Tijolo ecológico, como conhecido no Brasil.



Figura 5 - Construção com BTC em andamento.

## 2.2. CARATERIZAÇÃO DO BTC

O Bloco de Terra Compactada (BTC) ou tijolo modular de solo-cimento, também é conhecido pelo nome popular de tijolo ecológico por ser uma alternativa sustentável em comparação aos outros métodos construtivos.

A resistência máxima é atingida por compactação da prensa e não é necessária a queima de tijolos. Em inglês ele é designado como Compressed Earth Block (CEB), podendo também ser encontrado com o nome de Pressed Earth Block ou Compressed Soil Block.

Para fabricação e estabilização do BTC é necessário ponderar e considerar a qualidade e quantidade dos constituintes do bloco, que variam de acordo com as características do solo e resistência final do bloco.

Em geral a composição do BTC é constituída por: argila, areia, água e estabilizadores, podendo ser eles: cimento, cal ou ambos associados como estão representados na Figura 6.



Figura 6 - Composição do BTC.

Na combinação do BTC caso seja introduzida argila em quantidades superiores os blocos poderão fissurar, tal como areia em quantidade superiores poderá levar à destruição do bloco (Arumala & Gondal, 2007), sendo a quantidade dos materiais de grande importância.

O BTC pode ser utilizado para a construção após 7 dias depois de prensado, sendo necessário até 30 dias para a cura total. Para a prensagem dos blocos são utilizadas máquinas manuais, onde a prensagem é feita pelo operador, ou máquinas a motor, que a prensagem é feita com o acionamento de uma prensa hidráulica e placas de aço que comprimem a mistura.

### 2.2.1. Composição

O BTC é composto por diferentes componentes, sendo a terra o principal elemento. Por ser um material heterogêneo e de construção variável é importante definir as características dos solos, tendo que alguns solos não servem como matéria prima para a fabricação de blocos de BTC.

Para construção em terra com BTC, segundo Barbosa (2002), recomenda um intervalo menos restrito, já que sugere que o solo possua entre 50 a 70% de areia, 10 a 20% de silte e 1 a 20% de argila.

Segundo Moreira (2009), na seleção e na preparação da terra há que ter em consideração que a correta seleção é o fator que mais pesa na qualidade final do BTC, no entanto, as características do solo podem ser melhoradas: a granulometria do solo pode

ser corrigida; a terra pode ser estabilizada por adição de cal ou de cimento, assim como os elementos de maiores dimensões devem ser eliminados por crivagem; a mistura dos vários componentes deve ser efetuada a seco; e a terra deve ser umidificada por rega ou por vaporização sob pressão.

O teor de cada componente granulométrico também é importante. É importante que o limite de liquidez do solo não seja excessivo e que apresente plasticidade, de preferência menor que 40-45%. Para os tijolos prensados, pode-se dizer que é desejável que o solo tenha: (a) 10% a 20% de argila; (b) 10% a 20% de silte; e (c) 50% a 70% de areia (Barbosa, 2003). Ainda de acordo com Barbosa (2003), tijolos de ótima qualidade podem ser obtidos com um solo que apresente:

- 11% de argila,
- 18% de silte ,
- 70% de areia, sendo esta composta de grande quantidade de areia fina (grãos de 0,05 a 0,25 mm).

Constituída primordialmente por esses 3 elementos a terra possui também na sua composição água, ar e matéria orgânica. A argila e siltes possuem a tarefa de ligante no solo, enquanto a areia fina e areia grossa seria os agregados.

A coesão do solo é dado pela argila e pelos siltes, ambas são partículas finas de origem mineral. A consistência da argila num solo, dependendo do seu teor de humidade, varia de acordo com a sua composição mineral e química. Esta consistência é vulgarmente referida como plasticidade e refere-se à capacidade do solo se deformar sem rotura elástica caracterizada por fendilhação ou desintegração (Namango, 2006).

As areias finas e grossas constituem os agregados, diminuindo a possibilidade de fissuração por retração e aumentando a resistência do solo. Com a combinação de diferentes granulometrias, a resistência do solo pode ser aumentada devido ao preenchimento, pelos finos, dos vazios entre os grãos de maior dimensão.

Sendo assim as características de um solo dependem fundamentalmente, dos seus componentes e respectivas quantidades de cada. Segundo Rigassi (1985) e Arumala e Gondal (2007) elas devem variar entre as seguintes percentagens:

- Cascalho (gravels) 0 a 40%;
- Areias (sands) 25 a 80%;
- Siltes (silts) 10 a 25%;
- Argilas (clays) 8 a 30%.

Levando em consideração as características do solo, é analisado a quantidade de água e estabilizadores para a fabricação do BTC, de modo simplificado, segundo Neves & Cuna (2007) a composição ideal para o bom estado é dado pela simulação abaixo:

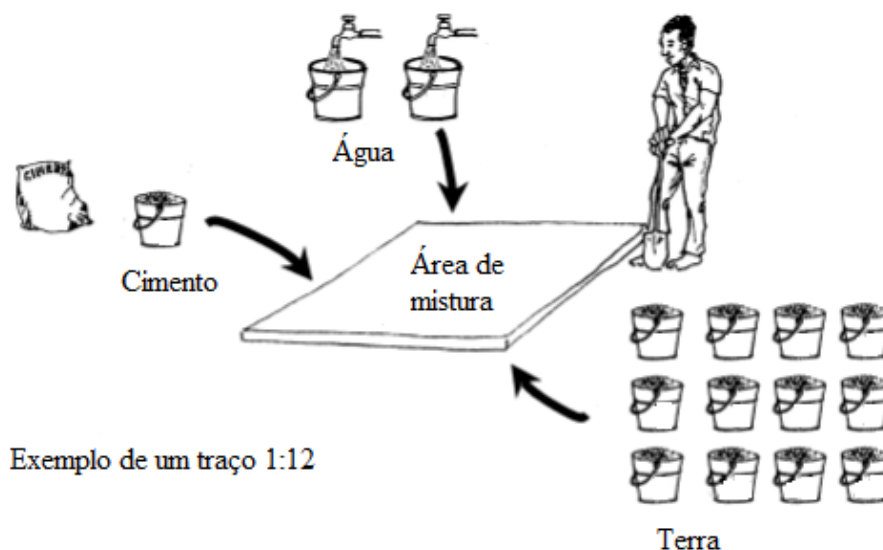


Figura 7 - Exemplo de um traço 1:12 para obtenção de BTC's (Adaptado de Neves & Cuna, 2007).

Observando a Figura 7, o cimento pode ser substituído por outros tipos de estabilizantes, sendo utilizado em nosso estudo cal e cimento.

### 2.2.2. Técnicas de Estabilização

Quando as características físico-mecânicas (resistência à compressão, absorção de água e durabilidade) do sistema de BTC que dependem diretamente do tipo de solo (granulometria, fração argila, grau de plasticidade), além das condições de cura (umidade e temperatura) e de compactação não são alcançadas, é preciso recorrer ao tipo e teor do agente estabilizante a ser utilizado em sua composição.

Estes métodos visam melhorar o desempenho, tal como a resistência a erosão, resistência mecânica e diminuir as variações de volume e porosidade do bloco, garantindo que o componente construtivo possua mais resistência e durabilidade.

Existem vários tipos de estabilizadores, cada um deles direcionado para uma das qualidades a melhorar (Rigassi, 1985). Segundo Moreira (2009), estes podem ser

divididos como estabilizadores: Mecânicos, Físicos e Químicos, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Diferentes tipos de Estabilizadores.

<b>Tipos de Estabilizadores</b>	
Mecânica	- A resistência mecânica, a porosidade, a permeabilidade e a compressibilidade são alteradas através da compactação e da adição de fibras.
Física	- A alteração da textura da terra é realizada através da mistura controlada de partículas de diferente composição e granulometria; podem também conseguir-se os mesmos resultados através de tratamentos térmicos e elétricos.
Química	- As propriedades da terra são modificadas por adição de produtos químicos que alteram as características da terra através de reações químicas.

Fonte: Adaptado de Moreira (2009).

Na estabilização mecânica e física podemos tratar os diferentes tipos de terra de diversas formas. Quando estamos perante uma terra extremamente fina, a correção é feita através dos resultados da curva granulometria. Quando a terra a utilizar é do tipo grossa, a correção é feita por remoção deste por peneiração. A correção de uma terra com excesso de partículas finas, como por exemplo uma argila, é feita adicionando partículas mais grossas (Moreira, 2009).

Em relação a estabilização química, esta é conseguida através de cimento, cal, betume, produtos naturais e produtos sintéticos. A adição de cimento no solo provoca aglomeração das partículas e torna a argila mais estável, já a adição de cal permite a dissolução de minerais argilosos. O betume aumenta a resistência da terra à ação da água e a utilização de resinas sintéticas permite tudo já referido anteriormente, apresentando no entanto algumas desvantagens, tais como o elevado custo e a toxicidade dos materiais (Rigassi, 1985).

A percentagem do estabilizante químico depende do tipo de solo que se vai empregar. O estabilizante químico mais utilizado é o cimento, sua ação no solo se dá precisamente da mesma maneira que no betão. O cimento adicionado ao solo trabalha reagindo quimicamente com a água e com as partículas finas do solo. Segundo Barbosa et al (2002), em solos argilosos é exigido no mínimo 6% de cimento, em peso de solo

seco. Para solos arenosos, bem graduados, é necessário no mínimo 4% de cimento. Sendo o melhor solo para estabilização é aquele que apresenta pequenas quantidades de argila, consistindo muitas vezes de areia e cascalho.

O grupo de estudos CRAterre recomenda percentagens de cimento entre 6 a 10% na estabilização de solos para a construção em terra. O estabilizante correntemente utilizado no fabrico de BTC é o cimento, apesar da cal ser o estabilizante mais barato e mais sustentável, porém é expectável que a sua utilização venha no futuro a ganhar uma utilização superior, devido ao menor impacto ambiental. Sendo assim estudos onde é analisado e verificado a melhor percentagem de estabilizantes para o BTC é muito importante.

### 2.2.3. Cura

Segundo Barbosa (2008), os tijolos prensados, em geral, são moldados com uma percentagem de água em torno de 8% a 15%. Então, a tendência da água é sair do interior do tijolo. Em regiões mais quentes com temperaturas elevadas ou em regiões com ventos. É de grande importância avaliar o local de secagem dos BTC, pois esses fenômenos fazem secar rapidamente os blocos recém fabricados, devem ser tomadas algumas medidas contra isso. Se ocorrer a saída rápida da água, não vai haver tempo para esta reagir com todos os grãos de cimento ou cal, comprometendo, a qualidade do bloco.

Dessa forma, é imprescindível fazer uma cura, que consiste em impedir que a água utilizada na mistura saia do produto após sua fabricação. Um método muito eficaz consiste em cobrir os tijolos com uma lona plástica. Assim, impede-se a evaporação da água. Também se podem molhar periodicamente os tijolos novos. Em contrapartida em lugares muito húmido ou chuvoso, pode-se armazenar os blocos em lugares fechados e mais quentes, evitando sua exposição com a água.

### 2.2.4. Geometria do BTC

Os blocos de terra compactada são classificados devido a altura, largura e espessura ( $b \times h \times l$ ), assim como ocorre em outros tipos de blocos de alvenaria. O bloco



atualmente mais comum apresenta dimensões  $29,5 \times 14 \times 9$  cm conferindo-lhe assim uma maior facilidade e flexibilidade na sua aplicação em obra (Rigassi, 1985).

Os BTC's podem classificar-se em 4 famílias diferentes, segundo Rigassi (1985):

- Os Blocos Sólidos (Solid Blocks) que se apresentam sob uma forma prismática e podem ainda ser subdivididos em blocos Standard,  $\frac{3}{4}$  Bloco e  $\frac{1}{2}$  de Bloco;
- Os Blocos Ocos (Hallow Blocks) que se distinguem pela presença de um maior volume de vazios (5% a 30%) e um avanço tecnológico na sua produção;
- Os blocos Perfurados (Perforated Blocks) apresentam ainda características mecânicas mais interessantes que os enunciados acima e são os mais adequados para áreas com forte atividade sísmica;
- Os Blocos Interligados (Interlocking blocks) que normalmente são ligados sem recurso a argamassa e utilizados maioritariamente em estruturas sem grandes cargas, a ligação deve ser feita com o auxílio de uma argamassa.

A geometria adotada usualmente para os blocos fabricados (Figura 8) consiste em uma unidade com dupla perfuração vertical conforme se pode verificar, variando sua largura entre 280 a 295 mm.

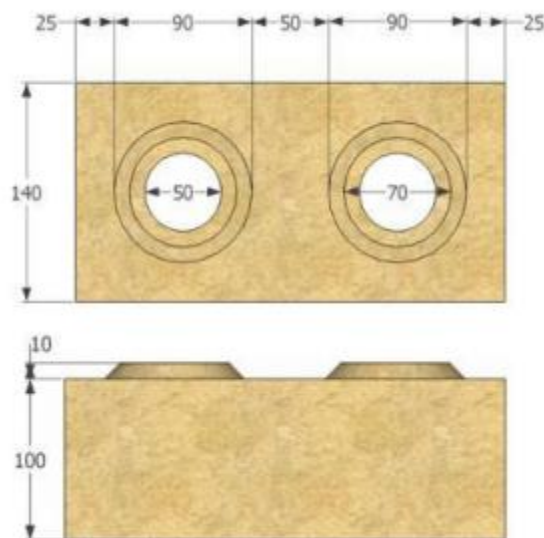


Figura 8 - Geometria dos BTC (mm) (Sturm et al., 2013).

Esta geometria dos BTC permite a construção de alvenaria com junta seca, simplificando o seu processo construtivo e diminuindo o tempo de construção. Neste caso, o travamento dos BTC é realizado através de um sistema de encaixe bloco a bloco.

Estes BTC podem ser utilizados para construção de paredes de pano duplo e de pano simples. As dimensões do BTC estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Dimensões do BTC.

Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )
280	140	100	50	352,7	3527

### 2.2.5. Processo de fabricação

O processo de fabricação deste tipo de blocos está associada à facilidade da sua produção e ao recurso de ferramentas pouco avançadas.

Analisando a Figura 9 pode-se verificar que para produzir um bloco em terra compactada é necessário numa primeira fase obter a matéria prima- terra.

Posteriormente é necessário testar essa terra e verificar as quantidades enunciadas no ponto abaixo. De seguida apresenta-se a obtenção da mistura, isto é, misturar a terra com água e cimento.

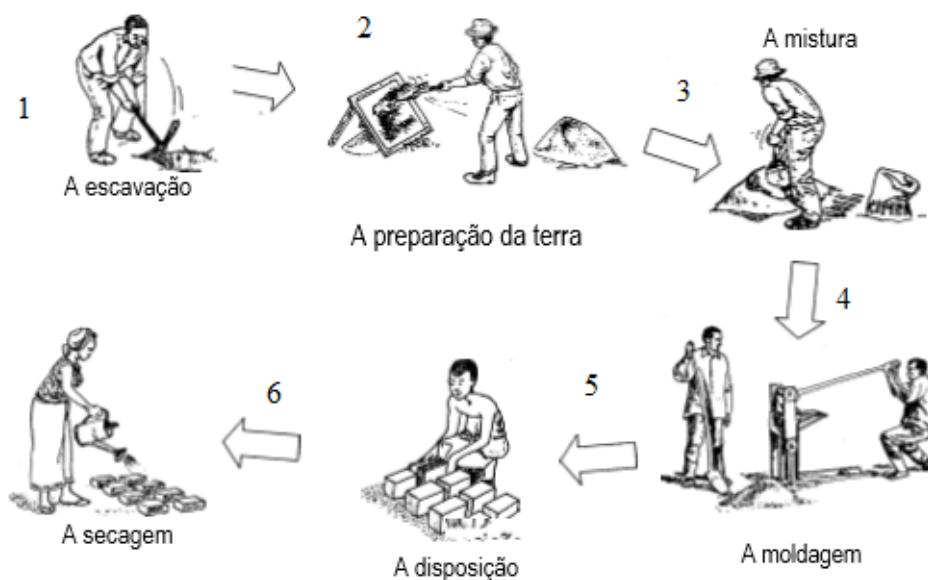


Figura 9 - Processo de fabricação dos blocos (Neves & Cuna, 2007).

Com recurso a diferentes tipos de maquinaria (manual ou automática) podemos proceder à compactação dos blocos. Após esta fase é necessário dispor os blocos cuidadosamente alinhados e esperar que estes sequem à temperatura ambiente.

Então a última e uma das mais importantes fases é permitir uma seca dos blocos de forma correta, entre 7 a 14 dias (Rigassi, 1985), logo é necessário regar constantemente para evitar a abertura de fissuras durante a fase de hidratação do cimento.

### 2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO BTC

#### 2.3.1. Vantagens

A facilidade na produção deste material e a barata formação social para posterior produção, são uma das mais importantes vantagens, junto ao custo energético baixo e baixa poluição ambiental causada pelo BTC.

Atualmente a “Construção Sustentável” está cada vez mais presente no quotidiano geral e na valorização dos materiais, sendo uma grande vantagem do BTC sua biodegradação e a sua reciclagem (Jalali & Torgal, 2009). Na Figura 10 é possível analisar a diferença entre os diferentes materiais e verificar a reduzida emissão de CO<sub>2</sub> na produção de BTC's.

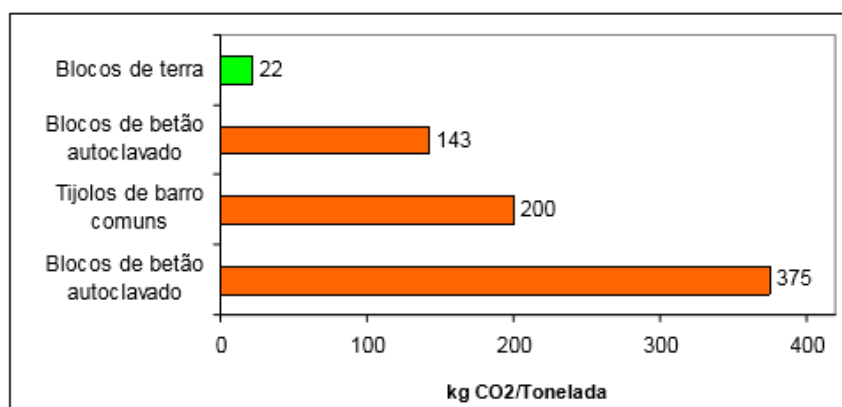


Figura 10 - Comparação da emissão do carbono em diferentes materiais (Jalali & Torgal, 2009).

O fato da produção dos BTC's não envolver queima, e seu material não possuir resíduos e contaminantes classifica-o como material ecológico

A terra, enquanto material de construção, apresenta diversas vantagens, nomeadamente (Adam & Agib, 2001):

- A nível económico – A utilização da terra como material de construção permite reduzir consideravelmente os custos da construção, já que se trata de um recurso disponível no próprio local ou conseguido a baixos custos;
- A nível energético – Como é utilizado localmente com baixos ou reduzidos custos de transporte, e não necessita de ser submetido a qualquer transformação industrial permite uma grande economia em termos de gastos energéticos. Além disso, graças à sua inércia térmica, possibilita reduções significativas em custos de aquecimento e climatização dos edifícios;
- A nível ecológico – Como a terra é utilizada em cru, não provoca poluição decorrente do seu tratamento, ao contrário do que acontece com a produção de outros materiais de construção. É também um material totalmente reutilizável o número de vezes que for necessário;
- A nível político – A dependência dos países de terceiro mundo em relação às técnicas e aos materiais importados tem-se tornado um entrave para o seu desenvolvimento, contudo, no caso da terra como material de construção este problema não existe, já que este é um material global existente em todo o mundo;
- A nível social – A terra crua permite reduzir os custos da habitação social e permite desenvolver a sociabilização e a autonomia do povo, por ser uma técnica que permite a autoconstrução;
- A nível cultural – A terra permite a adequação da arquitetura às possibilidades de cada cultura e de cada região.

Em relação específica dos BTC's, inúmeras vantagens são associadas a este tipo de material. Somente o fato dos BTC's serem constituídos maioritariamente por terra é por si só uma vantagem suficiente para levar ao seu estudo.

Além da vantagem já inumerada pode também ser analisada através dos parâmetros de fabricação e economia, pois os custos de exploração, transporte, importação de matérias e mão-de-obra é consideravelmente reduzido, devido à disponibilidade local dos materiais e técnicas simples de fabrico, não sendo necessário mão de obra qualificada.

Orientando o texto para o comportamento físico do material, podemos referir o seu bom comportamento a nível térmico, como observado na Figura 11. O fato de este ser dotado da capacidade de libertar e armazenar lentamente o calor do sol leva a uma constante temperatura no interior do edifício, ideal para climas com grandes amplitudes

térmicas do dia para a noite. Ainda incluindo neste tema, podemos referir o facto de este regular a humidade interior.

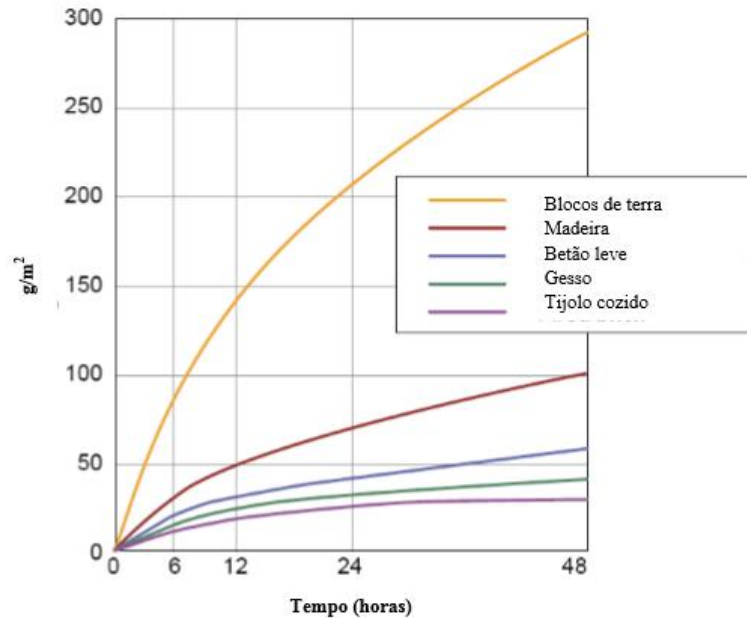


Figura 11 - Percentagem de absorção de água dos diferentes materiais (Jalali & Torgal, 2009).

A porosidade do material leva a que as trocas de vapor de água com o ar conduzem a um nível de humidade constante (40% e 60%), diminuindo assim os riscos associados a saúde humana (Jalali & Torgal, 2009). Devido a esta característica, o material evita assim a formação de fungos, que normalmente surgem em ambientes com níveis de humidade superiores. Quando comparado com os materiais utilizados de forma mais comum na construção, apresenta um índice de absorção de água 3 vezes superior, ver na Figura 11.

### 2.3.2. Desvantagens

Os blocos de terra compactada assim como outros tipos de alvenaria e técnica de construção apresenta as suas desvantagens.

A ignorância associada à produção e aplicação deste tipo de técnica (Earth Based Technologies), assim como a falta de estudos, acaba por ser uma desvantagem para os BTC, pois afeta a confiabilidade e o aumento de produção do método construtivo. Assim como a não utilização do BTC quando nos referimos a grandes, importantes e imponentes

edifícios, sendo o BTC restrito e mais adequado para edifícios de habitação e de pequenas dimensões.

Atualmente o material de construção mais utilizado é o betão, logo a tecnologia associada à sua produção e aplicação evolui cada dia, já os BTC's apresentam algumas limitações nas tecnologias de produção aplicada, pois está ainda é feita com auxílio a máquinas manuais, obtendo uma produção menor.

Uma desvantagem importante segundo Earth Based Technologies, incluía discriminação social deste tipo de técnica, devido ser associada a construção em terra a pobreza, pois muitos países subdesenvolvidos ainda mantêm a construção em terra.

A presença de água no solo é um dos maiores inconvenientes neste tipo de construção, esta induz esforços adicionais à estrutura tais como forças mecânicas devido ao efeito de capilaridade. Este efeito pode ser agravado devido às características do solo em causa, quanto mais finas forem as partículas do solo mais acentuado este efeito será (Rigassi, 1985). Para minimizar ou mesmo evitar problemas deste tipo é então necessário implementar algumas medidas, garantindo então a não existência de água permanente na superfície da habitação. A penetração da água na habitação pode ser feita através das possíveis danificações (fissuras, buracos, etc.) que esta possua. O edifício deve então ser dotado de uma cobertura eficiente e as paredes que o constituem protegidas por um revestimento uniforme.

A retração é um dos problemas em constante estudo quando nos referimos ao material de construção, betão, no entanto neste caso também aqui assumem uma influência negativa. A existência de fissuras devido a este fenómeno levam a uma considerável diminuição das características mecânicas do material tal como uma excessiva solicitação do material em tração ou flexão (Ramos et al., 2001).

#### 2.4. NORMAS DISPONÍVEIS PARA O USO DOS BTC

Especificamente em Portugal não existe uma norma de regulamentação para construção em terra. Um dos fatores para essa inexistência, é a falta de aceitação para esse tipo de construção. Em contrapartida, as construções em terra tem vindo a ser estudadas com excelentes resultados. Diversos são os países que já possuem regulamentação sobre construção em terra, podendo recorrer-se a informações e normas internacionais.

Apesar da falta de regulamentação da construção em terra em Portugal provoca incertezas quanto à segurança estrutural deste tipo de construções, uma vez que os projetos efetuados com este tipo de técnicas, e remetidos para as Câmaras Municipais para aprovação, não são sujeitos a qualquer tipo de revisão. Os estudos e normas existente em outros países, acaba oferecendo informações necessárias.

Para corrigir esta falha legislativa existente em Portugal, é importante o surgimento de um regulamento nacional de construção em terra, de forma a dissipar todas as dúvidas e ultrapassar todos os problemas que este tipo de construção proporciona, uma vez que existem estudos relacionados ao desempenho do BTC e outros métodos construtivos em terra. Levando em consideração as condicionantes atrás apresentadas torna-se fundamental o desenvolvimento de novos estudos experimentais que acrescentem informações sobre a resistência e o comportamento dos materiais.

Para se utilizar a construção em terra em Portugal, atualmente, os projetistas portugueses não optam por utilizar as alvenarias de terra apenas com função de preenchimento, recorrendo a uma estrutura corrente de betão armado de forma a cumprir os requisitos de segurança às ações sísmicas devido à ausência de regulamentação ou norma.

No entanto são já vários países que possuem regulamentação e normas no âmbito da construção em terra. Schroeder et al. (2012) identifica pelo menos 33 documentos, entre normas e documentos normativos, relativas a 19 países e regiões. Cid et al. (2011) também apresenta documentos normativos referentes à construção em terra, entre os principais países com regulamentação, estão incluídos, Brasil, Alemanha, Austrália, Espanha, Estados Unidos da América, entre outros.

Brasil - Existe uma normalização para a construção em terra, nomeadamente a norma NBR 8491 (ABR, 1984) – “Tijolo de solo-cimento”, que define parâmetros para a

produção de tijolos maciços de solo-cimento destinados à execução de alvenarias, e a NBR 8492 (ABR, 1984) – “Tijolo maciço de solo-cimento – determinação da resistência à compressão e da absorção d’água”. Onde é definida uma metodologia de ensaio dos blocos de terra comprimida (BTC) à compressão e à absorção de água.

Alemanha – Em 1944 surgiram as primeiras regras técnicas sobre a construção em terra (Earth Building Code, 1994), saindo de uso em 1971, dando início ao documento normativo para a construção em terra “Lehmbau Regeln”, que constitui ainda hoje um importante regulamento que serve de base a vários outros países. Em 2011 foram criadas draft de três normas em utilização na Alemanha. DIN (DIN 18945 – Blocos de terra: termos, definições, requerimentos e procedimentos de ensaio; DIN 18946 – Argamassas de assentamento de terra: termos, definições, requerimentos e procedimentos de ensaio; DIN 18947 – Rebocos de terra: termos, definições, requerimentos e procedimentos de ensaio) (Schroeder et al. 2012), que são definitivas desde 2013.

Austrália - Em 1952 foi publicado o “Bulletin 5” pela Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO). Este documento apresentou, pela primeira vez, um teste de erosão acelerada utilizando água pulverizada. Este regulamento era utilizado, até há relativamente pouco tempo, para projetos de construção e aplicava-se às técnicas de BTC, adobes e taipa. Com a atualização das técnicas construtivas em 2002, foi publicado o livro “Australian earth building handbook” (2002).

Espanha - Mais recentemente foi publicada a norma Espanhola UNE 41410 (2008), pela AENOR (Asociación Española de CONSTRUCCIÓN COM TERRA 7 Normalización y certificación), com o título “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”. Esta norma foi definida apenas para BTC e é essencial para o seu estudo e certificação.

Estados Unidos da América – Separado por estados, apenas o estado do Novo México tem regulamentação estadual, desde 1991, para construção com taipa, adobe e BTC, designada “New Mexico Earthen Building Materials Code” (2003).

Com o intuito de regulamentar a construção em terra. Existe a RILEM, trata-se de uma associação criada em 1947 por diretores de vários laboratórios mundiais que não está associado a nenhum país. Na RILEM é apresentado um procedimento técnico relativo à forma de ensaiar BTC à compressão, denominando-se TC 164-EBM:1997 - “Mécânica de la construction en terre – Mode opératoire pour la réalisation d’essais de résistance sur blocs de terre comprime”. Cid et al. (2011).



## 2.5. NORMAS E REGULAMENTOS ENVOLVIDOS NO ESTUDO DA REAÇÃO AO FOGO

A Regulamentação Nacional de Segurança contra Incêndios em Edifícios (SCEI) e a NP EN 1995-1-2 (CEN, 2004) são responsáveis por realizar os estudos das estruturas expostas ao fogo em Portugal. A finalidade desta norma e toda a legislação referente a estruturas expostas ao fogo é de salvaguarda de bens e pessoas, limitando a propagação de riscos na ocorrência de um incêndio.

Com estes regulamentos, são avaliadas e quantificadas a capacidade resistente de ações mecânicas e térmicas de estruturas, em condição de incêndio.

Os ensaios em questão são elaborados e baseados em normas europeias que permitem a caracterização dos elementos expostos ao fogo. Neste âmbito normativo, fazem parte integrante a EN 13501-2 (CEN, 2013), inerente à classificação segundo os ensaios de reação ao fogo, excluindo instalações de ventilação, a EN 1364 1 (CEN, 2000) referente aos ensaios de resistência ao fogo de paredes não estruturais e a EN 1363-1 (CEN, 1999), relativa aos requisitos gerais para ensaio à resistência ao fogo.

Antes da análise do conteúdo envolvido com bases nas normas citadas anteriormente, serão apresentados alguns parâmetros aplicados na caracterização da resistência ao fogo.

Na Tabela 4 estão apresentadas resumidamente as características da resistência ao fogo dos elementos.

Tabela 4 - Denominação das características da resistência ao fogo.

<b>Sigla</b>	<b>Significado</b>
R	Capacidade de suporte de carga
E	Estanquidade a chamas e gases quentes
I	Isolamento térmico
W	Radiação
M	Ação mecânica
C	Fecho automático
S	Passagem de fumo
P ou PH	Continuidade de fornecimento de energia e/ou de sinal
G	Resistência ao fogo de fuligem
K	Capacidade de proteção contra incêndios

Fonte: Diário da República Portuguesa. Decreto-Lei n.º 220/2008.

2.5.1. Parâmetros a avaliar na resistência ao fogo

A resistência de um elemento exposto ao fogo é analisada e avaliada pelo tempo que decorre um processo térmico normalizado a que este é submetido (curva de incêndio padrão ISO 834), até ao instante em que ele deixa de satisfazer as funções para o qual foi projetado, ou seja, perda de resistência, entre outros. Este processo é parte integrante dos regulamentos de resistência ao fogo de elementos estruturais ou de compartimentação. (Decreto-Lei n.º 220/2008). As estruturas sob ação do fogo podem ser classificadas da seguinte forma:

- Para-chamas (**E**) – As estruturas devem ser concebidas e executadas para que não permitam nenhuma falha de estanqueidade, a fim de prevenir a passagem de chamas e de gases no elemento, assim como o aparecimento de chamas na face não exposta.

- Estável ao fogo (**R**) – As estruturas devem ser concebidas e executadas para que mantenham as suas funções de capacidade de carga durante a exposição ao fogo.

- Isolamento térmico (**I**) – As estruturas devem ser concebidas e executadas para que não haja perda de isolamento, a fim de limitar a subida de temperatura na face exposta, dentro dos limites especificados.

- Corta-fogo (**EI**) – As estruturas denominadas de corta-fogo resultam da combinação das classificações de para-chamas e isolamento térmico.

- Elementos a que se exige simultaneamente funções de suporte e de compartimentação (**REI**) – Para um elemento a que se impõem em simultâneo, funções de suporte e de compartimentação, admite-se que estas funções deixam de ser cumpridas, quando no decurso do processo térmico deixam de reunir as exigências de estabilidade, de estanqueidade e de isolamento térmico.

São contabilizadas 10 classes de resistência que classificam os elementos expostos ao fogo, correspondentes aos escalões de tempo a seguir indicados, em minutos, pelo limite inferior de cada escalão (Decreto-Lei n.º 220/2008):

**15 20 30 45 60 90 120 180 240 360**

A representação da classe de resistência ao fogo de um elemento de construção é estabelecida pela indicação do símbolo que designa a qualificação do elemento, seguida da indicação do escalão de tempo em que é válida a qualificação atribuída.

A Tabela 5 apresenta a resistência ao fogo de produtos de construção com a relação das especificações do LNEC e as constantes do Sistema Europeu.

Tabela 5 - Resistência ao fogo de produtos de construção.

<b>Função do elemento</b>	<b>Classificação de acordo com o Sistema Europeu</b>
Suporte de cargas	R
Suporte de cargas e estanquidade a chamas e gases quentes	RE
Suporte de cargas e estanquidade a chamas e gases quentes e isolamento térmico	REI
Estanquidade a chamas e gases quentes e isolamento térmico	E
Estanquidade a chamas e gases quentes e isolamento térmico	EI

Fonte: Diário da República Portuguesa. Decreto-Lei n.º 220/2008.

#### 2.5.2. Portaria n.º 1532/2008

Ao abrigo da Portaria n.º 1532/2008 são tidos em conta elementos estruturais de edifícios. Estes devem conter uma resistência ao fogo que garanta as funções de suporte de cargas, de isolamento térmico e de estanquidade durante a fase de combate ao incêndio, assim sendo, devem possuir a resistência ao fogo padrão mínima indicada na Tabela 6.

No que respeita a elementos de compartimentação, devem funcionar como separadores de locais de risco e garantir as classes de resistência ao fogo padrão indicadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios.

<b>Utilizações – tipo</b>	<b>Categorias de risco</b>				<b>Função do elemento estrutural</b>
I, III, IV, V, VII, VIII, IX e X	R 30 REI 30	R 60 REI 60	R 90 REI 90	R 120 REI 120	Apenas suporte Suporte e compartimentação
II, XI e XII	R 60 REI 60	R 90 REI 90	R 120 REI 120	R 180 REI 180	Apenas suporte Suporte e compartimentação

Fonte: Diário da República Portuguesa, Decreto-Lei n.º 220/2008.

Os BTC's terão que garantir a resistência ao fogo padrão mínima presente na Tabela 7, conforme a função para a qual elas forem projetadas.

Tabela 7 - Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos de envolvente.

Elementos de construção	Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos de envolvente de diferentes locais de risco				
	B	C	D	E	F
Paredes não resistentes	EI 30	EI 60	EI 60	EI 30	EI 90
Pavimentos e paredes resistentes	REI 30	REI 60	REI 60	REI 60	REI 90
Portas	E 15 C	E 30 C	E 30 C	E 15 C	E 45 C

Fonte: Diário da República Portuguesa, Decreto-Lei n.º 220/2008.

### 2.5.3. EN 1363-1 – Ensaaios de Resistência ao Fogo: Requisitos Gerais

A EN 1363-1 (CEN, 1993) estabelece os princípios gerais, que determinam a resistência ao fogo de elementos de construção quando submetidos a um aquecimento padronizado. Este documento incide na metodologia comum aos vários ensaios específicos, relativos aos diversos elementos a ensaiar.

Os resultados de ensaio podem ser diretamente aplicados aos elementos de construção com características semelhantes aos ensaiados. Na aplicação direta, consideram-se as variações obtidas no ensaio, de modo a que este continue cumprindo com os requisitos de resistência ao fogo. As regras, para cada tipo de ensaio, são parte integrante da presente norma. As variações que se encontram fora do campo de aplicação direta da norma determinar-se-ão por extrapolação de resultados. Da aplicação direta ou extrapolações de resultados do teste, advém a classificação do elemento, (CEN, 1993).

#### 2.5.3.1. Equipamentos de ensaio

Em conformidade com a Norma EN 1363-1 (CEN, 1993), os equipamentos necessários à realização dos ensaios de resistência ao fogo, são:

- Um forno adequado à avaliação da resistência ao fogo dos elementos de construção à temperatura e pressão exigidos pela norma;
- Um equipamento capaz de regular a temperatura no interior do forno, de acordo com as especificações normativas;
- Equipamento para a medição da temperatura no interior do forno e na face exposta da amostra;

- Equipamento para a medição da deformação da amostra a testar;
- Aparelho para a medição do tempo decorrido.

### 2.5.3.2. Forno

O forno de ensaio deve desempenhar as condições normalizadas para a exposição ao fogo. Deve ser constituído por um revestimento com uma densidade inferior a  $1000 \text{ Kg/m}^3$ , uma espessura mínima de 50 mm, e deve constituir menos de 70% da superfície interna exposta ao fogo.

### 2.5.3.3. Termopares

Termopares são sensores utilizados com a função de medir a mudança de temperatura, em nosso caso dentro do forno e da superfície do provete. Eles cobrem um intervalo de temperaturas bastante extenso, que vai de  $-200$  a  $2300 \text{ }^\circ\text{C}$  aproximadamente, com boa precisão. Como representado na Figura 12, são compostos por dois filamentos de metais de natureza diferente, soldados numa extremidade, denominada por junta de medição, e na outra, onde fecha o circuito, por junta de referência.

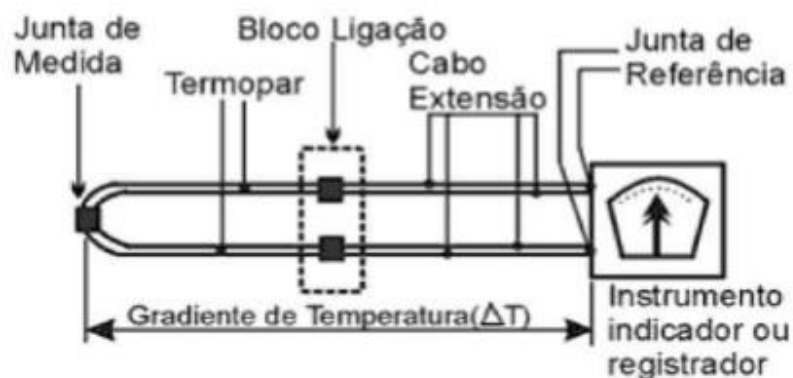
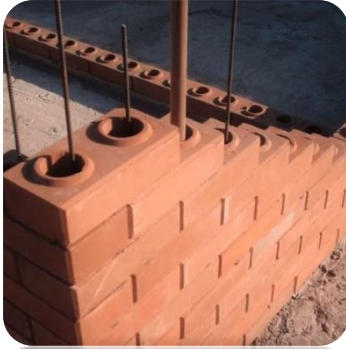


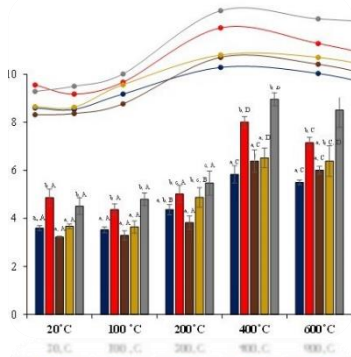
Figura 12 - Representação esquemática de um termopar (Jesus, 2008).





# CAPÍTULO 3.

## Ensaio experimentais







### 3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nesse capítulo é descrito o procedimento dos ensaios experimentais realizados no âmbito desta dissertação, nomeadamente ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário. Este trabalho experimental teve como objetivo a avaliação da resistência à compressão sob o efeito do aumento de temperatura e relacioná-la entre ambos.

A caracterização para identificação dos BTC produzidos, os equipamentos e softwares utilizados para a aquisição de dados para os ensaios de resistência a compressão e os métodos de ensaios utilizados a diferentes temperaturas são apresentados. Sendo realizado para cada patamar de temperatura três ensaios por composição. Dados os resultados, também será apresentado a metodologia do sistema estatístico para o de tratamento dos dados.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança do IPB. A construção dos cilindros de BTC até sua cura foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

### 3.2. MATERIAIS UTILIZADOS NO BTC

Os principais componentes para a constituição dos BTC são a terra, a água e eventualmente um estabilizador que pode ser químico, físico ou biológico. No caso dos BTC em estudo neste trabalho, utilizou-se solo residual granítico da região do Minho, localizada no Norte de Portugal, água e cal/cimento em diferentes percentagens para a estabilização do solo.

#### 3.2.1. Solo residual granítico

Apesar da maiorias dos locais onde possuem construções em terra serem utilizados solos ricos em argila, na região do Minho predominam solos que resultam da decomposição de rochas graníticas, conhecido como solo residuais graníticos.

São apresentados em seguida, na Tabela 8 estão apresentados os resultados dos ensaios levados a cabo por Faria (2012) relativos às características do solo utilizado nos ensaios.

Tabela 8 - Resumo dos resultados obtidos com a análise do solo residual granítico do Minho.

<b>Ensaio</b>	<b>Propriedade em avaliação</b>	<b>Parâmetros em avaliação</b>	<b>Resultados obtidos</b>
Análise granulométrica	Textura	Gravilha	22%
		Areia	60%
		Silte	14%
		Argila	4%
Limite de consistência	Plasticidade	Limite de liquidez	28
		Limite de plasticidade	-
		Limite de retração	26
		Índice de plasticidade	-
Densidade das partículas	Textura	Índice de retração	2
		Peso Específico dos grãos (g/cm <sup>2</sup> )	2.62
Ensaio de Proctor	Compactação	Teor em água ótimo (%)	12.1
		Baridade seca máxima (gm/cm <sup>2</sup> )	1.71

Fonte: Adaptado de Faria (2012).

É ainda possível referir que o solo residual granítico, apresenta geralmente na sua composição quantidades abundantes de minerais de quartzo, sendo eles fatores de influência quando submetidos a altas temperaturas.

Agregados silicosos, contendo grande quantidade de quartzo (SiO<sub>2</sub>) como granito, arenito e alguns xistos, apresentam uma expansão súbita de volume quando aquecidos a aproximadamente 500 °C (LANDI (1986), LIN et al. (1996)).

Este solo segundo o ensaio da análise granulométrica, realizado conforme a especificação LNEC EN 933-1 e EN 933-2, se caracteriza principalmente por obter uma maior percentagem de areia, e baixa percentagem de argila, dando um aspecto de cor cinzenta aos blocos, além de possuir uma distribuição boa das partículas, tendo em sua composição também cascalho e silte.

Segundo as normas australiana e espanhola para a construção em terra, recomenda uma percentagem de argila mínimo entre 5 e 10%. Sendo assim a percentagem da composição do solo utilizada muito baixa. Isto significa que podem haver implicações negativas para as resistências exigidas aos BTC, devido a baixa percentagem de argila.

Segundo o sistema unificado de classificação dos solos, o solo em análise é constituído sobretudo por areia e classificado como areia siltosa (SM).

Assim, verificou-se nesta análise, que o solo analisado não é adequado para o fabrico de BTC não estabilizados, já que as suas propriedades geotécnicas não são suficientes para a obtenção de BTC com resistência e durabilidade adequada. Deste modo, a utilização deste solo para a construção em terra requer estabilização química.

### 3.2.2. Cal

A estabilização de um solo tem como função a alteração de algumas propriedades desse solo. Sendo assim é possível obter um material mais resistente a intempéries, fungos e conseqüentemente mais durável, e que apresentam maior resistência mecânica. Para alcançar o melhor desempenho nesses fatores, é necessário conhecer muito bem as propriedades do solo, definir as melhorias que se pretendem alcançar, avaliar os custos da estabilização e conhecer as técnicas de construção envolvidas no projeto, para obter os melhores resultados possíveis (Houben & Guillaud, 2008).

O uso dos estabilizadores também permitem reduzir o tempo de cura do material e obter um aspeto mais adaptado às atuais exigências sociais (Jalali & Eires, 2008) .

Na utilização da Cal como estabilizador ocorrem várias reações químicas ao misturar cal num solo húmido, esse procedimento provoca a aglutinação das suas partículas e a modificação das suas características. As reações mais importantes durante o processo de estabilização com cal são: a permuta iónica e floculação, a ação da cimentação (ou pozolâmica) e a ação da carbonatação (Coelho et al., 2009).

A utilização da cal é particularmente interessante para a estabilização de solos finos com elevado índice de plasticidade, como é o caso dos solos argilosos. Segundo Torgal e Jalali (2010), o material inicia o processo de cimentação, fortifica e torna-se mais granular, podendo assim considerar-se um material agregado com partículas de maior granulometria e maior ângulo de atrito. A estabilidade assim alcançada melhora a resposta do solo em relação aos movimentos de assentamento ou deslizamento, possibilitando a sua aplicação em elementos estruturais, e ainda a sua resistência a ações de meteorização.

A cal assume-se como um estabilizante mais barato e mais sustentável, pelo que é espectável que venha no futuro a ganhar uma utilização superior. No entanto, não é

adequada para todos os tipos de solos, tratando-se de um tipo de estabilização que apresenta beneficiação apenas no caso de solos argilosos (Cristelo & Jalali, 2007).

### 3.2.3. Cimento

Com a utilização de cimento como estabilizador é possível observar uma melhora significativa na resistência mecânica e na estabilidade em relação à variação do teor em água da maior parte dos solos, nomeadamente solos granulares, solos siltosos e solos com argilas pouco plásticas, não sendo, no entanto, adequada à estabilização de solos com apreciável matéria orgânica (Torgal et al., 2009).

Em comparação a cal, a adição de cimento consegue maior resistência a curto prazo, já que as reações de hidratação são muito mais rápidas que as pozolânicas (Silva, 2013).

O cimento é usualmente utilizado no fabrico de BTC, principalmente pela disponibilidade fácil do material. Porém, para a realização da produção de cimento, sabemos que é consumido uma grande quantidade energética além de ser um forte promotor de poluição, não se apresentando como um material ecológico e sustentável. Apesar da baixa quantidade utilizada, tem sido realizados estudos de forma a introduzir novos ligantes, como é o caso da aplicação de cinzas volantes que são menos poluentes.

### 3.2.4. Quantidade de material utilizado na composição do BTC

Na composição dos BTC utilizados em ensaio foram usados os dois tipos de estabilizadores juntos, a cal e o cimento em diferentes percentagem.

As diferentes percentagens de materiais para o fabrico dos cilindros utilizados nos ensaios de resistência de termomecânica à compressão encontram-se identificadas na Tabela 9. A quantidade de água variável para cada tipo de composição.

Tabela 9 - Composição da fração sólida, em percentagem, de cada mistura estudada.

<b>Amostra</b>	<b>Solo</b>	<b>Cal</b>	<b>Cimento</b>
M1	90.0%	5.0%	5.0%
M2	87.5%	5.0%	7.5%
M3	87.5%	7.5%	5.0%
M4	85.0%	7.5%	7.5%
M5	80.0%	10.0%	10.0%

Em relação ao peso de cada material em gramas, podemos analisar a Tabela 10, onde se pode encontrar a quantidade do solo, cal e cimento para cada provete fabricado.

Tabela 10 - Quantidade de material de fabrico para cada provete (g).

<b>Amostra</b>	<b>Solo</b>	<b>Cal</b>	<b>Cimento</b>
M1	872.63	48.48	48.48
M2	848.39	48.48	72.72
M3	848.39	72.72	48.48
M4	824.15	72.72	72.72
M5	775.67	96.96	96.96

As características físicas médias dos provetes como altura, diâmetro, peso e volume estão apresentadas na Tabela 11, todos os provetes foram fabricados para possuírem as mesmas dimensões, porém devido à dilatação de alguns materiais, eles foram pesados e medidos antes do ensaio.

Tabela 11 - Característica físicas médias dos provetes de BTC.

<b>BTC</b>	
Altura(mm)	140
Diâmetro (mm)	70
Peso Aproximado BTCs (g)	4090
Volume (cm <sup>3</sup> )	2272.74
Massa Volúmica (g/cm <sup>3</sup> )	1.80
Volume Cilindrico (cm <sup>3</sup> )	538.78
Peso Sólidos (g)	969.59

### 3.3. PROCESSO DE FABRICO DOS CILINDROS DE BTC

Depois de definidas as composições e quantidades dos materiais, foi realizado o processo de fabrico dos BTC.

Este processo é dividido em 4 partes distintas, sendo elas:

- Preparação e pesagem dos materiais necessários;
- Mistura dos materiais numa misturadora;
- Prensagem e formação dos blocos, no nosso caso cilindros;
- Cura dos BTC.

Para a realização dos ensaios foram produzidos cerca de 100 provetes de BTC com as dimensões de 70x140 mm.

Para a preparação do solo foi necessário primeiro realizar o processo de destorroamento manualmente, ou seja deixar o solo em pedaços menores. Após este processo, afim de obter uma secagem rápida, dependendo das condições climáticas, o solo foi espalhado num local ao ar livre, por vezes num local suficientemente arejado, de forma a deixar o material mais homogéneo possível. Quando o solo apresentou um aspeto seco e mais claro foi recolhido e armazenado no laboratório.

A seguir à preparação do solo, foi realizada a pesagem dos 3 constituintes da mistura para os BTC, do solo, cal e do cimento.

Após serem pesados, os materiais estavam prontos para serem misturados. A mistura dos materiais foi realizada com uma misturadora vertical de 3 pás giratórias. Vale ressaltar, que este processo tem de ser feito com equipamento de segurança.

A primeira etapa realiza foram a mistura dos materiais sólidos, ou seja da terra, cal e cimento. Com a ajuda da misturadora foram colocados todos os materiais cerca de 5 minutos, até se alcançar uma mistura homogénea. Durante esta etapa foi necessário observar se existiam algumas pedras de maior dimensão para retirar e realizado a quantidade de água necessária para alcançar a homogeneidade.

Depois de obter uma mistura homogénea, esta foi retirada da misturadora, por uma abertura na parte de baixo, após retirada, foi separada a quantidade necessária para cada BTC. Esse processo foi realizada para cada diferente composição.

A mistura pesada foi coladada dentro do molde da prensa, que para maior facilidade de retirada foi oleada com um óleo descofrante. A mistura teve que ser espalhada e nivelada manualmente antes de se fechar o molde de modo a comprimir a mistura e assim formar os provetes. Por últimos os mesmo foram retirados da prensa, cuidadosamente, e colocado sobre uma base plana, para facilitar o transporte enquanto estão frescos.

Para sua cura foram deixados na base plana durante cerca de uma semana, afim que adquirissem alguma resistência para então serem empilhados, continuando assim o processo de cura. Vale ressaltar, que não devem empilhar os provetes em muitas quantidades, assim como é necessário deixar espaço entre eles para a circulação de ar necessária.

### 3.4. IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a realização deste estudo foram elaborados 90 cilindros de BTC, com a mesma geometria e com cinco composições diferentes, conforme mostra a Tabela 12. As amostras não apresentavam fissuras nem deformações e as arestas também não apresentavam irregularidades. Para que a variação mínima de comprimento, altura e peso das amostras não influenciasse o ensaio, foram medidos e pesados cada amostra antes do ensaio de compressão.

As dimensões dos provetes foram de 140 mm de altura e 70 mm de diâmetro. Dividas em 5 percentagens diferentes de estabilização. Para cada composição foi utilizado 18 amostras, sendo ensaiadas 3 amostras de cada composição por temperatura.

Tabela 12 - Quantidade em porcentagem de cada Estabilizador por amostra.

<b>Amostra</b>	<b>Estabilizador I Cal</b>	<b>Estabilizador II Cimento</b>
M1	5.0%	5.0%
M2	5.0%	7.5%
M3	7.5%	5.0%
M4	7.5%	7.5%
M5	10.0%	10.0%

Assim sendo, no final foram ensaiados 90 cilindros. Houve alguns ensaios que não correram como o esperado, devido a erros de manuseamento do software, bem como erros de mal funcionamento dos termopares. Sendo assim, esses ensaios foram repetidos.

Os provetes foram ensaiados em 6 diferentes temperaturas, ver Tabela 13. A temperatura P0 é identificado como a temperatura ambiente.

Tabela 13 - Patamar de temperatura dos ensaios.

<b>Identificação</b>	<b>Temperatura</b>
P0	20°C
P1	100°C
P2	200°C
P3	400°C
P4	600°C
P5	800°C

As diferentes quantidades de estabilizadores não influenciaram no aspeto exterior dos blocos como se pode observar na Figura 13, da esquerda para direita a composição M1, M2, M3, M4 e M5, destacando a importância da identificação de cada provete.



Figura 13 - Amostras M1, M2, M3, M4 e M5.

Os provetes foram identificados de acordo com um código de 3 parâmetros, traduzido nas amostras como uma sequência de letras e números que os distingue e identifica. Cada sequência de identificação dos provetes começa com as letras “M” seguido de um número que variam de 1 a 5, por exemplo “M1” Esse número que segue junto à letra indica a percentagem de estabilizantes utilizados como indica na Tabela 12, por exemplo “M2” significa então que se trata de um cilindro correspondente à 5.0% de cal e 7.50% de cimento. Após a primeira sequência, aparece um segundo número inscrito em cada provete, que corresponde precisamente a repetição do ensaio nas mesmas condições, podendo ele ser 1, 2 ou 3. O Terceiro parâmetro indica a temperatura de ensaio,



como se observar na Tabela 13, sendo representada pela letra “P” seguida de um numero que varia de 0 a 5. Identificado pelo 0 quando for 20°C e pelo 5 quando for 800°C, por exemplo “P5”.

Na Figura 14, pode ver-se um exemplo de identificação utilizada na amostra e nos registro do ficheiro, sendo ela de identificação “M3.2.P0”, trata-se de um provete cilindrico de composição 7.50% cal e 5.0% cimento, do primeiro ensaio, que foi ensaia à temperatura de 800°C.

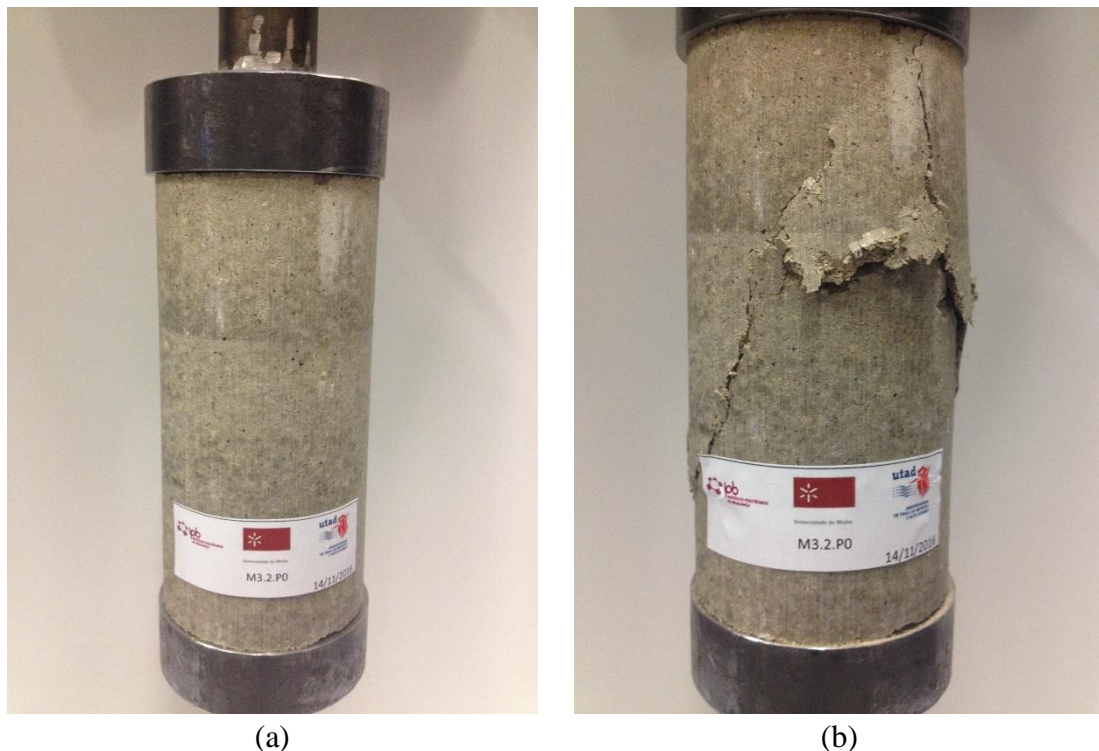


Figura 14 - Amostra (a) “M3.2.P0” antes do ensaio e (b) depois do ensaio de compressão a temperatura ambiente.

Além do sistema de identificação dos ensaios principal, também foram realizados ensaios de compressão residual com o objetivo de identificar o comportamento à compressão dos provetes da composição “M2” após serem arrefecidos. Primeiramente foram submetidos a diferentes temperaturas, entre elas, 100°C, 200°C, 400°C, 500 °C, 600°C e 800°C. Durante o aquecimento foi estabelecido um tempo de 15 minutos para estabilização da temperatura desejada.

Após as amostras serem arrefecidas à temperatura ambiente por 3 dias, foi realizado o ensaio à compressão. A identificação do provetes foram mudadas devido a menor quantia de provetes, sendo reconhecidos por “M2”, ou seja, com composição 7.5% cimento e 5% cal, seguido da temperatura que foram ensaiadas, por exemplo “M2.200”,

dizendo que foi submetido ao patamar de 200°C. Nesse ensaio também foi realizada uma nova temperatura de 500°C.

### 3.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA TEMPERATURA

O Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais é munido de um sistema de aquisição multicanal MGC Plus, com 23 canais de leitura disponíveis, dos quais foram utilizados 2, referentes ao número de termopares aplicados em cada amostra.

O canal 1.2 foi utilizado para monitorizar a temperatura da amostra, e o canal 1.3 para a temperatura interna do forno. Como se pode verificar na Figura 15.

De acordo com a temperatura que cada provete deve alcançar, o aumento da temperatura era acompanhado graficamente até a mesma ficar constante por 10 minutos para então iniciar o ensaio de compressão.

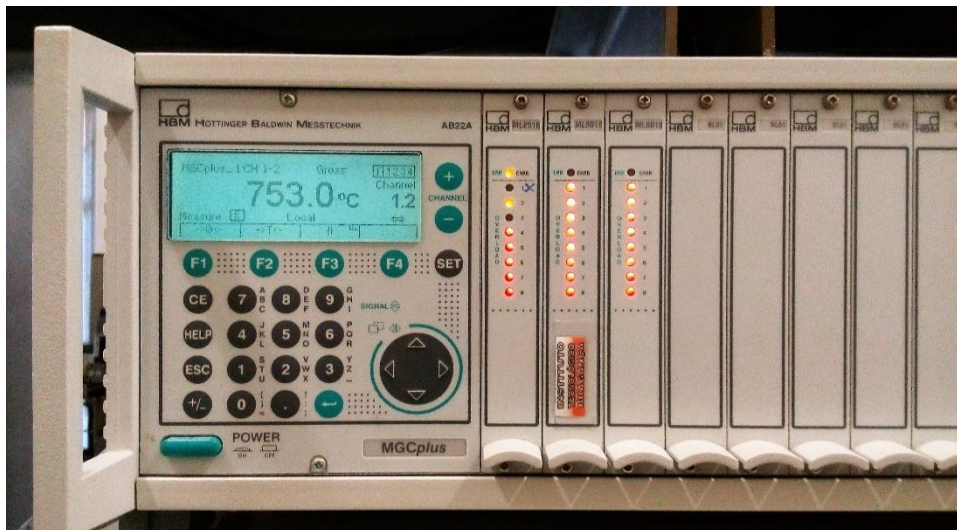


Figura 15 - Multicanal MGC Plus.

O tempo de espera foi importante para garantir que a parte interna da amostra também apresentasse a temperatura pretendida.

O primeiro termopar era fixado na amostra com a ajuda de um fio de aço, enquanto o segundo era simplesmente deixado solto dentro do forno de modo que não tocasse em nenhuma superfície. Na Figura 16 é apresentada a localização dos termopares, sendo eles identificados de cores vermelha e amarela.

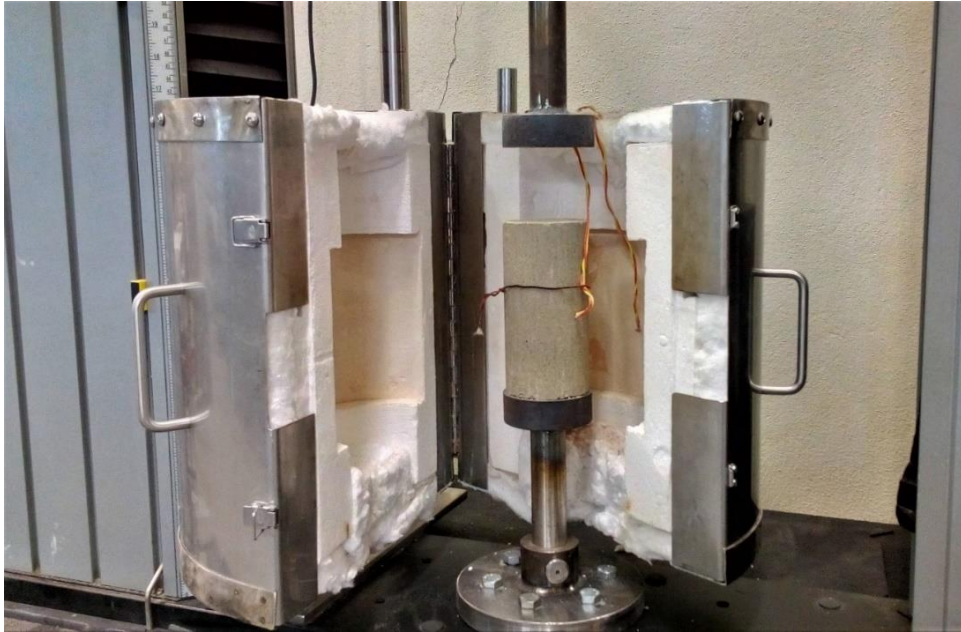


Figura 16 - Localização dos termopares 1.2 (Superfície da amostra) e termopares 1.3 (Vão do forno).

Com o forno fechado e a fixação do valor da temperatura do forno a ser alcançada fixada no PID responsável por controlar o aquecimento do forno, era iniciado a análise da temperatura no software CalmanEasy DAQ project, Figura 17.

Os dados da temperatura do forno e da amostra após serem lidos pelo sistema de aquisição multicanal MGC Plus eram direcionados para o computador, que apresenta os valores em forma de gráfico temperatura x tempo, sendo o vermelho a representação da temperatura dentro do forno e o azul a temperatura do provete.

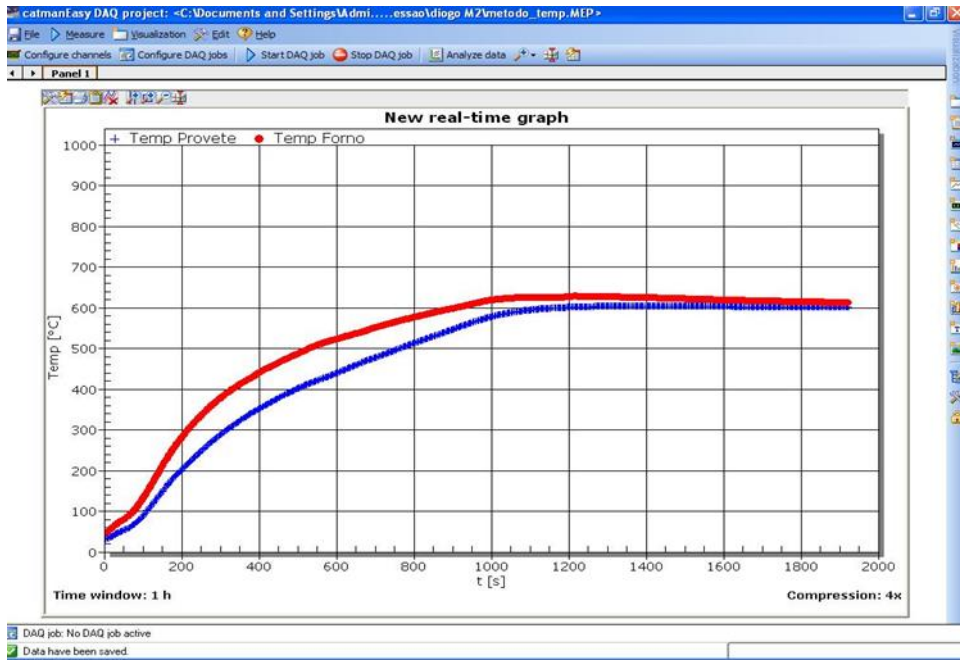
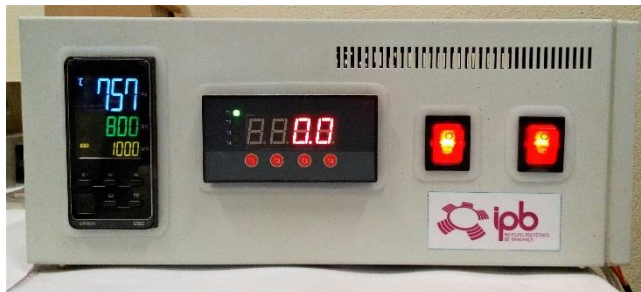


Figura 17 - Interface do Software CalmanEasy.

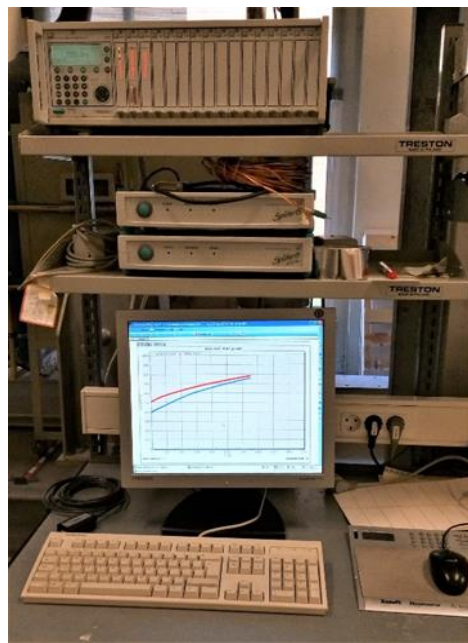
O sistema para aquisição dos dados da temperatura são compostos por: Aparelhos para captação da temperatura: PID, MGC Plus e Sistema MGC plus e computador.



(a)



(b)



(c)

Figura 18 - Aparelhos para captação da temperatura: (a) PID, (b) MGC Plus e (c) Sistema MGC plus e computador.

O sistema de aquisição de dados da temperatura está ligado ao forno que está apoiado na máquina de ensaios universal da Instron® série 4485 como pode-se ver na Figura 19.



Figura 19 - Forno fixado na base do sistemas de ensaios mecânicos da Instron® série 4485.

### 3.6. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO ENSAIO A COMPRESSÃO

As principais características a retirar deste ensaio são os valores da tensão de compressão máxima ( $f_c$ ), as extensões ( $\epsilon$ ) e as curvas de tensão- deformação. Depois de executados os ensaios aos provetes, é possível apresentar as curvas tensão/deformação, bem como os valores obtidos, de forma direta e indireta através dessas mesmas curvas. Os dois sistemas trabalharam em conjunto pois o controle das temperaturas foi de extrema importância ao longo de todo ensaio de compressão.

No início de cada ensaio, foram pesadas as respectivas amostras na balança digital que se encontra no laboratório e medidas conforme a Figura 20.

Os provetes foram todos medidos 3 vezes e pesados, logo após a coleta dos dados, foram realizado o cálculo da média das medidas, para se obter o valor mais próximo da realidade.

Em média os provetes tiveram uma variação para mais de 4 mm na altura desde sua fabricação, isso ocorre devido a dilatação do material durante o processo de cura.



(a)



(b)

Figura 20 - Medição (a) e pesagem (b) dos provetes.

Após este processo os provetes eram direcionados a máquina de compressão, onde era necessário realizar a limpeza da superfície da máquina de ensaio, nesta caso as bases da prensa, para colocar os cilindros de BTC, tendo o cuidado de alinhar o centro do cilindro com a célula de carga.

Com o ajuste da distância entre os pratos de compressão foi possível facilitar a introdução e o alinhamento da amostra entre os pratos, sendo necessário também manter uma distância significativa entre a base superior da prensa com a da amostra devido a dilatação do material de BTC em altas temperaturas.

Nas temperaturas que foram utilizados o forno, os cilindricos eram direcionados para a base da máquina como dito a cima, onde eram também colocados os termopares 1.2 à volta do provete e os termopares 1.3 no vão do forno, e envolvido pelo forno como mostra a Figura 16 uma vez atingido o patamar de temperatura pretendido eram esperados 10 minutos para estabilização da temperatura e só então era dado início ao ensaio de compressão. A temperatura do forno e do provete eram controladas até o final do ensaio.

Na Figura 21 é possível observar o alinhamento do provete na máquina de compressão e o sistema onde são colocados os parâmetros dos ensaios.



Figura 21 - Sistemas de ensaios mecânicos da Instron® série 4485.

Com a velocidade fixada do ensaio de 0.06 mm/s constante até à rotura dos provetes foi possível observar a tensão máxima de rotura assim como o comportamento da amostra após a rotura.

Quando o provete atingia a rotura, significava que o ensaio havia chegado ao fim sendo possível ver a rotura da amostra, Figura 22.

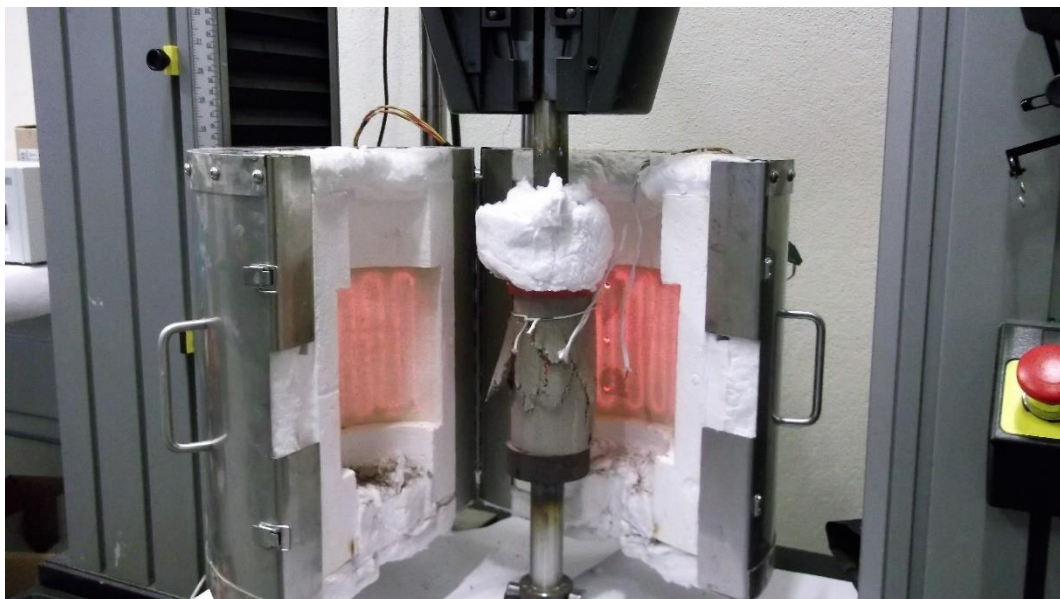


Figura 22 - Sistema mecânico de compressão junto ao forno após o ensaio.

Após o ensaio, os provetes eram colocados a uma base para arrefecerem. Para que os próximos ensaios iniciassem à mesma temperatura, o forno e a base da máquina foram mantidas em temperatura ambiente e arrefecidas com a ajuda de um ventilador, antes do início do ensaio seguinte, assim como aspirados todos os resíduos resultantes da sua rotura.

### 3.7. ENSAIO DE COMPRESSÃO RESIDUAL

Com base no ensaio principal, também foi realizado um ensaio de compressão residual. A principal diferença é a utilização do sistema de aquisição de dados da temperatura e do sistema de aquisição de dados do ensaio à compressão trabalharem em tempos separados.

Os primeiros ensaios descritos tiveram o objetivo de analisar a reação mecânica do provete simultaneamente ao aumento da temperatura, os ensaio de compressão residual tem como objetivo verificar o comportamento mecânico à compressão do provete após ele ser exposto a temperatura e deixado arrefecer até atingir a temperatura ambiente,

Os ensaios foram realizados com os provetes de composição “M2”, onde foram verificados melhor desempenho nos primeiros ensaios.

Primeiramente as amostras passaram pelo processo de aquecimento nas temperaturas apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Patamar da temperatura do ensaio de compressão residual.

<b>Identificação</b>	<b>Temperatura</b>
M2.100	100°C
M2.200	200°C
M2.400	400°C
M2.500	500°C
M2.600	600°C
M2.800	800°C

Após atingirem a uma temperatura constante de 15 minutos, os provetes ficaram em temperatura ambiente por 24 horas e então, foi realizado o ensaio propriamente dito.





Figura 23 - Provetes da composição “M2” do ensaio residual de compressão.

### 3.8. TRATAMENTO DE DADOS

Após a coleta de dados do sistema de ensaio mecânico da Instron® série 4485, todos os dados foram tratados no Excel e realizado o cálculo de tensão e extensão, utilizando as medidas de cada provete em individual. Os dados coletados pelo sistema são de Força (kN) e deslocamento (mm).

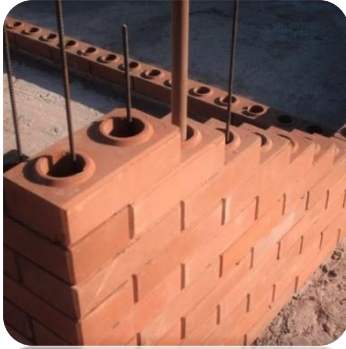
Os gráficos apresentados por Excel estão apresentados no formato de tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm). Ressaltando a importância das medidas de cada provete para a obtenção desses resultados.

Com a análise de variância foi possível avaliar a existência de diferenças estatísticas sobre os efeitos das composições para cada temperatura, assim como, sobre a variância da resistência da amostra devido ao aumento da temperatura.

Se houve diferenças estatísticas entre as mostras sobre uma mesma temperatura ou entre uma amostra em diferentes temperaturas, realizou-se análise estatística utilizando o software SPSS versão 20.0 (IBM Corporation, New York, EUA).

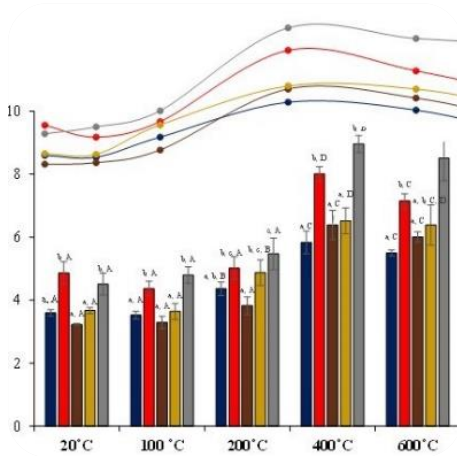
Todas as variáveis dependentes foram analisadas para verificar a sua normalidade e homogeneidade da variância (Testes de Shapiro-Wilk e Levene, respetivamente). Quando observou-se homogeneidade de variâncias ( $P > 0,05$ ) pelo teste de Levene, aplicou-se uma ANOVA e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey,

uma vez que a igualdade de variâncias foi assumida. No caso de variáveis não homogêneas ( $P < 0,05$  pelo teste de Levene), aplicou-se ANOVA de Welch, todas as médias foram comparadas pelo teste Dunnett T3's, uma vez que a igualdade de variâncias não foi assumida.



# CAPÍTULO 4.

## Resultados e discussões





#### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados da resistência à compressão das 5 composições de estabilizantes em relação as temperaturas que foram ensaiadas, onde, para além de comparar os seus comportamentos, se pretende, compreender a influência dos estabilizadores e da temperatura na resistência à compressão dos cilindros de BTC.

Para isso, ao longo do capítulo serão apresentados os gráficos do comportamento das amostras por patamar de temperatura, onde é discutida e analisada a composição mais resistente por temperatura.

Em seguida serão apresentados os gráficos dos patamares de temperatura por amostra, onde é possível visualizar a extensão axial devido ao aumento de temperatura, assim como o ganho ou perda de resistência das amostras devido ao aumento de temperatura, também será possível verificar em qual patamar de temperatura as amostras obtiveram melhor comportamento e desempenho.

Por último serão discutidos e comparados os resultados obtidos no ensaio laboratorial descrito no Capítulo 3. Afim de descobrir qual a melhor composição, também será realizado uma análise de variância estatística onde será possível afirmar qual a melhor composição por patamar de temperatura, assim como em qual patamar de temperatura cada amostra alcançou a melhor resistência.

#### 4.2. APRESENTAÇÃO DOS DADOS

No estudo dos blocos, as principais propriedades mecânicas são a resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, sendo a resistência à compressão do bloco o principal parâmetro de dimensionamento da alvenaria e, por isso, esta propriedade é a principal variável do controle de qualidade dos blocos, estando diretamente relacionado com o desempenho das paredes de uma edificação (Souza et al., 2008).

Nos gráficos apresentados a seguir serão analisadas a resistência a compressão, onde será verificado qual a melhor percentagem de cal e cimento para se obter uma maior resistência no BTC.

Os agregados calcários apresentam expansões similares às dos silicosos somente a partir dos 700 °C, devido às reações de descarbonatação. Possuem a vantagem de apresentarem menor diferença nos coeficientes de dilatação térmica entre a matriz e o agregado, minimizando assim, os efeitos destrutivos da dilatação térmica diferencial (Metha & Monteiro, 1994).






Apesar de ser consideravelmente menor a percentagem de estabilizadores em relação a quantidade de solo, eles possuem uma grande influência no comportamento do bloco.

Em relação ao cimento pesquisas referentes à exposição de elementos de betão a altas temperaturas apresentam resultados variáveis. Sabe-se que os diversos componentes do betão é um dos fatores que deve ser levado em consideração, uma vez que tanto a pasta de cimento como o agregado são constituídos por componentes que se alteram e se decompõem, em maior ou menor grau, com a exposição ao calor.

Também devemos levar em consideração a humidade inicial dos BTC, o tamanho da peça e o fator de dilatação, uma vez que gerem o desenvolvimento das pressões internas dos produtos gasosos de decomposição. Todos os componentes são modificados e alterados conforme o aumento da temperatura.

Para a apresentação dos dados, foi selecionada uma cor para cada composição como apresentado na Tabela 15 abaixo, com o objetivo de facilitar a identificação de cada amostra.

Tabela 15 - Legenda de cores e percentagens de composição por amostra.

<b>Amostra</b>	<b>Cores</b>	<b>Cal</b>	<b>Cimento</b>
M1		5.0%	5.0%
M2		5.0%	7.5%
M3		7.5%	5.0%
M4		7.5%	7.5%
M5		10.0%	10.0%

Os dados iniciais de cada provete estão apresentados no Anexo I, sendo o total de 90 amostras. Para facilitar os resultados e os gráficos, a análise será apresentada com a média entre os 3 ensaios realizados para cada amostra por patamar de temperatura.

Na Tabela 16 é possível observar o valor médio de rotura obtido nos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário. Os valores de todas as amostras estão apresentados no Anexo II.

Tabela 16 - Tensão média de rotura dos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário em MPa.

Amostra	Temperatura em Regime Estacionário					
	20°C	100 °C	200°C	400°C	600°C	800°C
<b>M1</b>	3.599	3.525	4.367	5.833	5.499	4.333
<b>M2</b>	4.864	4.369	5.018	8.011	7.149	5.986
<b>M3</b>	3.232	3.295	3.828	6.390	6.006	4.869
<b>M4</b>	3.67	3.643	4.876	6.516	6.385	5.438
<b>M5</b>	4.511	4.797	5.472	8.956	8.507	8.245

A apresentação e análise dos resultados é condição indispensável à compreensão da influência das variáveis investigadas no comportamento da resistência de compressão do BTC. Nos itens a seguir, cada composição ensaiada será analisada separadamente, primeiramente por temperatura onde é possível compreender e observar qual a composição com melhor comportamento a cada temperatura, e em seguida por amostra, onde se pode observar o comportamento de cada amostra, conforme o aumento da temperatura, sendo identificado qual o BTC que obteve maior resistência, assim como melhor comportamento.

#### 4.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS POR TEMPERATURA

##### 4.3.1. Ensaio de compressão à temperatura de 20°C

Na Figura 24 é apresentada a relação entre tensão e extensão axial no provete para  $T = 20^{\circ}\text{C}$ . Para cada grupo de provetes ensaiados nas mesmas características é apresentada a figura com a média aritmética dos 3 ensaios para as 5 amostras.

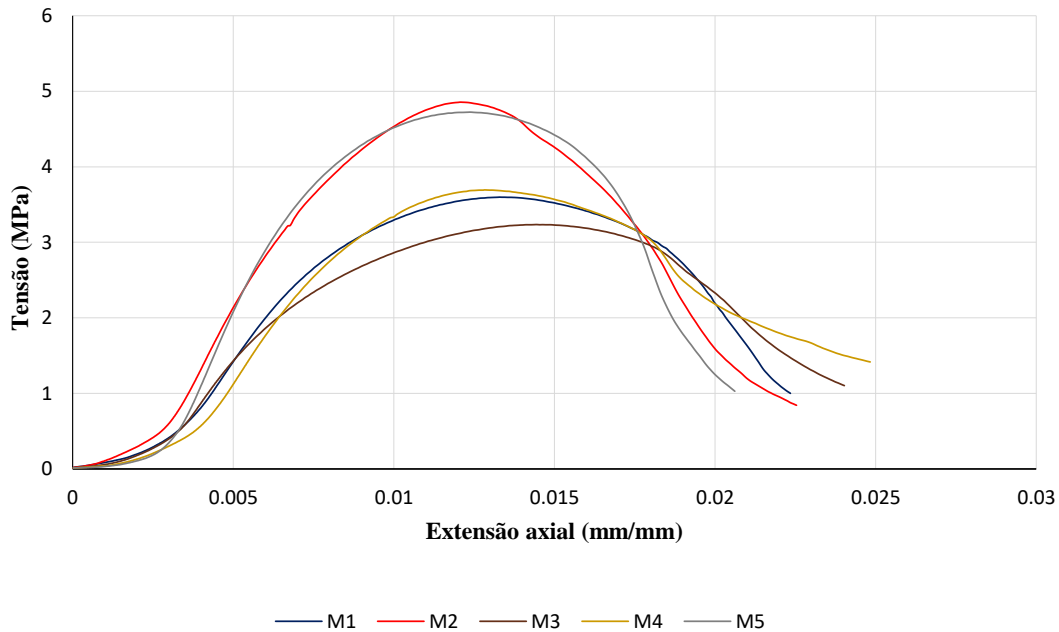


Figura 24 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 20°C.

Segundo Varum (2005), a resistência à compressão numa estrutura de terra varia entre 0.5 e 2.0 MPa e a resistência à tração é cerca de 20% da resistência à compressão. Nos provetes à temperatura ambiente foi obtida uma resistência entre 3 e 5 MPa, indicando um aumento significativo na resistência devido aos estabilizantes.

Ao analisar as amostras apresentadas na Figura 24, a composição que teve menor resistência em temperatura ambiente foi a M3, demonstrando que a quantidade de cal influencia na resistência do cimento, nesse caso de forma negativa, resultando que a amostra M3 com 2,5% de cal a mais, porém com a mesma quantidade de cimento que a composição M1, obteve menor resistência. Segundo Rigassi (1985) isso se deve, porque a adição de cimento no solo provoca aglomeração das partículas e torna a argila mais estável, já a adição de cal permite a dissolução de minerais argilosos.

Analisando as duas amostras que obtiveram melhores resultados e comportamento parecidos, M5 (10% de cal e 10% de cimento) e M2 (5% de cal e 7.5% de cimento), a amostra M2 apesar de 7,5% a menos de estabilizantes na sua composição, sua resistência foi maior. Visando à economia e a sustentabilidade, a quantidade de estabilizantes é importante na fabricação de grandes quantidades de BTC, devido ao processo de fabrico dos estabilizantes não serem sustentáveis como o processo de fabrico dos BTC.



4.3.2. Ensaio de compressão à temperatura de 100°C

Para a  $T = 100^\circ\text{C}$  obtivemos resultados próximos aos da temperatura ambiente, demonstrando que os materiais não sofrem grandes mudanças.

O uso de estabilizantes tem como objetivo melhorar o desempenho da terra, tal como a resistência mecânica. Nestas amostras existe uma variação entre 10% e 20% de estabilizantes, com diferentes percentagens entre cal e cimento.

Como pode se observar no comportamento tensão-extensão axial para patamar de 100°C, Figura 25, a tensão de rotura de M2 e M5 continuaram próximas de 4.5 e 5 MPa, sendo as tensões máximas, enquanto M1, M3 e M4 seguiram com os resultados semelhantes.

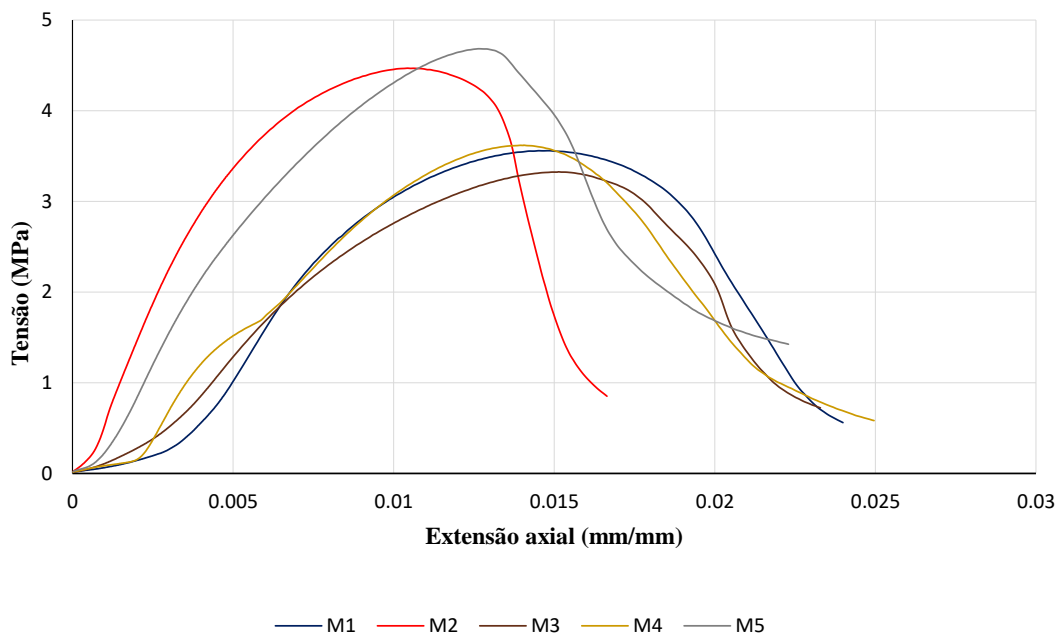


Figura 25 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 100°C.

A amostra M4 apesar da quantidade a mais de 2.5% de cal e 2.5% de cimento, obteve praticamente a mesma resistência que M1, demonstrando que para as mesmas percentagens de cal e cimento no total de 10% ou 15% de estabilizantes não há melhoria na resistência.

Já em comparação com a amostra M2, é possível observar que apesar de M4 ter maior quantidade de estabilizante, com 2.5% de cal a mais na sua composição, existe uma diminuição da resistência de rotura, confirmando a influência da cal na perda da resistência.

Como aumento da temperatura, a extensão axial entre M2 e M5 torna-se visível, sendo possível analisar a influência dos materiais e da dilatação causada pela temperatura.

Como expectável, a amostra M5 obteve a maior resistência, porém com um resultado bem próximo de M2, que ao analisar todos os fatores sustentáveis e económicos, continua a ser a melhor opção.

#### 4.3.3. Ensaio de compressão à temperatura de 200°C

Com o aumento de temperatura, para  $T = 200^{\circ}\text{C}$  é possível observar com clareza a diferença de resistência de rotura de cada composição, sendo M5 a que obteve melhor desempenho. As composições M5 e M2, obtiveram o melhor resultado em todas as temperaturas.

Na Figura 26 para  $T = 200^{\circ}\text{C}$ , pode verificar-se que as composições M5 e M2 apresentam melhor desempenho e M3 foi a composição que obteve a menor resistência.

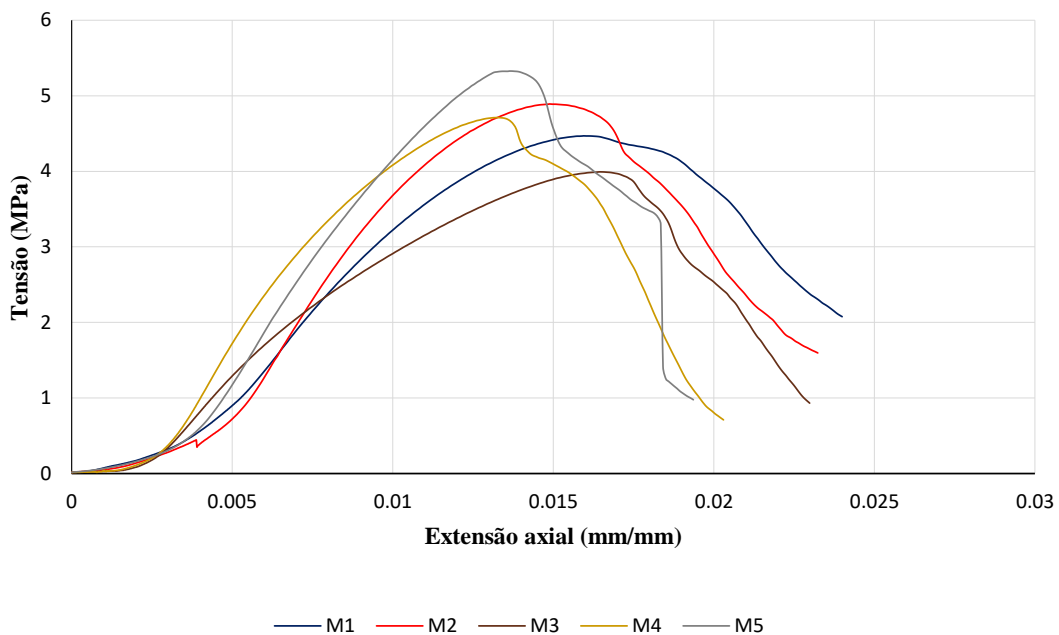


Figura 26 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 200°C.

Apesar de M3 (7.5% cal e 5.0% cimento) e M2 (5.0% cal e 7.5% cimento) possuírem a mesma quantidade de estabilizantes, total de 12.5%, sendo apenas diferenciado pelas percentagens diferentes entre cal e cimento, quando comparados,

pode-se observar que a composição com a maior percentagem de cimento em relação a cal obteve um resultado significativamente maior.

No caso da comparação entre M2 (5.0% cal e 7.5% cimento) e M4 (7.5% cal e 7.5% cimento), pode observar-se que o aumento da cal para a mesma percentagem de cimento, influencia na perda da resistência como já visto em outros patamares de temperatura.

Mais uma vez, estes resultados demonstram que a introdução de estabilizante em diferentes percentagens entre cal e cimento, influencia na resistência dos BTC melhorando o seu comportamento à compressão, quando colocado na percentagem correta de cal e cimento e não na maior percentagem total de estabilizantes, sendo esse o objetivo desse estudo.

#### 4.3.4. Ensaios de compressão à temperatura de 400°C

Com o aumento da temperatura, é possível observar um aumento na extensão axial das amostras, a princípio isso é devido à dilatação das amostras. Ao realizar os ensaios mecânico, a dilatação das amostras também foi observada, sendo necessário aumentar o espaçamento entre a plataforma de aço e a amostra, que inicialmente foi de 5 mm em temperatura ambiente até 200°C, seguida para 10 mm a partir de 400°C.

O gráfico tensão versus extensão axial para  $T = 400\text{ °C}$  é apresentado nas curvas da Figura 27.

Ao verificar a resistência de rotura de cada amostra, observamos que M5 e M2 são as amostras com maior capacidade resistente.

Com a temperatura a partir do patamar de 400°C, o comportamento dos blocos após a rotura obteve uma menor extensão axial nas amostras M2 e M5, concluindo que apesar de obterem um comportamento semelhante a temperatura ambiente antes da rotura, após a tensão máxima, a queda da tensão é significativa, enquanto a extensão axial não varia, obtendo um comportamento menos dúctil, isso ocorre principalmente devido ao aumento da tensão de rotura alcançada, onde após os ensaios, pode-se observar a amostra com mais fissuras e roturas.

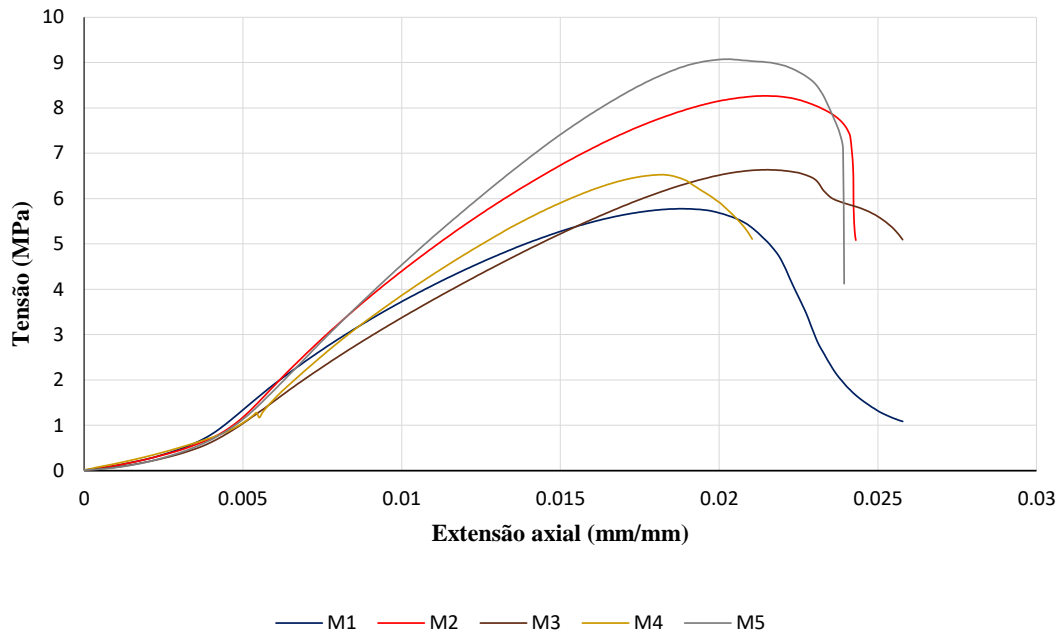


Figura 27 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 400°C.

A composição M1, com a menor quantidade de estabilizantes, tornou-se a composição menos favorável a partir do patamar de 400°C, onde se obteve uma mudança na influência negativa de 2.5% de cal a mais até a temperatura de 200°C, para uma influência positiva do material cal a partir de 400°C demonstrando um comportamento positivo da cal em alta temperatura, observando a influência da cal na aglomeração dos materiais, que são expandidos conforme o aumento da temperatura.

#### 4.3.5. Ensaio de compressão à temperatura de 600°C

A Figura 28 apresenta o gráfico tensão versus extensão axial para  $T = 600^{\circ}\text{C}$ , onde as curvas de cada amostra apresentam maior variação durante o ensaio, principalmente após a ruptura.

Com o aumento da temperatura entre 600°C e 800°C é possível identificar um afastamento maior da tensão entre a amostra M5 e M2, demonstrando que a quantidade maior de cimento influencia significativamente o comportamento a temperaturas mais elevadas.

Em contrapartida a quantidade de cimento mostra um aumento da resistência conforme o aumento da sua percentagem para todas as amostras em relação a M1. A percentagem de cal influencia negativamente a amostra M4, quando comparado a amostra

M2, onde apesar de 2.5% de cal a mais que a amostra M2 e com a mesma quantidade de cimento, acaba por obter uma tensão inferior.

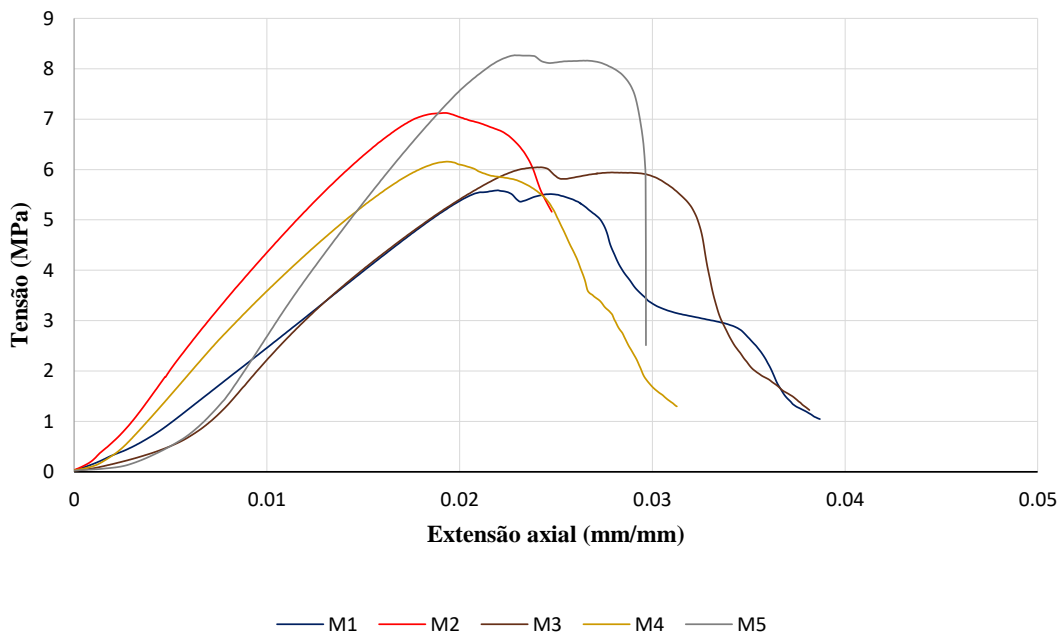


Figura 28 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 600°C.

Já ao analisar o comportamento da cal entre a composição M3 em relação a M1, os 2.5% de cal a mais na composição M3, acabou por influenciar negativamente até o patamar de 200°C, mas para as temperaturas mais elevadas, sua influência foi positiva.

#### 4.3.6. Ensaios de compressão à temperatura de 800°C

Analisado todos os patamares anterior, é possível ter uma maior clareza do comportamento dos blocos para  $T = 800^{\circ}\text{C}$ .

Em resumo pode-se dizer, que as temperaturas com o aumento da percentagem de estabilizantes, porém com a mesma quantidade de cal e de cimento, obtém um crescimento sequencial, por exemplo, M5 (10% de cal e 10% de cimento) seguido de M4 (7.5% de cal e 7.5% de cimento) e M1 (5.0% de cal e 5.0% de cimento). Já as composições que variavam a percentagem de cal e cimento, a M2 (5.0% de cal e 7.5% de cimento) e M3 (7.5% de cal e 5% de cimento) porém com a mesma percentagem de estabilizante mo total, obteve melhor resultado a amostra M2 com a maior quantidade de cimento.

Em análise, é possível dizer que quando ambas as amostras possuem 5.0% de cal e 5.0% de cimento, o acréscimo de 2.5% de cal é positivo para os patamares a partir de 400°C, porém quando as amostras possuem 7.5% de cal e 7.5% de cimento, a redução de 2,5% de cal é positiva em todas as temperaturas.

Pode se observar na Figura 29 as curvas tensão-extensão axial das amostras, onde a extensão antes da rotura é maior que nos outros patamares.

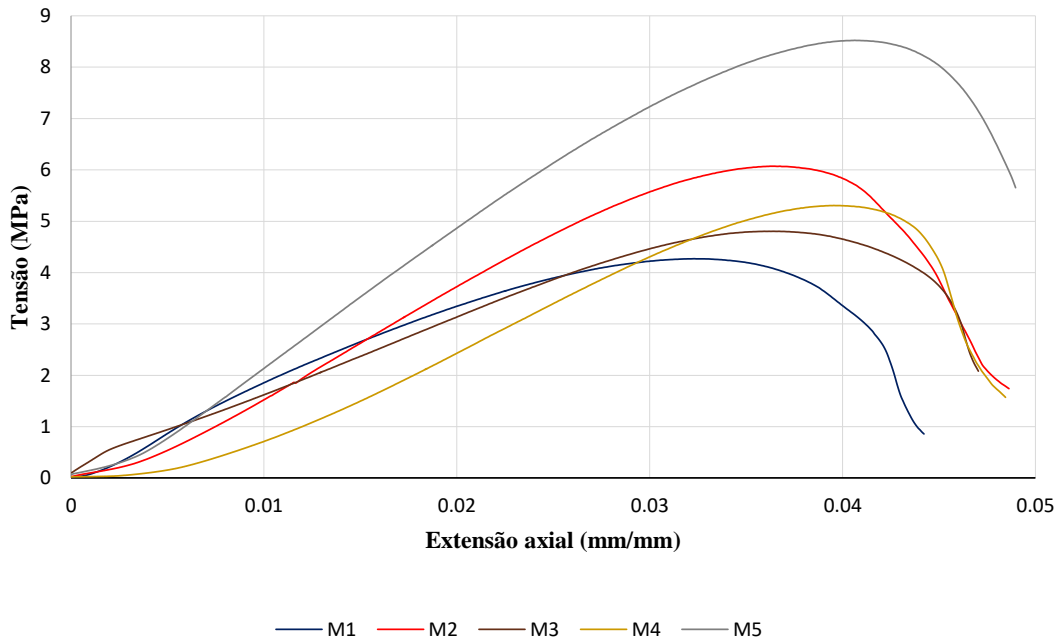


Figura 29 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para o Patamar de 800°C

Em relação às 5 amostras, ao analisar a quantidade de estabilizantes, independente da percentagem de cimento ou cal, observamos um aumento da resistência conforme a quantidade de estabilizante, excluindo a composição M2, que apesar de ser composta de 2.5% a menos de estabilizante que M4, possui um comportamento melhor.

A análise entre a composição M4 e M2 é fundamental para descobrir a influência da cal, que com o aumento da sua quantidade, resultou em uma perda de resistência do BTC.

Com esta análise nota-se que deve haver uma compatibilização entre a quantidade de cal e cimento, que influencia diretamente na resistência à compressão dos blocos, pois a falta desta acarretaria num prejuízo económico e principalmente na eficiência da alvenaria.

#### 4.4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS POR AMOSTRA

##### 4.4.1. Análise de resultados da amostra M1

Em seguida serão apresentados as curvas entre tensão e extensão axial para a amostra M1 (5.0% de cal e 5.0% de cimento), a amostra com menor quantidade de estabilizantes. Nos resultados a amostra M1 alcançou uma resistência maior que M3 até o patamar de temperatura de 200°C, sendo a menos resistente entre as amostras nos patamares de temperatura acima de 400°C.

Nota-se que apesar de 2.5% de cal a menos na composição em relação a M3, para temperatura ambiente, o seu desempenho foi satisfatório. Porém em temperaturas elevadas a quantidade de cal, influenciou o desempenho da amostra M3. Em todos os patamares de temperatura a diferença de tensão máxima entre M1 e M3 ficaram entre 0.5 MPa.

Na Figura 30 estão representados o comportamento tensão e extensão axial da amostra M1.

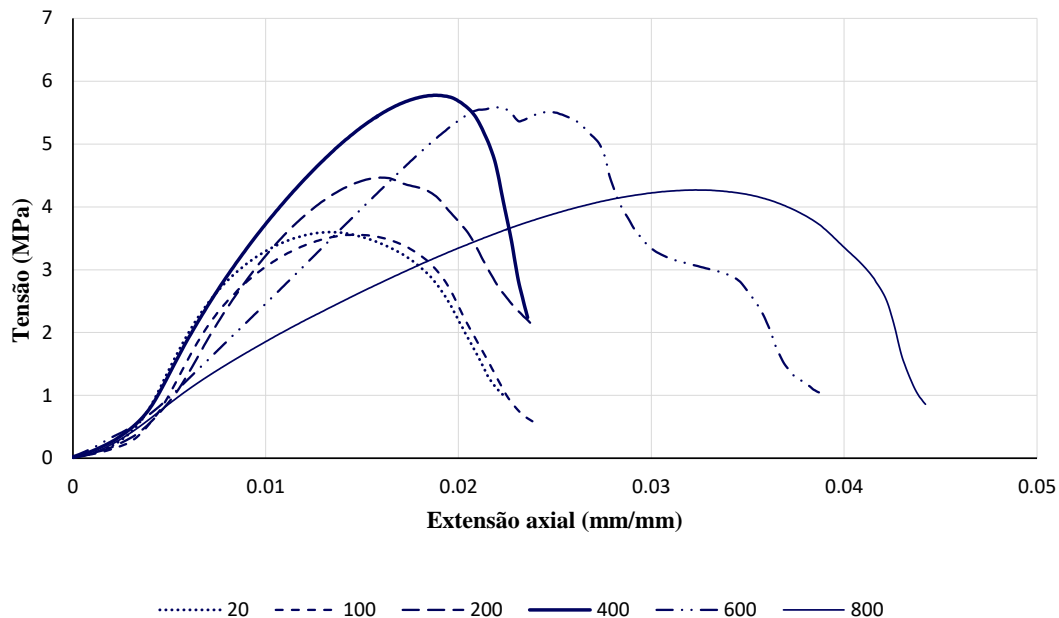


Figura 30 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a amostra M1.

Com estes resultados, verificou-se a influência da temperatura no ganho da resistência do BTC. Entre 400°C e 600°C a resistência do bloco chegou a alcançar o dobro da resistência em relação a temperatura ambiente. Entre 20°C e 100°C a resistência

permaneceu estável, verificando um aumento de 25% da resistência ao aumentar a temperatura a 200°C. Nos ensaios, todos os blocos foram submetidos a um tempo de 10 minutos na temperatura estacionária. O tempo que os blocos ficaram submetidos nas temperaturas mais elevada pode ter influenciado a sua resistência porém não foi o fator principal.

A extensão axial do BTC aumentou conforme o aumento da temperatura, sendo a principal causa a expansão dos materiais. No patamar  $T = 800^{\circ}\text{C}$  a resistência do BTC aproxima-se da tensão de rotura em temperatura ambiente, nessa análise é possível concluir que a extensão axial não está relacionada com a resistência máxima alcançada dos blocos.

#### 4.4.2. Análise de resultados da amostra M2

A Figura 31 mostra a relação entre a tensão e extensão axial da amostra M2.

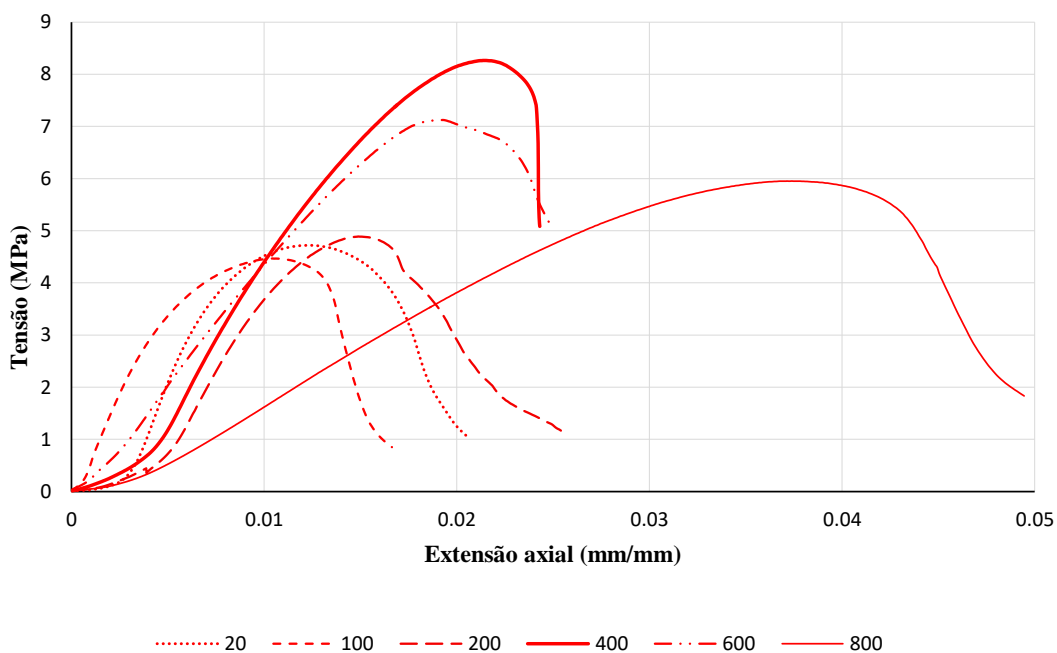


Figura 31 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a amostra M2.

Comparando o comportamento do BTC após a tensão de rotura, verifica-se um comportamento menos dúctil na temperatura de 400°C, onde a perda de resistência ocorre de forma mais rápida que as causadas em temperaturas mais altas, assim como em tensão de rotura mais baixa, onde é possível observar uma extensão axial maior após a rotura.



Em todas as amostras, foi verificado a maior tensão de rotura na temperatura de 400°C. Sendo a de maior resistência a amostra M5 com aproximadamente 9 MPa, seguida de M2 com aproximadamente 8 MPa. Apesar da quantidade de estabilizantes serem 7.5% a mais em M5. A amostra M2 apresenta uma resistência máxima aproximada da amostra M5, obtendo um desempenho satisfatório, quando analisado todos os fatores, como económico e sustentável. Lembrando que produção de cimento acarreta um consumo energético significativo e um é um forte promotor de poluição, sendo sua menor percentagem uma vantagem para a produção de BTC.

O comportamento da amostra M2 manteve-se estável até a temperatura de 100°C, assim como todas as outras amostras, demonstrando que até o patamar de 100°C somente a quantidade de estabilizante influencia na resistência. Ao aumentar para o patamar de temperatura de 200°C a resistência torna-se aproximadamente 20% maior. Sendo a resistência 50% maior quando a amostra está submetida a uma temperatura de 400°C.

Em relação a extensão axial, o comportamento das amostras apresenta uma grande diferença na temperatura a 800°C, sendo 50% maior que na temperatura de 400°C. Esse comportamento foi observado em todas as amostras, não sendo influenciado pela quantidade de estabilizantes.

#### 4.4.3. Análise de resultados da amostra M3

Ao analisar a Figura 32 pode se observar um comportamento semelhante entre a temperatura ambiente e a temperatura de 100°C.

A extensão axial da amostra M3 na temperatura de 800°C é maior que nas temperaturas inferiores, também observa-se que até a 400°C a extensão axial se comporta semelhante, tendo seu aumento somente após 600°C.

Assim com em todas as amostra, a temperatura de 400°C obteve a maior tensão para a amostra M3.

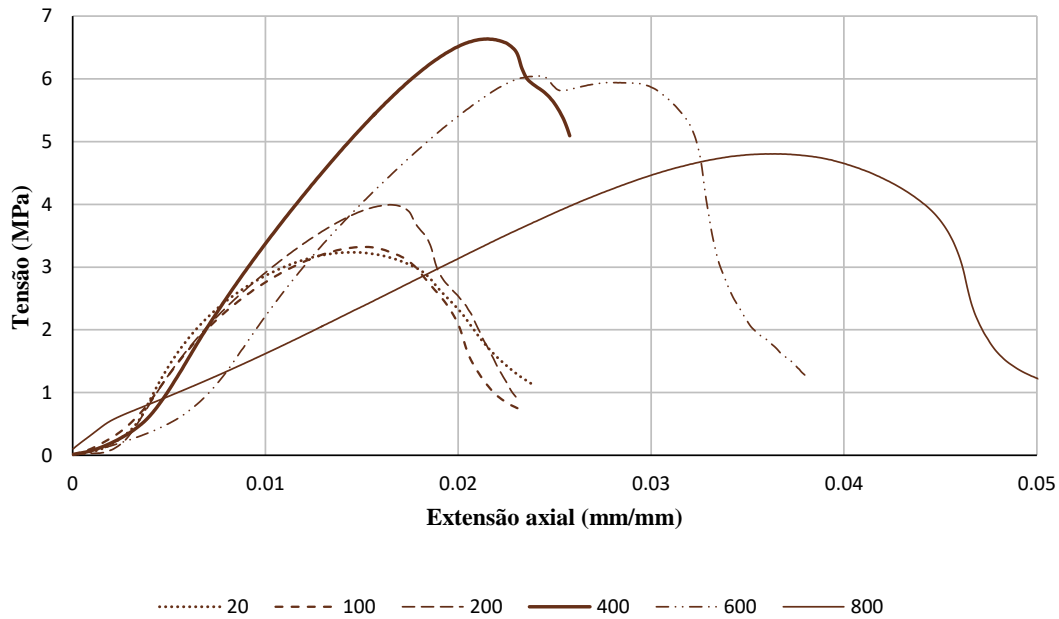


Figura 32 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a amostra M3.

Ao analisar a resistência de rotura da amostra M3 na figura 32, é possível observar um melhor desempenho da amostra na temperatura 600°C e 800°C após 400°C, demonstrando um desempenho suficiente da cal em altas temperaturas.

#### 4.4.4. Análise de resultados da amostra M4

Ao verificar o comportamento da amostra M4 apresentado na Figura 33 pode-se observar a maior tensão de rotura entre 400°C e 600°C.

A amostra M4 comportou-se de modo semelhante às amostras M1 e M5. Ambas as amostras são compostas pelas mesmas percentagem de cimento e cal, ou seja 50/50. Apesar da amostra M5 ser composta por 2.5% de cal e 2.5% de cimento a mais que M4, e M1 ser composto com 2.5% de cal e 2.5% de cimento a menos que M4. Foi observado o mesmo comportamento para as 3 amostras quando analisado em qual temperatura as amostras obtiveram maior resistência, ou seja, ambas foram mais resistentes quando elevadas a 400°C.

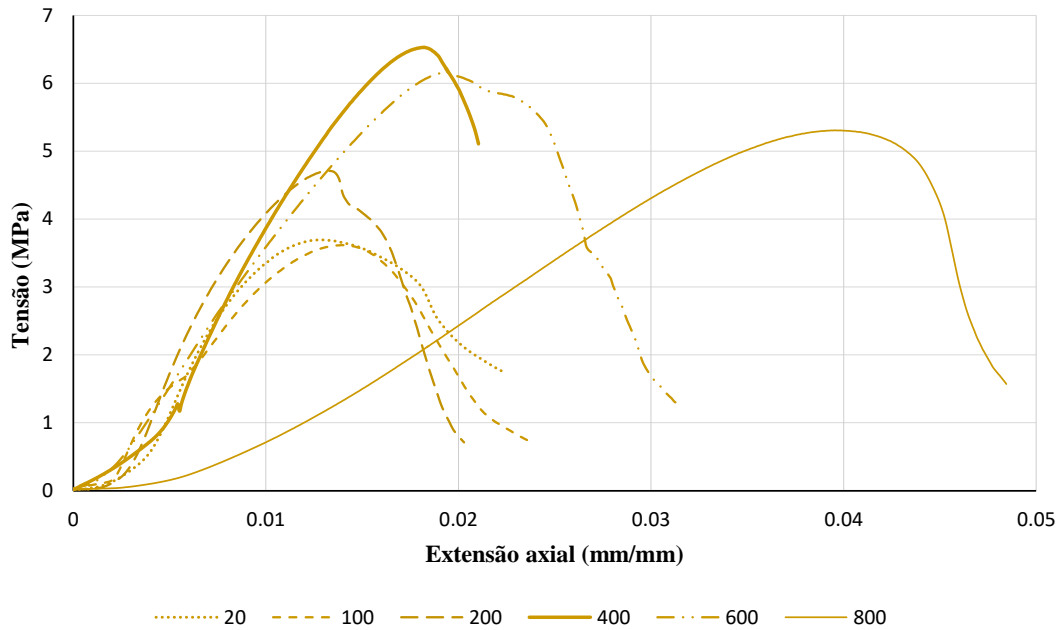


Figura 33 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a Amostra M4.

#### 4.4.5. Análise de resultados da amostra M5

Na comparação das curvas onde-se obteve o melhor desempenho para as temperaturas a cima de 400°C apresentados na Figura 34, observa-se uma resistência próxima entre 8.2 MPa e 9 MPa. Pode-se verificar um aumento de extensão axial conforme a temperatura aumenta, porém a resistência manteve-se próxima, o que demonstra uma variação menor entre 400°C e 800°C.

Na curva de  $T = 200^{\circ}\text{C}$ , é possível verificar um comportamento onde se obteve 2 fases de roturas após atingir a tensão máxima. O comportamento da amostra após a tensão máxima é importante para observar a influência da temperatura externa com a parte interna da amostra, a homogenidade da composição assim como as roturas causadas no provete.

Como era esperado, a amostra M5 obteve a maior tensão de rotura em relação a todas as amostras, sendo a maior tensão de rotura alcançada aos 400°C.

Comparada com a amostra M2, seu desempenho foi muito próximo e como já dito anteriormente, devido a 7.5% a menos de estabilizantes na amostra M2, ela acaba por ser a melhor escolha quando analisado de forma económica e sustentável.

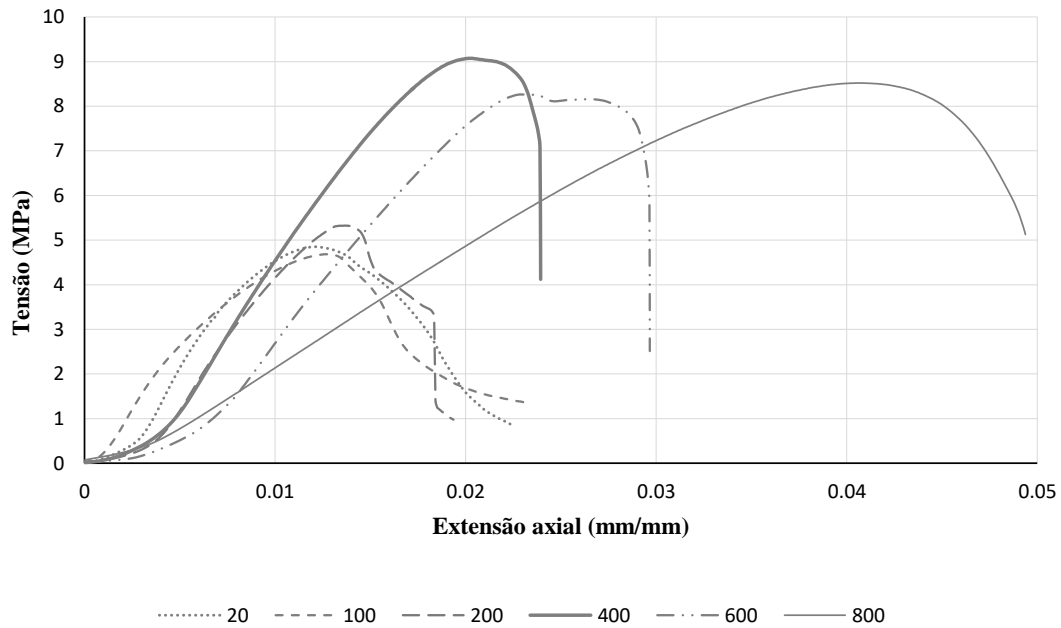


Figura 34 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a Amostra M5.

Em relação a temperatura, o aumento da resistência das amostras quando elevada a altas temperaturas, o melhor desempenho foi a 400°C, porém em caso de incêndio, após o término a estrutura voltará para a temperatura ambiente, com as modificações causadas pelo contato com o fogo.

#### 4.5. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO RESIDUAL DA AMOSTRA M2

Na Figura 35 são apresentados os resultados dos ensaios compressão residual da amostra M2. Os ensaios de compressão residual tiveram como resultado o comportamento mecânico à compressão do provete após ele ser exposto a temperatura e deixado arrefecer até atingir a temperatura ambiente. A amostra “M2” foi selecionada para estes ensaios devido a obtenção dos melhores resultados nos primeiros ensaios.

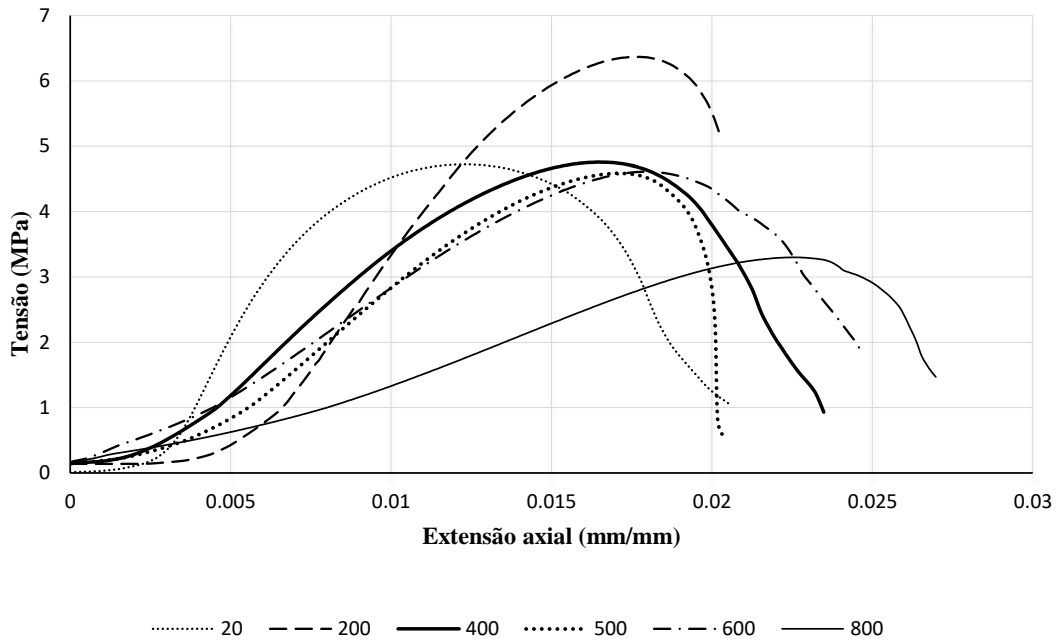


Figura 35 - Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a amostra M2 no ensaio de compressão residual.

Esse ensaio tem como principal objetivo demonstrar o comportamento da amostra M2 e qual a sua resistência mecânica após ter sido submetida a alta temperatura.

Em comparação ao outro ensaio, pode observar-se um melhor desempenho da amostra M2 submetida a 200°C. Após o patamar de T = 400°C verifica-se um desempenho 50% menor, demonstrando a influência da temperatura na mudança da resistência do material após ele ter sido exposto a alta temperatura e regressado à temperatura ambiente.

Na Tabela 17 são apresentados os valores da tensão máxima do ensaio de resistência termomecânica em regime estacionário e do ensaio de compressão residual da amostra M2

Tabela 17 - Resultado da tensão máxima do ensaio de resistência termomecânica em regime estacionário e do ensaio de compressão residual (ECR) da amostra M2 em MPa.

Temperatura	M2	M2 - ECR
20°C	4.864	4.864
100 °C	4.369	- - - -
200 °C	5.018	6.638
400 °C	8.011	4.758
500 °C	- - - -	4.583
600 °C	7.149	4.608
800 °C	5.986	3.300

Nos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário os provetes obtiveram maior tensão de rotura entre 400°C e 600°C. Sendo assim foi realizado um ensaio extra no ensaio de compressão residual no patamar  $T = 500^{\circ}\text{C}$ , onde podemos observar um melhor desempenho da amostra após ser submetida a 400°C em relação a 500°C e 600°C.

Com estes resultados observamos um melhor desempenho da amostra após ser sido submetida a temperatura de 200°C. No ensaio de compressão residual em comparação com o ensaio de resistência termomecânica em regime estacionário, demonstrando que a exposição até aos 200°C, traz mudanças positivas para a amostra após arrefecer, porém acima de 400°C a resistência mecânica do BTC sofrem mudança negativas na qual diminuem o desempenho e resistência da amostra, como pode-se observar nos ensaios de compressão residual.

Em resumo observamos que o bloco de BTC apresenta uma resistência antes de ser submetido a alta temperatura diferente da resistência enquanto submetido a temperaturas elevadas e diferente após ser arrefecido. Para além da mudança da resistência também muda de cor. Revela-se de extrema importância o estudo dos ensaios de compressão dos BTC bem como o seu comportamento em caso de incêndio.

#### 4.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na Figura 36 pode observar-se a análise da variância da tensão máxima das amostras por patamar de temperatura, assim como em qual patamar de temperatura cada amostra alcançou a melhor resistência.

Os valores apresentados são a média  $\pm$  desvio padrão; a-c para o grupo de amostras com a mesma temperatura são relatos os valores médios com diferentes letras minúsculas que diferem estatisticamente ( $P < 0,05$ ); A-D para uma mesma amostra nos diferentes patamares de temperatura os valores médios com letras maiúsculas diferem estatisticamente ( $P < 0,05$ ).

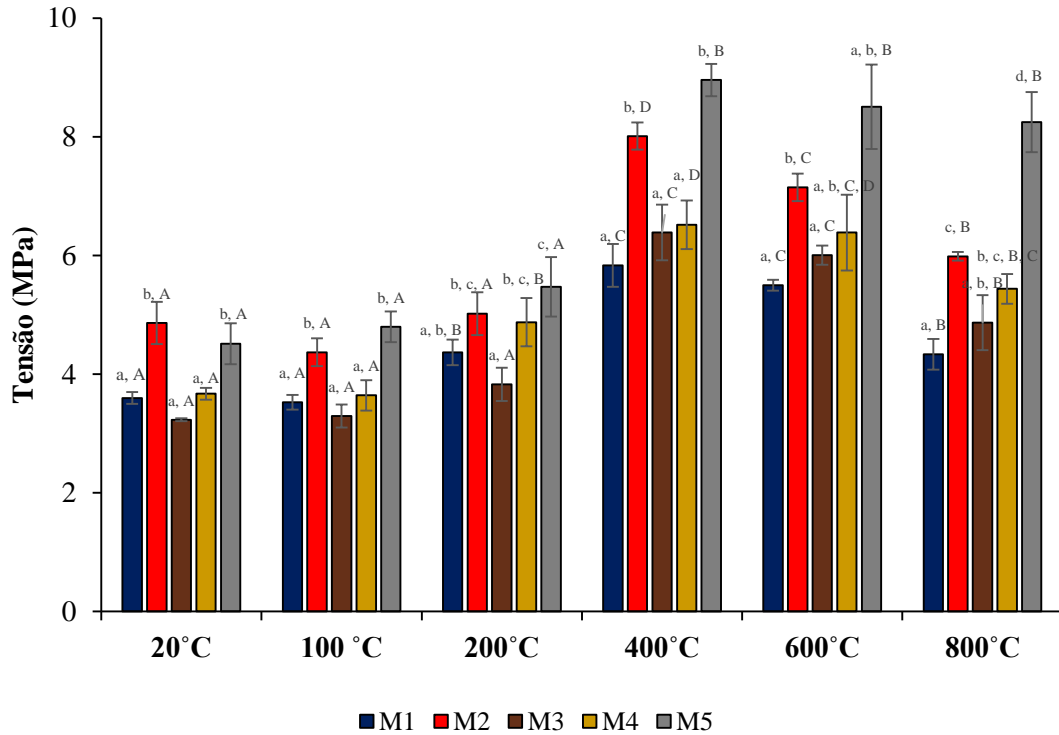


Figura 36 - Variância da tensão média de rotura dos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário em MPa.

A partir da análise da Figura 36 e da Tabela 18 é possível verificar que as amostras M2 e M5 obtiveram comportamento semelhante até o patamar de 600°C. Pela análise individual de cada patamar de temperatura, ou seja, ao comparar o comportamento das diferentes amostra para uma mesma temperatura, até os 600°C, as amostras M2 e M5 apresentaram-se com letras minúsculas iguais, sendo assim, considerada iguais, estatisticamente.

Ao analisar-se o comportamento da amostra M2 em diferentes patamares de temperatura através das letras maiúsculas, pode-se verificar que até os 200°C a amostra M2 obteve um comportamento constante, ainda, para a mesma amostra pode-se verificar uma maior resistência a 400°C. Para os patamares com temperaturas superior uma redução gradual da resistência máxima foi observada com o aumento da temperatura.

Tabela 18 - Comparação estatística das resistências máximas das amostras em diferentes patamares de temperatura.

Amostra	Temperatura em Regime Estacionário						P-valor
	20°C	100 °C	200°C	400°C	600°C	800°C	
<b>M1</b>	3.599 ± 0.102 <sup>a, A</sup>	3.525 ± 0.123 <sup>a, A</sup>	4.367 ± 0.215 <sup>a, b, B</sup>	5.833 ± 0.360 <sup>a, C</sup>	5.499 ± 0.093 <sup>a, C</sup>	4.333 ± 0.259 <sup>a, B</sup>	<0.001*
<b>M2</b>	4.864 ± 0.356 <sup>b, A</sup>	4.369 ± 0.236 <sup>b, A</sup>	5.018 ± 0.362 <sup>b, c, A</sup>	8.011 ± 0.228 <sup>b, D</sup>	7.149 ± 0.231 <sup>b, C</sup>	5.986 ± 0.074 <sup>c, B</sup>	<0.001*
<b>M3</b>	3.232 ± 0.023 <sup>a, A</sup>	3.295 ± 0.193 <sup>a, A</sup>	3.828 ± 0.279 <sup>a, A</sup>	6.390 ± 0.469 <sup>a, C</sup>	6.006 ± 0.161 <sup>a, C</sup>	4.869 ± 0.465 <sup>a, b, B</sup>	<0.001*
<b>M4</b>	3.67 ± 0.100 <sup>a, A</sup>	3.643 ± 0.256 <sup>a, A</sup>	4.876 ± 0.408 <sup>b, c, B</sup>	6.516 ± 0.410 <sup>a, D</sup>	6.385 ± 0.639 <sup>a, b, C, D</sup>	5.438 ± 0.250 <sup>b, c, B, C</sup>	<0.001*
<b>M5</b>	4.511 ± 0.344 <sup>b, A</sup>	4.797 ± 0.259 <sup>b, A</sup>	5.472 ± 0.500 <sup>c, A</sup>	8.956 ± 0.274 <sup>b, B</sup>	8.507 ± 0.712 <sup>a, b, B</sup>	8.245 ± 0.506 <sup>d, B</sup>	<0.001*
<b>P-valor</b>	<0.001*	<0.001*	0.002*	<0.001*	0.001**	<0.001*	

Os valores relatados são a média ± desvio padrão; a-c na mesma coluna são os valores médios com diferentes letras minúsculas que diferem estatisticamente ( $P < 0,05$ ); A-D dentro da mesma linha são os valores médios com diferentes letras maiúsculas que diferem estatisticamente ( $P < 0,05$ ). (1). \*  $P > 0,05$ , por meio do teste de Levene. Os valores de P são os da análise ANOVA unidirecional (one-way ANOVA). As médias foram comparados usando o teste de Tukey, uma vez que variações iguais poderiam ser assumidas; \*\*  $P < 0,05$ , por meio do teste de Levene. Os valores de P são aqueles obtidos através da análise ANOVA unidirecional (one-way ANOVA) com correção de Welch. As médias foram comparadas pelo teste de Dunnett T3, uma vez que não foi possível supor variações iguais.



## 4.7. ANÁLISE GLOBAL DE TODAS AS AMOSTRAS

Na Figura 37 estão apresentados os resultados médios de todas as amostras analisadas, onde é possível observar o comportamento de cada amostra em todas as temperaturas.

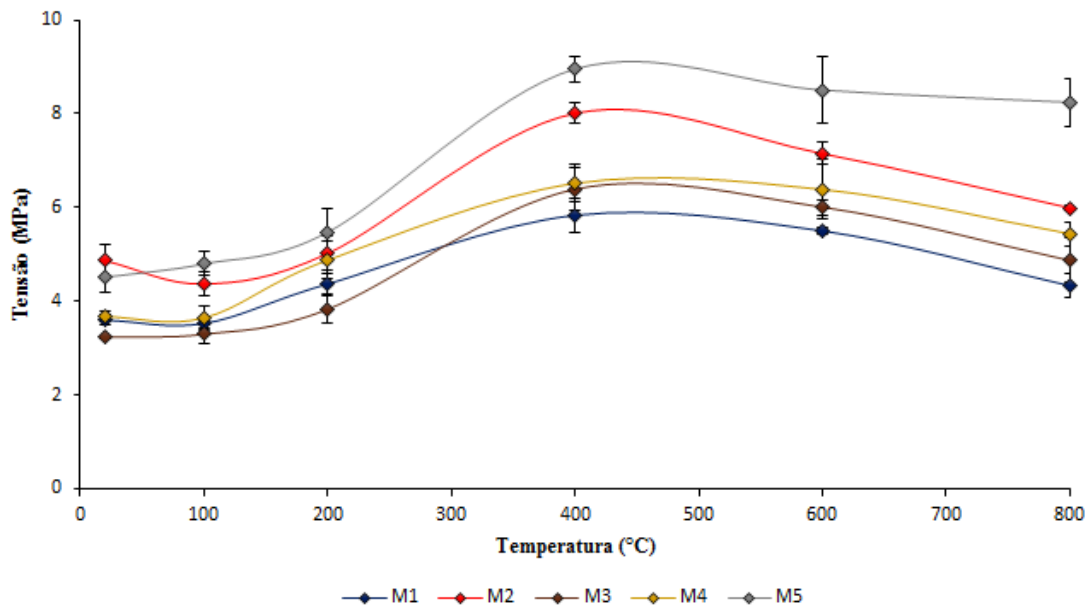


Figura 37 - Tensão média de rotura dos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário (média±desvio padrão).

As análises realizadas a partir de 400°C obtiveram a mesma sequência sendo a amostra M5 a mais resistente, seguida de M2, M4, M3 e por último M1. Já ao analisar os patamares de 20°C, 100°C e 200°C, a amostra M1 obteve um comportamento melhor que M3.

A amostra M1 (5.0% de cal e 5.0% de cimento) apesar de 2.5% a menos de cal que a amostra M3 (7.5% de cal e 5% de cimento) foi mais resistente até o patamar de 200°C. Com 2.5% a mais de cal em sua composição, a amostra M3 obteve melhor desempenho nas temperaturas a cima de 400°C, demonstrando um comportamento positivo da cal em temperaturas mais elevadas.

Quanto às amostras M5 e M2, em temperatura ambiente a amostra M2 demonstrou ser mais resistente que a amostra M5, onde se pode afirmar que a quantidade de 7.5% de estabilizante a mais não influenciou na resistência da amostra M5 quando não

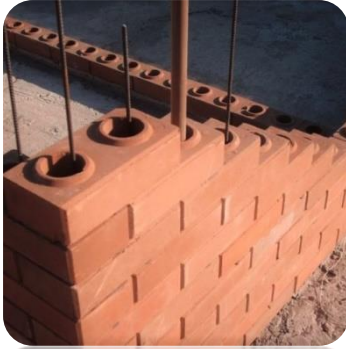
submetida a alta temperatura, assim como, a quantidade ideal de estabilizante é a da composição M2 com 5.0% de cal e 7.5% de cimento.

Com essa análise pode-se dizer que em  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , a amostra com 7.5% e 10% de cimento possui a mesma resistência, assim como a quantidade a mais de cal, age de forma negativa quando se compara a amostra M2 com a M5, onde apesar de 5.0% a menos de cal, a amostra M2 obteve maior resistência, e a amostra M3 com a amostra M1, que ao verificar os resultados é possível afirmar que M3 apesar de 2.5% de cal a mais, obteve-se uma resistência de rotura menor que M1.

Vale lembrar que os produtos mais utilizados para a estabilização química do solo são o cimento e cal, contudo, o cimento, gera um consumo energético considerável e um é um forte promotor de poluição em comparação com a cal.

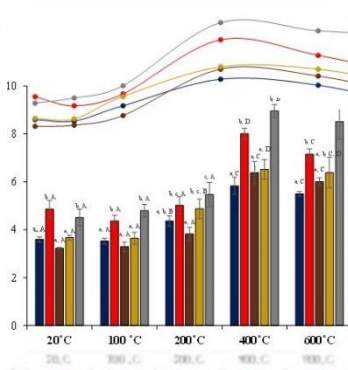
Em contrapartida, a estabilização com cal é mais barato e mais sustentável, mas não é adequado para todo o tipo de solos.

Com o objetivo de produzir um produto sustentável, apesar de M5 obter os melhores resultados com esperado, a amostra M2 é considerada a melhor opção.



# CAPÍTULO 5.

## Conclusões





## 5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação consistiu na realização de ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário em blocos de terra compactada e análise dos ensaios de compressão e comportamento do BTC em altas temperaturas. Algumas considerações e desenvolvimentos futuros poderão ser retirados.

A envolvimento neste projeto permitiu analisar e avaliar o comportamento do BTC e a sua resistência modificando em diferentes percentagens a quantidade de estabilizantes utilizado e a temperatura submetida. Assim, apesar de já esperado o melhor desempenho da composição M5 por obter a maior quantidade de estabilizantes, foi possível concluir que a composição M2 com 5.0% cal e 7.5% cimento apresenta uma resistência aproximada da composição M5 com 10% cal e 10% cimento, sendo a M2 a melhor escolha devido a menor quantidade de estabilizantes, sendo mais económica e sustentável.

No ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário, para diferentes patamares de temperatura, concluímos que o BTC se comporta em geral de uma forma melhor quando submetido a 400°C, atinge uma resistência maior.

Nos ensaios de compressão residual, os provetes são submetidos a altas temperaturas e só após 24 horas é realizado o ensaio de compressão. A amostra M2, tem uma perda significativa da resistência a partir de 400°C, demonstrando que em caso de incêndio ou exposição a altas temperaturas, é necessário tomar precaução e realizar um reforço na alvenaria devido a modificações negativas que os materiais sofrem após voltarem a temperatura ambiente causando uma perda de resistência no BTC.

Por exemplo no ensaio de compressão residual da amostra M2 obtivemos uma resistência de rotura próxima 4.7 MPa, porém no ensaio realizado enquanto a amostra estava submetida a 400°C sua resistência foi aproximadamente 8.0 MPa.

A principal preocupação dos órgãos normativos com a ocorrência de incêndio não está ligada ao interesse de preservar o património, mas sim de garantir que a estrutura permaneça com sua capacidade portante preservada, por um período de tempo considerado suficiente para garantir a total evacuação das pessoas.

Em suma, podemos afirmar que o BTC obteve um aumento da resistência quando submetido a temperaturas maiores que 400°C, dando a segurança necessária em caso de incêndios.

Com a amostra M5 podemos concluir que o aumento de temperatura até 800°C não retira a resistência da amostra com maior percentagem de estabilizante, demonstrando o bom comportamento da cal e do cimento em caso de incêndios.

Este trabalho permitiu aprofundar e descobrir novos conhecimentos no domínio das construções com blocos de terra compactada, mas também sobre o comportamento e propriedades dos materiais e estabilizantes utilizados. Com a análise estatística, foi possível afirmar estaticamente qual a melhor composição e quais obtiveram a mesma resistência apesar da maior quantidade de estabilizante.

Com este estudo a segurança de estruturas em BTC quando sujeitas a situações de incêndio ficam mais claras através dos resultados de resistência atingida antes do seu colapso, durante o incêndio e após serem arrefecido, assim, aumentar a segurança das pessoas e dos bens, também foi possível analisar a melhor composição e quantidade de estabilizante afim de colocar a economia e a sustentabilidade em primeiro lugar.

## 5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A continuação da investigação neste domínio torna-se indispensável, principalmente pela a quantidade de informações e combinações que podem ser adquiridas de todos os materiais envolvidos, além do crescimento do método construtivo BTC no âmbito mundial.

Em termos de trabalhos experimentais, podemos ampliar nosso conhecimento sobre BTC quando elevado em alta temperatura.

Apesar da resistência do BTC aumentar entre 400°C e 600°C, verificou-se uma perda de resistência quando é realizado o mesmo ensaio após o seu arrefecimento.

Sugere-se, então:

- A investigação mais profunda e coerente de todos os constituintes e percentagens de estabilizantes, afim de reforçar as suas propriedades mecânicas e resistência.
- Ensaio de resistência termomecânica em regime estacionário em blocos de terra compactada composto com cal ou cimento separadamente, afim de verificar o comportamento da cal e do cimento quando elevado a alta temperatura.

- Ensaios mecânicos realizados com o BTC arrefecido após ser submetido a alta temperatura, com o objetivo de responder a percentagem de perda de resistência após a construção/parede serem submetidos a um incêndio.
- Análise em diferentes temperaturas, verificando o comportamento do BTC estabilizado com cal ou cimento com o objetivo de verificar o comportamento e a resistência do BTC após serem arrefecidos.

Essas análises com a cal e o cimento separados serão de extrema importância para entender-se melhor o comportamento da cal e do cimento quando unidos como estabilizantes nos blocos de terra comprimido devido a mudança que ambos sofrem em diferentes temperaturas.





# **CAPÍTULO 6.**

## Referências



## Referências:

- ABNT (2012). NBR 13554:2012 - Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil.
- ABNT (2012). NBR 8491:2012 - Tijolo de solo-cimento – Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil.
- ABNT (2012). NBR 8492:2012 - Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil.
- Adam, E. A.; & Agib, A. R. A. (2001). Compressed stabilised earth block manufacture in Sudan. France, Paris: Printed by Graphoprint for UNESCO.
- Arumala, J. O.; & Gondal, T. (2007). Compressed earth building blocks for affordable housing. In The construction and building research conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors.
- ASTM C1314-03b, (2003). Standard test method for compressive strength of masonry prisms, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. Barbosa.
- Barbosa, N.; Mattone, R.; & Mesbah, A. (2002). Blocos de concreto de terra: uma opção interessante para a sustentabilidade da construção. 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte - Minas Gerais.
- Beltrame, E. de S. (2013) Meio Ambiente na Construção Civil.
- Braga, A.; & Rocheta, V. (2008). A construção em terra e a sustentabilidade. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10400.1/80>
- Cid, J.; Mazarrón, F. R.; & Cañas, I. (2011). The earth building normative documents in the world. *Informes de La Construcción*, 63 (523), 159–169.
- Faria, H. (2012). Desenvolvimento de uma solução para a construção de taipa no Minho baseada na ativação alcalina.
- Gomes, M. I. (2013). Conservação de construções de taipa: argamassas de reparação. Tese de Doutoramento. FCT-UNL. Lisboa - Portugal.
- Jesus, Arlete S.; & Costa (2008). Ensaio de resistência ao fogo de elementos de compartimentação. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. U.A, Aveiro.
- John, V.M. (2000). Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- John, V.M.J. (1999). Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: Seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil, 2., São Paulo, 1999. Anais. São Paulo, IBRACON. p.44-55.
- Jorge, F.; Fernandes, M.; & Correia, M. (2006) *Arquitetura de Terra em Portugal*. 1ª Edição, Lisboa, Argumentum ISBN 972-8479-36-0.
- Landi, F., R. (1986) Ação do Incêndio Sobre Estruturas de Concreto Armado. Boletim Técnico n° 01/86 PCC-EPUSP. São Paulo.
- Lin, W.; Lin, T. D.; & Powers-Couche, L. J. (1996). Microstructures of Fire Damaged Concrete. *ACI Materials Journal*. Vol. 93, N° 3. Technical Paper. ACI – American Concrete Institute. New York, May-June.
- LNEC, E. 196 (1966). Especificação LNEC: Análise Granulométrica. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Meneses, T. A. D. F. (2010). Estudo do comportamento térmico das construções em alvenaria de adobe (Master's thesis, Universidade de Aveiro).
- Metha, P. K. M.; & Paulo J. M. (1994) *Concreto — Estrutura, Propriedades e Materiais*. Ed. PINI. São Paulo.
- Moreira, A. M. (2008/2009) Terra crua, anotações de aula Materiais de construção. Instituto politécnico de Tomar. Tomar. (2008/2009).
- Morel, J. C.; Pkla, A.; & Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21(2), 303-309.
- Murta, A.; Varum, H.; Pinto, J.; Bentes, I.; Paiva, A.; & Ramos, L. (2010). Benefícios económicos e ambientais inerentes ao uso de materiais estruturais naturais em habitações unifamiliares, 7–22.
- Namango, S. S. (2006). Development of Cost-Effective Earthen Building Material for Housing Wall Construction: Investigations into the Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Sisal Vegetable Fibres, Cassava Powder and Cement Compositions. Cassava Powder and Cement Compositions. A Doctoral Dissertation, Brandenburg Technical University, Cottbus, Germany.
- Neves, C. M.; Faria, O. B.; Rotondaro, R.; Salas, P. C.; & Hoffman, M. (2005) Seleção de solos e métodos de controle em construção com terra – práticas de campo. CYTED – Programa Ibero-Americano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento. PROTERRA – Projeto de investigação XIV 6.
- Neves, S. C. de M. (2011). Estudo da aplicabilidade de sistemas construtivos no desempenho da sustentabilidade na Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. IST, Lisboa.

- Oliveira, J. (2014). Comportamento mecânico de blocos de terra compactada ativada alcalinamente.
- Pinto, T.P. (1999). Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo. 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Rigassi, V. (1985). Compressed earth blocks–manual of production. CRATerre-EAG, vol. 1. GATE/GTZ/BASIN, German.
- RILEM (1998). RILEM TC 164 – EBM. Un test d'humidification-séchage pour les blocs de terre comprimée et stabilisée au ciment. RILEM Publications SARL.
- Schroeder, H.; Ziegert, C.; & Müller, U. (2012). Standardisation in earthen building in Germany: Situation. In 6th International Conference on Building with Earth, LEHM 2012, Weimar, Germany, Dachverband Lehm 57-71.
- Standards Australia (2002). The Australian Building Handbook. Standards Australia.
- Wines, J. (2000) Green Architecture. Milão. Taschen.



## Anexo I

<b>Caraterísticas Iniciais das Amostras</b>									
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Provete ID</b>	<b>l<sub>o</sub> (mm)</b>	<b>d<sub>o</sub> (mm)</b>	<b>m<sub>o</sub> (g)</b>	<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>γ (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>γ<sub>médio</sub> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>σ</b>	<b>CdV (%)</b>
<b>20</b>	M1.1.P0	144.20	70.49	1035.9	562.7431	1.84			
	M1.2.P0	143.90	70.04	1025.1	554.4252	1.85	1.84	0.00515	0.28%
	M1.3.P0	143.24	70.09	1015.0	552.6705	1.84			
	M2.1.P0	143.61	70.20	1038.5	555.8387	1.87			
	M2.2.P0	143.60	70.22	1038.5	556.1167	1.87	1.86	0.00451	0.24%
	M2.3.P0	143.90	70.49	1043.6	561.5723	1.86			
	M3.1.P0	143.51	70.46	1020.6	559.5737	1.82			
	M3.2.P0	143.69	70.70	1037.8	564.0989	1.84	1.83	0.00718	0.39%
	M3.3.P0	143.94	70.59	1028.2	563.3233	1.83			
	M4.1.P0	143.48	70.70	1041.1	563.2745	1.85			
	M4.2.P0	143.69	70.35	1043.1	558.5276	1.87	1.84	0.02999	1.63%
	M4.3.P0	143.61	70.68	1012.3	563.4659	1.80			
	M5.1.P0	143.45	70.53	1050.0	560.4517	1.87			
	M5.2.P0	143.46	70.45	1042.7	559.22	1.86	1.87	0.00614	0.33%
	M5.3.P0	143.13	70.67	1055.2	561.4237	1.88			
<b>100</b>	M1.1.P1	143.63	70.47	1006.2	560.2006	1.80			
	M1.2.P1	143.16	70.52	1026.3	559.1601	1.84	1.82	0.01612	0.89%
	M1.3.P1	143.92	70.63	1025.8	563.8836	1.82			
	M2.1.P1	143.04	70.26	1031.4	554.5793	1.86			
	M2.2.P1	143.64	70.32	1049.5	557.8571	1.88	1.86	0.01441	0.77%
	M2.3.P1	143.35	70.60	1036.1	561.1733	1.85			
	M3.1.P1	144.31	70.51	1017.5	563.492	1.81			
	M3.2.P1	143.44	70.64	1035.4	562.1621	1.84	1.82	0.01475	0.81%
	M3.3.P1	143.78	70.59	1026.9	562.6972	1.82			
	M4.1.P1	144.20	70.60	1032.6	564.5008	1.83			
	M4.2.P1	143.97	70.60	1040.3	563.6004	1.85	1.84	0.00760	0.41%
	M4.3.P1	143.37	70.63	1036.3	561.7287	1.84			
	M5.1.P1	142.58	70.44	1037.1	555.6319	1.87			
	M5.2.P1	142.57	70.54	1034.9	557.1716	1.86	1.86	0.00394	0.21%
	M5.3.P1	143.19	70.57	1041.3	560.0706	1.86			
<b>200</b>	M1.1.P2	143.46	70.41	1012.1	558.5852	1.81			
	M1.2.P2	142.86	70.52	1017.0	557.9884	1.82	1.82	0.00442	0.24%
	M1.3.P2	143.70	70.54	1021.3	561.5877	1.82			
	M2.1.P2	143.01	70.57	1038.2	559.3666	1.86			
	M2.2.P2	143.60	70.49	1034.5	560.4016	1.85	1.85	0.00537	0.29%
	M2.3.P2	143.66	70.52	1034.5	561.113	1.84			
	M3.1.P2	143.94	70.58	1018.0	563.1637	1.81			
	M3.2.P2	144.08	70.58	1020.1	563.7115	1.81	1.81	0.00886	0.49%
	M3.3.P2	144.45	70.50	1030.4	563.8787	1.83			

**Anexo I**  
Características Iniciais das Amostras

<b>Caraterísticas Iniciais das Amostras</b>									
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Provete ID</b>	<b>l<sub>o</sub> (mm)</b>	<b>d<sub>o</sub> (mm)</b>	<b>m<sub>o</sub> (g)</b>	<b>V (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Y (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Y<sub>médio</sub> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>σ</b>	<b>CdV (%)</b>
<b>200</b>	M4.1.P2	142.54	70.49	1029.5	556.2649	1.85			
	M4.2.P2	142.54	70.52	1020.8	556.7385	1.83	1.84	0.00713	0.39%
	M4.3.P2	143.50	70.48	1032.8	559.8524	1.84			
	M5.1.P2	143.24	70.56	1039.4	560.1074	1.86			
	M5.2.P2	142.39	70.49	1040.9	555.6795	1.87	1.86	0.00743	0.40%
	M5.3.P2	142.98	70.46	1037.0	557.5072	1.86			
<b>400</b>	M1.1.P3	142.80	70.63	1026.0	559.5429	1.83			
	M1.2.P3	143.80	70.43	1010.7	560.2271	1.80	1.82	0.01612	0.89%
	M1.3.P3	143.41	70.45	1008.9	559.0251	1.80			
	M2.1.P3	143.52	70.41	1032.1	558.8188	1.85			
	M2.2.P3	143.69	70.61	1035.8	562.6636	1.84	1.81	0.01378	0.76%
	M2.3.P3	142.96	70.52	1036.4	558.3789	1.86			
	M3.1.P3	144.16	70.42	1034.9	561.4702	1.84			
	M3.2.P3	143.73	70.68	1032.1	563.9367	1.83	1.85	0.00625	0.34%
	M3.3.P3	143.77	69.98	1007.0	552.9757	1.82			
	M4.1.P3	143.66	70.49	1025.4	560.6357	1.83			
	M4.2.P3	144.40	70.47	1018.1	563.2039	1.81	1.83	0.00909	0.50%
	M4.3.P3	143.10	70.42	1008.5	557.3417	1.81			
	M5.1.P3	143.41	70.53	1022.5	560.2954	1.82			
	M5.2.P3	143.05	70.21	1022.8	553.829	1.85	1.82	0.00965	0.53%
	M5.3.P3	143.61	70.50	1024.5	560.6473	1.83			
<b>600</b>	M1.1.P4	144.20	70.73	1036.3	566.5816	1.83			
	M1.2.P4	144.80	70.40	1008.1	563.6425	1.79	1.79	0.02810	1.57%
	M1.3.P4	143.06	70.41	980.7	557.0277	1.76			
	M2.1.P4	143.45	70.20	1007.5	555.2194	1.81			
	M2.2.P4	143.33	70.23	1007.3	555.2292	1.81	1.82	0.00458	0.25%
	M2.3.P4	143.52	70.27	1015.3	556.5987	1.82			
	M3.1.P4	143.29	70.36	996.4	557.1311	1.79			
	M3.2.P4	144.80	70.23	995.8	560.9237	1.78	1.78	0.00890	0.50%
	M3.3.P4	143.78	70.16	982.1	555.8627	1.77			
	M4.1.P4	143.51	70.33	1010.9	557.5108	1.81			
	M4.2.P4	143.68	70.12	1004.9	554.8429	1.81	1.81	0.00339	0.19%
	M4.3.P4	143.47	70.17	1009.3	554.8223	1.82			
	M5.1.P4	142.93	70.68	1020.5	560.7979	1.82			
	M5.2.P4	143.85	70.29	1026.5	558.1961	1.84	1.82	0.01037	0.57%
	M5.3.P4	143.44	70.39	1013.1	558.19	1.81			



**Anexo I**  
Características Iniciais das Amostras

Caraterísticas Iniciais das Amostras									
Temperatura (°C)	Provete ID	$l_0$ (mm)	$d_0$ (mm)	$m_0$ (g)	$V$ (cm <sup>3</sup> )	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{\text{médio}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma$	CdV (%)
<b>800</b>	M1.1.P5	143.28	70.48	1018.9	558.9941	1.82			
	M1.2.P5	143.36	70.27	978.0	555.9782	1.76	1.79	0.02610	1.46%
	M1.3.P5	142.81	70.45	999.7	556.6863	1.80			
	M2.1.P5	142.89	70.27	1001.7	554.1555	1.81			
	M2.2.P5	142.45	70.30	1001.4	552.9209	1.81	1.81	0.00199	0.11%
	M2.3.P5	143.25	70.37	1009.7	557.1339	1.81			
	M3.1.P5	144.34	70.31	997.9	560.4163	1.78			
	M3.2.P5	143.77	70.43	999.9	560.1103	1.79	1.78	0.00319	0.18%
	M3.3.P5	144.10	70.33	995.0	559.8028	1.78			
	M4.1.P5	143.40	70.33	999.8	557.0835	1.79			
	M4.2.P5	143.62	70.32	1001.8	557.7795	1.80	1.80	0.00953	0.53%
	M4.3.P5	143.11	70.31	1008.8	555.6407	1.82			
	M5.1.P5	142.30	70.36	1009.8	553.2819	1.83			
	M5.2.P5	142.98	70.20	1008.1	553.4003	1.82	1.82	0.00700	0.38%
	M5.3.P5	143.03	70.31	1004.5	555.3301	1.81			



## Anexo II

Temperatura (°C)	Provete ID	Tensão				Extensão de Compressão Máxima			
		T (N/mm <sup>2</sup> )	T <sub>média</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$	CdV (%)	$\epsilon$ (mm/mm)	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (mm/mm)	$\sigma$	CdV (%)
20	M1.1.P0	3.497				0.0096			
	M1.2.P0	3.598	3.599	0.10200	2.83%	0.0136	0.0122	0.00186	15.22%
	M1.3.P0	3.701				0.0135			
	M2.1.P0	5.269				0.0113			
	M2.2.P0	4.723	4.864	0.35572	7.31%	0.0124	0.0122	0.00063	5.21%
	M2.3.P0	4.601				0.0128			
	M3.1.P0	3.208				0.0136			
	M3.2.P0	3.254	3.232	0.02312	0.72%	0.0143	0.0142	0.00042	2.96%
	M3.3.P0	3.235				0.0146			
	M4.1.P0	3.561				0.0103			
	M4.2.P0	3.757	3.670	0.09995	2.72%	0.0117	0.0117	0.00110	9.45%
	M4.3.P0	3.693				0.0130			
	M5.1.P0	4.167				0.0115			
	M5.2.P0	4.855	4.511	0.34400	7.63%	0.0121	0.0118	0.00030	2.54%
	M5.3.P0	4.510				-- --			
100	M1.1.P1	3.559				0.0146			
	M1.2.P1	3.627	3.525	0.12259	3.48%	0.0137	0.0145	0.00065	4.51%
	M1.3.P1	3.389				0.0153			
	M2.1.P1	4.469				0.0105			
	M2.2.P1	4.100	4.369	0.23550	5.39%	0.0118	0.0114	0.00064	5.59%
	M2.3.P1	4.538				0.0119			
	M3.1.P1	3.471				0.0148			
	M3.2.P1	3.088	3.295	0.19329	5.87%	0.0142	0.0147	0.00041	2.79%
	M3.3.P1	3.325				0.0152			
	M4.1.P1	3.399				0.0175			
	M4.2.P1	3.619	3.643	0.25632	7.04%	0.0141	0.0155	0.00145	9.36%
	M4.3.P1	3.910				0.0149			
	M5.1.P1	4.683				0.0128			
	M5.2.P1	5.094	4.797	0.25916	5.40%	0.0139	0.0128	0.00086	6.68%
	M5.3.P1	4.615				0.0118			
200	M1.1.P2	4.512				0.0174			
	M1.2.P2	4.469	4.367	0.21499	4.92%	0.0160	0.0156	0.00166	10.62%
	M1.3.P2	4.120				0.0134			
	M2.1.P2	4.737				0.0153			
	M2.2.P2	5.426	5.018	0.36163	7.21%	0.0130	0.0144	0.00100	6.97%
	M2.3.P2	4.891				0.0149			
	M3.1.P2	3.978				0.0167			
	M3.2.P2	3.506	3.828	0.27939	7.30%	0.0133	0.0155	0.00156	10.05%
	M3.3.P2	4.001				0.0165			

**Anexo II**

Resultados dos Ensaio de Resistência Termomecânica em Regime Estacionário

Temperatura (°C)	Provete ID	Tensão				Extensão de Compressão Máxima			
		T (N/mm <sup>2</sup> )	T <sub>média</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$	CdV (%)	$\epsilon$ (mm/mm)	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (mm/mm)	$\sigma$	CdV (%)
200	M4.1.P2	5.341				0.0132			
	M4.2.P2	4.576	4.876	0.40812	8.37%	0.0118	0.0127	0.00066	5.18%
	M4.3.P2	4.712				0.0132			
	M5.1.P2	5.061				0.0138			
	M5.2.P2	6.029	5.472	0.50024	9.14%	0.0145	0.0140	0.00039	2.76%
	M5.3.P2	5.326				0.0136			
400	M1.1.P3	6.218				0.0188			
	M1.2.P3	5.504	5.833	0.36028	6.18%	0.0202	0.0193	0.00064	3.30%
	M1.3.P3	5.777				0.0189			
	M2.1.P3	7.824				0.0198			
	M2.2.P3	8.265	8.011	0.22815	2.85%	0.0215	0.0207	0.00069	3.36%
	M2.3.P3	7.943				0.0207			
	M3.1.P3	6.683				0.0230			
	M3.2.P3	6.637	6.390	0.46880	7.34%	0.0216	0.0220	0.00071	3.24%
	M3.3.P3	5.849				0.0214			
	M4.1.P3	6.530				0.0182			
	M4.2.P3	6.919	6.516	0.41018	6.29%	0.0181	0.0199	0.00252	12.65%
	M4.3.P3	6.099				0.0235			
	M5.1.P3	9.075				0.0258			
	M5.2.P3	9.150	8.956	0.27422	3.06%	0.0220	0.0237	0.00158	6.65%
	M5.3.P3	8.642				0.0233			
600	M1.1.P4	5.400				0.0193			
	M1.2.P4	5.512	5.499	0.09318	1.69%	0.0229	0.0216	0.00163	7.55%
	M1.3.P4	5.585				0.0226			
	M2.1.P4	7.122				0.0268			
	M2.2.P4	6.933	7.149	0.23121	3.23%	0.0235	0.0248	0.00142	5.72%
	M2.3.P4	7.393				0.0242			
	M3.1.P4	6.192				0.0194			
	M3.2.P4	5.913	6.006	0.16079	2.68%	0.0219	0.0207	0.00103	4.96%
	M3.3.P4	5.914				0.0209			

**Anexo II**

Resultados dos Ensaio de Resistência Termomecânica em Regime Estacionário

Temperatura (°C)	Provete ID	Tensão				Extensão de Compressão Máxima			
		T (N/mm <sup>2</sup> )	T <sub>média</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$	CdV (%)	$\epsilon$ (mm/mm)	$\epsilon_{m\acute{e}dia}$ (mm/mm)	$\Sigma$	CdV (%)
600	M4.1.P4	6.156				0.0230			
	M4.2.P4	7.107	6.385	0.63905	10.01%	0.0204	0.0228	0.00192	8.42%
	M4.3.P4	5.892				0.0251			
	M5.1.P4	8.161				0.0204			
	M5.2.P4	9.326	8.507	0.71244	8.38%	0.0196	0.0222	0.00308	13.90%
	M5.3.P4	8.033				0.0265			
800	M1.1.P5	4.270				0.0324			
	M1.2.P5	4.112	4.333	0.25888	5.97%	0.0370	0.0342	0.00199	5.81%
	M1.3.P5	4.618				0.0333			
	M2.1.P5	5.934				0.0388			
	M2.2.P5	5.953	5.986	0.07422	1.24%	0.0375	0.0377	0.00087	2.30%
	M2.3.P5	6.071				0.0367			
	M3.1.P5	5.363				0.0405			
	M3.2.P5	4.439	4.869	0.46538	9.56%	0.0441	0.0401	0.00344	8.58%
	M3.3.P5	4.804				0.0357			
	M4.1.P5	5.727				0.0356			
	M4.2.P5	5.281	5.438	0.25033	4.60%	0.0392	0.0381	0.00177	4.65%
	M4.3.P5	5.307				0.0395			
M5.1.P5	8.523				0.0408				
M5.2.P5	8.551	8.245	0.50595	6.14%	0.0448	0.0405	0.00368	9.10%	
M5.3.P5	7.661				0.0358				