

PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DE MATERIAIS – CONSTRUÇÃO DE BASE DE DADOS ESTOCÁSTICOS PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

INÊS MARGARIDA PAIVA DE ARAÚJO NOVO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

Co-Orientador: Professora Doutora Maria de Lurdes de Oliveira
Simões

JULHO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha avó Ilda
À minha mãe

*Estuda e trabalha no duro, senão um dia verás,
o que nos faz o futuro, quando a gente não o faz.*

Hermínio Beato de Oliveira

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos, por toda a disponibilidade, dedicação, pela sua boa disposição e por ter acreditado em mim ao longo destes meses de trabalho. Agradeço a proposta do tema, de carácter inovador e estimulante.

À Professora Doutora Maria de Lurdes de Oliveira Simões, co-orientadora da área de Estatística, pelo seu apoio na utilização do software *SPSS Statistics*, na compreensão de resultados e na clarificação de dúvidas. Agradeço em especial as suas correcções atentas e a sua grande simpatia.

Agradeço a todos os meus colegas de curso, pelo companheirismo ao longo destes anos, por toda a ajuda e pelas as palavras de motivação, tendo tornado esta jornada mais aprazível. Em especial à Diana Torres, Gabriela Fernandes, Manuela Passos, Pedro Fonte e Rui Duarte, por se terem tornado amigos eternos.

Ao João, por todos os momentos de encorajamento, de paciência e carinho que me dedicou e dedica todos os dias.

À minha família, em especial aos meus tios Carlos e Ilda, pela sua fibra e carácter, e por todo o esforço dedicado à nossa família.

À minha mãe, avó e irmã, pelo apoio incondicional e pela enorme demonstração de força ao longo destes anos. Sem vocês, não estaria aqui.

Um profundo obrigada a todos!

RESUMO

O desempenho higrotérmico dos edifícios tem sido alvo de exigências crescentes nas últimas décadas, tanto ao nível da construção nova como ao nível da reabilitação de edifícios. A escolha adequada de materiais e de tecnologias de construção é, cada vez mais, apoiada por programas de simulação numérica que simulam o comportamento higrotérmico dos edifícios. As propriedades higrotérmicas dos materiais constituem um dos pilares para a realização das simulações numéricas, servindo, paralelamente, para consulta por parte de profissionais da área.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação incidiu na aplicação de ferramentas estatísticas adequadas ao tratamento de propriedades higrotérmicas, num contexto de construção de bases de dados para simulação numérica. Pretendeu-se evidenciar, com este tratamento, a importância da variabilidade das propriedades higrotérmicas nos diferentes materiais, que pode afectar significativamente os resultados das simulações.

O estado da arte realizado sobre os programas de simulação numérica existentes e sobre propriedades higrotérmicas permitiu, por um lado, conhecer quais as principais diferenças de cada programa ao nível das propriedades higrotérmicas. Por outro lado, permitiu aferir quais são as técnicas laboratoriais utilizadas na medição destas propriedades.

O estado da arte sobre o tratamento estatístico permitiu apurar quais as ferramentas estatísticas mais adequadas para a caracterização das propriedades higrotérmicas. São elas a estatística descritiva (medidas estatísticas, gráficos e tabelas), que resume as principais características de um conjunto de dados, e os testes não-paramétricos *K-S* e Qui-Quadrado, que verificam o ajustamento de distribuições amostrais a curvas teóricas, permitindo uma caracterização mais eficaz dessas distribuições.

A aplicação das ferramentas estatísticas a um conjunto de amostras de sete propriedades higrotérmicas em cinco materiais específicos permitiu caracterizar devidamente as propriedades com amostras de maior dimensão (no presente caso, a massa volúmica e porosidade aberta total). Percebeu-se, por outro lado, as limitações decorrentes da aplicação destas ferramentas em amostras de pequena dimensão (neste trabalho, a saturação capilar, condutibilidade térmica, calor específico, permeabilidade ao vapor de água e coeficiente de absorção de água).

Na sequência deste exercício estatístico, foram compostos Quadros Resumo com os principais indicadores e gráficos estatísticos a serem integrados numa base de dados.

Dado que alguns programas de simulação numérica utilizam valores de propriedades existentes na literatura, procedeu-se, posteriormente, à aplicação das mesmas ferramentas estatísticas em dados de propriedades higrotérmicas recolhidas na literatura, em materiais genéricos. O seu propósito centrou-se na caracterização das propriedades quanto aos seus valores médios e quanto à sua dispersão/variabilidade.

Por fim, foi efectuado um estudo comparativo entre os resultados estatísticos referentes às amostras de propriedades higrotérmicas em materiais específicos e em materiais genéricos da mesma natureza, de forma a verificar o encaixe de ambos.

PALAVRAS-CHAVE: Análise estatística, Apoio à decisão, Bases de dados, Variabilidade das propriedades dos materiais, Simulação higrotérmica.

ABSTRACT

Higher demands have been made in the past decades regarding the hygrothermal performance of buildings in new and retrofit construction. Hygrothermal simulation plays an important role in the assessment of building materials and construction techniques. Material properties are part of the data package required for hygrothermal simulation and can be used for consultation by professionals as well.

The work developed in this dissertation focused on the application of statistical tools in a material data base for hygrothermal simulation. This statistical treatment of the hygrothermal properties intends to demonstrate its variability, which can significantly affect the accuracy of simulation results.

The state-of-the-art elaborated on hygrothermal simulation programs and hygrothermal properties has shown the most important differences in each program regarding material properties. It has also shown different laboratory methods for measuring material properties.

According to the state-of-the-art on statistical matters, descriptive statistics – that describe the main features of data samples – and non-parametric tests such as *K-S* and Chi-Square – that compare a sampling distribution with a reference distribution – are the best tools to achieve the goal that was set.

The application of statistical tools to a set of seven samples of hygrothermal properties in five different materials has allowed a proper description of the biggest data samples (bulk density and total open porosity). On the other hand it became clear the limitations of the same statistical application in the smallest data samples (capillary saturation, thermal conductivity, specific heat capacity, dry cup value and water uptake coefficient).

Following this statistical exercise, summary tables were made with key indicators and statistical graphs ready to be integrated in a data base.

Since some simulation programs use hygrothermal property values from the literature, the same statistical tools were applied on data samples available in literature. Its purpose was focused on their mean values and data variability.

Finally, a comparative study of the statistical results between the hygrothermal properties in specific materials and the hygrothermal properties in generic materials was done in order to verify their fit.

KEYWORDS: Construction advisement, Data base, Hygrothermal simulation, Statistical analysis, Variability of material properties

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA E PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	5
2.1. ENQUADRAMENTO GERAL	5
2.2. A SIMULAÇÃO NUMÉRICA E AS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS	5
2.2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2.2. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA	6
2.2.3. DADOS PARA A SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA	7
2.2.4. PROPRIEDADES E PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA	8
2.3. PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS MEDIDAS EM LABORATÓRIO	9
2.3.1. MASSA VOLÚMICA	10
2.3.2. POROSIDADE ABERTA TOTAL	10
2.3.3. SATURAÇÃO CAPILAR	11
2.3.4. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA	11
2.3.5. CALOR ESPECÍFICO	13
2.3.6. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	13
2.3.7. PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA	14
2.3.8. A INCERTEZA DOS DADOS MEDIDOS EM LABORATÓRIO	15
3. PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS PARA O TRATAMENTO DE DADOS DE PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS	17
3.1. ENQUADRAMENTO GERAL	17

3.2. DADOS ESTOCÁSTICOS	17
3.3. ESTATÍSTICA DESCRITIVA	18
3.3.1. MEDIDAS DESCRITIVAS.....	18
3.3.2. HISTOGRAMA	23
3.3.3. CAIXA-DE-BIGODES	25
3.4. TESTES DE AJUSTE DE DISTRIBUIÇÕES	29
3.4.1. TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	29
3.4.2. TESTE QUI-QUADRADO.....	30

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS NO TRATAMENTO DE DADOS DE PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS..... 33

4.1. ENQUADRAMENTO GERAL	33
4.2. ANÁLISE DESCRITIVA DAS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS	33
4.2.1. ANÁLISE DESCRITIVA DAS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS NOS DIFERENTES MATERIAIS	33
4.2.1.1. Análise descritiva por propriedade	36
4.2.1.2. Análise descritiva por material.....	46
4.2.2. ANÁLISE DESCRITIVA DA PERMEABILIDADE AO VAPOR NO GESSO COM DIFERENTES TIPOS DE PINTURA	48
4.3. AJUSTE DE DISTRIBUIÇÕES.....	49
4.3.1. APLICAÇÃO DO TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	50
4.3.2. APLICAÇÃO DO TESTE QUI-QUADRADO	56
4.3.3. FUNÇÕES DE FREQUÊNCIAS	59
4.4. SÍNTESE DA ANÁLISE DO CAPÍTULO 4.....	60

5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DE PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DA LITERATURA..... 63

5.1. ENQUADRAMENTO	63
5.2. PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS RECOLHIDAS NA LITERATURA	64
5.2.1. BETÃO NORMAL.....	67
5.2.2. BETÃO CELULAR AUTOCLAVADO	68
5.2.3. PEDRA CALCÁRIA	69
5.2.4. ARENITO.....	70

5.2.5. TIJOLO CERÂMICO	71
5.2.6. CONTRAPLACADO	73
5.2.7. ISOLAMENTO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	75
5.2.8. ISOLAMENTO DE POLIESTIRENO EXTRUDIDO.....	76
5.2.9. ARGAMASSA DE CIMENTO	77
5.2.10. ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL.....	78
5.2.11. GESSO PROJECTADO	79
5.2.12. GESSO EM PAINÉL.....	80
5.3. ANÁLISE DESCRITIVA DAS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS RECOLHIDAS NA LITERATURA	81
5.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS RECOLHIDAS E AS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DO CAPÍTULO 4	90
5.5. SÍNTESE DA ANÁLISE DOS DO CAPÍTULO 5	99
 6. CONCLUSÕES	105
6.1. CONCLUSÕES GERAIS	105
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	107
 BIBLIOGRAFIA	109
 ANEXOS	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. – Fluxograma dos dados para modelos de simulação higrotérmica	7
Fig. 2.2. – Equipamento Holometrix GHP-300 do LFC da FEUP, utilizado para medir a condutibilidade térmica (LFC, 2007).....	12
Fig. 2.3. – Equipamento CT-Mètre do LFC da FEUP, utilizado para medir a condutibilidade térmica (LFC, 2007)	12
Fig. 2.4. – Esquema de uma tina de ensaio (Ramos, 2007)	14
Fig. 2.5. – Esquema do fluxo de vapor dos Métodos Tina Seca e Tina Húmida	15
Fig. 3.1. – Gráfico das frequências acumuladas (F_i) da classe que contém a mediana	19
Fig. 3.2. – Média (a azul) e desvio-padrão (preto) das amostras A e B.....	22
Fig. 3.3. – Forma da curva de distribuição de frequências consoante o valor de g_1	23
Fig. 3.4. – Histograma de frequências absolutas (efectivos)	24
Fig. 3.5. – Formas possíveis dos histogramas.....	25
Fig. 3.6. – Representação de uma caixa-de-bigodes sem valores discrepantes.....	26
Fig. 3.7. – Representação de uma caixa-de-bigodes com valores discrepantes.....	26
Fig. 3.8. – Caixa-de-bigodes com valores discrepantes e extremamente discrepantes máximos	27
Fig. 3.9.a) – Formas possíveis da caixa-de-bigodes conforme a distribuição simétrica	28
Fig. 3.9.b) – Formas possíveis da caixa-de-bigodes conforme a distribuição assimétrica à esquerda	28
Fig. 3.9.c) – Formas possíveis da caixa-de-bigodes conforme a distribuição assimétrica à direita	28
Fig. 4.1. – Diferentes perspectivas de análise das medidas descritivas	35
Fig. 4.2. – Análise descritiva segundo a direcção horizontal (a verde) e segundo a direcção vertical (a amarelo).....	35
Fig. 4.3. – Média e desvio-padrão da massa volúmica nos quatro materiais considerados.....	36
Fig. 4.4. – Histograma da massa volúmica na pedra	37
Fig. 4.5. – Caixa-de-bigodes da massa volúmica na pedra	37
Fig. 4.6. – Histograma da massa volúmica na argamassa de cimento e cal	37
Fig. 4.7. – Caixa-de-bigodes da massa volúmica na argamassa de cimento e cal	37
Fig. 4.8. – Histograma da massa volúmica no isolamento.....	38
Fig. 4.9. – Caixa-de-bigodes da massa volúmica no isolamento	38
Fig. 4.10. – Média e desvio-padrão da porosidade aberta total nos quatro materiais considerados ...	38
Fig. 4.11. – Histograma da porosidade aberta total no tijolo cerâmico	39
Fig. 4.12. – Caixa-de-bigodes da porosidade aberta total no tijolo cerâmico	39
Fig. 4.13. – Histograma da porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal	39

Fig. 4.14. – Caixa-de-bigodes da porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal.....	39
Fig. 4.15. – Histograma da porosidade aberta total no isolamento	40
Fig. 4.16. – Caixa-de-bigodes da porosidade aberta total no isolamento	40
Fig. 4.17. – Média e desvio-padrão da saturação capilar nos quatro materiais considerados.....	41
Fig. 4.18.a) – Histogramas da saturação capilar na argamassa de cimento e cal com amplitude de classes igual a 0,010	42
Fig. 4.18.b) – Histogramas da saturação capilar na argamassa de cimento e cal com amplitude de classes igual a 0,015	42
Fig. 4.18.c) – Histogramas da saturação capilar na argamassa de cimento e cal com amplitude de classes igual a 0,020	42
Fig. 4.19. – Média e desvio-padrão da condutibilidade térmica nos quatro materiais considerados	43
Fig. 4.20. – Média e desvio-padrão do calor específico nos quatro materiais considerados	44
Fig. 4.21. – Média e desvio-padrão do coeficiente de absorção de água nos quatro materiais considerados	45
Fig. 4.22. – Média e desvio-padrão da permeabilidade ao vapor de água nos quatro materiais considerados	46
Fig. 4.23. – Média e desvio-padrão da permeabilidade ao vapor de água no gesso com diferentes pinturas.....	49
Fig. 4.24. – Histograma da massa volúmica no tijolo cerâmico.....	50
Fig. 4.25. – Histograma da porosidade aberta total na pedra.....	50
Fig. 4.26. – Histograma da massa volúmica na pedra com ajustamento da curva da lei Normal.....	52
Fig. 4.27. – Histograma da massa volúmica no tijolo cerâmico com ajustamento da curva da lei Normal	52
Fig. 4.28. – Histograma da porosidade aberta total na pedra com ajustamento da curva da lei Normal	53
Fig. 4.29. – Histograma da porosidade aberta total no tijolo cerâmico com ajustamento da curva da lei Normal	54
Fig. 4.30. – Histograma da porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal.....	59
Fig. 5.1. – Média e desvio-padrão da massa volúmica (ρ) em diversos materiais	84
Fig. 5.2. – Média e desvio-padrão da condutibilidade térmica (λ) em diversos materiais	85
Fig. 5.3. – Média e desvio-padrão do calor específico (c) em diversos materiais	86
Fig. 5.4. – Média e desvio-padrão da permeabilidade ao vapor de água (μ) em diversos materiais	87
Fig. 5.5. – Média e desvio-padrão do coeficiente de absorção de água (A_w) no betão normal, betão celular autoclavado e tijolo cerâmico	88
Fig. 5.6. – Comparação dos valores médios das quatro propriedades analisadas no arenito	91
Fig. 5.7. – Comparação dos coeficientes de variação das quatro propriedades analisadas no arenito	92

Fig. 5.8. – Comparação dos valores médios das quatro propriedades analisadas no argamassa de cimento e cal.....	93
Fig. 5.9. – Comparação dos coeficientes de variação das quatro propriedades analisadas na argamassa de cimento e cal.....	94
Fig. 5.10. – Comparação dos valores médios das quatro propriedades analisadas no tijolo cerâmico	95
Fig. 5.11. – Comparação dos coeficientes de variação das quatro propriedades analisadas no tijolo cerâmico	96
Fig. 5.12. – Comparação dos valores médios da permeabilidade ao vapor de água no gesso	98
Fig. 5.13. – Comparação dos coeficientes de variação da permeabilidade ao vapor de água no gesso	98
Fig. 5.14. – Comparação dos coeficientes de variação das propriedades higrotérmicas nos diversos materiais	100
Fig. 5.15. – Comparação dos coeficientes de variação das propriedades higrotérmicas do Cap.4 e Cap.5	102

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. – Programas de simulação higrotérmica disponíveis ao público ao geral (Delgado <i>et al.</i> , 2010)	8
Quadro 2.2. – Lista de propriedades utilizadas em programas de simulação higrotérmica (Delgado <i>et al.</i> , 2010).....	9
Quadro 3.1. – Medidas descritivas de duas amostras distintas.....	21
Quadro 4.1. – Medidas descritivas das propriedades higrotérmicas por material	33
Quadro 4.2. – Medidas descritivas da permeabilidade ao vapor de água no gesso pintado	48
Quadro 4.3. – Aplicação do teste <i>Kolmogorov-Smirnov</i> para ajuste da lei Normal à massa volúmica na pedra e no tijolo cerâmico	51
Quadro 4.4. – Aplicação do teste <i>Kolmogorov-Smirnov</i> , para ajuste da lei Normal à porosidade aberta total na pedra e no tijolo cerâmico	53
Quadro 4.5. – Aplicação do teste <i>Kolmogorov-Smirnov</i> , para ajuste da lei Normal à massa volúmica na argamassa de cimento e cal	54
Quadro 4.6. – Aplicação do teste <i>Kolmogorov-Smirnov</i> , para ajuste da lei Normal à porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal.....	55
Quadro 4.7. – Aplicação do teste <i>Kolmogorov-Smirnov</i> , para ajuste da lei Exponencial à massa volúmica no isolamento.....	55
Quadro 4.8. – Aplicação do teste <i>Kolmogorov-Smirnov</i> , para ajuste da lei Exponencial à porosidade aberta total no isolamento	56
Quadro 4.9. – Aplicação do teste Qui-Quadrado, para ajuste da distribuição Normal à massa volúmica na argamassa de cimento e cal	57
Quadro 4.10. – Aplicação do teste Qui-Quadrado, para ajuste da lei Normal à porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal	58
Quadro 5.1. – Fontes da literatura de valores de propriedades higrotérmicas em diversos materiais	64
Quadro 5.2. – Propriedades higrotérmicas da literatura no betão normal	67
Quadro 5.3. – Propriedades higrotérmicas da literatura no betão celular autoclavado	68
Quadro 5.4. – Propriedades higrotérmicas da literatura na pedra calcária	69
Quadro 5.5. – Propriedades higrotérmicas da literatura no arenito	70
Quadro 5.6. – Propriedades higrotérmicas da literatura no tijolo cerâmico	71
Quadro 5.7. – Propriedades higrotérmicas da literatura em contraplacado	73
Quadro 5.8. – Propriedades higrotérmicas da literatura em isolamento de poliestireno expandido	75
Quadro 5.9. – Propriedades higrotérmicas da literatura em isolamento de poliestireno extrudido	76
Quadro 5.10. – Propriedades higrotérmicas da literatura na argamassa e cimento	77
Quadro 5.11. – Propriedades higrotérmicas da literatura na argamassa de cimento e cal.....	78

Quadro 5.12. – Propriedades higrotérmicas da literatura no gesso projectado.....	79
Quadro 5.13. – Propriedades higrotérmicas da literatura no gesso em painel	80
Quadro 5.14. – Siglas para designação dos materiais.....	81
Quadro 5.15. – Medidas descritivas da massa volúmica, condutibilidade térmica e calor específico nos diversos materiais	82
Quadro 5.16. – Medidas descritivas da permeabilidade ao vapor de água e coeficiente de absorção de água nos diversos materiais	83
Quadro 5.17. – Medidas descritivas das propriedades higrotérmicas nos diversos materiais	90
Quadro 5.18. – Medidas descritivas das permeabilidade ao vapor e água no gesso	97

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A_w – coeficiente de absorção de água [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$]

c – calor específico [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]

c_v – coeficiente de variação [%]

g_1 – coeficiente de assimetria

m_a – massa do provete saturado imerso em água [kg]

m_{cap} – massa do provete saturado para medição da saturação capilar [kg]

m_d – massa do provete seco para medição da porosidade aberta total [kg]

M_e – mediana

m_o – massa do provete seco para medição da saturação capilar [kg]

m_{seco} – massa do provete seco [kg]

m_w – massa do provete saturado para medição da porosidade aberta total [kg]

N – dimensão da amostra

s_x – desvio-padrão

V_{total} – volume total do provete [m^3]

w_c – saturação capilar [m^3/m^3]

$\bar{x}$ – média

χ^2 – Qui-Quadrado

α – nível de significância

δ_a – permeabilidade ao vapor do ar [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$]

δ_p – permeabilidade ao vapor de um material [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$]

ε – porosidade total [m^3/m^3]

λ – condutibilidade térmica [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]

μ – factor de resistência à difusão ao vapor de água [-]

ρ – massa volúmica [kg/m^3]

ρ_l – densidade da água líquida [kg/m^3]

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HR – Humidade Relativa

IEA – Internacional Energy Agency

K-S – Kolmogorov-Smirnov

LFC – Laboratório de Física das Construções

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NIT002 – Nota de Informação Técnica - Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção - Condensações Internas

PATORREB – Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios

SPSS – Statistical Package for the Social Sciences

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Actualmente, a concepção de edifícios e de soluções de reabilitação implica grandes expectativas no domínio do conforto, qualidade, durabilidade e redução do consumo de energia.

A ausência de patologias, decorrentes da acção da humidade e temperatura, são requisitos fundamentais tanto na construção nova como na construção já existente, pois interferem significativamente nos níveis de conforto dos utilizadores e na qualidade/desempenho dos materiais de construção.

Como tal, o bom desempenho higrotérmico dos edifícios constitui uma vertente fundamental para o cumprimento destes requisitos, sendo crucial a análise do comportamento dos elementos construtivos neste âmbito.

O estudo do desempenho higrotérmico dos edifícios é largamente apoiado por programas de simulação numérica que modelam os processos físicos de transferência de humidade e temperatura, e cuja complexidade varia conforme o seu modelo de cálculo. Estes programas assentam, entre outros parâmetros, no conhecimento de propriedades higrotérmicas de materiais que podem ser caracterizadas por um só parâmetro, no caso dos modelos mais simples, ou através de funções, nos modelos de maior complexidade. As propriedades dos materiais são determinadas por técnicas laboratoriais eficazes e podem ser encontradas na literatura, ainda que o seu leque disponível seja um pouco escasso e se encontre longe de abranger a generalidade dos materiais existentes.

Apesar da maioria das técnicas laboratoriais de medição estarem descritas em normas estipuladas por organismos de normalização nacional, regional e internacional (como o IPQ, CEN e ISO), os valores das propriedades estão inevitavelmente associados a um determinado grau de incerteza. Factores intrínsecos ao próprio material e à actividade laboratorial, que mede as propriedades, estão na origem dessa incerteza.

De facto, é possível detectar variabilidade nos valores de propriedades medidas em amostras do mesmo material, provenientes da mesma localidade e produtor. Paralelamente, as medições efectuadas com os mesmos protocolos de medição em laboratórios diferentes, ou até no mesmo laboratório, também evidenciam variabilidade nos valores medidos.

Apesar destes factos serem conhecidos, a generalidade das bases de dados de propriedades inseridas em programas de simulação numérica e, também, em catálogos para consulta de profissionais, não contabiliza a incerteza dos dados. Isto limita as conclusões retiradas das simulações/projecções do

comportamento higrotérmico dos edifícios – cujos cálculos assentam nessas bases de dados – dado que não é possível avaliar o efeito da variabilidade das propriedades.

A presente dissertação pretende utilizar ferramentas estatísticas no tratamento de dados de propriedades higrotérmicas definidas por um só parâmetro, de forma a obter um conjunto de indicadores estatísticos que caracterizam esses dados através de curvas ajustadas, gráficos e de medidas que traduzem a sua centralidade, variabilidade (ou dispersão) e forma.

A utilização desse conjunto de parâmetros, integrados em bases de dados de propriedades, torna possível determinar uma amplitude real do comportamento dos elementos construtivos face às solicitações higrotérmicas, otimizando assim todo o seu processo de simulação. Obtém-se, como consequência, uma melhoria significativa nas decisões construtivas apoiadas nas simulações higrotérmicas, ao nível da construção nova, das soluções de reabilitação e na compreensão de patologias existentes.

1.2. OBJECTIVOS

O principal objectivo da presente dissertação consiste na caracterização estatística de propriedades higrotérmicas definidas por um só parâmetro, num contexto de construção de bases de dados para simulação numérica. Este tratamento é efectuado com o intuito de se caracterizar adequadamente esses dados através de curvas ajustadas, gráficos e medidas descritivas que indicam a sua tendência central, dispersão e forma.

Os parâmetros estatísticos mencionados são determinados através do software *SPSS Statistics* na versão 17.0., e formam um conjunto de indicadores que se pretende que façam parte de uma base de dados estocásticos que, nesta dissertação, não será efectivamente construída por limitações de tempo. Pretende-se mostrar qual seria o caminho a tomar no tratamento e análise estatística, evidenciando-se a importância da variabilidade das propriedades no contexto da simulação higrotérmica.

As propriedades higrotérmicas que serão abordadas são as seguintes: massa volúmica, porosidade aberta total, saturação capilar, condutibilidade térmica, calor específico, permeabilidade ao vapor de água e coeficiente de absorção de água.

De forma a se atingir o objectivo principal, foram delineados objectivos parciais que se apresentam de seguida:

- Abordagem aos programas de simulação numérica do comportamento higrotérmico dos edifícios, existentes actualmente, e as suas principais potencialidades e diferenças – focadas sobretudo no domínio das propriedades higrotérmicas dos materiais;
- Pesquisa de normas existentes que estipulam os procedimentos de determinação das propriedades higrotérmicas em laboratório;
- Recolha de informação sobre a incerteza associada aos dados de propriedades higrotérmicas e respectivas causas;
- Procura de ferramentas estatísticas adequadas ao tratamento de dados de propriedades higrotérmicas, permitindo a sua completa caracterização. Procurar direccionar o tratamento estatístico para o âmbito das bases de dados, dando especial atenção à variabilidade dos dados;
- Análise dos resultados da aplicação de procedimentos estatísticos em dados de propriedades higrotérmicas em cinco materiais específicos, fornecidos pelo projecto *Annex 55* da Agência Internacional de Energia;

- Composição de Quadros Resumo; tal como o nome indica, resumem as principais características das amostras de propriedades higrotérmicas nos materiais analisados;
- Recolha de dados de propriedades higrotérmicas na literatura, em diferentes materiais genéricos;
- Análise dos resultados da aplicação de procedimentos estatísticos nos dados de propriedades higrotérmicas recolhidos na literatura. Análise direccionada para a sua centralidade e variabilidade;
- Análise comparativa entre os resultados das propriedades higrotérmicas em materiais específicos (provenientes do projecto *Annex 55*) e os resultados das propriedades higrotérmicas em materiais genéricos (recolhidas na literatura), de forma a aferir o seu encaixe.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A presente dissertação divide-se em seis capítulos:

- O Capítulo 1 efectua uma introdução ao tema desenvolvido, descrevendo paralelamente os seus principais objectivos e a organização dos restantes capítulos;
- O Capítulo 2 corresponde ao estado da arte de três assuntos distintos: são abordados, em primeiro lugar, os programas de simulação higrotérmica existentes, sendo focadas as suas diferenças e semelhanças quanto às propriedades higrotérmicas dos materiais. Em segundo lugar, são definidas as metodologias de determinação laboratorial das propriedades higrotérmicas, enunciando-se as respectivas normas. Por último, são abordadas, de uma forma geral, as causas das incertezas associadas aos valores das propriedades higrotérmicas;
- O Capítulo 3 diz respeito ao estado da arte de todos os procedimentos estatísticos relevantes para a caracterização adequada das amostras de dados das propriedades higrotérmicas;
- O Capítulo 4, efectua a análise descritiva dos resultados do tratamento estatístico das propriedades higrotérmicas em cinco materiais. Os dados tratados fazem parte do projecto *Annex 55*, da IEA, e dizem respeito a propriedades medidas em laboratório em materiais específicos. Com estes resultados, foram elaborados Quadros Resumo com as principais características das distribuições amostrais das propriedades, tendo sido colocados, posteriormente, em Anexo;
- O Capítulo 5 efectua a análise descritiva dos resultados do tratamento estatístico das propriedades higrotérmicas recolhidas na literatura. Estas propriedades dizem respeito a materiais genéricos. A análise é direccionada essencialmente para a centralidade e dispersão dos dados. Ainda neste capítulo, estabelece-se uma comparação entre as amostras das propriedades higrotérmicas em materiais específicos (do projecto *Annex 55*) as amostras das propriedades higrotérmicas em materiais genéricos (encontradas na literatura);
- O Capítulo 6 resume as principais conclusões retiradas deste trabalho.

2

SIMULAÇÃO NUMÉRICA E PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

2.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Actualmente, a simulação numérica constitui uma ferramenta fundamental na caracterização do comportamento dos edifícios sujeitos à acção da humidade e calor. Os programas de simulação do comportamento higrotérmico dos edifícios têm sido desenvolvidos ao longo de décadas, sendo as propriedades dos materiais parte integrante do conjunto de dados necessários ao seu funcionamento.

Neste capítulo, pretende-se efectuar uma introdução geral aos programas de simulação numérica mais conhecidos, apontando as suas potencialidades e diferenças. Posteriormente, serão abordadas as propriedades higrotérmicas que foram utilizadas no âmbito do Capítulo 4, efectuando-se uma descrição das metodologias laboratoriais que permitem a sua determinação. Por último, será feita uma abordagem ao grau de incerteza a que os seus valores estão associados e suas respectivas causas.

2.2. A SIMULAÇÃO NUMÉRICA E AS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS

2.2.1. INTRODUÇÃO

Entre as principais causas de patologias que ocorrem frequentemente em edifícios, encontram-se as solicitações da humidade e temperatura. Estas patologias são responsáveis pelo desconforto dos utilizadores e interferem significativamente na qualidade e desempenho dos materiais de construção.

Muitas vezes, os problemas decorrentes da humidade resultam de opções construtivas tomadas pela arquitectura e da utilização de novos materiais e tecnologias cujo desempenho não é conhecido na sua totalidade (Ramos *et al.*, 2009).

De acordo com Lanzinha e Freitas (1998), apresentam-se algumas das consequências das solicitações higrotérmicas a que estão sujeitos os materiais:

- Variação da sua resistência mecânica;
- Variação do desempenho térmico;
- Alteração do aspecto estético;
- Efeitos físico-químicos;
- Riscos no domínio da segurança;
- Efeitos biológicos;
- Prejuízos económicos.

De forma a reduzir estas consequências torna-se necessário conhecer devidamente os fenómenos físicos que ocorrem nos elementos construtivos.

Por estes motivos, a temática da higrotérmica tem vindo a exigir, cada vez mais, o desenvolvimento de métodos de simulação numérica que permitam efectuar análises nesse domínio. O seu grande propósito passa por fornecer informação suficiente e fundamentada que sirva de apoio a decisões ao nível construtivo, evidenciando a adequabilidade dos materiais e tecnologias e permitindo, por conseguinte, a garantia de um bom desempenho higrotérmico dos edifícios. Este apoio revela grande utilidade ao nível da construção nova – nomeadamente na antecipação da ocorrência de patologias – e ao nível das soluções de reabilitação, permitindo o solucionamento de patologias existentes.

2.2.2. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA

A temática da humidade e das patologias que dela advêm tem suscitado interesse desde o início do século passado. Contudo, foi apenas a partir das últimas décadas que se iniciou o seu estudo sistemático, impulsionado pelo desenvolvimento de modelos higrotérmicos que analisam o desempenho dos elementos construtivos. Estes modelos são utilizados, normalmente, para simular os processos de transferência de humidade e calor para diferentes cenários. De facto, a sua utilização permite efectuar análises específicas de uma só componente/zona do edifício ou, em alternativa, análises multi-zona.

Actualmente, existem vários programas de simulação do comportamento higrotérmico de edifícios, variando todos eles de forma significativa consoante o grau de detalhe com que os seus respectivos modelos tratam os seguintes aspectos (Straube e Burnett, 1991):

- Direcções consideradas para a transferência de humidade (uni/multidimensional);
- Tipo de regime (estático, quase-estático, dinâmico);
- Dados utilizados na simulação, nomeadamente propriedades dos materiais, clima, condições fronteira e geometria da envolvente.

Em 2007 contabilizava-se a existência de cerca de 57 modelos higrotérmicos provenientes de diversos países. Contudo, grande parte desses modelos não se encontra acessível ao público, sendo apenas utilizados pelas organizações que os desenvolveram. Apenas 14 modelos, desses 57, estão disponíveis ao público em geral, fazendo parte desse conjunto os seguintes programas: 1D-HAM, BSim2000, DELPHIN 5, EMPTIED, HAMlab, WUFI, UMIDUS, entre outros (Delgado *et al.*, 2010).

Os programas de simulação numérica também permitem avaliar diferentes vertentes do domínio da higrotérmica, que variam conforme o modelo de cada programa. Toma-se como exemplo o caso do *WUFI*, cujo modelo permite aferir (LFC, 2010):

- O tempo de secagem de elementos com elevada humidade inicial;
- O risco de condensações intersticiais;
- A influência da chuva nos elementos da envolvente;
- O impacto da reparação ou reabilitação de elementos construtivos;
- O desempenho higrotérmico de elementos construtivos em utilizações imprevistas e diferentes condições climáticas.

Já o programa *BSim2000*, permite avaliar (Delgado *et al.*, 2010):

- Clima interior;

- Consumo de energia;
- Comportamento higrotérmico de elementos construtivos.

Não é do interesse deste trabalho avaliar todas as vertentes de análise dos programas mencionados. Apenas se pretende mostrar que os programas de simulação do comportamento higrotérmico também se distinguem pelos diferentes assuntos que os seus modelos permitem aferir. Assim, a escolha do programa a utilizar depende, naturalmente, do problema vigente e das diferentes vertentes da higrotérmica cuja análise é de maior interesse, tendo como objectivo encontrar a melhor solução construtiva possível.

2.2.3. DADOS PARA A SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação higrotérmica, gerada pelos modelos numéricos, apoia-se na análise dos balanços da humidade, calor e ar. Contudo, apesar dos processos físicos que envolvem o armazenamento e transporte da humidade e calor serem relativamente bem conhecidos, prever as condições de humidade e temperatura no interior dos elementos construtivos não é, de todo, uma tarefa simples (Straube e Burnett, 1991).

As simulações do comportamento higrotérmico dos edifícios requerem o conhecimento de 3 factores essenciais, que constituem os “dados para simulação” (Delgado *et al.*, 2010). Podemos observá-los na Fig.2.1., que se apresenta de seguida:

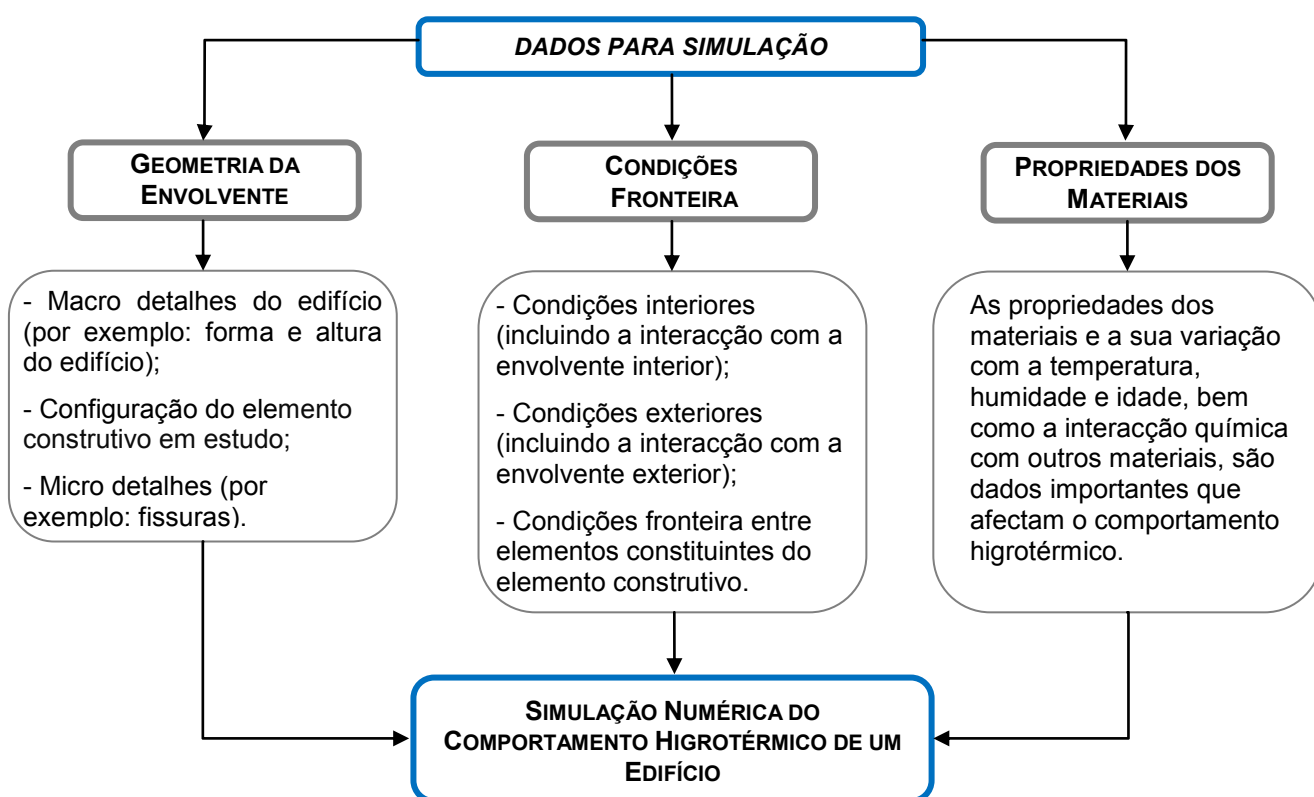


Fig. 2.1. – Fluxograma dos dados para modelos de simulação higrotérmica

Embora tenhamos conhecimento destes três conjuntos de dados distintos, no presente trabalho iremos focar as nossas atenções nas propriedades dos materiais, uma vez que é o tratamento dos dados das propriedades e a sua respectiva análise que será concretizado em capítulos mais adiante.

2.2.4. PROPRIEDADES E PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA

Vimos anteriormente que os programas de simulação numérica diferem entre si a vários níveis: quanto ao grau de detalhe das direcções de transferência de humidade, quanto ao regime de simulação considerado, quanto aos dados utilizados nas simulações e quanto às suas vertentes de análise. De seguida, serão aprofundadas as diferenças existentes quanto às propriedades dos materiais.

São diversas as propriedades dos materiais que permitem caracterizar o comportamento dos elementos construtivos face às solicitações higrotérmicas. No entanto, não existem modelos numéricos que utilizem nos seus cálculos todas as propriedades existentes, sem excepção. De facto, os programas de simulação numérica diferem entre si quanto às propriedades que utilizam e quanto ao número de propriedades que consideram nos seus cálculos – pode dizer-se que as propriedades variam qualitativa e quantitativamente de programa para programa. Podemos visualizar essas diferenças no Quadro 2.1., onde se apresenta a lista dos programas de simulação numérica que estão disponíveis ao público em geral e as respectivas propriedades higrotérmicas consideradas por cada um deles. A legenda das propriedades encontra-se escrita no Quadro 2.2.

Denota-se que há programas que utilizam nos seus cálculos até 11 propriedades (MOIST-EXP), ao contrário de outros que utilizam apenas 5 (GLASTA) ou 6 (1D-HAM, EMPTIED, HAMlab e UMIDUS). Apesar de todas essas diferenças, observa-se que existem três propriedades comuns: a massa volúmica, o calor específico e a condutibilidade térmica.

Quadro 2.1. – Programas de simulação higrotérmica disponíveis ao público ao geral (Delgado *et al.*, 2010)

PROGRAMA	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1D-HAM	x		x	x	x	x							x	
BSim2000	x	x	x	x	x	x						x		x
DELPHIN 5	x	x	x	x	x		x	x	x		x		x	
EMPTIED	x		x	x		x		x					x	
GLASTA	x		x	x		x	x							
hygIRC-1D	x		x	x	x	x		x	x				x	
HAMlab	x		x	x			x			x		x		
HAM-Tools	x	x	x	x	x	x		x			x		x	
IDA-ICE(*)	x		x	x	x	x						x	x	
MATCH	x	x	x	x	x	x		x			x	x		x
MOIST	x		x	x	x	x		x	x				x	
MOIST-EXP	x	x	x	x	x	x		x	x		x	x	x	
UMIDUS	x	x	x	x	x		x							
WUFI(**)	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x		

(*) IDA-ICE versão com HAMWall

(**) WUFI family: WUFI-Plus, WUFI-2D, WUFI-Pro e WUFI-ORNL/IBP

Quadro 2.2. – Lista de propriedades utilizadas em programas de simulação higrotérmica (Delgado *et al.*, 2010)

PROPRIEDADES	
1 Massa volúmica	8 Pressão de sucção
2 Porosidade	9 Difusão líquida
3 Calor específico	10 Factor de resistência à difusão
4 Condutibilidade térmica	11 Condutibilidade da água
5 Curva higroscópica	12 Capacidade higroscópica específica
6 Permeabilidade ao vapor de água	13 Permeabilidade ao ar
7 Difusão de vapor	14 Histerese da curva higroscópica

Verifica-se, então, que as diferenças entre as propriedades higrotérmicas estão associadas essencialmente à avaliação dos processos de transferência de humidade, o que contribui para que os modelos de simulação numérica possam ser mais simples ou mais complexos.

Os modelos de simulação numérica mais simples, de um modo geral, apenas requerem um único parâmetro para definir cada propriedade, como a permeabilidade ao vapor de água e a condutibilidade térmica.

Em contrapartida, os modelos numéricos mais complexos requerem dados mais detalhados. É frequente que estes modelos utilizem propriedades definidas por parâmetros calculados em função da humidade e temperatura, tal como a permeabilidade ao ar, permeabilidade ao vapor de água, difusão de vapor e condutibilidade térmica (Straube e Burnett, 1991). Recorrendo ao exemplo do *WUFI*, o seu modelo de cálculo determina o factor de resistência à difusão do vapor de água (que caracteriza a permeabilidade ao vapor de água) em função da humidade relativa, e a condutibilidade térmica em função da temperatura ou da humidade relativa.

2.3. PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS MEDIDAS EM LABORATÓRIO

As propriedades dos materiais, necessárias ao funcionamento dos modelos de simulação numérica, são medidas através de metodologias realizadas em laboratório – quer sejam propriedades caracterizadas por um só parâmetro, quer sejam definidas por funções.

Neste ponto, serão descritas as metodologias laboratoriais de determinação das propriedades higrotérmicas que foram avaliadas neste trabalho:

- 1) Massa Volúmica;
- 2) Porosidade Aberta Total;
- 3) Saturação Capilar;
- 4) Condutibilidade Térmica;
- 5) Calor Específico;
- 6) Coeficiente de Absorção de Água;
- 7) Permeabilidade ao vapor de água.

É importante referir que todos os parâmetros medidos em laboratório acarretam um certo grau de incerteza nos seus valores. De forma a explicar, ainda que de uma forma geral, a natureza dessa incerteza, descrever-se-ão no final deste capítulo algumas definições importantes no âmbito da “incerteza dos dados”, culminando com as suas causas gerais.

2.3.1. MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica de um dado material é obtida através da razão entre a massa de um provete seco e o seu volume total.

A secagem dos provetes deve ser feita em estufa, até que estes atinjam uma massa constante. Para a determinação do volume, é necessário medir as dimensões do provete, efectuando-se três leituras por medição e calculando-se a sua respectiva média aritmética. (Ramos *et al.*, 2009) O volume será calculado, como é óbvio, pela multiplicação das três dimensões do provete (que correspondem a três médias aritméticas). O cálculo da massa volúmica é dada, então, pela equação 2.1:

$$\rho = \frac{m_{\text{seco}}}{V_{\text{total}}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (2.1)$$

Algumas normas que podem ser utilizadas na determinação desta propriedade são as seguintes:

- NP 616 (IPQ, 1973)
- NP EN ISO 10545-3 (CEN, 1997)

2.3.2. POROSIDADE ABERTA TOTAL

A porosidade aberta total é definida pela razão entre o volume de poros abertos e o volume total do provete.

A determinação da porosidade aberta total pode ser efectuada através do método de saturação por vácuo. Este método determina que, em primeiro lugar, os provetes sejam secos em estufa. Depois, os provetes são colocados num recipiente hermeticamente fechado durante 3 horas (pelo menos) onde o ar é extraído por uma bomba de vácuo. É fornecida água destilada ao recipiente de forma a que o provetes fiquem imersos. Cessa-se o fornecimento de água e os provetes permanecem imersos durante 24 horas, garantindo-se que atingem a saturação. Durante todo este processo, a pressão absoluta do ar no recipiente não deve exceder 2000 Pa (Roels *et al.*, 2003).

Sendo a massa dos provetes secos m_d [kg], a massa dos provete saturados m_w [kg] e a massa dos provetes saturados imersos em água m_a [kg] – o designado peso de Arquimedes – a porosidade aberta total pode ser determinada por intermédio das equações 2.2. e 2.3. (Roels *et al.*, 2003):

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_l} \left[\text{m}^3 \right] \quad (2.2)$$

Sendo ρ_l a massa volúmica da água [kg/m^3].

$$\varepsilon = \frac{m_w - m_d}{V \times \rho_l} [m^3 / m^3] \quad (2.3)$$

2.3.3. SATURAÇÃO CAPILAR

A saturação capilar, ou teor de humidade de saturação capilar, de um dado material define-se como sendo a quantidade máxima de água contida no material, absorvida por capilaridade, após o contacto com água líquida em condições de pressão normal.

Quando dois materiais apresentam distribuições porosas diferentes a sua capacidade de absorção de água também será diferente. É de salientar que a saturação capilar muito dificilmente atinge o teor de humidade máximo possível, devendo-se este facto à habitual presença de bolhas de ar no interior da estrutura porosa.

Um método de determinação do valor da saturação capilar está descrito na norma NT BUILD 472 (Nordtest, 1996). Mede-se o provete com rigor, de forma a se determinar o seu volume (as medições podem ser efectuadas com recurso a um paquímetro). Depois, o provete é colocado num tabuleiro de plástico que se enche de água até que o seu nível atinja 2 mm acima do provete. O nível da água deve ser mantido constante durante toda esta fase do procedimento. É colocada uma tampa no tabuleiro de forma a evitar a perda de água.

O provete permanece no tabuleiro mergulhado em água durante 24 horas, até se efectuar a primeira pesagem. Antes de cada pesagem o provete deve ser limpo com uma esponja de forma a retirar o excesso de água e a formação de gotículas. Este processo é repetido uma vez por dia até que duas pesagens consecutivas registem uma diferença de massas igual ou inferior a 1%, o que significa que o provete atinge o equilíbrio e se encontra saturado. Regista-se o valor da massa do provete saturado, designada por m_{cap} .

Posto isto, os provetes são colocados a secar em estufa a uma temperatura igual a $105 \pm 2^\circ\text{C}$. Considera-se que os provetes estão secos quando em sucessivas pesagens, com intervalos de pelo menos 6 horas, a diferença das suas massas é igual ou inferior a 0,5%. Regista-se o valor da massa do provete seco, designada por m_o .

Sabendo-se m_{cap} [kg], m_o [kg] e V [m^3], a saturação capilar é calculada através da equação 2.4.:

$$w_c = \frac{m_{\text{cap}} - m_o}{V \times \rho_l} [m^3 / m^3] \quad (2.4)$$

Sendo ρ_l a massa volúmica da água [kg/m^3].

2.3.4. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

A condutibilidade térmica é o fluxo de calor (em Watts) que atravessa, de uma forma perpendicular, um elemento com 1 m^2 de secção e espessura de 1 m, quando a diferença de temperatura entre as duas faces é de 1°C , sendo estas planas e paralelas entre si.

O Método *Guarded-Hot-Plate* é um dos mais utilizados para a determinação da condutibilidade térmica. O seu procedimento passa, em primeiro lugar, por se colocar dois provetes iguais de faces lisas ($30 \times 30 \text{ cm}^2$ e 7 cm de espessura máxima) entre placas metálicas, colocando um isolante na lateral para evitar o fluxo de calor por esse lado. Após um período de estabilização do sistema, é obtido um fluxo constante e unidireccional, na direcção perpendicular às faces do provete. Sabendo-se a geometria dos provetes, os valores da potência eléctrica fornecida ao aquecedor principal e os valores das temperaturas nas faces dos provetes, é possível determinar a condutibilidade térmica (Ramos *et al.*, 2009). A Fig.2.2. ilustra o equipamento utilizado pelo Laboratório de Física das Construções (LFC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) para realizar este método.



Fig. 2.2. – Equipamento *Holometrix* GHP-300 do LFC da FEUP, utilizado para medir a condutibilidade térmica (LFC, 2007)

Acrescenta-se que existe outro método que permite determinar a condutibilidade térmica dos materiais: o método da sonda de choque térmico.

Através de um aparelho semelhante ao que vemos na Fig.2.3., é colocada uma sonda entre dois provetes com iguais características. Essa sonda transmite um determinado fluxo de calor e mede a temperatura provocada no provete que, por sua vez, está dependente da condutibilidade térmica do material ensaiado (Lanzinha e Freitas, 1998). Este aparelho tanto pode ser utilizado em laboratório como *in situ*.



Fig. 2.3. – Equipamento *CT-Mètre* do LFC da FEUP, utilizado para medir a condutibilidade térmica (LFC, 2007)

A condutibilidade térmica expressa-se nas unidades $W/(m \cdot K)$ e o símbolo que a representa é λ .

Algumas das normas que podem ser utilizadas na determinação da condutibilidade térmica são:

- NP 2254 (C580/CT 58, 1988)
- ISO 8302 (ISO, 1991)

2.3.5. CALOR ESPECÍFICO

O calor específico é a quantidade de calor necessária para fazer variar de 1 grau a temperatura da unidade de massa de uma determinada substância.

O método tipicamente utilizado para a determinação do calor específico é designado por Método das Misturas. Este, assenta no “princípio da igualdade das trocas de calor”, que dita que: quando ocorrem trocas de calor entre corpos isolados termicamente do meio exterior, a quantidade de calor libertada pelos corpos que arrefecem é igual à quantidade de calor recebida pelos corpos que aquecem.

O ensaio utiliza a água como fluído calorimétrico a uma temperatura média de 60°C (intervalo de 20 a 100°C) – a utilização de outros fluidos pode variar o intervalo, conforme o que é pretendido. Os provetes são sujeitos a secagem em estufa, a uma temperatura que varia entre os 102 e 120°C. Posteriormente, é adicionada uma dada massa de material a elevada temperatura, a uma dada massa de água a baixa temperatura (método das misturas). Posto isto, determina-se a temperatura de equilíbrio resultante. Calculando-se o calor absorvido pela água e pelo recipiente e, igualando o seu valor à expressão da quantidade de calor libertada, conseguimos determinar o valor do calor específico (Lanzinha e Freitas, 1998).

O calor específico é designado pelo símbolo c e é expresso, habitualmente, nas unidades $J/(kg \cdot K)$.

Podemos encontrar o Método das Misturas na seguinte norma:

- ASTM C351-92b (ASTM, 1999)

2.3.6. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

O coeficiente de absorção de água caracteriza a capilaridade dos materiais, isto é, a propriedade de um material absorver água líquida por sucção, quando se encontra em contacto com a água.

A metodologia laboratorial para determinação desta propriedade prevê que, em primeiro lugar, os provetes sejam colocados no ambiente onde irão ser realizados os ensaios, a uma determinada humidade relativa, até a sua massa estabilizar. Posto isto, os provetes devem ser impermeabilizados nas suas faces laterais, de forma a se obter um fluxo unidireccional. De seguida, devem ser mergulhados numa tina com água, procurando manter as suas bases imersas em água (5 ± 2 mm). Nas primeiras 24h, as pesagens são feitas periodicamente seguindo uma escala logarítmica. Decorrido esse tempo, as pesagens passam a ser feitas por períodos de 24h.

O coeficiente de absorção é determinado a partir da relação linear entre $\sqrt{t}$ (raiz quadrada do tempo) e a variação do peso dos provetes. Se não existir nenhuma relação linear, a determinação é efectuada com valores registados às 24h (Freitas *et al.*, 2008).

Este coeficiente é designado pelo símbolo A_w e é expresso nas unidades $kg/(m^2 s^{0.5})$.

Uma norma que indica os processos de determinação de A_w é:

- EN ISO 15148 (CEN, 2002)

2.3.7. PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA

A permeabilidade ao vapor de água consiste na quantidade de vapor que passa em uma unidade de tempo, em regime permanente, através da unidade de superfície de um material com espessura unitária, quando a diferença de pressão de vapor entre as duas faces paralelas é também unitária (Lanzinha e Freitas, 1998).

Existem diferentes métodos experimentais para a determinação desta propriedades, sendo o mais tradicional o Método das Tinas.

Coloca-se numa câmara climática uma tina de ensaio impermeável ao vapor de água, selada na face aberta, contendo um provete a ensaiar e uma solução de salina saturada – Método da Tina Húmida – ou, ao invés, um dessecante – Método da Tina Seca. Impõe-se na câmara climática uma humidade relativa diferente da humidade relativa no interior da tina e, devido ao gradiente de pressão parcial de vapor que se estabelece entre a tina e a câmara, é desenvolvido um fluxo de vapor através do provete. O fluxo de vapor é determinado através do provete por sucessivas pesagens (Ramos *et al.*, 2009).

Assim, é usual distinguirem-se os dois métodos de acordo com as seguintes diferenças de humidade relativa entre as faces do provete (Freitas e Pinto, 1998):

Método da Tina Seca ou *Dry Cup* – para humidades relativas entre 0 e 50%;

Método da Tina Húmida ou *Wet Cup* – para humidades relativas entre os 50 e 100% (Freitas *et al.*, 2008).

Podemos observar uma representação esquemática de uma tina de ensaio na Fig. 2.4., onde se localiza o selante, o provete e a solução condicionadora.

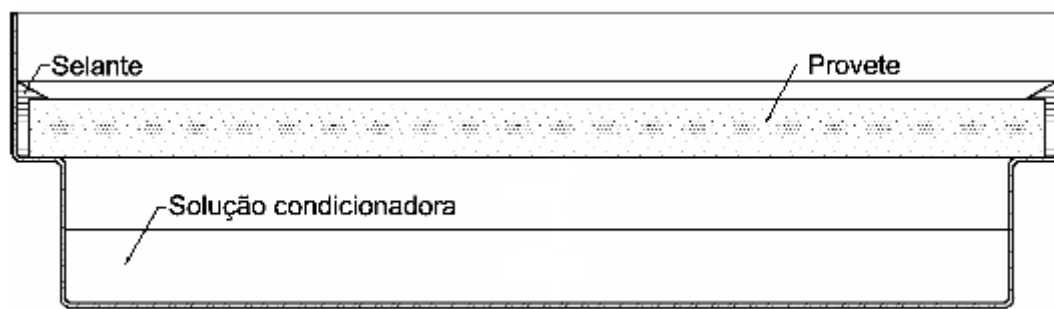


Fig. 2.4. – Esquema de uma tina de ensaio (Ramos, 2007)

Observando a Fig.2.5., verificamos o sentido do fluxo de vapor desenvolvido através do provete nos dois métodos.

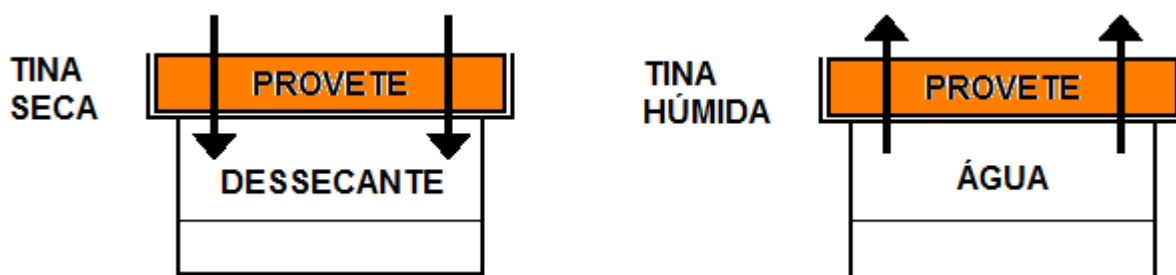


Fig. 2.5. – Esquema do fluxo de vapor dos Métodos Tina Seca e Tina Húmida

Estes métodos laboratoriais permitem, por intermédio de cálculos descritos na norma EN ISO 12572 a determinação do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material ensaiado, δ_p . Este valor, representa a quantidade de vapor de água que, por unidade de tempo e espessura, atravessa por difusão um provete de material homogêneo, quando sujeito a uma diferença de pressão de vapor unitária entre as duas faces (Freitas e Pinto, 1998).

A mesma norma descreve o cálculo do factor de resistência à difusão do vapor, μ , que foi utilizado, no presente trabalho, para caracterizar esta propriedade. Este factor, é um valor característico dos materiais, obtido pela relação (adimensional) entre o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar (δ_a) e o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do próprio material (δ_p), e indica quantas vezes a resistência à difusão de um provete desse material é maior do que a resistência de uma camada de ar em repouso, de igual espessura e sujeita às mesmas condições ambientais (Freitas e Pinto, 1998).

Assim, sabendo-se o valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material, δ_p , e do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar, δ_a – que se determinam através da mesma norma –, calcula-se o factor de resistência à difusão do vapor através da equação 2.5.:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (2.5.)$$

Assim, quanto maior for o valor do factor μ , menor será a permeabilidade do material e vice-versa.

Uma norma que pode ser utilizada na determinação da permeabilidade ao vapor é:

- EN ISO 12572 (CEN, 2001)

2.3.8. A INCERTEZA DOS DADOS MEDIDOS EM LABORATÓRIO

A incerteza dos dados medidos em laboratório é um facto que deve ser conhecido e ponderado quando se está a realizar o seu tratamento estatístico.

As propriedades dos materiais são medidas em laboratório segundo metodologias normalizadas que garantem a uniformização e optimização dos procedimentos. Contudo, há determinados factores intrínsecos aos materiais e à própria actividade laboratorial que induzem uma certa variabilidade nos resultados, associando-lhes, dessa forma, um determinado grau de incerteza.

O presente ponto deste trabalho pretende definir quais são as causas das incertezas associadas aos valores das propriedades higrotérmicas, utilizadas em bases de dados. Para isso, em primeiro lugar, é importante abordar algumas definições que permitem uma melhor compreensão dessas causas.

Segundo Grunewald e Zhao (2010), os dados das propriedades, medidos através de amostras de diferentes materiais, podem ser diferenciados segundo os seguintes patamares de classificação de materiais:

- **Material específico** – Dados medidos em amostras de um determinado material, com um nome específico, referente a uma determinada categoria e produtor. Assim, o material específico é identificado pelo seu respectivo nome, produtor e categoria onde se insere. De notar que podem existir restrições ao nível da confidencialidade dos dados dos materiais e dos próprios produtores. Exemplo de material específico: tijolo *Wienerberger*;
- **Material genérico** – Dados que resultam da junção de materiais específicos. Os nomes dos materiais específicos e dos seus produtores não são revelados. Não existem restrições de confidencialidade. Exemplo: tijolo de edifício moderno;
- **Categoria do material** – Resultam da junção de dados de materiais genéricos, servindo para consulta rápida em bases de dados. Exemplo: tijolo.

Relembrando que os modelos de simulação numérica se distinguem por utilizarem nos seus cálculos propriedades definidas por um só parâmetro ou por funções, Grunewald e Zhao (2010) separam as causas das incertezas segundo essas duas vertentes: (1) causas das incertezas das propriedades definidas por um só parâmetro; (2) causas das incertezas das propriedades definidas por funções.

As causas da incerteza dos dados das propriedades definidas por um só parâmetro são as seguintes (Grunewald e Zhao, 2010):

- **Material específico** – Variabilidade natural das propriedades físicas dentro do próprio material específico, podendo dever-se, também, aos processos de fabrico do próprio material;
- **Material genérico** – Variabilidade dos valores das propriedades intrínseca a cada material genérico, sendo essa variabilidade, de uma forma geral, superior à verificada nos materiais específicos;
- **Experimental** – Erros sistemáticos causados pelo equipamento experimental;
- **Ser Humano** – Erros estocásticos cometidos pelas pessoas que executam, analisam e interpretam as metodologias experimentais das medições.

As causas da incerteza dos dados das propriedades definidas por funções relacionam-se com os seguintes factores (Grunewald e Zhao, 2010):

- **Modelo de simulação utilizado** – As funções (como os coeficientes de transferência líquida) são geradas com base em modelos que são meramente aproximações à realidade;
- **Aproximações** – As funções matemáticas aproximam os valores medidos em pontos específicos.

É de notar que as propriedades definidas por funções, ou seja, por parâmetros em função da temperatura ou humidade, também partilham das incertezas relativas às propriedades medidas por um só parâmetro. Essas funções são compostas por parâmetros cujos dados são medidos, também, em laboratório.

3

PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS PARA O TRATAMENTO DE DADOS DE PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS

3.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Este capítulo pretende apresentar todos os procedimentos estatísticos utilizados no tratamento de dados de propriedades definidas por um só parâmetro (Capítulo 2). O tratamento estatístico servir-se-á da estatística descritiva (medidas descritivas, gráficos estatísticos) e de testes de ajustamento dos conjuntos de valores medidos a distribuições conhecidas. Como resultado, os dados tratados passam a estar aptos para consulta e/ou para serem introduzidos numa base de dados a integrar em programas de simulação numérica.

A estatística descritiva é baseada em medidas e gráficos estatísticos que permitem caracterizar as distribuições amostrais. Os testes de ajuste de distribuições são aplicados para determinar a aderência das distribuições amostrais a leis típicas – no presente trabalho, as leis típicas consideradas foram a normal e exponencial.

Antes de avançar para a estatística descritiva, far-se-á uma pequena referência à natureza dos dados das propriedades – dados estocásticos – que resultam de processos efectuados em laboratório.

3.2. DADOS ESTOCÁSTICOS

Tal como foi mencionado no ponto 2.3.8. do Capítulo 2, os valores das propriedades higrotérmicas são dados medidos em laboratório com recurso a processos normalizados. Não obstante, esses valores estão incontornavelmente associados a um determinado grau de incerteza.

Devido a essa incerteza, a representação destes resultados de medição segundo modelos matemáticos que usam funções determinísticas é desadequada. De facto, estes resultados são não-determinísticos e são normalmente designados de estocásticos.

Os resultados estocásticos advêm de sistemas estocásticos que possuem um comportamento aleatório, no sentido em que cada estado do sistema não determina completamente qual será o seu estado seguinte. As funções que definem as distribuições de dados estocásticos não são suficientes para determinar o seu valor no instante seguinte, mas apenas para estimar probabilidades. Assim, os dados estocásticos constituem valores de uma variável aleatória com uma distribuição de probabilidade subjacente.

Quando se mede uma determinada propriedade, utilizando uma amostra de um certo material, a repetição dessa medição no mesmo laboratório, em outra amostra idêntica do mesmo local e produtor, poderá não resultar em valores idênticos (variabilidade intrínseca ao material, variabilidade associada à actividade laboratorial). Os dados resultantes constituem, assim, dados estocásticos definidos por funções de probabilidade, que nos indicam qual a maior ou menor probabilidade de ocorrência numa determinada amplitude de valores.

3.3. ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A estatística descritiva visa sumariar as principais características de um conjunto de dados recorrendo a diversas técnicas analíticas, tais como: tabelas, indicadores numéricos e gráficos (Moraes, 2005). Com recurso a esta informação é possível efectuar uma análise estatística cujo principal objectivo é determinar que generalizações sobre a população se podem inferir a partir de uma amostra dessa mesma população.

3.3.1. MEDIDAS DESCRITIVAS

Tal como foi dito previamente, as medidas descritivas são um instrumento analítico utilizado para descrever um conjunto de dados. Estas medidas devem responder a um certo número de propriedades, tais como facilidade de cálculo, clareza de interpretação, pouca influência de erros de observação e resistência a valores “anormais”. Contudo, uma medida por si só raramente reúne todas essas propriedades (Oliveira, 2006). Por este motivo, será o conjunto delas que poderá dar uma indicação mais precisa sobre as principais características da distribuição. Existem três categorias essenciais de medidas descritivas:

- **Medidas de tendência central** – visam determinar o centro da distribuição dos dados observados;
- **Medidas de dispersão** – mostram a maior ou menor flutuação à volta da tendência central;
- **Medidas de forma** – indicam a forma da distribuição.

Medidas de Tendência Central

As principais medidas de tendência central são a média, mediana e moda. Na realização deste trabalho não se utilizou a moda, motivo pelo qual não se fará a sua descrição de seguida.

() Média, $\bar{x}$

A média é a medida de tendência central, ou de localização, mais frequentemente utilizada em estudos estatísticos. Para uma amostra constituída por N observações, a média é dada pelo quociente entre a soma dos valores observados da amostra $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ e o número N (ver equação 3.1.):

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1.)$$

() Mediana, M_e

A mediana de uma amostra é o valor que divide em duas partes iguais a distribuição dessa amostra. Isto significa que metade dos valores da amostra são inferiores ou iguais à mediana, ao passo que a outra metade é constituída por valores superiores ou iguais.

Considerando-se uma determinada amostra de dados e supondo que os seus valores estão dispostos de forma crescente ou decrescente, há dois tipos de casos a considerar para se determinar a mediana:

- Se a amostra for de dimensão ímpar, a mediana toma o valor que ocupa a posição central, ou seja, o valor de ordem (equação 3.1.):

$$\frac{N + 1}{2} \quad (3.1.)$$

- Se a amostra for de dimensão par, não existe na distribuição ordenada nenhum valor que ocupe a posição central. Nestes casos, a convenção estabelecida consiste em tomar como valor da mediana a média aritmética dos valores que ocupam as posições (equação 3.2 e 3.3):

$$\frac{N}{2} \quad (3.2.)$$

$$\frac{N + 2}{2} \quad (3.3.)$$

É de notar que este cálculo da mediana é efectuado quando as variáveis em estudo são discretas, isto é, quando as variáveis tomam valores num conjunto numerável.

Quando se trata de variáveis contínuas, em que não é possível formar um conjunto numerável (por exemplo, as variáveis peso ou comprimento), o cálculo de uma estimativa mediana passa pela construção de um gráfico de frequências acumuladas da classe que contém a mediana (ver Fig. 3.1.).

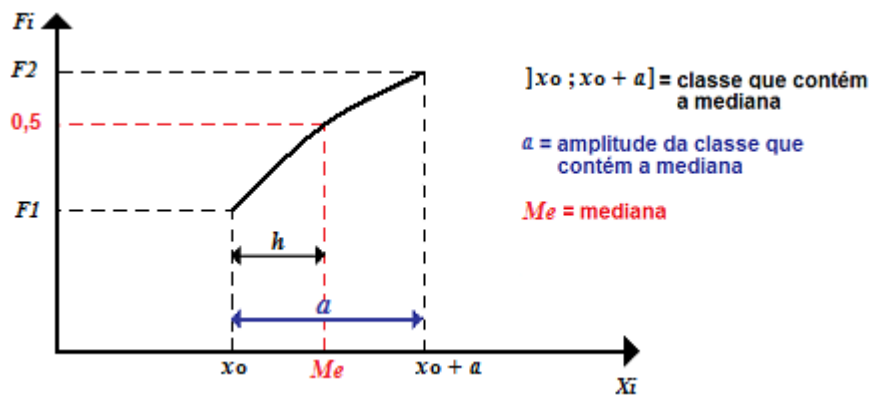


Fig. 3.1. – Gráfico das frequências acumuladas (F_i) da classe que contém a mediana

A classe que contém a mediana é a classe cujo limite superior ($F2$) e inferior ($F1$) das frequências acumuladas possui, no seu intervalo, a frequência de valor igual a 0,5 (ver Fig. 3.1.). Sabendo-se que x_o é o limite inferior da classe que contém a mediana e que $x_o + a$ é o limite superior dessa mesma classe, apresenta-se a seguinte metodologia de determinação da mediana em variáveis contínuas, em que h e M_e são as incógnitas (equações 3.4. e 3.5.):

$$\frac{h}{0,5 - F1} = \frac{a - h}{F2 - 0,5} \quad (3.4.)$$

$$Me = x_o + h \quad (3.5.)$$

É importante referir que a diferença de critérios no cálculo da média e da mediana, faz com que a mediana seja muito menos vulnerável à existência de valores discrepantes.

Medidas de Dispersão

Os índices de tendência central não efectuam qualquer descrição sobre o modo como os dados da amostra se distribuem em torno da média. Esta característica é descrita pelas medidas de dispersão, que traduzem, então, a variabilidade dos dados da distribuição. Neste trabalho, apenas se utilizou o desvio-padrão e o coeficiente de variação como medidas de dispersão.

() Desvio-padrão, s_x

O desvio-padrão é utilizado quando se pretende efectuar uma avaliação da dispersão dos dados. O seu valor é calculado através da raiz quadrada da variância, s_x^2 , que consiste no quociente entre a soma dos quadrados dos desvios de cada observação relativamente à média e o número total da amostra.

Assim, o desvio-padrão é calculado através da equação 3.6.:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.6.)$$

Algumas considerações sobre o desvio-padrão:

- O desvio-padrão é igual a zero quando não existe variabilidade, ou seja, quando todos os valores da distribuição são iguais entre si;
- O desvio-padrão apresenta sempre resultados positivos e é expresso na mesma unidade que os dados;
- Quanto maior for a dispersão da amostra, maior será o valor do desvio-padrão.

() Coeficiente de variação, c_v

O coeficiente de variação é uma medida descritiva muito útil na comparação dos desvios relativamente à média de várias variáveis. Por outro lado, como se trata de uma medida adimensional, permite colmatar algumas limitações do desvio-padrão que, por ser expresso nas mesmas unidades da amostra, não permite estabelecer comparações relativamente à dispersão entre amostras de unidade diferentes.

Assim, o coeficiente de variação é uma medida de dispersão que mede a homogeneidade das amostras, reflectindo a sua maior ou menor dispersão. Quanto mais próximo de 0 estiver o c_v , mais homogéneo é o conjunto de dados e, por conseguinte, menor é a sua dispersão. Este coeficiente é dado pelo quociente entre o desvio-padrão e a média (ver equação 3.7.):

$$c_v = \frac{s_x}{\bar{x}} \quad (3.7.)$$

Por vezes, esta expressão é multiplicada por 100, de forma a se obter o c_v em percentagem.

É importante referir que o coeficiente de variação é a medida de dispersão mais indicada quando se pretende estabelecer comparações sobre a dispersão/homogeneidade entre duas ou mais amostras.

Por exemplo, se tivermos duas amostras A e B, cujos valores da média e desvio-padrão se encontram escritos no Quadro 3.1., por análise do desvio-padrão, rapidamente se pode concluir que a amostra B é mais dispersa que a amostra A, pois 50 é maior que 40. Contudo, a variação de 40 para 100 é muito inferior à variação de 50 para 1000, o que significa que, relativamente à média, a amostra A é muito mais dispersa que a amostra B. Esta análise da dispersão é a mais relevante quando se pretende comparar a homogeneidade entre amostras. A relação entre a média e o desvio-padrão é quantificada pelo coeficiente de variação, cujo valor é igual a 40% na amostra A e 5% na amostra B.

Quadro 3.1. – Medidas descritivas de duas amostras distintas

	AMOSTRA A	AMOSTRA B
Média	100	1000
Desvio-padrão	40	50
Coeficiente de variação	0,4	0,05

O coeficiente de variação trata-se, então, de uma medida de dispersão relativa, ao passo que o desvio-padrão se trata de uma medida de dispersão absoluta.

A representação gráfica da média e do desvio-padrão permite agilizar a análise comparativa da dispersão entre duas ou mais distribuições. A Fig. 3.2. faz uma ilustração dos valores do Quadro 3.1., onde as barras azuis representam a média de cada distribuição e os traços verticais pretos representam o desvio-padrão, sendo que quanto maior o seu valor, maior o comprimento dos traços.

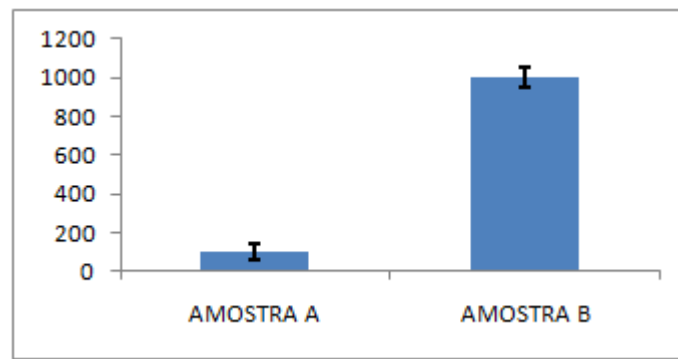


Fig. 3.2. – Média (a azul) e desvio-padrão (preto) das amostras A e B

Por análise deste gráfico, é possível inferir que o desvio-padrão da amostra A tem muito mais relevância do que o desvio-padrão da amostra B, uma vez que o comprimento do traço vertical na amostra A cobre quase metade da altura da barra azul, o que não acontece na amostra B.

Medidas de Forma

Tal como o próprio nome indica, as medidas de forma são indicadores da forma que a distribuição toma – se é simétrica ou assimétrica, se é achatada ou afunilada. Existem duas medidas de forma conhecidas: o coeficiente de assimetria e o coeficiente de achatamento. Neste trabalho, a caracterização da forma das distribuições foi baseada no coeficiente de assimetria, que será descrito de seguida.

() Coeficiente de assimetria, g_1

O coeficiente de assimetria mede o grau de deformação da curva de distribuição de frequências, indicando se essa curva de distribuição é simétrica ou assimétrica. O cálculo do coeficiente de assimetria é efectuado com base no quociente entre o momento centrado de ordem 3 (equação 3.8.) e o desvio padrão ao cubo (equação 3.9.):

$$m_3^{\bar{x}}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^3 \quad (3.8.)$$

$$g_1 = \frac{m_3^{\bar{x}}(x)}{s_x^3} \quad (3.9.)$$

Em que:

- $g_1 = 0 \rightarrow$ A distribuição é simétrica;
- $g_1 < 0 \rightarrow$ A distribuição é assimétrica à esquerda;
- $g_1 > 0 \rightarrow$ A distribuição é assimétrica à direita.

Para uma melhor visualização da forma da distribuição nos três casos, ver a seguinte figura (Fig. 3.3.):

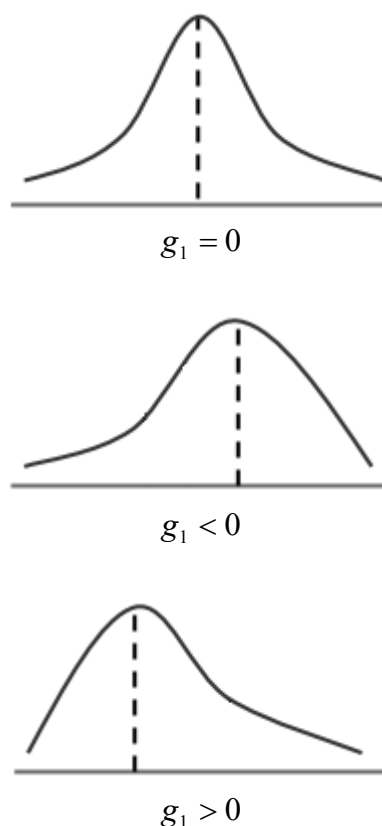


Fig. 3.3. – Forma da curva de distribuição de frequências consoante o valor de g_1

É ainda de referir que, numa amostra, é quase impossível observar uma distribuição que assuma uma simetria pura. Como tal, na grande maioria dos casos, o coeficiente de assimetria tem valores diferentes de zero, contudo, se estiverem relativamente próximos (de zero) pode considerar-se que a distribuição é simétrica.

3.3.2. HISTOGRAMA

A representação gráfica de dados contínuos é feita através de um gráfico de barras, ou histograma, formado por uma sucessão de rectângulos adjacentes – barras – tendo definido, para cada um dos rectângulos, um intervalo de classes. Normalmente, o intervalo de classes possui uma amplitude comum em todas as barras, designada de h , embora possam existir histogramas onde a amplitude das classes seja diferente.

Os histogramas podem ser construídos com base nos efectivos ou frequências observadas ou, como alternativa, com base nos efectivos acumulados ou frequências acumuladas. Sabendo-se que a amplitude das classes é constante e igual a h , a altura de cada uma das barras corresponde ao valor dos efectivos ou frequências (Guimarães e Cabral, 1997).

No presente trabalho, a altura das barras corresponde aos efectivos, também denominados de frequências absolutas. Assim, a ordenada dos histogramas será a frequência absoluta (n_i) e a abcissa será composta pelos valores assumidos pela variável (x_i) – ver Fig.3.4.:

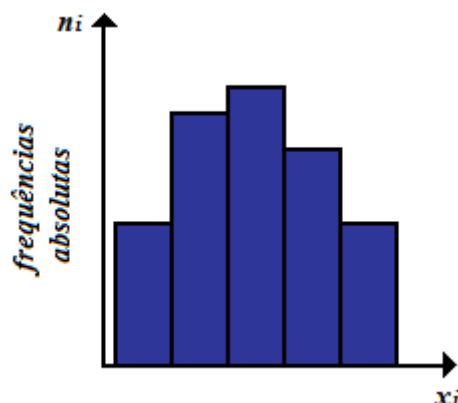


Fig. 3.4. – Histograma de frequências absolutas (efectivos)

O cálculo das frequências observadas (f_i) baseia-se na equação 3.10., ao passo que o cálculo das frequências acumuladas (F_i) é dado pela expressão 3.11.:

$$f_i = \frac{n_i}{N} \quad (3.10.)$$

Onde, n_i são os efectivos de cada classe e N o total dos efectivos observados.

$$F_i = \frac{N_i}{N} \quad (3.11.)$$

Onde N_i representa os efectivos acumulados de cada classe e N o total dos efectivos observados.

É importante referir que a obtenção da amplitude das classes não possui nenhuma regra estipulada. No entanto, nos casos em que a amplitude das classes é constante, existem fórmulas de cálculo do número de classes que conduzem a resultados satisfatórios. É exemplo disso a equação 3.12., que determina o número de classes do histograma. Esta regra, de carácter meramente indicativo, consiste em cobrir a gama de valores na qual os dados se situam, por um número de classes próximo da raiz quadrada da dimensão da amostra, N (Guimarães e Cabral, 1997):

$$N^\circ \text{ de classes} \approx \sqrt{N} \quad (3.12.)$$

Assim, a amplitude das classes, sendo constante, será a que resulta da construção do histograma com o número de classes resultante desta fórmula.

Apesar da existência desta regra indicativa, a par de outras, na grande maioria dos casos a amplitude das classes é definida de uma forma mais ou menos aleatória, dependendo da “habilidade” de quem está a construir o histograma. A escolha de uma amplitude muito pequena – que resulta num grande número de classes – não permite que sobressaiam as características fundamentais do conjunto de

dados, uma vez que se lhe poderá sobrepor o aspecto aleatório dos mesmos. Por outro lado, a escolha de uma amplitude grande – que resulta num menor número de classes – poderá não mostrar alguns aspectos importantes da distribuição, pecando pela falta de detalhe.

Por conseguinte, a escolha da amplitude advém de um compromisso entre um número de classes que não seja muito alto (demasiado detalhe) nem muito baixo (pouco detalhe), encaixando-se na gama de valores nos quais os dados se situam e evidenciando as principais características da distribuição.

Por fim, a representação gráfica do histograma permite-nos retirar conclusões sobre a tendência dos dados da distribuição. Existem três formas fundamentais que o histograma pode assumir: simétrica, assimétrica à direita e assimétrica à esquerda (ver Fig. 3.5.):

Quando se verifica que o histograma é simétrico, isto significa que a média, mediana e moda apresentam valores iguais. Já nos casos em que se observa que o histograma é assimétrico à direita, isto significa que a mediana e a moda se situam mais à esquerda da média, ao passo que quando o histograma é assimétrico à esquerda, a mediana e a moda situam-se mais à direita da média.

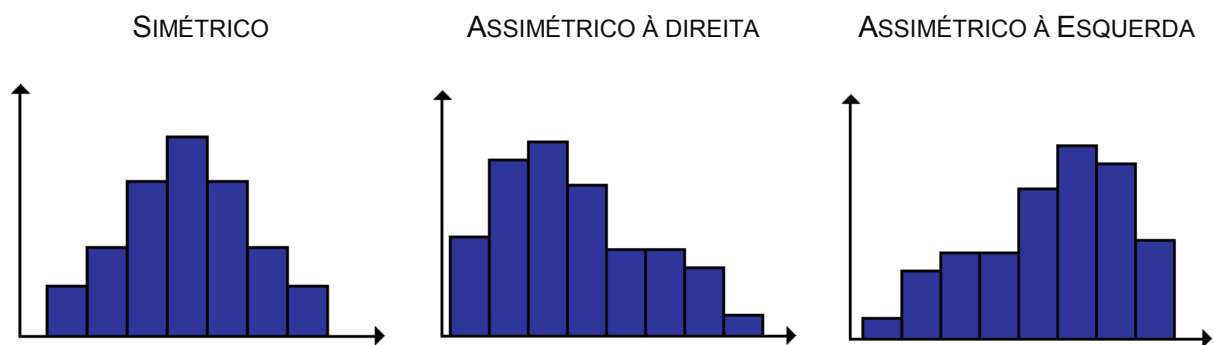


Fig. 3.5. – Formas possíveis dos histogramas

3.3.3. CAIXA-DE-BIGODES

A caixa-de-bigodes, em inglês *box-plot*, é um diagrama que permite a visualização das principais características de um conjunto de dados, nomeadamente a:

- Tendência central;
- Variabilidade (ou dispersão);
- Assimetria;
- Valores discrepantes (ou *outliers*).

A construção deste gráfico é baseado no chamado resumo de cinco números, que corresponde ao: mínimo (menor valor do conjunto), primeiro quartil (Q1), mediana (M_e) ou segundo quartil (Q2), terceiro quartil (Q3) e o máximo (maior valor do conjunto) (Hoaglin *et al*, 1983).

Olhando para a Fig.3.6., podemos observar como é que estes cinco números estão representados na caixa-de-bigodes.

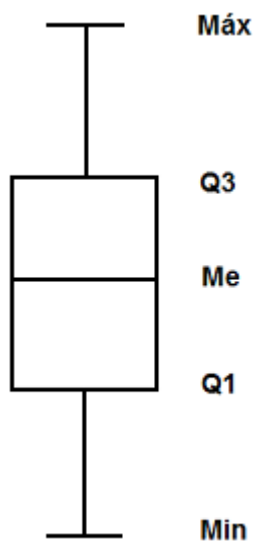


Fig. 3.6. – Representação de uma caixa-de-bigodes sem valores discrepantes

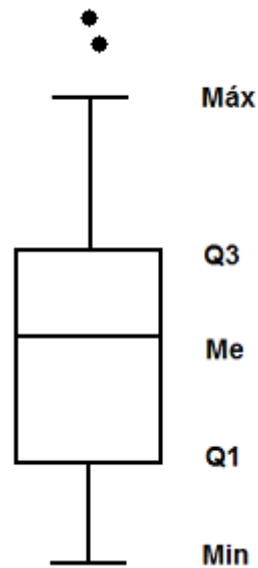


Fig. 3.7. – Representação de uma caixa-de-bigodes com valores discrepantes

A caixa propriamente dita, é composta pelo primeiro quartil (nível inferior da caixa), pelo terceiro quartil (nível superior da caixa) e pela mediana (ou segundo quartil), representada pela linha horizontal que divide a caixa.

Os bigodes são constituídos pelas linhas que ligam Q1 ao ponto adjacente inferior (constituindo o bigode inferior) e Q3 ao ponto adjacente superior (constituindo o bigode superior). É de referir que os bigodes demarcam dois casos distintos:

- O caso em que não existem valores discrepantes, e, por conseguinte, os bigodes demarcam os valores máximo e mínimo do conjunto de dados (ver Fig.3.6.);
- O caso em que existem valores discrepantes, onde os bigodes demarcam o valor máximo não-discrepante e o valor mínimo não-discrepante do conjunto de dados (ver Fig.3.7.).

Observando a Fig.3.7. podemos verificar que os valores discrepantes estão representados por bolas que se encontram destacadas do gráfico, ao longo da sua vertical. Desta forma, facilmente se depreende que os valores discrepantes, quando existem, são os valores máximos e mínimos do conjunto total de dados.

De seguida, descreve-se o método utilizado para se definir se um valor é discrepante ou não. Este método passa pelo cálculo das chamadas barreiras de *outliers*, onde BI (equação 3.13.) é a barreira inferior, BS é a barreira superior (equação 3.14.) e dQ é a amplitude interquartis (ver equação 3.15.):

$$BI = Q1 - 1,5dQ \quad (3.13.)$$

$$BS = Q3 + 1,5dQ \quad (3.14.)$$

$$AIQ = Q3 - Q1 \quad (3.15.)$$

São considerados valores discrepantes aqueles que são superiores a BS ou inferiores a BI .

É de notar que a definição de ponto adjacente, referida anteriormente, consiste no seguinte:

- Ponto adjacente inferior – é o menor valor da amostra, podendo ser maior ou igual que a barreira inferior;
- Ponto adjacente superior – é o maior valor da amostra, podendo ser menor ou igual que a barreira superior.

Por outras palavras, os pontos adjacentes são os valores mais extremos da amostra que ainda estão dentro do intervalo $[BI;BS]$.

Posto isto, acrescenta-se que é possível efectuar o cálculo de segundas barreiras de *outliers*, que permitem determinar valores extremamente discrepantes, diferenciando-os dos outros valores discrepantes menos severos. Assim, BI^* (equação 3.16.) é a barreira secundária inferior e BS^* é a barreira secundária superior (equação 3.17.):

$$BI^* = Q1 - 3dQ \quad (3.16.)$$

$$BS^* = Q3 + 3dQ \quad (3.17.)$$

Então, determinadas as barreiras $[BI; BS]$ e $[BI^*;BS^*]$ podemos distinguir quais são os valores discrepantes (representados por pontos) e os valores extremamente discrepantes (representados por asteriscos). Os primeiros, encontram-se entre os dois intervalos – caindo, portanto, para fora do intervalo $[BI; BS]$ e para dentro do intervalo $[BI^*;BS^*]$ – ao passo que os segundos encontram-se para fora do intervalo $[BI^*;BS^*]$ – ver Fig.3.8.:

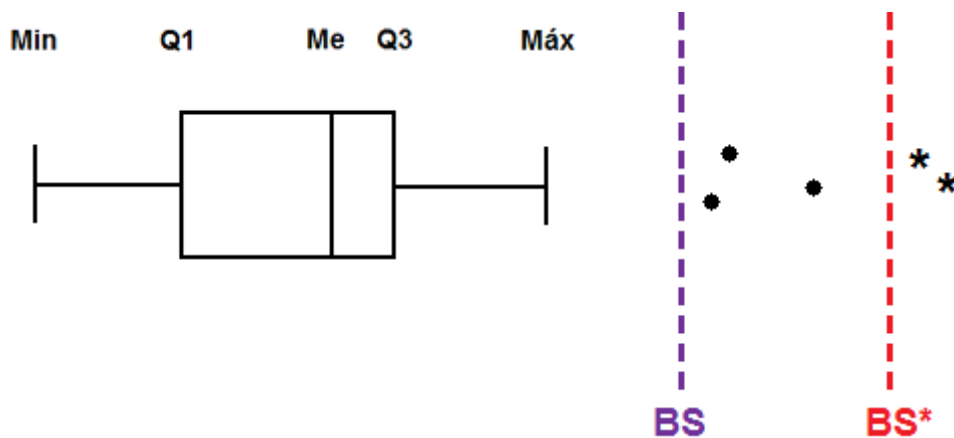


Fig. 3.8. – Caixa-de-bigodes com valores discrepantes e extremamente discrepantes máximos

Por fim, conhecendo-se já a estrutura da caixa-de-bigodes, é possível estabelecer algumas considerações sumárias sobre a interpretação deste gráfico estatístico. Olhando para as seguintes figuras (Fig.3.8. a), b) e c)), torna-se mais fácil entender em que medida é que a caixa-de-bigodes fornece informação sobre a tendência central, dispersão e assimetria – sendo que os valores discrepantes já foram abordados em cima.

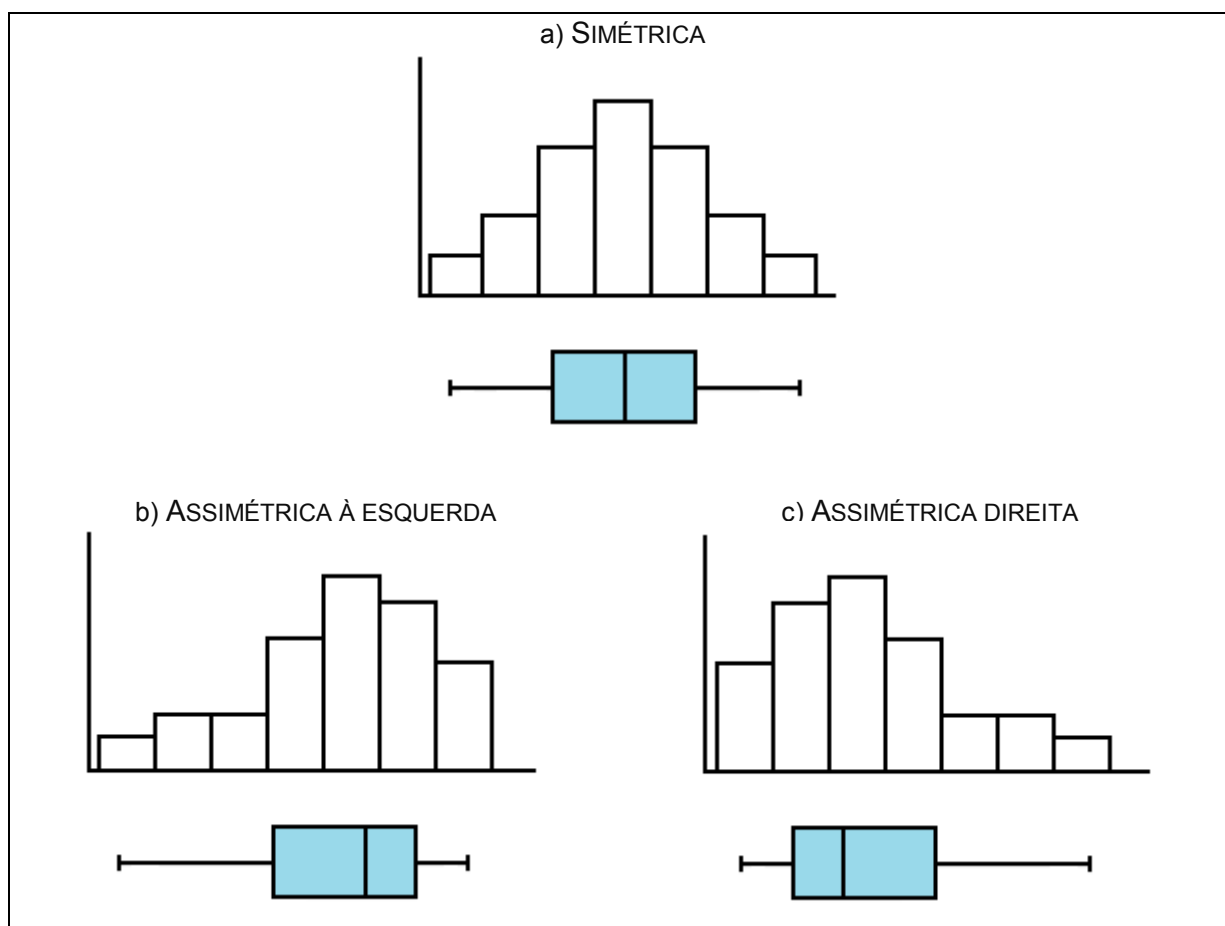


Fig. 3.9. – Formas possíveis da caixa-de-bigodes conforme a distribuição: a) Simétrica; b) Assimétrica à esquerda; c) Assimétrica à direita

De facto, é através da observação do conjunto dos parâmetros que compõem a caixa-de-bigodes que rapidamente percebemos como se distribuem os dados da amostra.

A Fig.3.9. a) representa uma distribuição simétrica: a linha da mediana está situada no centro da caixa e o comprimento dos bigodes é semelhante.

A Fig.3.9. b) representa uma distribuição assimétrica à esquerda: a linha da mediana localiza-se mais perto do terceiro quartil, observando-se, paralelamente, que o bigode inferior – representado do lado esquerdo da caixa – é bastante mais comprido que o superior.

A Fig. 3.9. c) representa uma distribuição assimétrica à direita: a linha da mediana deslocou-se para o lado do primeiro quartil, verificando-se, ao mesmo tempo, que o bigode superior – representado do lado direito da caixa – é bastante mais comprido que o inferior.

Para finalizar, acrescenta-se que o tamanho da caixa é dado pela amplitude interquartis que constitui, também, uma medida de dispersão: quanto maior a caixa, maior será a dispersão da amostra e vice-versa.

3.4. TESTES DE AJUSTE DE DISTRIBUIÇÕES

O ajuste de uma distribuição teórica ao conjunto de dados de uma amostra permite reduzir o número de parâmetros necessários para caracterizar devidamente a distribuição amostral, uma vez que podemos usar os parâmetros da distribuição teórica. Tomando como exemplo a distribuição Normal, são suficientes para a sua caracterização apenas dois parâmetros: a média e o desvio-padrão.

A simples visualização dos dados amostrais nos histogramas e nas caixas-de-bigodes é insuficiente para inferir qual a distribuição teórica que melhor se ajusta a esses dados. Por isso, são utilizados testes de ajustamento de distribuições, que consistem, fundamentalmente, em testes de hipóteses que incidem sobre a adequação ou não de uma dada distribuição teórica à distribuição amostral.

No presente trabalho, usam-se dois testes de ajuste de distribuições: o teste de *Kolmogorov-Smirnov* e o teste do Qui-Quadrado, que serão descritos de seguida.

3.4.1. TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

O teste *Kolmogorov-Smirnov* (*K-S*) destina-se a estabelecer se uma determinada distribuição não é significativamente diferente de uma distribuição teórica. A sua aplicação não tem restrições quanto à dimensão da amostra, podendo ser aplicado em amostras pequenas; além disso, em muitos casos, é mais potente que o teste do Qui-Quadrado, explicado mais à frente (Hainaut, 1997).

Em rigor, este teste não deveria ser aplicado quando temos de nos apoiar em parâmetros estimados a partir de uma amostra – o que acontece quando se compara uma distribuição amostral com uma teórica. No entanto, considera-se que esse erro é muito pequeno, o que leva a que muitos autores não hesitem em recomendá-lo ou utilizá-lo nessas circunstâncias (McNemar, 1969 e Guildford, 1965).

O procedimento de realização do teste *K-S* compõe-se pelos seguintes passos:

- 1) A hipótese nula e alternativa são formuladas da seguinte forma:

H_0 : a população segue uma determinada distribuição teórica;

H_1 : a população não segue tal distribuição teórica.

- 2) Define-se o grau de significância do teste (α), conforme se pretende uma maior ou menor confiança nos resultados. O valor de referência, habitualmente utilizado, é $\alpha = 5\%$;
- 3) A equações 3.19., 3.20. e 3.21. compõem a formulação matemática utilizada pelo teste (Oliveira, 2006):

$$D = \max_i |F(x) - F^*(x)| \quad (3.19.)$$

$$\lambda = D\sqrt{n} \quad (3.20.)$$

$$p(\lambda) = 1 - \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (-1)^k e^{-2k^2\lambda^2} \quad (3.21.)$$

Onde,

$F(x_i)$ é o valor da função de distribuição teórica em x_i ;

$F_i^*(x_i)$ é a frequência observada acumulada no extremo superior da i -ésima classe;

n é o número de observações independentes de X ;

α é o nível de significância fixado (onde o valor habitualmente utilizado é de 5%).

4) Verificar se a hipótese nula é rejeitada ou não:

$p(\lambda) \leq \alpha \rightarrow$ a hipótese H_0 é rejeitada;

$p(\lambda) > \alpha \rightarrow$ a hipótese H_0 não é rejeitada.

NOTA: O símbolo λ representa o coeficiente de condutibilidade térmica na presente dissertação. Como tal, de forma a contornar este conflito, será adoptado o símbolo Z – utilizado pelo programa SPSS – para definir o parâmetro λ do teste $K-S$.

3.4.2. TESTE QUI-QUADRADO

O teste do Qui-Quadrado, à semelhança do teste $K-S$, tem como princípio determinar se uma distribuição observada numa amostra segue um modelo matemático específico, isto é, se segue uma distribuição teórica conhecida. Para isso, este teste estabelece uma comparação entre os dados amostrais e a distribuição teórica à qual se supõe pertencer a amostra. As distribuições teóricas que podem ser consideradas são diversas, apresentando-se alguns exemplos: distribuição normal, exponencial, Poisson, uniforme, entre outras.

É de notar que existem algumas regras práticas que, a serem aplicadas, permitem realizar o teste do Qui-Quadrado com confiança (Guimarães e Cabral, 1997):

- dimensão da amostra não inferior a 30 ($N \geq 30$);
- frequência esperada em cada classe não inferior a 5 ($e_k \geq 5$) – este parâmetro será explicado mais à frente;

O procedimento de realização do teste Qui-Quadrado é constituído pela seguinte sequência de passos (Guimarães e Cabral, 1997):

1) As hipóteses nula e alternativa são formuladas da seguinte forma:

H_0 : a população segue uma determinada distribuição teórica;

H_1 : a população não segue tal distribuição teórica;

- 2) Agrupam-se em K classes não sobreponíveis (com $K \geq 2$) as N observações que constituem a amostra. Sendo as amostras constituídas por dados contínuos, estes serão agrupados em classes que, à semelhança do que acontece na construção dos histogramas, são de definição relativamente arbitrária.
- 3) As frequências absolutas das observações amostrais em cada classe k , ($k = 1, 2, \dots, K$) são designadas por frequências observadas, denotam-se por N_k e satisfazem a seguinte condição (equação 3.22):

$$\sum_{k=1}^K N_k = N \quad (3.22.)$$

Onde N corresponde à dimensão da amostra.

- 4) Determina-se a frequência de observações que seria expectável obter em cada classe k , se os dados fossem provenientes de uma determinada distribuição teórica conhecida. Essas frequências, que são dadas pela equação 3.23., são designadas de frequências esperadas e denotam-se por e_k :

$$e_k = N \times p_k \quad (3.23.)$$

De notar que p_k representa a probabilidade de, sendo H_0 verdadeira, a variável aleatória tomar valores pertencentes à categoria k .

As frequências esperadas, tal como as frequências observadas, também satisfazem a condição de que o seu somatório é igual a N .

- 5) A medida global de “ajuste” entre as frequências observadas na amostra (N_k) e as frequências (e_k) é dada por (equação 3.24.):

$$d = \sum_{k=1}^K \frac{(N_k - e_k)^2}{e_k} \quad (3.24.)$$

Se a hipótese H_0 for verdadeira, devem registar-se pequenas diferenças entre as frequências esperadas e as observadas. Por conseguinte, o valor d deve assumir valores baixos.

- 6) Este teste permite fixar um grau de significância que varia conforma se pretende uma maior ou menor confiança nos resultados. O valor de referência, habitualmente utilizado, é de $\alpha = 5\%$.

- 7) Uma vez fixado o nível de significância α , a rejeição ou não rejeição de H_0 será feita com base na comparação entre o valor d e o valor crítico $\chi^2_{GL}(\alpha)$, que determinamos através da Tabela de Distribuições χ^2 .

O número de graus de liberdade é dado pela seguinte expressão (equação 3.25.):

$$GL = (K - 1) - R \quad (3.25.)$$

Sendo K o número de classes e R o número de parâmetros estimados a partir da amostra. É de salientar que 1 é o número mínimo de GL para que este teste possa ser realizado.

Por fim, verifica-se se a hipótese H_0 é rejeitada ou não:

$d \geq \chi^2_{GL}(\alpha) \rightarrow$ A hipótese H_0 é rejeitada;

$d < \chi^2_{GL}(\alpha) \rightarrow$ A hipótese H_0 não é rejeitada.

4

ANÁLISE DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS NO TRATAMENTO DE DADOS DE PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS

4.1. ENQUADRAMENTO GERAL

No presente capítulo será efectuada a análise dos resultados obtidos da aplicação dos procedimentos estatísticos apresentados no Capítulo 2, para o tratamento de dados de propriedades higrotérmicas. Todos os dados utilizados neste capítulo, relativamente às propriedades e aos diversos materiais abordados, são do âmbito do projecto internacional *Annex 55*, da Agência Internacional de Energia (IEA, 2011). São quatro os materiais específicos considerados, contudo, por motivos de confidencialidade, não são mencionados os seus nomes nem produtores – indica-se apenas o nome do material genérico ou categoria do material onde se inserem.

A análise dos resultados irá abordar, no domínio estatístico, medidas descritivas, gráficos e ajustes de dados a distribuições conhecidas. Os parâmetros e testes estatísticos foram calculados através do software *SPSS* na versão 17.0, à excepção do teste Qui-Quadrado que foi realizado analiticamente.

Todo este tratamento estatístico de dados resulta num conjunto de informação preparada para integrar uma base de dados estocásticos de propriedades higrotérmicas.

4.2. ANÁLISE DESCRITIVA DAS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS

A análise descritiva das propriedades higrotérmicas consiste em avaliar as medidas descritivas e gráficos estatísticos de forma a retirar conclusões fundamentadas sobre as distribuições dessas propriedades. Em primeiro lugar, esta análise recairá sobre as propriedades medidas em quatro materiais distintos: pedra, argamassa de cimento e cal, isolamento térmico e tijolo cerâmico.

Em segundo lugar, a análise será efectuada apenas para a permeabilidade ao vapor de água, medida num material distinto: o gesso. Este, surge com diferentes tipos de pintura.

4.2.1. ANÁLISE DESCRITIVA DAS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS NOS DIFERENTES MATERIAIS

As medidas descritivas, referentes a cada uma das propriedades, podem ser observadas no Quadro 4.1.:

Quadro 4.1. – Medidas descritivas das propriedades higrotérmicas por material

PROPRIE- DADES	MEDIDAS DESCRITIVAS	MATERIAIS			
		PEDRA	ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL	ISOLAMENTO	TIJOLO CERÂMICO
Massa Volumica ρ [kg/m ³]	Média	1988,647	1023,822	222,254	1833,856
	Mediana	1989,279	1029,543	221,927	1831,625
	Desvio-padrão	13,682	18,069	1,813	72,501
	Assimetria	-0,529	-0,611	1,099	0,141
	Coef. Variação	0,007	0,018	0,008	0,040
	N (dimensão)	30	30	20	33
Porosidade Aberta Total ϵ [m ³ /m ³]	Média	0,248	0,614	0,909	0,308
	Mediana	0,248	0,612	0,909	0,309
	Desvio-padrão	0,005	0,007	0,001	0,027
	Assimetria	0,528	0,612	-1,094	-0,142
	Coef. Variação	0,021	0,011	0,001	0,089
	N (dimensão)	30	30	20	33
Saturação Capilar w_c [m ³ /m ³]	Média	0,132	0,272	0,815	0,165
	Mediana	0,142	0,273	0,818	0,171
	Desvio-padrão	0,023	0,014	0,025	0,011
	Assimetria	-1,574	-0,223	-0,860	-1,671
	Coef. Variação	0,174	0,051	0,031	0,067
	N (dimensão)	3	5	6	3
Condutibilidade Térmica λ [W/(m·K)]	Média	2,402	0,225	0,057	0,704
	Mediana	2,420	0,225	0,057	0,754
	Desvio-padrão	0,130	0,026	0,001	0,082
	Assimetria	-0,713	0,523	-0,668	-1,010
	Coef. Variação	0,054	0,117	0,021	0,116
	N (dimensão)	6	5	6	6
Calor Específico c [J/(kg·K)]	Média	882,670	1090,030	1303,170	861,000
	Mediana	873,500	1113,470	1320,000	859,500
	Desvio-padrão	40,043	60,445	52,178	11,781
	Assimetria	0,451	-0,376	-2,212	1,509
	Coef. Variação	0,045	0,055	0,040	0,014
	N (dimensão)	6	5	6	6
Coeficiente de Absorção de Água A_w [kg/(m ² s ^{0,5})]	Média	0,140	0,127	0,954	0,251
	Mediana	0,180	0,096	0,966	0,312
	Desvio-padrão	0,090	0,057	0,048	0,105
	Assimetria	-1,613	0,589	-1,875	-1,732
	Coef. Variação	0,647	0,451	0,051	0,418
	N (dimensão)	3	5	6	3
Permeabilidade ao Vapor de Água μ [-]	Média	16,464	6,149	5,371	10,210
	Mediana	16,464	6,144	5,315	10,597
	Desvio-padrão	0,523	0,097	0,216	1,783
	Assimetria	0,000	0,213	1,406	-0,931
	Coef. Variação	0,032	0,016	0,040	0,175
	N (dimensão)	2	5	4	3

Observando o Quadro 4.1., depreende-se que é possível estabelecer uma análise segundo duas direcções distintas (ver Fig.4.1. e Fig.4.2.).

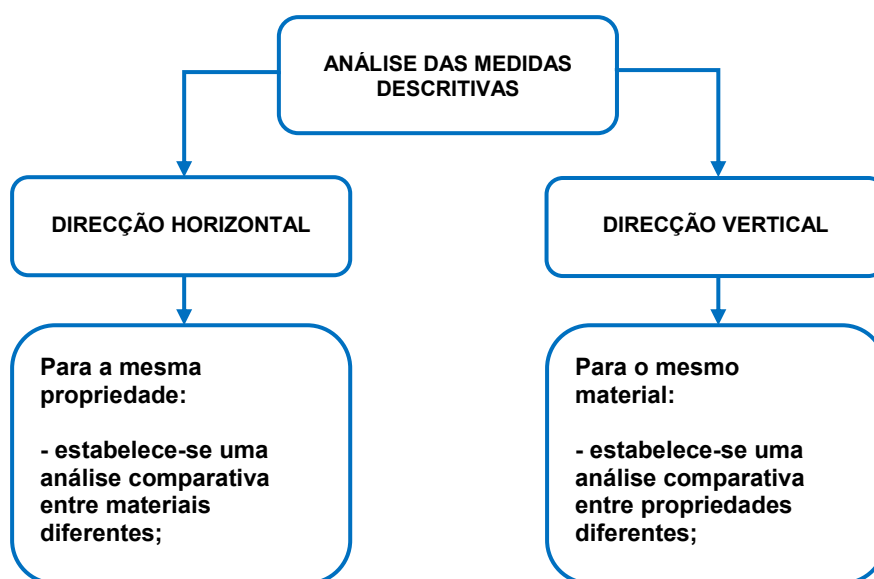


Fig.4.1. – Diferentes perspectivas de análise das medidas descritivas

MATERIAIS					
PROPRIEDADES	MEDIDAS DESCRITIVAS	PEDRA	ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL	ISOLAMENTO	TIJOLO CERÂMICO
Massa Volumica [kg/m³]	Média	1988,647	1023,822	222,254	1833,856
	Mediana	1989,279	1029,543	221,927	1831,625
	Desvio-padrão	13,682	18,069	1,813	72,501
	Assimetria	-0,529	-0,611	1,099	0,141
	Coef. Variação	0,007	0,018	0,008	0,040
	N (dimensão)	30	30	20	33
Porosidade Total [m³/m³]	Média	0,248	0,614	0,909	0,308
	Mediana	0,248	0,612	0,909	0,309
	Desvio-padrão	0,005	0,007	0,001	0,027
	Assimetria	0,528	0,612	-1,094	-0,142
	Coef. Variação	0,021	0,011	0,001	0,089
	N (dimensão)	30	30	20	33
Saturação Capilar [m³/m³]	Média	0,132	0,272	0,815	0,165
	Mediana	0,142	0,273	0,818	0,171
	Desvio-padrão	0,023	0,014	0,025	0,011
	Assimetria	-1,574	-0,223	-0,860	-1,671
	Coef. Variação	0,174	0,051	0,031	0,067
	N (dimensão)	3	5	6	3

Fig.4.2. – Análise descritiva segundo a direcção horizontal (a verde) e segundo a direcção vertical (a amarelo)

Por conseguinte, será efectuada uma análise descritiva das propriedades, abordando-se, primeiramente, a direcção horizontal (por propriedade) e, posteriormente, a vertical (por material). Apresentam-se, conjuntamente, os gráficos estatísticos efectuados para essa análise descritiva, surgindo apenas os que se consideram ser os mais relevantes. Os restantes podem ser consultados em Quadros Resumo (quadros com o resumo principal da análise descritiva), no Anexo.

4.2.1.1. Análise descritiva por propriedade

Seguindo-se a ordem apresentada no Quadro 4.1., inicia-se a análise descritiva por propriedade (ou seja, segundo a direcção horizontal do referido quadro).

Em primeiro lugar, surge a **Massa Volúmica** (ρ) onde se verifica o seguinte:

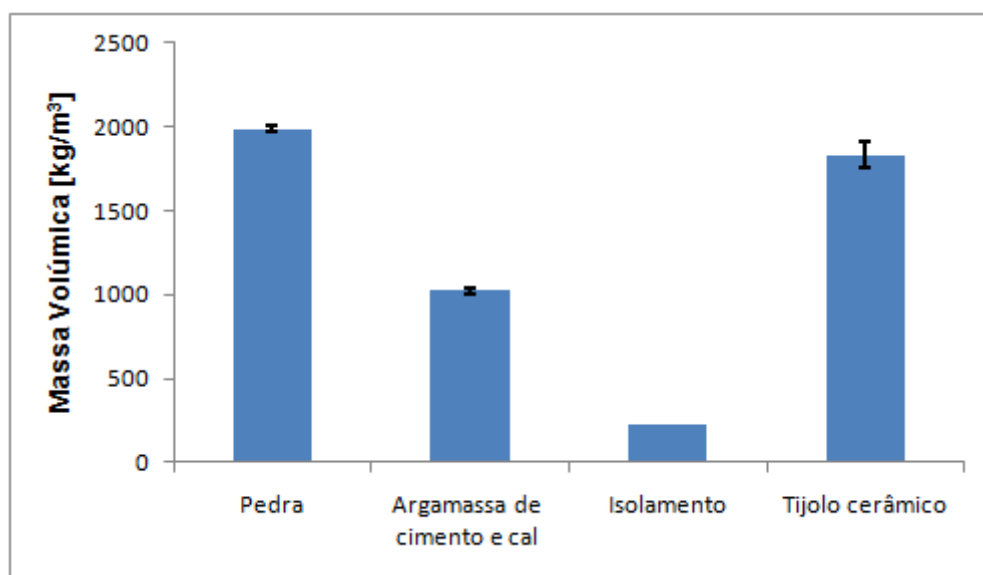


Fig.4.3. – Média e desvio-padrão da massa volúmica nos quatro materiais considerados

- A Fig. 4.3. exibe a representação das médias da massa volúmica nos materiais considerados (barras azuis). Os materiais em questão evidenciam diferenças expectáveis, dada a sua natureza;
- Por observação da mesma figura verifica-se que a dispersão da massa volúmica é reduzida em todos os materiais;
- Este facto é traduzido numericamente pelo coeficiente de variação, cujo valor no isolamento e na pedra se situa abaixo de 1%. O maior, regista-se no caso do tijolo cerâmico, não ultrapassando os 4%. Isto confirma que a massa volúmica destas amostras é muito homogénea, implicando que os desvios relativamente à média são muito pequenos;
- A mediana no caso da pedra e do tijolo cerâmico possui um valor muito aproximado da média, levando a acreditar que estamos perante distribuições aproximadamente simétricas (ou com pouca assimetria). É possível observar esta situação nas Fig.4.4. e Fig.4.5., que apresentam, respectivamente, o histograma e a caixa-de-bigodes da distribuição da massa volúmica medida na pedra.
- Analisando as Fig.4.4. e Fig.4.5., constata-se que a distribuição é apenas ligeiramente assimétrica à esquerda, impulsionada em parte por um valor discrepante (*outlier*). Paralelamente, o valor do coeficiente de assimetria vem corroborar o que se observa nos gráficos, apresentando-se negativo ($g_1 = -0,529$ no caso da pedra), o que confirma uma assimetria à esquerda da amostra;

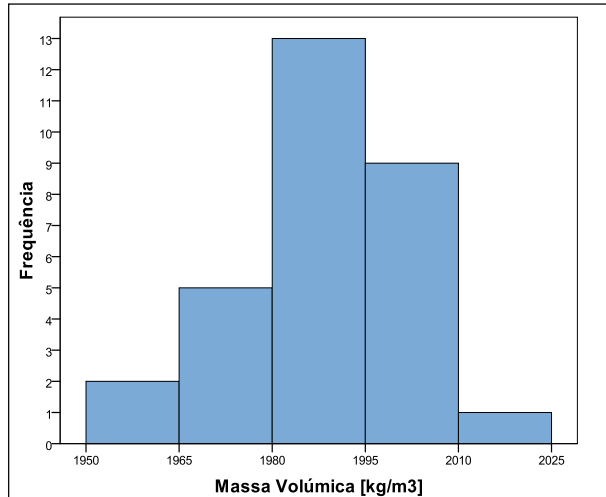


Fig.4.4. – Histograma da massa volúmica na pedra

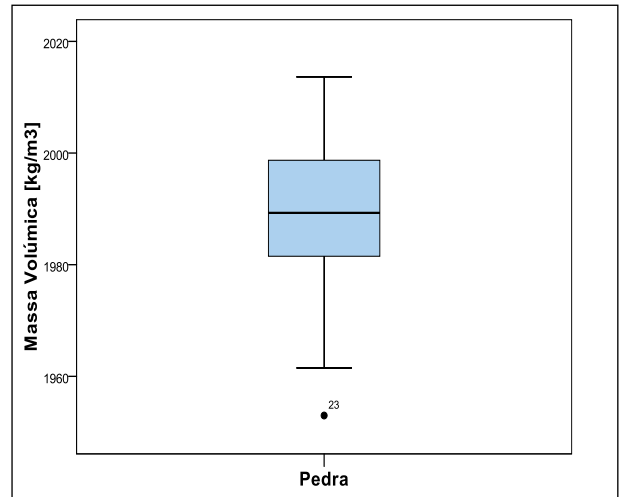


Fig.4.5. – Caixa-de-bigodes da massa volúmica na pedra

- Relativamente à massa volúmica na argamassa de cimento e cal e no isolamento, apesar da mediana não ser muito dispare da média, os histogramas e respectivas caixas-de-bigodes revelam que as distribuições são assimétricas em ambas as situações (ver Fig.4.6. a Fig.4.9.);
- Começando pela argamassa (Fig.4.6. e Fig.4.7.) a distribuição é assimétrica à esquerda ($g_1 = -0,611$) ao passo que, no caso do isolamento (Fig.4.8. e Fig.4.9.), a distribuição é assimétrica à direita ($g_1 = 1,099$). Na caixa-de-bigodes da Fig.4.9. verifica-se a existência de dois valores extremos, eventual razão para a assimetria desta amostra ser à direita;

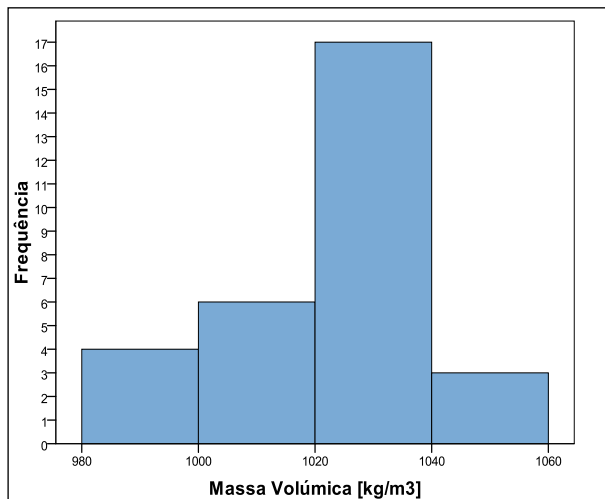


Fig.4.6. – Histograma da massa volúmica na argamassa de cimento e cal

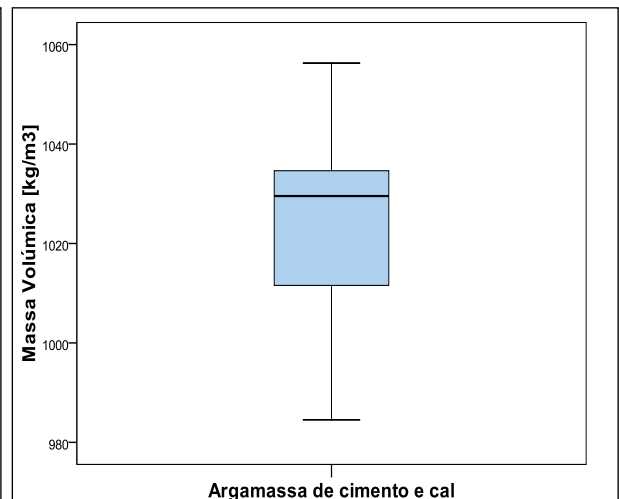


Fig.4.7. – Caixa-de-bigodes da massa volúmica na argamassa de cimento e cal

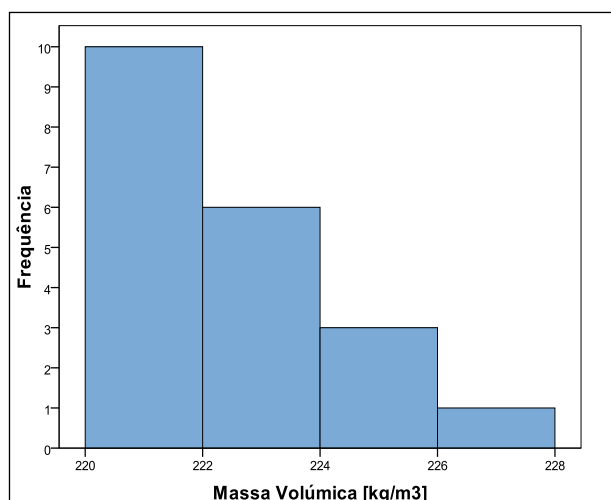


Fig.4.8. – Histograma da massa volúmica no isolamento

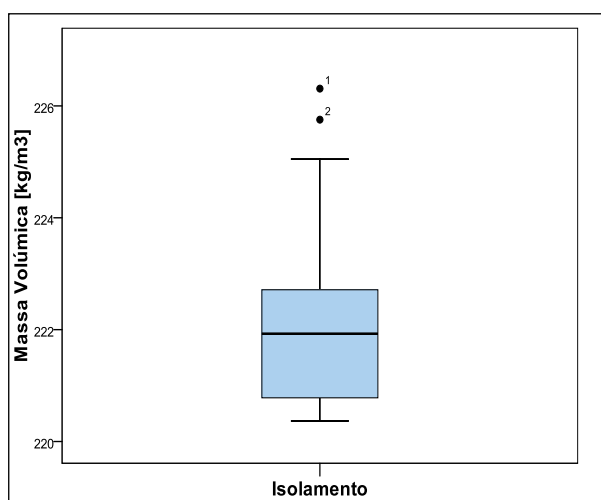


Fig.4.9. – Caixa-de-bigodes da massa volúmica no isolamento

Posto isto, na análise da **Porosidade Aberta Total** (ε), verifica-se que:

- Pela Fig. 4.10., observa-se que a porosidade aberta total média varia significativamente de material para material, sendo o isolamento o material mais poroso;
- Observando a mesma figura, verifica-se que a dispersão é muito reduzida em todos os casos, sendo que no isolamento é quase imperceptível;

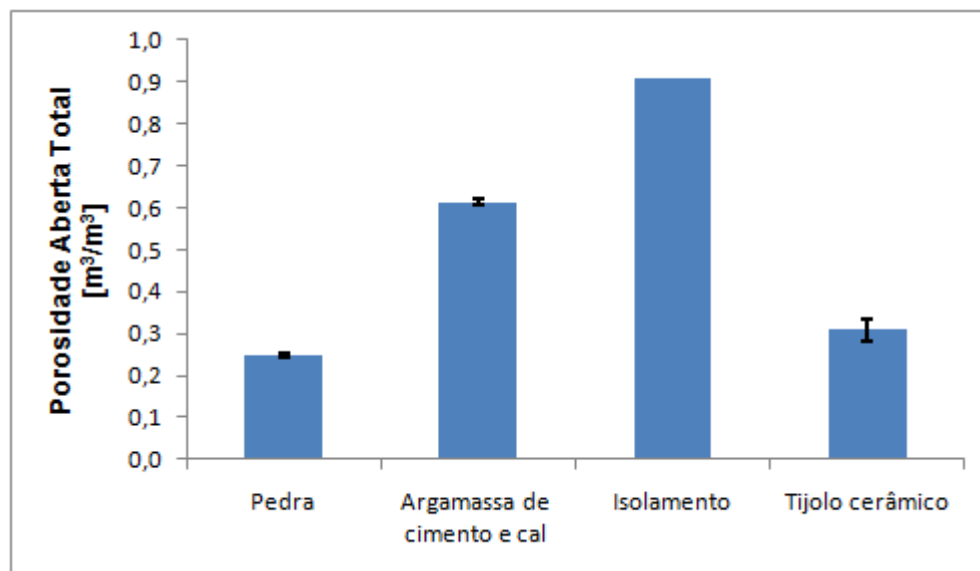


Fig.4.10. – Média e desvio-padrão da porosidade aberta total nos quatro materiais considerados

- Estas dispersões baixas são traduzidas pelo coeficiente de variação, que reforça a elevada homogeneidade desta propriedade em todos os materiais. Contudo, é de notar que o c_v no tijolo se destaca dos outros em cerca de 8 vezes mais ($c_v = 8,88\%$); pelo contrário, o c_v no isolamento é

bastante inferior aos restantes ($c_v=0,10\%$). Conclui-se, assim, que estamos perante as amostras com, respectivamente, a maior e menor homogeneidade do conjunto analisado;

- A mediana da porosidade aberta total, no caso da pedra e do tijolo cerâmico, possui um valor muito próximo da média, o que nos leva a crer que estamos perante distribuições aproximadamente simétricas. É possível observar parte da situação através Fig.4.11. e Fig.4.12. que apresentam, respectivamente, o histograma e o caixa-de-bigodes da porosidade aberta total no caso do tijolo cerâmico;
- Observando o histograma da Fig.4.11. verifica-se que a distribuição é ligeiramente assimétrica à esquerda. Contudo, essa assimetria é mínima, chegando a ser praticamente imperceptível pela caixa-de-bigodes da Fig.4.12.;
- O coeficiente de assimetria, para estes dois materiais (pedra e tijolo), vem confirmar a análise dos gráficos. O valor do coeficiente de assimetria é negativo no caso do tijolo cerâmico ($g_1 = -0,142$), o que sugere uma ligeira assimetria à esquerda;

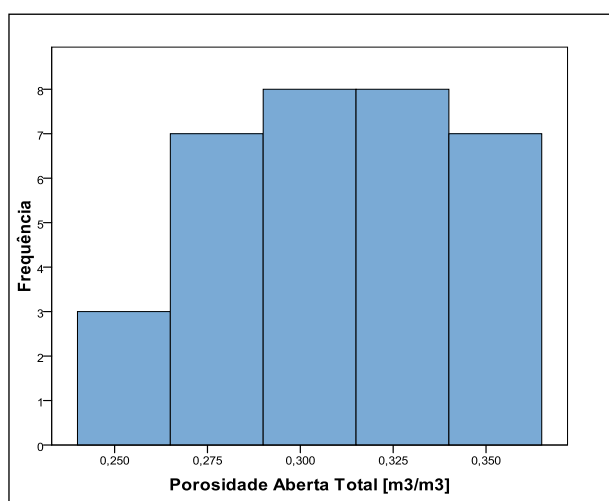


Fig.4.11. – Histograma da porosidade aberta total no tijolo cerâmico

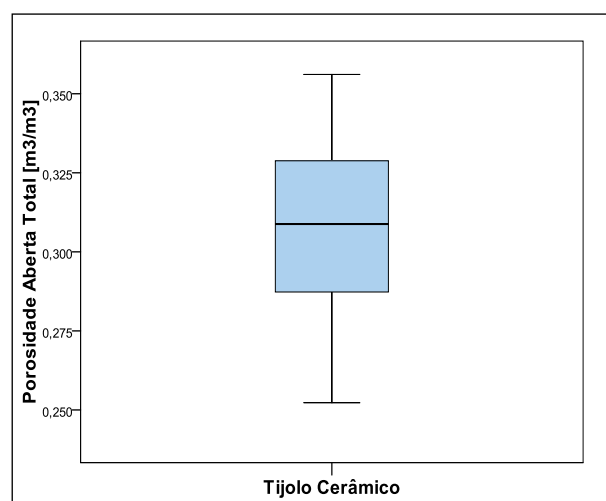


Fig.4.12. – Caixa-de-bigodes da porosidade aberta total no tijolo cerâmico

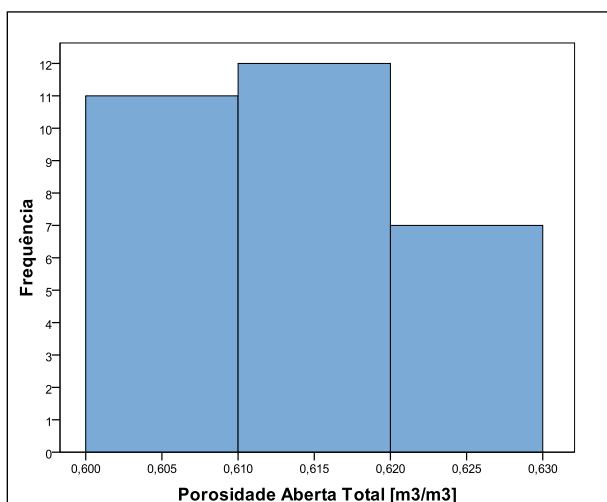


Fig.4.13. – Histograma da porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal

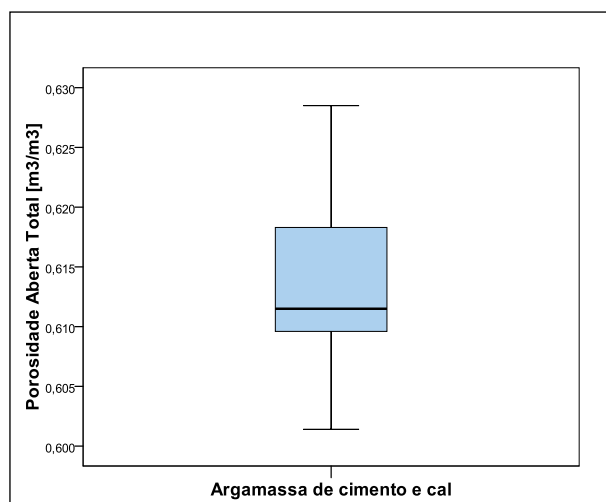


Fig.4.14. – Caixa-de-bigodes da porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal

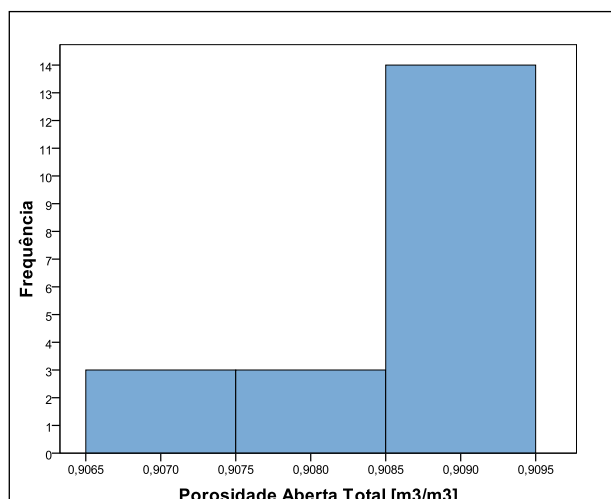


Fig.4.15. – Histograma da porosidade aberta total no isolamento

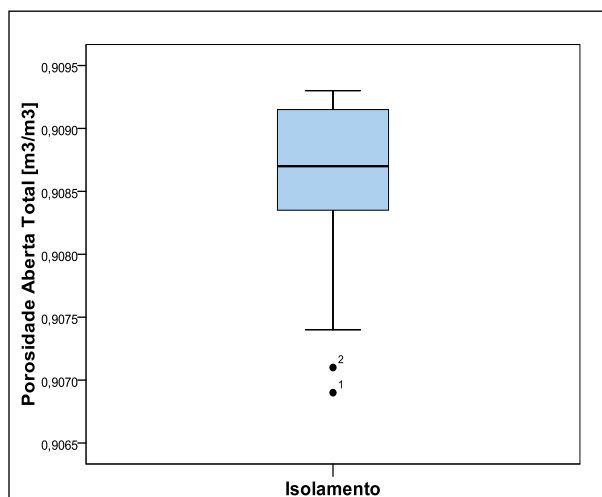


Fig.4.16. – Caixa-de-bigodes da porosidade aberta total no isolamento

- A porosidade mediana nos materiais argamassa e isolamento é próxima da porosidade média, no entanto, verifica-se que essas distribuições não são simétricas através dos respectivos histogramas e caixa-de-bigodes. Ver da Fig.4.13. à Fig.4.16.;
- No caso da argamassa (Fig. 4.13. e Fig. 4.14.), a distribuição é assimétrica à direita e, no caso do isolamento (Fig.4.15. e Fig.4.16.), a distribuição é assimétrica à esquerda. Na caixa-de-bigodes da Fig.4.16. verifica-se que a razão para a assimetria ser à esquerda deve-se à existência de extremos inferiores e, também, a um bigode inferior bastante mais longo que o superior;
- O valor do coeficiente de assimetria corrobora o que se observa nos gráficos mencionados. Isto é, no caso da argamassa, o coeficiente de assimetria é positivo ($g_1 = 0,612$) – o que indica uma distribuição assimétrica à direita – e no caso do isolamento, o coeficiente de assimetria é negativo ($g_1 = -1,094$) – o que indica uma distribuição assimétrica à esquerda.

Ao contrário das propriedades higrotérmicas anteriores, os dados relativos às propriedades que se seguem são provenientes de amostras muito pequenas. De facto, todas essas amostras apresentam dimensões iguais ou inferiores a 9. Isto significa que os histogramas poderão ter poucas classes e, como consequência, tornar-se pouco fidedignos. Verifica-se a mesma limitação para as caixas-de-bigodes.

Como tal, a análise da assimetria de distribuições provenientes de amostras muito pequenas deve ser apoiada essencialmente no coeficiente de assimetria (g_1), que engloba todos os valores da amostra.

Acrescenta-se ainda que, pelo facto das amostras serem muito pequenas, se torna difícil a extrapolação de conclusões para a totalidade da população (ou seja, extrapolar conclusões para a propriedade em geral) sem que a margem de erro seja muito grande. É erróneo inferir que os valores medidos em 9 ensaios (por exemplo) para uma propriedade qualquer, não variarão significativamente sempre que essa propriedade for medida.

À luz destas limitações, conclui-se que não é possível obter informações precisas sobre estas distribuições de dados. A forma mais robusta de análise neste tipo de situações baseia-se no estudo da centralidade da amostra através das medidas de tendência central ($\bar{x}$ e M_e) e dispersão (c_v).

Tendo em conta todas estas considerações, analisam-se de seguida as restantes propriedades. Começando pela **Saturação Capilar** (w_c), observa-se que:

- As amostras dos materiais estudados possuem dimensões muito pequenas (de 3 a 9 efectivos), o que impede a extrapolação de conclusões para a totalidade da população;

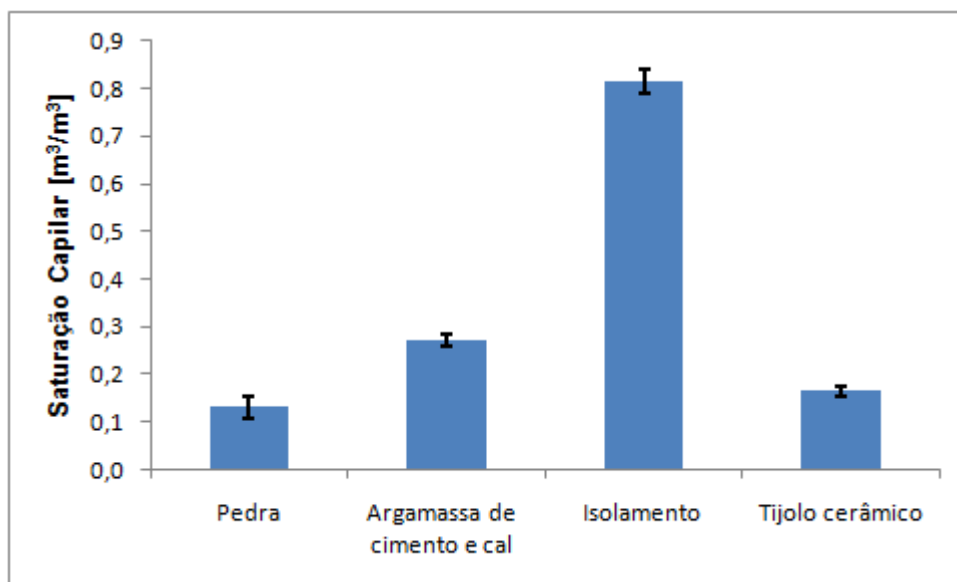
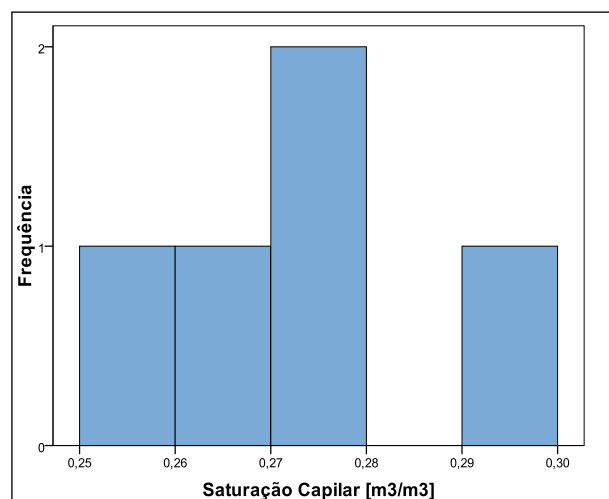
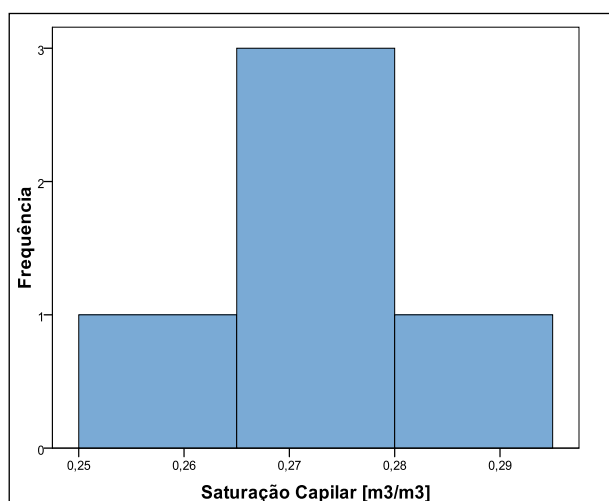


Fig.4.17. – Média e desvio-padrão da saturação capilar nos quatro materiais considerados

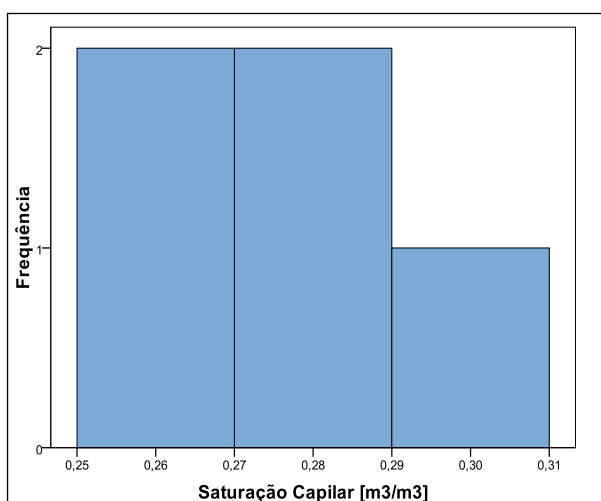
- Por análise da Fig.4.17., verifica-se que a média desta propriedade destaca-se, como seria de esperar, no caso do isolamento ($\bar{x} = 0,815 \text{ m}^3/\text{m}^3$), uma vez que este material já se tinha apresentado como sendo o mais poroso;
- A dispersão dos valores é relativamente baixa em todos os materiais, à excepção da pedra onde se verifica uma dispersão um pouco maior;
- Analisando o coeficiente de variação, confirma-se que as distribuições da saturação capilar são bastante homogéneas na maioria dos materiais. Salienta-se o caso da pedra, onde este coeficiente assume um valor de 17,4%, bastante acima dos coeficientes de variação dos restantes materiais (todos abaixo dos 7%). Esta distribuição é, por conseguinte, a mais dispersa;
- Quanto à saturação capilar mediana nos materiais pedra e tijolo cerâmico, verifica-se que os seus valores são um pouco diferentes da média, o que sugere que se tratam de distribuições assimétricas em ambos os casos. Pelo contrário, na argamassa e isolamento, estas duas medidas descritivas estão bastante próximas, o que significa que estas distribuições serão possivelmente simétricas;
- Tal como foi dito anteriormente, a análise dos histogramas e das caixas-de-bigodes em amostras muito pequenas não permite obter conclusões. É possível confirmar este facto através das Fig.4.18. a), b) e c), que dizem respeito à saturação capilar na argamassa de cimento e cal.



a) Amplitude das classes = 0,010



b) Amplitude das classes = 0,015



c) Amplitude das classes = 0,020

Fig.4.18. – Histogramas da saturação capilar na argamassa de cimento e cal com amplitude de classes igual a: a) 0,010; b) 0,015; c) 0,020

- Na Fig.4.18. a), observa-se que o histograma – cuja amplitude das classes é igual a 0,01 – sugere uma distribuição assimétrica à esquerda, apesar da existência de uma falha entre as barras. Com o intuito de eliminar essa falha, procurou-se aumentar a amplitude das classes para 0,015 (Fig.4.18. b)), onde verificamos que o histograma passou a ter uma forma completamente simétrica. Voltando a aumentar um pouco a amplitude, agora para 0,020 (Fig.4.18.c)), obteve-se um histograma assimétrico à direita. Desta forma, facilmente se depreende que estes histogramas apresentam resultados que se contradizem, comprovando a sua pouca utilidade;
- O coeficiente de assimetria da saturação capilar em todos os materiais é negativo, o que indica que todas as distribuições são assimétricas à esquerda. Esta medida descritiva é o único indicador que se deve ter em conta para descrever as características da forma desta distribuição, uma vez que as amostras são muito pequenas.

De seguida, efectua-se a análise da **Condutibilidade Térmica** (λ):

- As amostras possuem dimensões muito pequenas (de 5 a 6 efectivos), não sendo possível a extrapolação dos resultados;

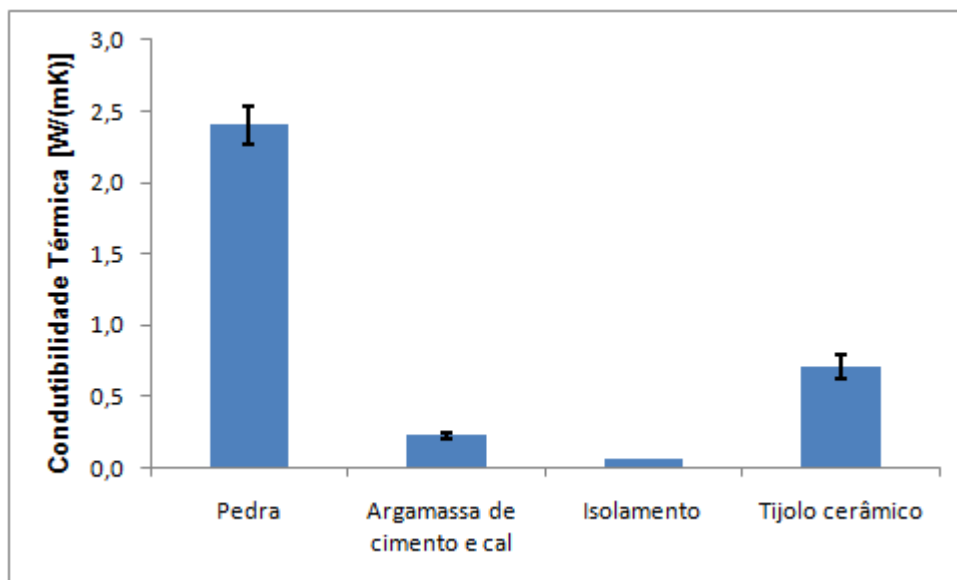


Fig.4.19. – Média e desvio-padrão da condutibilidade térmica nos quatro materiais considerados

- A Fig.4.19. ilustra as diferenças da condutibilidade térmica média nos quatro materiais considerados. É de salientar o destaque pronunciado da condutibilidade térmica na pedra;
- Por observação da mesma figura, verifica-se que a dispersão dos dados não é elevada em nenhum material, contudo existem diferenças a registar;
- Para melhor se analisar as diferenças da dispersão, verifica-se os valores do coeficiente de variação: na argamassa de cimento e cal e no tijolo cerâmico o seu valor ultrapassa os 10% ($c_v = 11,7\%$ e $c_v = 11,6\%$, respectivamente), ao passo que na pedra e no isolamento a dispersão é menor do que 5%, sendo estas últimas as amostras mais homogêneas do conjunto;
- O valor do coeficiente de assimetria desta propriedade é negativo nos diversos materiais, com excepção da argamassa ($g_1 = 0,523$). Isto quer dizer que as distribuições são maioritariamente assimétricas à esquerda. Só no caso da argamassa é que se observa uma distribuição assimétrica à direita;
- Dado que a dimensão desta amostra é muito pequena, não se analisam os histogramas e caixa-de-bigodes desta propriedade (que se encontram no Quadro Resumo 4, no Anexo) pelos motivos apresentados anteriormente.

Passa-se, agora, à análise do **Calor Específico** (c). Observa-se que:

- As amostras dos materiais medidos possuem dimensões muito pequenas (de 5 a 6 efectivos), o que impede, novamente, a extrapolação de conclusões;

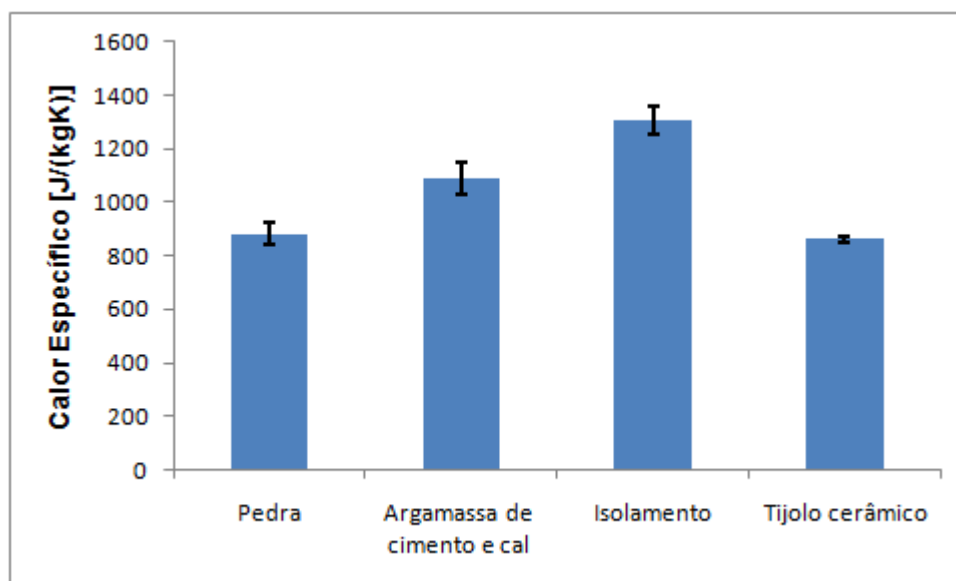


Fig.4.20. – Média e desvio-padrão do calor específico nos quatro materiais considerados

- Analisando a Fig.4.20. verifica-se que existe uma certa aproximação dos valores médios do calor específico nos materiais analisados, destacando-se um pouco o isolamento como é natural;
- Continuando a observar a mesma figura, verifica-se que a dispersão destas amostras é pequena e aproximada em todos os casos;
- O coeficiente de variação do calor específico confirma numericamente este facto, apresentando-se muito reduzido: varia entre 1,4% e 5,5%. Isto permite concluir que estamos perante amostras muito homogêneas, onde os desvios relativamente à média são pequenos;
- O valor do coeficiente de assimetria é negativo na argamassa e no isolamento ($g_1 = -0,376$ e $g_1 = -2,212$, respectivamente), o que indica distribuições assimétricas à esquerda. No caso da pedra e do tijolo cerâmico, os valores do coeficiente de assimetria são positivos ($g_1 = 0,451$ e $g_1 = 1,509$, respectivamente) o que indica distribuições assimétricas à direita;
- Dado que a dimensão desta amostra é muito pequena, não se analisam os histogramas e caixa-de-bigodes desta propriedade (que se encontram no Quadro Resumo 5, no Anexo) pelos motivos apresentados anteriormente.

Segue-se a análise do **Coefficiente de Absorção de Água** (A_w), onde se conclui que:

- As amostras dos materiais medidos possuem dimensões muito pequenas (de 3 a 6 efectivos), o que impede a extrapolação de conclusões;
- A Fig. 4.21. exibe uma grande disparidade entre o coeficiente de absorção de água médio do isolamento ($\bar{x} = 0,954 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0,5})$) relativamente aos restantes materiais (todos abaixo de $0,251 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0,5})$);
- Verifica-se, também por análise da Fig.4.21., que a dispersão é bastante elevada em todos os materiais à excepção do isolamento;

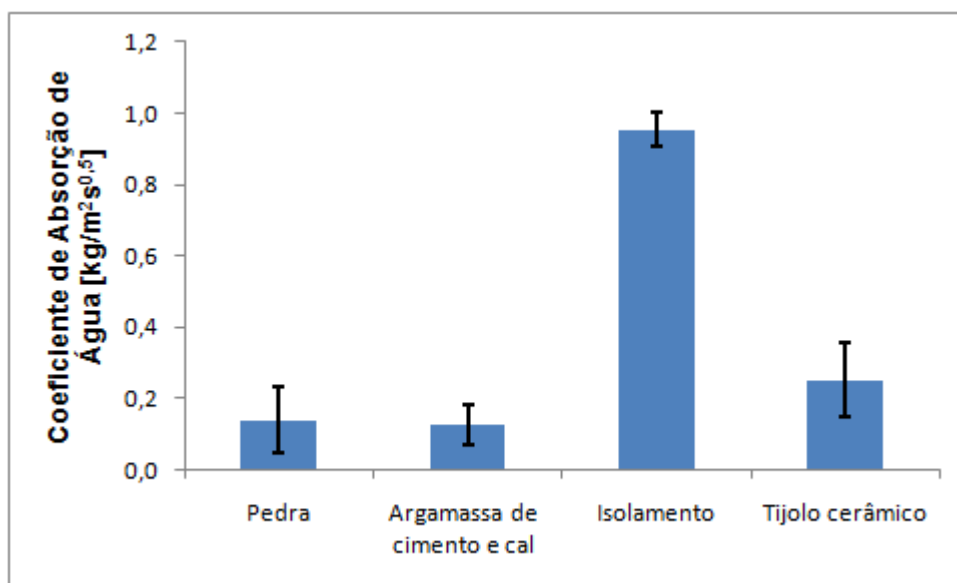


Fig.4.21. – Média e desvio-padrão do coeficiente de absorção de água nos quatro materiais considerados

- Como seria de esperar, o coeficiente de variação é bastante alto (na ordem dos 40 a 60%), com a excepção do isolamento ($c_v = 5,1\%$). Isto significa que as distribuições do coeficiente de absorção de água nas amostras de pedra, argamassa e tijolo cerâmico são pouco homogêneas, ao passo que no isolamento a distribuição é homogênea;
- Com excepção da argamassa ($g_1 = 0,589$), o valor do coeficiente de assimetria é negativo para todos os materiais. Isto quer dizer que as distribuições são, maioritariamente, assimétricas à esquerda. Só no caso da argamassa é que se observa uma distribuição assimétrica à direita;
- Mais uma vez, não se analisam os histogramas e caixas-de-bigodes desta propriedade (que se encontram no Quadro Resumo 6, no Anexo) pelos motivos apresentados anteriormente.

Por fim, efectua-se a análise da **Permeabilidade ao Vapor de Água** (μ), onde se verifica que:

- As amostras dos materiais medidos possuem dimensões muito pequenas (de 2 a 5 efectivos), o que impede, novamente, a extrapolação de conclusões para a totalidade da população;
- Observando a Fig. 4.22., verifica-se que a permeabilidade ao vapor de água varia significativamente consoante o material. Apenas se pode inferir que a argamassa de cimento e cal e o isolamento são relativamente próximos ($\bar{x} = 6,149$ e $\bar{x} = 5,371$, respectivamente);
- Analisando a mesma figura verifica-se uma maior dispersão desta propriedade no tijolo cerâmico, sendo que nos restantes materiais a dispersão é mais similar;
- Traduzindo a dispersão por números, o coeficiente de variação é, em todos os casos, abaixo de 4%, à excepção do tijolo cerâmico ($c_v = 17,5\%$). Assim, a distribuição da permeabilidade ao vapor de água no tijolo cerâmico é a mais dispersa, mas relativamente homogênea, sendo que as restantes são muito homogêneas;

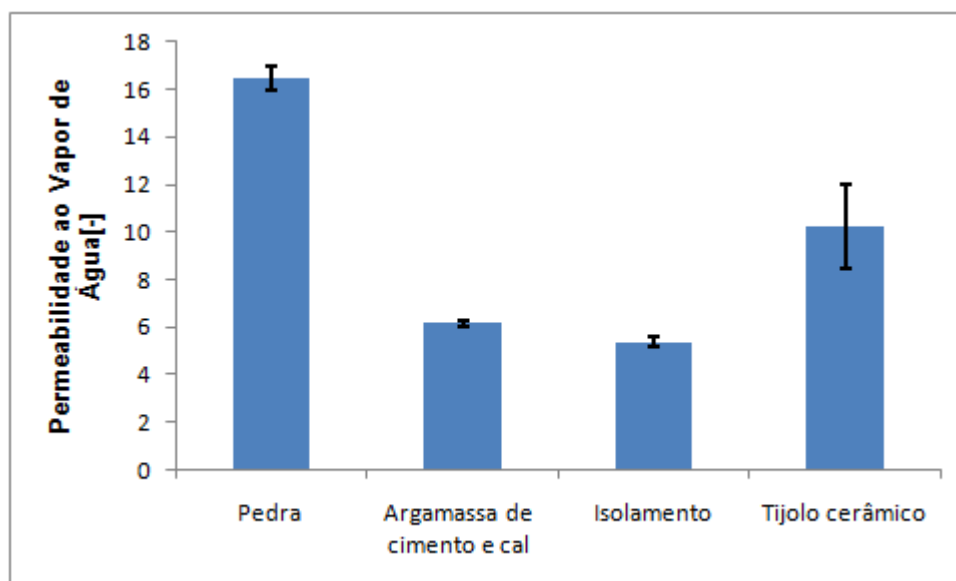


Fig.4.22. – Média e desvio-padrão da permeabilidade ao vapor de água nos quatro materiais considerados

- O valor do coeficiente de assimetria é positivo no caso da argamassa ($g_1 = 0,213$) e isolamento ($g_1 = 1,406$), o que indica tratar-se de uma distribuição com assimetria à direita. Por outro lado, este coeficiente é negativo no caso do tijolo cerâmico ($g_1 = -0,931$), sendo esta distribuição assimétrica à esquerda. Quanto à pedra, o valor do coeficiente de assimetria é 0,000, o que indica que estamos perante uma distribuição totalmente simétrica. Este resultado não é de estranhar, uma vez que a amostra utilizada é extremamente reduzida: apenas 2 efectivos;
- Neste caso, também não se efectua a análise dos histogramas e das caixa-de-bigodes desta propriedade (que se encontram no Quadro Resumo 7, no Anexo) pelos motivos apresentados anteriormente.

4.2.1.2. Análise descritiva por material

Neste ponto irá ser efectuada a análise descritiva das propriedades por material – ou seja, segundo a direcção vertical do Quadro 4.1.

Não será efectuada uma análise comparativa entre a média, a mediana e os respectivos gráficos (histogramas e caixa-de-bigodes) – existe pouco interesse em comparar estas medidas entre propriedades diferentes, uma vez que a grande maioria das propriedades apresenta unidades distintas. De facto, a análise segundo a direcção horizontal já cobriu todas as conclusões importantes a serem retiradas dessas medidas descritivas.

A abordagem vertical irá focar-se essencialmente na assimetria e homogeneidade das distribuições.

Posto isto, inicia-se a análise descritiva das propriedades da **Pedra**, que permite concluir o seguinte:

- O coeficiente de assimetria, neste material, varia entre todas as situações possíveis: indica a existência de distribuições assimétricas à direita e esquerda e, também, simétricas. De facto, observa-se que g_1 é negativo em quatro propriedades (ρ , w_c , λ e A_w) – distribuições assimétricas à esquerda – com g_1 negativo de uma forma mais expressiva no caso do coeficiente de absorção de

água (A_w), pois ultrapassa a unidade ($g_1 = -1,613$). Por outro lado, verifica-se que g_1 é positivo nas propriedades ε e c – o que indica que são distribuições assimétricas à direita. No caso da permeabilidade ao vapor, observa-se um valor de g_1 nulo – distribuição simétrica;

- Quanto ao coeficiente de variação, que traduz o grau de homogeneidade da amostra, verificamos que, no geral, todas elas são homogêneas – os coeficientes de variação variam entre 0,7% e 17,4%. A exceção à regra é o caso do coeficiente de absorção de água, cujo coeficiente de variação é 64,7%. Isto significa que os desvios desta propriedade, relativamente à média, são grandes.

Quanto às propriedades medidas na **argamassa de cimento e cal**, concluímos o seguinte:

- Os coeficientes de assimetria das propriedades medidas nas amostras de argamassa, nunca chegam a ser nulos. Logo, as distribuições ou são assimétricas à direita ou à esquerda. No primeiro caso, encontram-se as seguintes propriedades: ε , λ e A_w e μ . No segundo caso, encontram-se as restantes: ρ , w_c e c ;
- O coeficiente de variação mais elevado é o da absorção de água ($c_v = 45,1\%$), o que indica que esta amostra é pouco homogênea. Pelo contrário, os coeficientes de variação das restantes propriedades variam entre 1,1% e 11,7%, valores bastante inferiores ao do coeficiente da absorção de água. Por conseguinte, conclui-se que estas amostras são relativamente homogêneas.

De seguida, passamos para o **isolamento**, onde se observa que:

- O coeficiente de assimetria das várias propriedades no isolamento é maioritariamente negativo. Logo, a maioria das propriedades – nomeadamente ε , w_c , λ , c e A_w – apresentam distribuições assimétricas à esquerda. Apenas nas propriedades ρ e μ se observam valores positivos deste coeficiente ($g_1 = 1,099$ e $g_1 = 1,406$, respectivamente), indicando que estas distribuições são assimétricas à direita.
- O coeficiente de variação de todas as propriedades varia entre 0,1% e 5,1%. Como tal, todas as amostras são muito homogêneas.

Por fim, é feita a análise vertical para o **tijolo cerâmico**:

- À semelhança do caso do isolamento, grande parte das propriedades no tijolo cerâmico apresenta coeficientes de assimetria negativos, mais especificamente: ε , w_c , λ , A_w e μ . Por conseguinte, conclui-se que a maioria destas distribuições apresentam assimetrias à esquerda. Como exceção, encontram-se as propriedades ρ e c , com valores de g_1 positivos ($g_1 = 0,141$ e $g_1 = 1,509$, respectivamente). É de notar que estes valores são um pouco diferentes um do outro, pois o g_1 do calor específico é bastante mais elevado que o da massa volúmica. Isto indica uma assimetria à direita mais pronunciada, no primeiro caso;
- O coeficiente de variação indica que as amostras menos homogêneas dizem respeito ao coeficiente de absorção de água ($c_v = 41,8\%$) e à permeabilidade ao vapor de água ($c_v = 17,5\%$), embora este último seja consideravelmente pequeno em termos comparativos. Já nas restantes propriedades, este coeficiente apresenta valores baixos, entre 1,4% e 11,6%, sendo esta a amostra mais homogênea a do calor específico.

4.2.2. ANÁLISE DESCRITIVA DA PERMEABILIDADE AO VAPOR NO GESSO COM DIFERENTES TIPOS DE PINTURA

Neste ponto, a permeabilidade ao vapor de água, definida pelo factor de resistência à difusão do vapor de água, é analisada num material distinto – o gesso. Este surge com vários tipos de pintura: pintura 0 (sem tinta), pintura 1 (tinta de vinil), pintura 2 (primário de acrílico mais tinta de vinil), pintura 3 (tinta de acrílico) e pintura 4 (primário de acrílico mais tinta de acrílico).

As medidas descritivas desta propriedade são apresentadas no Quadro 4.2.:

Quadro 4.2. – Medidas descritivas da permeabilidade ao vapor de água no gesso pintado

PROPRIE- DADE	MEDIDAS DESCRITIVAS	GESSO PINTADO				
		PINTURA 0 (Sem tinta)	PINTURA 1 (Vinil)	PINTURA 2 (Primário + Vinil)	PINTURA 3 (Acrílico)	PINTURA 4 (Primário + Acrílico)
Permeabilidade ao Vapor de Água [-]	Média	9,379	21,904	51,942	13,530	50,931
	Mediana	9,770	21,940	52,870	13,310	48,745
	Desvio-padrão	1,497	4,313	11,935	2,790	13,231
	Assimetria	-0,610	1,087	-0,283	1,474	1,581
	Coef. Variação	0,160	0,197	0,230	0,206	0,260
	N (dimensão)	9	9	9	9	8

Mais uma vez, verifica-se que as dimensões das amostras são muito pequenas em todos os casos ($N \leq 9$). Como tal, são pouco fidedignas as conclusões que se possam retirar da análise dos histogramas e caixa-de-bigodes, não se podendo obter uma informação precisa sobre as distribuições dos dados.

Assim, a análise descritiva das amostras, através das medidas de tendência central e medidas de dispersão, constitui a forma mais robusta de análise da distribuição neste tipo de situações.

Posto isto, a análise da **Permeabilidade ao Vapor (μ)** no gesso pintado permite concluir o seguinte:

- Por análise da Fig. 4.23. e dos valores do Quadro 4.2., em média verifica-se que o gesso com Pintura 2 é o menos permeável ao vapor de água ($\bar{x} = 51,942$), ao passo que o gesso com Pintura 0 é o mais permeável ($\bar{x} = 9,379$). Denota-se que existem diferenças consideráveis entre as médias do factor μ nos casos das Pinturas 0, 1 e 3 relativamente às Pinturas 2 e 4. Estas diferenças tornam clara a influência da aplicação do primário de acrílico na permeabilidade ao vapor de água do gesso, sendo que a sua utilização provoca um aumento significativo dos valores de μ , o que indica que o material se torna menos permeável;
- Observando a Fig.4.23., conclui-se a dispersão assume contornos consideráveis em todos os materiais;
- Sendo mais fácil analisar a dispersão com números, o coeficiente de variação assume valores que se situam entre 16 e 26%, sendo este intervalo indicativo de que estamos perante amostras não muito homogêneas em todos os casos. A permeabilidade ao vapor de água nos casos do gesso com as Pinturas 2 e 4 apresenta menor homogeneidade. Em contrapartida, o gesso sem qualquer pintura constitui a distribuição menos dispersa deste conjunto. Pode concluir-se, então, que a aplicação de pintura aumenta a dispersão dos valores, especialmente se envolver a utilização de de acrílico;

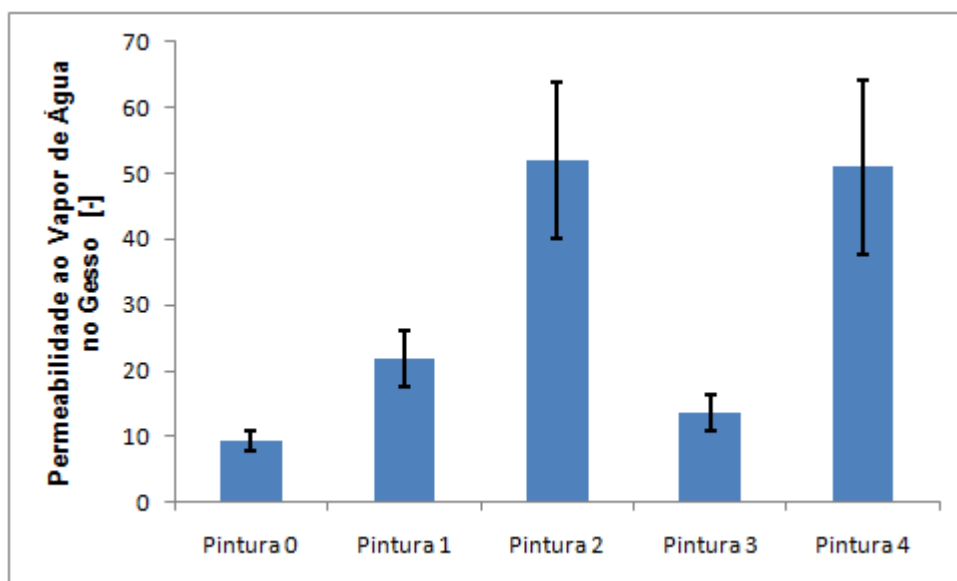


Fig.4.23. – Média e desvio-padrão da permeabilidade ao vapor de água no gesso com diferentes pinturas

- O valor do coeficiente de assimetria da permeabilidade ao vapor é negativo na Pintura 0 ($g_1 = -0,610$) e Pintura 2 ($g_1 = -0,283$), indicando que são distribuições assimétricas à esquerda. Já nas restantes pinturas, verifica-se que os coeficientes de assimetria são positivos, o que significa que se tratam de distribuições assimétricas à direita;
- Dado que as dimensões destas amostras são muito pequenas, não se analisam os histogramas e caixa-de-bigodes desta propriedade (que se encontram no Quadro Resumo 8, no Anexo), pelos motivos apresentados anteriormente.

Infelizmente, esta análise, como diz respeito a amostras muito pequenas, não poderá ser extrapolada para a população geral.

Contudo, a análise da centralidade da amostra, aliada ao coeficiente de assimetria, permite-nos obter uma visão aproximada das principais características das propriedades.

4.3. AJUSTE DE DISTRIBUIÇÕES

Neste ponto apresentam-se os resultados obtidos da aplicação dos testes *Kolmogorov-Smirnov* e *Qui-Quadrado*, que analisam a compatibilidade entre um conjunto de valores observados e uma distribuição teórica.

A grande vantagem em se confirmar a aderência entre uma distribuição teórica e uma distribuição de dados amostrais é o facto de se reduzir o número de medidas estatísticas necessárias para caracterizar a distribuição amostral, uma vez que podemos utilizar os parâmetros da distribuição teórica para o efeito. Este processo vem simplificar o trabalho de construção da base de dados.

4.3.1. APLICAÇÃO DO TESTE KOLMOGOROV-SMIRNOV

A aplicação do teste *Kolmogorov-Smirnov* (*K-S*) não impõe nenhuma restrição quanto à dimensão da amostra em estudo. No entanto, neste trabalho, entendeu-se ser melhor aplicá-lo apenas às distribuições provenientes das amostras de maior dimensão, deixando de lado as distribuições que provêm de amostras $N \leq 9$. Nestes casos, a aplicação do teste não seria aconselhável pois iria permitir retirar conclusões associadas a um grau de incerteza elevado, caso quiséssemos extrapolá-las para a generalidade das propriedades.

Desta forma, a aplicação do teste *K-S* apenas permitirá concluir se existe, ou não, um ajuste entre as distribuições da massa volúmica e porosidade aberta total e as distribuição teóricas sugeridas pela análise dos histogramas destas propriedades.

Observando os histogramas das distribuições amostrais da massa volúmica e da porosidade aberta total, verificamos que estes sugerem uma distribuição normal em quase todos os materiais (ver no ponto 4.2.1.1. a Fig. 4.4., Fig.4.6., Fig.4.11. e Fig.4.13., bem como as Fig. 4.24. e Fig.4.25. que são apresentadas já de seguida). Todas estas representações gráficas indicam uma provável adequação do ajuste da distribuição normal.

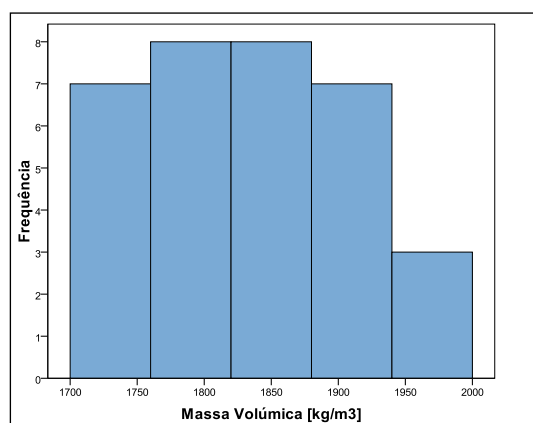


Fig.4.24. – Histograma da massa volúmica no tijolo cerâmico

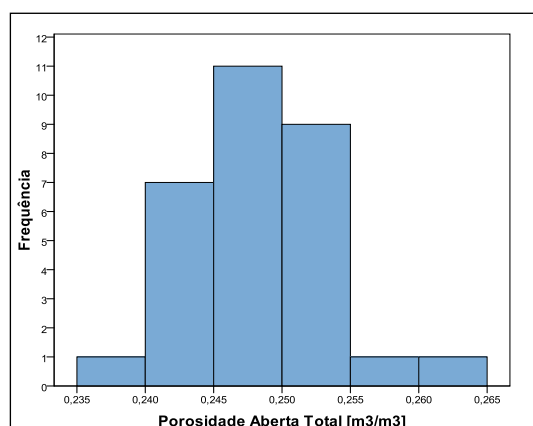


Fig.4.25. – Histograma da porosidade aberta total na pedra

Contudo, a distribuição normal não será provável nas distribuições da massa volúmica e da porosidade aberta total no isolamento, uma vez que estes histogramas sugerem distribuições exponenciais (ver no ponto 4.2.1.1. as Fig.4.8. e 4.15.).

Em suma, o teste *K-S* irá ser aplicado para determinar se a distribuição normal se ajusta às distribuições da massa volúmica e porosidade aberta total na pedra, argamassa de cimento e cal e tijolo cerâmico. Paralelamente, aplica-se o teste *K-S* para determinar se existe alguma aderência entre a distribuição exponencial e as referidas distribuições amostrais no isolamento.

De seguida, apresentam-se os resultados da aplicação do teste *K-S* nos casos onde se verificou que existe, efectivamente, um ajuste entre as distribuições amostrais e a distribuição normal. Depois, seguem-se os casos onde o teste não permite retirar essa conclusão.

Por fim, abordam-se os resultados referentes ao ajuste da distribuição exponencial às distribuições da massa volúmica e porosidade aberta total no isolamento.

Aplicação do Teste *K-S* – aderência das distribuições amostrais da massa volúmica e da porosidade aberta total à lei Normal

1) Formulação das hipóteses

H_0 : a população segue uma lei Normal;

H_1 : a população não segue uma lei Normal.

2) Nível de significância do teste

$\alpha = 5\%$ (valor adoptado)

3) e 4) Resultados do teste *K-S* e verificação de rejeição ou não rejeição de H_0

Começando pela massa volúmica na pedra e no tijolo cerâmico, apresenta-se o Quadro 4.3.:

Quadro 4.3. – Aplicação do teste *Kolmogorov-Smirnov* para ajuste da lei Normal à massa volúmica na pedra e no tijolo cerâmico

	MASSA VOLÚMICA [kg/m ³]	MATERIAL	
		PEDRA	TIJOLO CERÂMICO
N (dimensão)		30	33
Parâmetros normais	Média	1988,647	1833,856
	Desvio-padrão	13,682	72,501
Diferenças extremas	Absoluta	0,088	0,092
	Positiva	0,050	0,092
	Negativa	-0,088	-0,089
Z		0,483	0,526
valor-p		0,974	0,945

Olhando para o Quadro 4.3., verificamos o seguinte:

$\text{valor-}p = 0,974 > 0,05 \rightarrow$ a hipótese H_0 não é rejeitada

$\text{valor-}p = 0,945 > 0,05 \rightarrow$ a hipótese H_0 não é rejeitada

Logo, como o $\text{valor-}p$ é superior a 5% (nível de significância do teste) tanto para a pedra como para o tijolo cerâmico, **a hipótese H_0 não é rejeitada**. Por conseguinte, considera-se que a massa volúmica na pedra e no tijolo cerâmico segue uma distribuição Normal. Ajustando a curva da lei de Gauss (ou Normal) aos respectivos histogramas, obtemos as Fig.4.26. e Fig.4.27.:

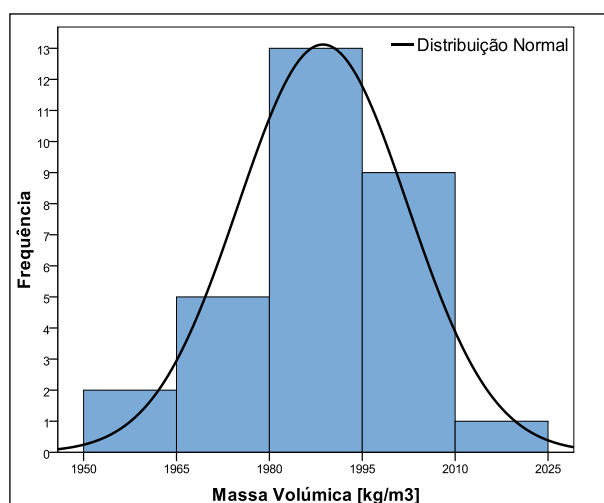


Fig.4.26. – Histograma da massa volúmica na pedra com ajustamento da curva da lei Normal

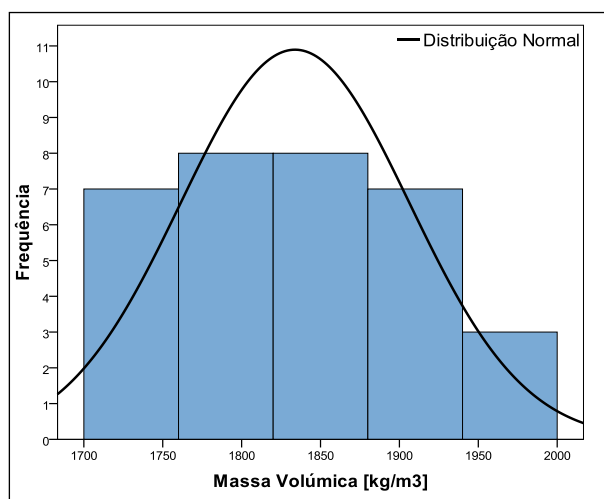


Fig.4.27. – Histograma da massa volúmica no tijolo cerâmico com ajustamento da curva da lei Normal

Posto isto, passamos à análise da porosidade aberta total na pedra e no tijolo cerâmico, cujos resultados se encontram no Quadro 4.4.:

Quadro 4.4. – Aplicação do teste *Kolmogorov-Smirnov*, para ajuste da lei Normal à porosidade aberta total na pedra e no tijolo cerâmico

	POROSIDADE TOTAL [m ³ /m ³]	MATERIAL	
		PEDRA	TIJOLO CERÂMICO
N (dimensão)		30	33
Parâmetros normais	Média	0,248	0,308
	Desvio-padrão	0,005	0,027
	Absoluta	0,086	0,091
Diferenças extremas	Positiva	0,086	0,089
	Negativa	-0,052	-0,091
Z		0,469	0,524
valor-p		0,981	0,946

Olhando para este quadro, verificamos que:

$valor-p = 0,981 > 0,05 \rightarrow$ a hipótese H_0 não é rejeitada

$valor-p = 0,946 > 0,05 \rightarrow$ a hipótese H_0 não é rejeitada

Assim, como o *valor-p* é superior a 5% (nível de significância do teste) tanto na pedra como no tijolo cerâmico, **a hipótese H_0 não é rejeitada**. Desta forma, considera-se que a porosidade aberta total na pedra e no tijolo cerâmico também segue a distribuição Normal. Ajustando a curva da lei Normal aos respectivos histogramas, obtemos as Fig.4.28. e Fig.4.29.:

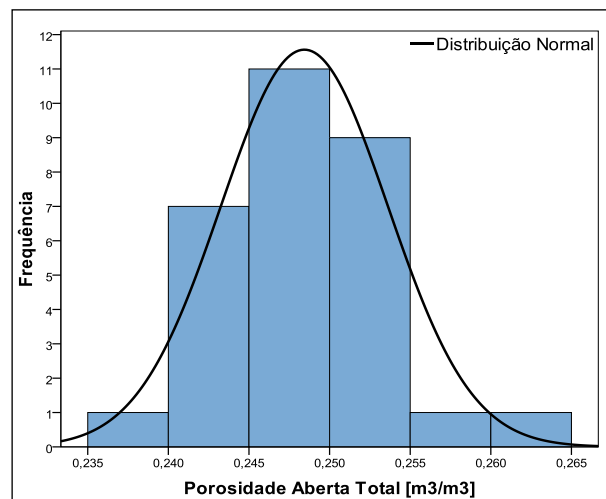


Fig.4.28. – Histograma da porosidade aberta total na pedra com ajustamento da curva da lei Normal

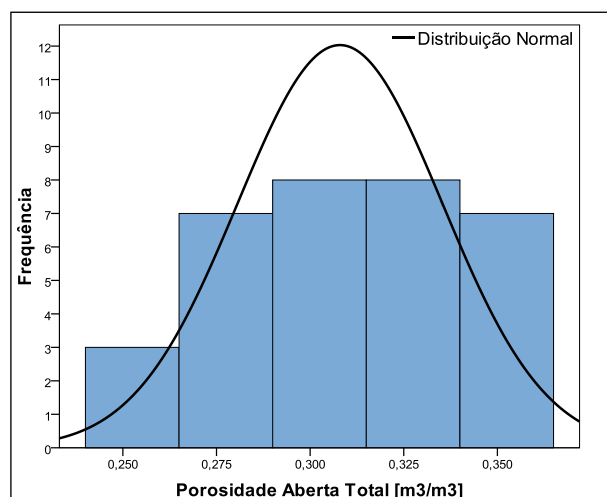


Fig.4.29. – Histograma da porosidade aberta total no tijolo cerâmico com ajustamento da curva da lei Normal

Terminam assim os resultados “positivos” do teste *K-S*, que confirmam o ajuste entre a distribuição Normal e as distribuições amostrais em estudo.

O teste *K-S* aplicado às distribuições da massa volúmica e da porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal não permitiu confirmar a aderência destas distribuições à lei Normal. É importante salientar que nestes casos o *valor-p* superou os 5% (ver Quadro 4.5. e Quadro 4.6.), contudo a significância dos seus resultados foi colocada em causa pelos seguintes motivos:

- As caixas-de-bigodes evidenciam medianas bastante afastadas das médias (Fig.4.7. e Fig.4.14., apresentadas no ponto 4.2.1.1.) e que não se coadunam com a centralidade de uma distribuição Normal;
- Denota-se que os *valores-p* obtidos nestes testes (0,096 e 0,100) surgem bastante inferiores aos *valores-p* obtidos nos testes de ajuste da massa volúmica e porosidade aberta total na pedra e no tijolo cerâmico (que ultrapassam o valor 0,900), reforçando a incerteza destes resultados.

É importante notar, também, que em todos os casos onde se considerou válido o resultado do teste *K-S*, os gráficos (histograma e caixa-de-bigodes) concordam com a distribuição Normal (ex: Fig.4.12.).

Quadro 4 5. – Aplicação do teste *Kolmogorov-Smirnov*, para ajuste da lei Normal à massa volúmica na argamassa de cimento e cal

	MASSA VOLÚMICA [kg/m ³]	MATERIAL ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL
N (dimensão)		30
Parâmetros normais	Média	1023,822
	Desvio-padrão	18,069
Diferenças extremas	Absoluta	0,225
	Positiva	0,113
	Negativa	-0,225
Z		1,232
<i>valor-p</i>		0,096

Quadro 4.6. – Aplicação do teste *Kolmogorov-Smirnov*, para ajuste da lei Normal à porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal

	POROSIDADE TOTAL [m ³ /m ³]	MATERIAL ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL
N (dimensão)		30
Parâmetros normais	Média	0,614
	Desvio-padrão	0,007
Diferenças extremas	Absoluta	0,223
	Positiva	0,223
	Negativa	-0,113
Z		1,224
valor-p		0,100

Posto isto, apresentam-se os resultados da aplicação do teste *K-S* ao ajuste das distribuições da massa volúmica e da porosidade aberta total, no isolamento, a uma lei Exponencial.

Aplicação do Teste *K-S* – aderência das distribuições amostrais massa volúmica e da porosidade aberta total à distribuição Exponencial

Atendendo à forma das representações gráficas das distribuições da massa volúmica e da porosidade aberta total referentes ao isolamento, que sugerem uma distribuição exponencial, testou-se a sua aderência através do teste *K-S*, apresentando-se os resultados no Quadro 4.7. e Quadro 4.8.:

Quadro 4.7. – Aplicação do teste *Kolmogorov-Smirnov*, para ajuste da lei Exponencial à massa volúmica no isolamento

	MASSA VOLÚMICA [kg/m ³]	MATERIAL ISOLAMENTO
N (dimensão)		20
Parâmetro da exponencial	Média	222,254
	Absoluta	0,629
Diferenças extremas	Positiva	0,361
	Negativa	-0,629
Z		2,813
valor-p		0,000

Quadro 4.8. – Aplicação do teste *Kolmogorov-Smirnov*, para ajuste da lei Exponencial à porosidade aberta total no isolamento

	POROSIDADE TOTAL [m ³ /m ³]	MATERIAL ISOLAMENTO
N (dimensão)		20
Parâmetro da exponencial	Média	0,909
	Absoluta	0,631
Diferenças extremas	Positiva	0,368
	Negativa	-0,631
Z		2,824
valor-p		0,000

Olhando para os Quadros 4.7. e 4.8., verificamos que:

Massa volúmica (isolamento) $\text{valor-p} = 0,000 \leq 0,05 \rightarrow$ a hipótese H_0 é rejeitada

Porosidade aberta total (isolamento) $\text{valor-p} = 0,000 \leq 0,05 \rightarrow$ a hipótese H_0 é rejeitada

Então, como em ambos os casos o *valor-p* resultante da aplicação do teste *K-S* foi menor que 5%, a hipótese H_0 é rejeitada. Conclui-se que as distribuições da massa volúmica e da porosidade aberta total no isolamento não seguem uma distribuição exponencial.

4.3.2. APLICAÇÃO DO TESTE QUI-QUADRADO

Tendo em conta todas as regras práticas do teste Qui-Quadrado, facilmente se percebe que a sua aplicação apenas é possível para ajustamentos de leis típicas às distribuições da massa volúmica e porosidade aberta total nos diferentes materiais. De facto, só nestas variáveis as amostras apresentam dimensões $N \geq 30$, valor mínimo exigível para a aplicação deste teste com confiança.

Neste trabalho, a aplicação do teste Qui-Quadrado incidiu apenas nos casos onde o teste *K-S* não permitiu confirmar o ajuste entre as distribuições amostrais em questão e a leis teóricas prováveis.

As distribuições da massa volúmica e porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal não foram consideradas ajustáveis à lei Normal, apesar de evidenciarem *valores-p* superiores a 5% no teste *K-S*. De forma a confirmar esta desconfiança nos resultados do teste *K-S*, será efectuada a aplicação do teste Qui-Quadrado nestas distribuições.

É de referir que, no caso do isolamento, não são verificados os requisitos mínimos de aplicação do teste Qui-Quadrado, uma vez que as amostras são de dimensão $N = 20$. Por conseguinte, não foi possível aplicar este teste para determinar a aderência destas distribuições à Lei Exponencial.

Posto isto, apresenta-se o teste do Qui-Quadrado aplicado às distribuições da massa volúmica e porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal:

Aplicação do Teste Qui-Quadrado – aderência da distribuição da massa volúmica na argamassa de cimento e cal, à distribuição Normal

Formulação das hipóteses

H_0 : a população segue uma lei Normal;

H_1 : a população não segue uma lei Normal.

Cálculo da estatística de teste

Quadro 4.9. – Aplicação do teste Qui-Quadrado, para ajuste da distribuição Normal à massa volúmica na argamassa de cimento e cal

CLASSES	N_k	p_k	e_k	d
≤ 1000	4	0,0937	2,811	0,503
]1000;1020]	6	0,3226	9,678	1,398
]1020;1040]	17	0,3985	11,955	2,129
≥ 1040	3	0,1853	5,559	1,178

$e_k < 5 \rightarrow \text{KO}$

Tal como foi referido no Capítulo 2, uma das regras práticas que permite utilizar o teste do Qui-Quadrado com confiança é respeitar um valor mínimo de e_k igual a 5. No Quadro 4.9. verificamos que para aquelas classes adoptadas existe uma situação que não respeita essa condição (assinalada a vermelho).

Segundo Guimarães e Cabral (1997), se a condição $e_k \geq 5$ não prevalecer o teste ainda pode ser utilizado embora com moderada confiança, desde que não mais de 20% dos valores de e_k sejam inferiores a 5 e nenhum for inferior a 1. Quando tal não se verificar, procura-se agregar classes adjacentes de forma a obter novas categorias que satisfaçam esta condição.

Tendo em consideração estas recomendações, verifica-se que não é possível a aplicação do teste uma vez que:

- Mais de 20% dos valores de e_k são inferiores a 5;
- Recorrendo à prática da agregação de classes, ao se agregar no mínimo duas classes, isto levaria a que restassem apenas 3 no total. Isto implicaria que o número de graus de liberdade (GL) fosse igual a 0 ($GL = 3 - (2 + 1)$), sendo que o número mínimo de GL necessário para a realização do teste é igual a 1.

Desta forma, conclui-se que não é possível aplicar o teste do Qui-Quadrado a esta distribuição. Como o teste $K-S$ também não permitiu comprovar com confiança a aderência à lei Normal, considera-se que esta distribuição amostral não segue, de facto, uma distribuição Normal.

Aplicação do Teste Qui-Quadrado – aderência da distribuição da porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal à distribuição Normal

Formulação das hipóteses:

H_0 : a variável segue uma lei Normal;

H_1 : a variável não segue uma lei Normal.

Cálculo da estatística de teste:

Quadro 4.10. – Aplicação do teste Qui-Quadrado, para ajuste da lei Normal à porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal

CLASSES	N_k	p_k	e_k	d_k
$\leq 0,610$	11	0,2839	8,517	0,724
$]0,610;0,615]$	9	0,2729	8,187	0,081
$]0,615;0,620]$	3	0,2475	7,425	2,637
$\geq 0,620$	7	0,1957	5,871	0,217
N = 30		d = 3,659		

Graus de Liberdade:

$$GL = 4 - (2 + 1) = 1$$

Nível de significância de teste:

$$\alpha = 5\% \text{ (valor adoptado)}$$

Decisão estatística:

Por consulta do Quadro 4.10. e da Tabela de Distribuição do χ^2 , verifica-se que $\chi^2_{(0,05)} = 3,841$. Então, pode concluir-se que:

$$d = 3,659 < 3,841 \rightarrow \text{A hipótese } H_0 \text{ não é rejeitada;}$$

Apesar do teste não rejeitar a hipótese H_0 , observa-se que o valor d se encontra muito próximo do limite 3,841. Isto indica que o resultado do teste não é conclusivo. De facto, caso se tivesse adoptado um nível de significância mais elevado (tornando o teste mais rigoroso), a hipótese H_0 seria rejeitada. A este facto junta-se a representação da caixa-de-bigodes da Fig.4.14., cuja mediana se encontra afastada do centro (não confirmando tratar-se de uma distribuição normal).

Assim, podemos concluir que não é possível afirmar com confiança que esta distribuição segue a lei Normal.

4.3.3. FUNÇÕES DE FREQUÊNCIAS

Quando os testes de ajustamento não confirmam aderência entre as distribuições amostrais em estudo e as distribuições teóricas prováveis, a caracterização das distribuições amostrais pode ser feita com recurso a funções de frequências relativas, retiradas da leitura dos histogramas. Desta forma, é possível obter estimativas de probabilidades de ocorrência em intervalos de valor de interesse.

Este processo foi adoptado na grande maioria dos casos deste trabalho, não só devido aos resultados negativos dos testes de ajuste a distribuições teóricas, mas também devido às limitações associadas à dimensão das amostras. Em suma, todas as distribuições provenientes de amostras de dimensão $N \leq 9$, juntamente com as distribuições onde os testes *K-S* e *Qui-Quadrado* não confirmaram ajustes, foram caracterizadas pelas suas funções de frequências.

A título de exemplo, apresenta-se a função de frequências da porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal (expressão 4.1.) e respectivo histograma (Fig. 4.30.), a partir do qual se determinou a função. O histograma é composto por frequências absolutas, ou seja, pelo número de efectivos contabilizado em cada intervalo de valores (classes). Dividindo esses efectivos pela totalidade das frequências da amostra em estudo (no presente caso 30), obtemos as frequências relativas em cada intervalo. Estas frequências estimam a probabilidade dos valores da porosidade aberta total se encontrarem dentro dos intervalos considerados. O mesmo raciocínio foi aplicado aos casos mencionados em cima, podendo-se observar todas as funções de frequências nos Quadros Resumo colocados no Anexo.

FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{11}{30} & \text{se } x \in]0,60;0,61] \\ \frac{12}{30} & \text{se } x \in]0,61;0,62] \\ \frac{7}{30} & \text{se } x \in]0,62;0,63] \end{cases} \quad (4.1.)$$

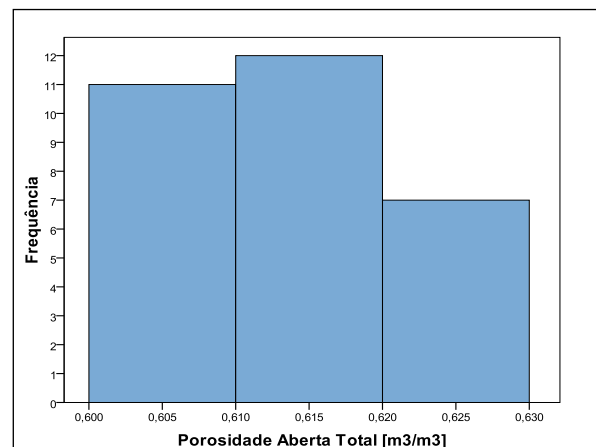


Fig.4.30. – Histograma da porosidade aberta total na argamassa de cimento e cal

À luz do que foi efectuado nas amostras de maior dimensão, o principal objectivo dos histogramas é permitir determinar a distribuição subjacente, de forma a ajustar uma curva conhecida que modele o comportamento aleatório da propriedade. Contudo, como a maioria das amostras deste capítulo são de dimensão muito reduzida, este processo não é passível de ser aplicado. Assim que mais dados sejam incluídos no estudo, uma curva teórica poderá ser ajustada a essas distribuições.

4.4. SÍNTESE DA ANÁLISE DO CAPÍTULO 4

O Capítulo 4 apresenta uma análise crítica aos resultados obtidos do tratamento estatístico de valores de propriedades higrotérmicas, definidas por um só parâmetro, em diferentes materiais. Os dados que foram tratados provêm do projecto *Annex 55* da IEA, e dizem respeito a sete propriedades higrotérmicas em cinco materiais específicos distintos. Foi, então, estruturada uma reflexão crítica segundo dois pontos de vista: o da análise da mesma propriedade nos diferentes materiais e o da análise das diferentes propriedades no mesmo material.

A análise crítica dos resultados foi baseada na estatística descritiva, tendo sido viável avançar para a inferência estatística nos casos com amostras de dimensão representativa, podendo-se extrapolar conclusões para as propriedades em geral. Refiram-se os casos das distribuições da massa volúmica e da porosidade aberta total, onde foi possível chegar a caracterizações razoavelmente fiáveis das suas distribuições através de medidas estatísticas descritivas, gráficos e testes de ajustamento a leis típicas.

Concluiu-se que ambas as propriedades apresentam valores médios que variam substancialmente conforme o material e que as suas amostras são muito pouco dispersas em todos os materiais considerados; já a forma das distribuições revelou-se variável. Acrescenta-se que foi possível determinar, através do teste de ajuste *Kolmogorov-Smirnov (K-S)*, que a curva da lei Normal se ajusta às distribuições da massa volúmica e da porosidade aberta total na pedra e no tijolo cerâmico. Outros testes (*K-S* e Qui-Quadrado) foram aplicados às distribuições destas propriedades nos restantes materiais, mas sem conclusões afirmativas de ajuste.

As restantes propriedades abordadas (saturação capilar, condutibilidade térmica, calor específico, coeficiente de absorção de água e permeabilidade ao vapor de água) apresentaram limitações muito grandes neste exercício estatístico, uma vez que as dimensões das suas amostras eram demasiado pequenas para a realização da inferência estatística e para a utilização de gráficos e testes de ajustamento. Como tal, as conclusões retiradas são meramente baseadas na análise descritiva e em funções de frequências, sem extrapolação de conclusões para a população geral. Com a junção de mais dados, o raciocínio elaborado para a massa volúmica e porosidade aberta total poderia ser aplicado nestas distribuições.

Relativamente a cada uma destas propriedades, verificou-se que todas elas exibem valores tipo sem grande semelhança entre os vários materiais. Apenas o calor específico evidenciou uma certa contrariedade a este facto, verificando-se alguma harmonia dos seus valores.

Quanto à dispersão salienta-se que todas as propriedades, à excepção do coeficiente de absorção de água, exibem o geral distribuições homogéneas nos diversos materiais. É de salientar que o calor específico apresenta a maior homogeneidade do conjunto de propriedades analisado. É expectável esta homogeneidade na maioria das propriedades, visto que dizem respeito a materiais específicos.

À semelhança das amostras com maiores dimensões, a forma das distribuições é variável em todos os casos, à excepção da saturação capilar onde se observou uma forma assimétrica à esquerda em todos os materiais.

Do ponto de vista da análise das diversas propriedades num só material foi apenas considerada a forma e a dispersão das distribuições. Foi possível concluir que em cada material as distribuições das diversas propriedades higrotérmicas exibiam formas diferentes e dispersões variáveis (isto é, cada propriedade evidenciava dispersões baixas ou elevadas consoante o material). A maior diferença nas dispersões registou-se na pedra, com coeficientes de variação iguais a 0,7% na massa volúmica e 64,7% no coeficiente de absorção de água. Já as propriedades no isolamento revelaram-se as menos dispersas de todo o conjunto de materiais em estudo.

Aos materiais em cima referidos acrescentou-se o gesso pintado, cuja análise foi focada apenas na permeabilidade ao vapor de água, traduzida por μ . Verificou-se que a utilização da pintura com um primário acrílico provocou um aumento pronunciado dos valores médios do factor μ – o que indica uma diminuição da permeabilidade – bem como uma maior dispersão dos seus valores. O gesso não pintado também foi incluído na análise, apresentando-se como o material com maior permeabilidade ao vapor de água do conjunto analisado e, paralelamente, a amostra com menor dispersão de valores.

Estabelece-se, portanto, uma relação entre a aplicação do primário de acrílico e a diminuição da permeabilidade ao vapor de água do gesso. Por outro lado, verificou-se a existência de uma relação entre o aumento da dispersão dos valores e a aplicação de pintura (em especial, de acrílico). Infelizmente, estas considerações não podem ser tomadas para a população geral, uma vez que são retiradas de amostras demasiado pequenas ($N \leq 9$).

As amostras de dimensão pequena, juntamente com as de dimensão mais elevada onde não foi possível comprovar o seu ajuste a distribuições teóricas, foram caracterizadas através de funções de frequências que traduzem a probabilidade dos valores das propriedades ocorrerem em determinados intervalos.

Todo este exercício de tratamento de dados de propriedades higrotérmicas foi condensado em quadros que resumem as principais características das distribuições de valores estudadas – os Quadros Resumo apresentados no Anexo. Estes quadros exemplificam o tipo de informação que poderia ser integrada em bases de dados de materiais, em programas de simulação numérica, bem como em catálogos de consulta.

5

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DA LITERATURA

5.1. ENQUADRAMENTO

A importância do conhecimento das propriedades higrotérmicas dos materiais é já conhecida. Em certos programas de simulação numérica são utilizados valores de referência de propriedades higrotérmicas tabelados na literatura. Por outro lado, o acesso a catálogos ou valores de referência por parte de projectistas e profissionais da área também assume um papel importante na compreensão do comportamento dos edifícios no domínio da higrotérmica.

No âmbito deste capítulo foi efectuada uma pesquisa na literatura de valores de propriedades higrotérmicas em diferentes materiais, frequentemente utilizados na construção civil. Esta pesquisa foi direccionada para as propriedades estudadas nos capítulos anteriores – massa volúmica, porosidade aberta total, saturação capilar, condutibilidade térmica, calor específico, permeabilidade ao vapor de água e coeficiente de absorção de água.

A selecção dos materiais foi feita em função do maior volume de dados encontrados na literatura, sendo eles: o betão normal, o betão celular autoclavado, pedra calcária, arenito, tijolo cerâmico, contraplacado, isolamento EPS, isolamento XPS, argamassa de cimento, argamassa de cimento e cal, gesso projectado e gesso em painél.

O objectivo do presente capítulo passa por cumprir, essencialmente, os seguintes pontos de análise:

- Efectuar uma análise crítica das medidas descritivas obtidas do tratamento estatístico dos valores recolhidos na literatura. Análise focada fundamentalmente na centralidade e dispersão dos dados;
- Estabelecer uma análise comparativa entre as amostras das propriedades higrotérmicas em materiais específicos (do Capítulo 4) e as amostras das mesmas propriedades em materiais genéricos (do presente capítulo), de forma a averiguar o encaixe entre ambas;

Inicialmente, serão enumeradas todas as fontes e respectivos dados de cada propriedade recolhidos na pesquisa.

Posteriormente, serão apresentados os resultados obtidos do tratamento estatístico desses dados, concretizando, no final, os pontos de análise acima referidos.

5.2. PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS RECOLHIDAS NA LITERATURA

Foi já mencionado que as propriedades higrotérmicas pesquisadas na literatura englobam apenas as propriedades que foram abordadas nos Capítulos 2 e 4.

As limitações de tempo e a escassez de dados relevantes na literatura não permitiram encontrar um número de valores relativamente elevado para a maioria das propriedades procuradas. De facto, quanto à porosidade aberta total e à saturação capilar, não foi possível recolher mais do que um valor em certos materiais, sendo que na maior parte dos casos não se encontrou qualquer valor. Por esse motivo, estas duas propriedades não serão analisadas neste capítulo.

É de notar que, em algumas fontes pesquisadas, os valores das propriedades são apresentados sob a forma de intervalo; por exemplo, o calor específico do betão é traduzido pelo seguinte intervalo de valores 1060-1080 J/(kg·K), segundo Lanzinha e Freitas, 1998. Nestes casos, o critério utilizado foi o de calcular o valor médio do intervalo, inserindo esse valor no conjunto de dados adequado; no exemplo anterior o valor médio seria igual a 1070 J/(kg·K), sendo inserido no conjunto “calor específico no betão normal”.

Algumas fontes da permeabilidade ao vapor de água traduzem esta propriedade segundo o valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material, δ_p . Nestes casos, calculou-se o valor do factor de resistência ao vapor de água, μ , segundo a equação (2.3) apresentada no Capítulo 2. Adoptou-se como referência o valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar, δ_a , igual a $1,852 \times 10^{-10}$ kg/(m·s·Pa) – descrito na norma DIN4108 e utilizado na Nota Técnica 002 (Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção, Condensações Internas) do LFC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Nos pontos que se seguem serão apresentados em quadros todos os valores das propriedades encontradas na literatura e suas respectivas fontes. Para evitar um excesso de informação em cada quadro, são utilizadas referências aos nomes de cada artigo/livro consultado. Os seus nomes completos encontram-se referidos no Quadro 5.1. e na bibliografia. Os artigos que se encontram *online* também estão assinalados no referido quadro e a sua página WEB encontra-se descrita na bibliografia.

Quadro 5.1. – Fontes da literatura de valores de propriedades higrotérmicas em diversos materiais

REFERÊNCIA	FONTE	AUTOR(ES)	WEB
[1]	Análise Técnico Financeira de Paredes Exteriores em Panos Simples. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2007	L. Silva	Ver bibliografia
[2]	Analysis of Microstructure and Properties of Autoclaved Aerated Concrete Wall Construction Materials, 2007	Y. Ungkoon, C. Sittipunt, P. Namprakai, W. Jetipattaranat, K. Kim, T. Charinpanitkul	Ver bibliografia
[3]	Automatic Measurement of Water Uptake Coefficient of Building Materials. 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, 2005	R. Plagge, G. Scheffler, J. Grunewald	Ver bibliografia

[4]	Bases de Dados do programa WUFI light versão 5.0	Fraunhofer IBP	Ver bibliografia
	[4a] Base de dados América do Norte		
	[4b] Base de dados MASEA		
	[4c] Base de dados Instituto Fraunhofer para Física das Construções		
	[4d] Base de dados Universidade Tecnológica de Viena		
	[4e] Base de dados Universidade de Lund		
	[4f] Base de dados Universidade Norueguesa de Ciências e Tecnologia		
[5]	Building materials and products. Hygrothermal Properties - Tabulated design values, 2000	CEN - Comité Européen de Normalisation	-
[6]	Caracterização da Capilaridade de Revestimentos de Fachada. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996	J. M. M. S.Sousa	-
[7]	Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios, 1990	C.A. Pina dos Santos, J.A. Vasconcelos de Paiva	-
[8]	Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações, 2003	ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas	Ver bibliografia
[9]	Heat Air and Moisture Transport. Final Report, Vol 3, Task 3: Material Properties. International Energy Agency, Annex 24, 1996	M.K. Kumaran	-
[10]	Humidade Ascensional, 2008	V.P. Freitas, M.I. Torres, A.S. Guimarães	-
[11]	Hygric and thermal properties of materials used in historical masonry	M. Pavlíková, Z. Pavlík, R. Černý	Ver bibliografia
[12]	HAMSTAD. WPI: Final Report. Moisture transfer properties and materials characterization. Laboratory of Building Physics, K.U. –Leuven, Belgium, 2003	S. Roels, K. Vandersteen, J. Carmeliet	Ver bibliografia
	[12a] CTU - CTU Prague		
	[12b] KUL - K.U. Leuven, Belgium		
	[12c] TNO - Building and Construction Research		
	[12d] TUD - Technical University of Dresden, Germany		
	[12e] UE - University of Edinburgh, England		
	[12f] NRC - National Research Council, Canada		

[13]	Moisture transport across interfaces between autoclaved aerated concrete and mortar, 2003.	X. Qiu, F. Haghighat, M.K. Kumaran	Ver bibliografia
[14]	Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção - Condensações Internas, Nota de Informação Técnica, LFC, Porto, 1998.	V.P. Freitas, P.S. Pinto	-
[15]	Proprietats dels materials i elements de construcció, 2000.	R.S. Sastre	-
[16]	Propriedades Higrotérmicas de Materiais de Construção – Um Catálogo. 6 ^{as} Jornadas de Construções Cíveis – Humidade na Construção, 1998.	J. Lanzinha, V.P. Freitas	-
[17]	Thermal and Hygric Properties of Gypsum: Reference Measures.	P. Tesárek, R. Černý, J. Drchalová, P. Rovnaníková	Ver bibliografia
[18]	Measuring and simulating moisture uptake in a fractured porous medium, Department of Civil Engineering, K.U. – Leuven, Belgium, 2002	S. Roels, K. Vandersteen, J. Carmeliet	Ver bibliografia

Os pontos 5.2.1 até ao 5.2.12. dizem respeito aos quadros que apresentam os valores das propriedades recolhidas na literatura em cada material seleccionado.

5.2.1. BETÃO NORMAL

O Quadro 5.2., apresenta as propriedades higrotérmicas no betão normal, encontradas na literatura.

Quadro 5.2. – Propriedades higrotérmicas da literatura no betão normal

BETÃO NORMAL	PROPRIEDADES										FONTE
	MASSA VOLÚMICA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (Aw)		
	kg/m ³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	kg/(m ² ·s ^{0,5})	Valor médio	
Betão	460	-	0,119	-	840	-	19	-	-	-	[4a]
Betão	2104	-	1,373	-	776	-	76	-	-	-	[4b]
Betão de densidade média	1800	-	1,15	-	1000	-	100	-	-	-	[5]
Betão de densidade média	2000	-	1,35	-	1000	-	100	-	-	-	
Betão de densidade média	2200	-	1,65	-	1000	-	120	-	-	-	
Betão de alta densidade	2400	-	2,00	-	1000	-	130	-	-	-	
Betão	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-	[6]
Betão normal	2200-2400	2300	1,75	-	-	-	-	-	-	-	[7]
Betão	-	-	-	-	-	-	154	-	-	-	[9]
Betão	-	-	-	-	-	-	132	-	-	-	
Betão	-	-	-	-	-	-	147	-	-	-	
Betão	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-	[10]
Betão normal	2112	-	-	-	-	-	110	-	-	-	[14]
Betão	-	-	-	-	840-1040	940	-	-	-	-	[15]
Betão B25	2210	-	1,75	-	1060-1080	1070	132-154	143	0,02	-	[16]

5.2.2. BETÃO CELULAR AUTOCLAVADO

No Quadro 5.3., observam-se os valores das propriedades higrotérmicas no betão celular autoclavado, encontrados na literatura.

Quadro 5.3. – Propriedades higrotérmicas da literatura no betão celular autoclavado

BETÃO CELULAR AUTOCLAVADO	PROPRIEDADES										FONTE
	MASSA VOLÚMICA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (Aw)		
	kg/m³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	kg/(m²·s ^{0,5})	Valor médio	
Betão celular autoclavado	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	[1]
Betão celular autoclavado	-	575	-	-	-	-	-	-	-	-	[2]
Betão celular autoclavado	-	-	-	-	-	-	8,6	-	0,04	-	[3]
Betão celular autoclavado	599	-	0,066	-	850	-	5,30	-	-	-	[4b]
Betão celular autoclavado	386	-	0,072	-	850	-	9,90	-	-	-	
Betão celular autoclavado	400-800	600	0,2	-	-	-	-	-	-	-	[7]
Betão celular autoclavado	-	-	-	-	1000	-	-	-	-	-	[8]
Betão celular autoclavado	-	-	-	-	-	-	8,95	-	-	-	[9]
Betão celular autoclavado	-	-	-	-	-	-	7,68	-	-	-	
Betão celular autoclavado	-	-	-	-	-	-	5,97	-	-	-	
Betão celular autoclavado	-	-	-	-	-	-	-	-	0,03-0,13	0,08	[12]
Betão celular autoclavado	-	478,51	-	-	-	-	9,60	-	-	-	[12a]
Betão celular autoclavado	-	454,52	-	-	-	-	14,10	-	-	-	[12b]
Betão celular autoclavado	-	442,03	-	-	-	-	8,34	-	-	-	[12c]
Betão celular autoclavado	-	432,24	-	-	-	-	8,61	-	-	-	[12d]
Betão celular autoclavado	-	447,22	-	-	-	-	-	-	-	-	[12e]
Betão celular autoclavado	-	461,72	-	-	-	-	6,93	-	-	-	[12f]
Betão celular autoclavado	455	-	-	-	-	-	-	-	0,05	-	[13]

5.2.3. PEDRA CALCÁRIA

O Quadro 5.4., apresenta os valores encontrados das propriedades higrotérmicas na pedra calcária.

Quadro 5.4. – Propriedades higrotérmicas da literatura na pedra calcária

PEDRA CALCÁRIA	PROPRIEDADES								FONTE
	MASSA VOLÚMICA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		
	kg/m³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	
Pedra calcária	2500	-	0,723	-	840	-	813	-	[4a]
Pedra calcária, Oland	2650	-	3	-	2600	-	36	-	[4e]
Calcário extra macio	1600	-	0,85	-	1000	-	30	-	[5]
Calcário macio	1800	-	1,10	-	1000	-	40	-	
Calcário semi-duro	2000	-	1,40	-	1000	-	50	-	
Calcário duro	2200	-	1,70	-	1000	-	200	-	
Calcário extra duro	2600	-	2,30	-	1000	-	250	-	
Pedra calcária	1480-2590	2035	1,4	-	-	-	-	-	[7]
Pedra calcária	-	-	-	-	-	-	20-90	55	[14]
Pedra calcária	-	-	-	-	810	-	-	-	[15]

5.2.4. ARENITO

O Quadro 5.5., apresenta os valores das propriedades higrotérmicas encontradas no arenito.

Quadro 5.5. – Propriedades higrotérmicas da literatura no arenito

ARENITO	PROPRIEDADES								FONTE
	MASSA VOLÚMICA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		
	kg/m³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	
Arenito	2224	-	1,68	-	771	-	73	-	[4b]
Arenito Bad Bentheim	1933	-	2,58	-	910	-	10	-	
Arenito Cotta	1939	-	2,32	-	831	-	19	-	
Arenito Posta	2095	-	2,49	-	799	-	16	-	
Arenito Reinhardsdorf	1989	-	2,34	-	883	-	16	-	
Arenito Ruthen	1919	-	1,88	-	708	-	13	-	
Arenito Velbke	1943	-	1,79	-	817	-	11	-	
Arenito Hils	1974	-	2,31	-	813	-	14	-	

5.2.5. TIJOLO CERÂMICO

No Quadro 5.6., é possível analisar os valores encontrados na literatura relativamente às propriedades higrotérmicas no tijolo cerâmico.

Quadro 5.6. – Propriedades higrotérmicas da literatura no tijolo cerâmico

TIJOLO CERÂMICO	PROPRIEDADES										FONTE
	MASSA VOLÚMICA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (Aw)		
	kg/m³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	kg/(m²·s ^{0.5})	Valor médio	
Tijolo cerâmico	1852	-	-	-	-	-	19	-	0,150	-	[3]
Tijolo argila amarela	1719	-	0,43	-	800	-	29	-	-	-	[4a]
Tijolo argila vermelha	1935	-	0,495	-	800	-	138	-	-	-	
Tijolo (belga)	1952	-	0,955	-	863	-	19	-	-	-	[4b]
Tijolo 800	765	-	0,158	-	850	-	15	-	-	-	
Tijolo H	1891	-	0,955	-	860	-	14	-	-	-	
Tijolo Joens	1722	-	0,802	-	850	-	11	-	-	-	
Tijolo sólido ARB	1807	-	0,695	-	863	-	10	-	-	-	
Tijolo sólido Bernhard	2060	-	0,827	-	850	-	19	-	-	-	
Tijolo sólido Jons	1788	-	0,861	-	860	-	13	-	-	-	
Tijolo sólido Wienerberger	1786	-	0,519	-	850	-	19	-	-	-	
Tijolo sólido ZA	1845	-	0,518	-	863	-	16	-	-	-	
Tijolo sólido ZC	1985	-	0,908	-	850	-	23	-	-	-	
Tijolo sólido ZD	1611	-	0,393	-	860	-	10	-	-	-	
Tijolo sólido ZE	1642	-	0,577	-	850	-	13	-	-	-	
Tijolo sólido ZF	2012	-	0,962	-	863	-	41	-	-	-	
Tijolo sólido ZG	1700	-	0,521	-	850	-	22	-	-	-	

Tijolo sólido ZH	1851	-	0,614	-	860	-	12	-	-	-	[4b]
Tijolo sólido ZI	1722	-	0,404	-	850	-	21	-	-	-	
Tijolo sólido ZJ	1767	-	0,492	-	863	-	17	-	-	-	
Tijolo sólido ZK	1737	-	0,695	-	850	-	25	-	-	-	
Tijolo sólido ZL	1660	-	0,506	-	860	-	13	-	-	-	
Tijolo sólido ZM	1720	-	0,547	-	850	-	19	-	-	-	
Tijolo sólido ZO	1873	-	0,907	-	863	-	45	-	-	-	
Tijolo sólido ZP	1979	-	0,99	-	850	-	45	-	-	-	
Tijolo sólido ZQ	1972	-	0,904	-	860	-	30	-	-	-	
Tijolo sólido ZS	1742	-	0,644	-	850	-	23	-	-	-	[4c]
Tijolo sólido	1900	-	0,6	-	850	-	10	-	-	-	
Tijolo alto isolamento	650	-	0,13	-	850	-	15	-	-	-	[4d]
Tijolo sólido extrudido	1630	-	0,6	-	850	-	10	-	-	-	
Tijolo sólido feito à mão	1780	-	0,6	-	850	-	10	-	-	-	
Tijolo sólido, Viena	1560	-	0,6	-	850	-	15	-	-	-	[9]
Tijolo cerâmico	-	-	-	-	-	-	14,9	-	-	-	
Tijolo cerâmico	-	-	-	-	-	-	185,2	-	-	-	
Tijolo cerâmico	-	-	-	-	-	-	34,9	-	-	-	
Tijolo cerâmico	-	-	-	-	-	-	56,1	-	-	-	
Tijolo cerâmico	-	-	-	-	-	-	7,1	-	-	-	[11]
Tijolo cerâmico	-	-	-	-	-	-	-	-	0,190	-	
Tijolo cerâmico	-	2044	-	-	-	-	-	5,9	-	-	[12a]
Tijolo cerâmico	-	2001	-	-	-	-	-	24,9	-	-	[12b]
Tijolo cerâmico	-	2006	-	-	-	-	-	13,6	-	-	[12c]
Tijolo cerâmico	-	1993	-	-	-	-	-	18,5	-	-	[12d]
Tijolo cerâmico	-	2035	-	-	-	-	-	-	-	-	[12e]
Tijolo cerâmico	-	2007	-	-	-	-	-	23,1	-	-	[12f]
Tijolo cerâmico	-	-	-	-	-	-	-	-	0,184	-	[18]

5.2.6. CONTRAPLACADO

O Quadro 5.7. apresenta os valores das propriedades higrotérmicas no contraplacado, recolhidos na literatura.

Quadro 5.7. – Propriedades higrotérmicas da literatura em contraplacado

CONTRAPLACADO	PROPRIEDADES								FONTE
	MASSA VOLUMÍCA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		
	kg/m³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	
Contraplacado (alta qualidade)	600	-	0,101	-	1880	-	383	-	[4a]
Contraplacado (baixa qualidade)	400	-	0,068	-	1880	-	493	-	
Contraplacado (EUA)	470	-	0,084	-	1880	-	1078	-	
Contraplacado BFU100	427	-	0,088	-	1600	-	188	-	[4b]
Contraplacado BFU100 (painéis)	427	-	0,12	-	2500	-	188	-	[4c]
Contraplacado (painéis)	500	-	0,1	-	1500	-	700	-	
Contraplacado	560	-	0,13	-	1500	-	274	-	[4e]
Contraplacado	410	-	0,13	-	1600	-	210	-	[4f]
Contraplacado	600	-	0,13	-	1600	-	210	-	
Contraplacado (painéis)	300	-	0,09	-	1600	-	150	-	[5]
Contraplacado (painéis)	500	-	0,13	-	1600	-	200	-	
Contraplacado (painéis)	700	-	0,17	-	1600	-	220	-	
Contraplacado (painéis)	1000	-	0,24	-	1600	-	250	-	
Contraplacado	350-550	450	-	-	-	-	-	-	[7]
Contraplacado 350<ρ<450 m³	-	-	0,115	-	-	-	-	-	
Contraplacado 450<ρ<600 m³	-	-	0,15	-	-	-	-	-	
Contraplacado	-	-	-	-	-	-	391-1260	826	[9]

Contraplacado	-	-	-	-	-	-	686	-	[9]
Contraplacado	-	-	-	-	-	-	168	-	
Contraplacado	-	-	-	-	-	-	60	-	[14]

5.2.7. ISOLAMENTO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO

O Quadro 5.8. indica os valores das propriedades higrotérmicas no isolamento de poliestireno expandido (EPS).

Quadro 5.8. – Propriedades higrotérmicas da literatura em isolamento de poliestireno expandido

ISOLAMENTO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO	PROPRIEDADES								FONTE
	MASSA VOLÚMICA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		
	kg/m³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	
EPS	14,8	-	0,036	-	1470	-	73,01	-	[4a]
EPS	15	-	0,04	-	1500	-	50	-	[4c]
EPS	30	-	0,04	-	1500	-	16	-	
EPS	20	-	0,04	-	1500	-	21,7	-	[4e]
EPS	10-50	30		-	1450	-	60	-	[5]
EPS	-	-	0,04	-	-	-	-	-	[7]
EPS	-	-	-	-	-	-	30	-	[14]
EPS	-	-	-	-	1550	-	-	-	[15]

5.2.8. ISOLAMENTO DE POLIESTIRENO EXTRUDIDO

Através do Quadro 5.9. é possível observar os valores das propriedades higrotérmicas no isolamento de poliestireno extrudido (XPS), recolhidos na literatura.

Quadro 5.9. – Propriedades higrotérmicas da literatura em isolamento de poliestireno extrudido

ISOLAMENTO POLIESTIRENO EXTRUDIDO	PROPRIEDADES								FONTE
	MASSA VOLÚMICA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		
	kg/m³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	
XPS	29	-	0,025	-	1470	-	171	-	[4a]
XPS	20	-	0,04	-	1500	-	125	-	[4e]
XPS	20-65	42,5	-	-	1450	-	150	-	[5]
XPS	-	-	0,035	-	-	-	-	-	[7]
XPS	-	-	-	-	-	-	105	-	[14]
XPS	30-40	35	0,035	-	1470	-	-	-	[16]

5.2.9. ARGAMASSA DE CIMENTO

O Quadro 5.10. apresenta os valores das propriedades higrotérmicas na argamassa de cimento recolhidos na literatura.

Quadro 5.10. – Propriedades higrotérmicas da literatura na argamassa e cimento

ARGAMASSA DE CIMENTO	PROPRIEDADES								FONTE
	MASSA VOLÚMICA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		
	kg/m³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	
Argamassa de cimento	1885	-	0,459	-	900	-	15,5	-	[4a]
Argamassa de cimento	1885	-	0,44	-	900	-	14,8	-	
Argamassa de cimento	-	-	-	-	-	-	15-41	28	[14]
Argamassa de cimento	-	-	-	-	1046	-	-	-	[15]

5.2.10. ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL

O Quadro 5.11. indica os valores das propriedades higrotérmicas na argamassa de cimento e cal, pesquisados na literatura.

Quadro 5.11. – Propriedades higrotérmicas da literatura na argamassa de cimento e cal

ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL	PROPRIEDADES								FONTE
	MASSA VOLÚMICA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		
	kg/m³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	
Argamassa de cimento e cal (fina)	1880	-	0,6	-	850	-	50	-	[4d]
Argamassa de cimento e cal (grossa)	1910	-	0,8	-	850	-	45,89	-	

5.2.11. GESSO PROJECTADO

Através do Quadro 5.12. é possível observar os valores das propriedades higrotérmicas no gesso projectado, recolhidos na literatura.

Quadro 5.12. – Propriedades higrotérmicas da literatura no gesso projectado

GESSO PROJECTADO	PROPRIEDADES								FONTE
	MASSA VOLÚMICA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		
	kg/m³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	
Gesso	1237	-	0,43	-	850	-	7,5	-	[4b]
Gesso	906	-	0,276	-	850	-	5,7	-	
Gesso	600	-	0,18	-	1000	-	10	-	[5]
Gesso	900	-	0,30	-	1000	-	10	-	
Gesso	1200	-	0,43	-	1000	-	10	-	
Gesso	1500	-	0,56	-	1000	-	10	-	
Gesso	1019	-	0,47	-	-	-	17,3	-	[17]

5.2.12. GESSO EM PAINEL

Por fim, o Quadro 5.13. apresenta os valores das propriedades higrotérmicas no gesso em painel, pesquisados na literatura.

Quadro 5.13. – Propriedades higrotérmicas da literatura no gesso em painel

GESSO EM PAINEL	PROPRIEDADES								FONTE
	MASSA VOLÚMICA (ρ)		CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (λ)		CALOR ESPECÍFICO (c)		PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA (μ)		
	kg/m³	Valor médio	W/(m·K)	Valor médio	J/(kg·K)	Valor médio	[-] dry	Valor médio	
Gesso cartonado (EUA)	850	-	0,163	-	870	-	6	-	[4a]
Gesso (placa, para interiores)	625	-	0,16	-	870	-	7,03	-	
Gesso (painel)	732	-	0,193	-	1384	-	6,8	-	[4b]
Gesso (painel)	800	-	0,2	-	1200	-	8	-	[4c]
Gesso cartonado	850	-	0,2	-	850	-	8,3	-	
Gesso (placa, para exteriores)	675	-	0,2	-	850	-	8,33	-	[4e]
Gesso (painel, para interiores)	625	-	0,2	-	850	-	8,33	-	
Gesso cartonado	900	-	0,25	-	1000	-	10	-	[5]
Gesso cartonado	-	-	-	-	-	-	6 - 11	8,5	[14]
Gesso cartonado	-	-	-	-	-	-	5,5 - 11	8,25	

5.3. ANÁLISE DESCRITIVA DAS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS RECOLHIDAS NA LITERATURA

O objectivo da análise descritiva das propriedades higrotérmicas encontradas na literatura debruça-se, fundamentalmente, sobre a questão da centralidade dos dados e a respectiva dispersão. Assim, esta análise basear-se-á essencialmente na média e no coeficiente de variação, apoiados por gráficos que relacionam a média com o desvio-padrão e os valores mínimos e máximos das distribuições, quando se entender necessário. Os valores das medidas descritivas são apresentados nos Quadros 5.15. e 5.16. das páginas seguintes.

É importante referir que os histogramas e caixas-de-bigodes não foram determinados para esta análise tendo em conta as dimensões reduzidas das amostras de valores recolhidos – é de lembrar que em conjuntos de valores de pequena dimensão as conclusões retiradas destes gráficos estatísticos não são fiáveis. Só as amostras relativas ao tijolo cerâmico, nas várias propriedades, se excluem desta limitação. Contudo, entendeu-se que o estudo das medidas descritivas e a representação gráfica da média/desvio-padrão das propriedades higrotérmicas nos diversos materiais, são suficientes para reflectir com fundamento sobre a sua centralidade e dispersão.

Nos gráficos média/desvio-padrão foram adoptadas as seguintes siglas para designação dos materiais (Quadro 5.14.):

Quadro 5.14. – Siglas para designação dos materiais

MATERIAL	SIGLA
Betão normal	BN
Betão celular autoclavado	BCA
Pedra calcária	PC
Arenito	ARE
Tijolo cerâmico	TC
Contraplacado	CP
Gesso projectado	GPR
Gesso em painél	GPA
Argamassa de cimento	AC
Argamassa de cimento e cal	ACC
Isolamento EPS	EPS
Isolamento XPS	XPS
Gesso	GES

Posto isto, dar-se-á início à análise descritiva das propriedades higrotérmicas da literatura. À semelhança do Capítulo 4, será efectuada uma análise individual de cada uma das propriedades nos diversos materiais.

Quadro 5.15. – Medidas descritivas da massa volúmica, condutibilidade térmica e calor específico nos diversos materiais

PROPRIEDADES	MEDIDAS DESCRITIVAS	MATERIAIS											
		Betão normal	Betão celular autoclavado	Pedra calcária	Arenito	Tijolo cerâmico	Contraplacado	Gesso projectado	Gesso em painel	Argamassa de cimento	Argamassa de cimento e cal	Isolamento EPS	Isolamento XPS
Massa Volúmica ρ [kg/m ³]	Média	1954	486	2173	2002	1782	525	1052	757	1885	1895	21,96	31,525
	Mediana	2112	458	2118	1959	1826	485	1019	766	1885	1895	20,00	31,80
	Desvio-padrão	586	69	384	106	292	170	291	108	0	21	7,63	9,56
	Coef. Variação	0,300	0,143	0,177	0,053	0,164	0,325	0,276	0,143	0,000	0,011	0,347	0,303
	Mínimo	460	386	1600	1919	650	300	600	625	1885	1880	14,8	20
	Máximo	2400	600	2650	2224	2060	1000	1500	900	1885	1910	30	42,5
	N (dimensão)	9	12	8	8	38	14	7	8	2	2	5	4
Condutibilidade Térmica λ [W/(m·K)]	Média	1,393	0,113	1,559	2,174	0,639	0,123	0,378	0,196	0,450	0,700	0,039	0,034
	Mediana	1,512	0,072	1,400	2,315	0,600	0,120	0,430	0,200	0,450	0,700	0,040	0,035
	Desvio-padrão	0,582	0,076	0,766	0,340	0,226	0,042	0,131	0,028	0,013	0,141	0,002	0,006
	Coef. Variação	0,418	0,672	0,491	0,156	0,354	0,342	0,346	0,142	0,030	0,202	0,046	0,186
	Mínimo	0,119	0,066	0,723	1,684	0,13	0,068	0,18	0,16	0,44	0,6	0,036	0,025
	Máximo	2	0,2	3	2,584	0,99	0,24	0,56	0,25	0,459	0,8	0,04	0,04
	N (dimensão)	8	3	8	8	31	15	7	8	2	2	5	4
Calor Específico c [J/(kg·K)]	Média	953,250	900,000	1156,250	816,500	851,226	1718,462	950	984	949	850	1495,000	1472,500
	Mediana	1000,000	850,000	1000,000	815,000	850,000	1600,000	1000	870	900	850	1500,000	1470,000
	Desvio-padrão	97,681	86,603	588,750	62,719	14,796	271,227	77	202	84	0	33,912	20,616
	Coef. Variação	0,102	0,096	0,509	0,077	0,017	0,158	0,082	0,206	0,089	0,000	0,023	0,014
	Mínimo	776	850	810	708	800	1500	850	850	900	850	1450	1450
	Máximo	1070	1000	2600	910	863	2500	1000	1384	1046	850	1550	1500
	N (dimensão)	8	3	8	8	31	13	6	8	3	2	6	4

Quadro 5.16. – Medidas descritivas da permeabilidade ao vapor de água e coeficiente de absorção de água nos diversos materiais

PROPRIEDADES	MEDIDAS DESCRITIVAS	MATERIAIS											
		Betão normal	Betão celular autoclavado	Pedra calcária	Arenito	Tijolo cerâmico	Contraplacado	Gesso (projectado)	Gesso em painel	Argamassa de cimento	Argamassa de cimento e cal	Isolamento EPS	Isolamento XPS
Permeabilidade ao Vapor μ [-]	Média	111,926	8,544	184,188	21,500	26,755	369,664	10,071	7,954	19,433	47,945	41,785	137,640
	Mediana	120,000	8,600	52,500	15,000	18,510	220,000	10,000	8,275	15,500	47,945	40,000	137,500
	Desvio-padrão	38,848	2,335	267,540	21,010	32,807	286,213	3,605	1,105	7,427	2,906	22,722	28,645
	Coef. Variação	0,347	0,273	1,453	0,977	1,226	0,774	0,358	0,139	0,382	0,061	0,544	0,208
	Mínimo	18,58	5,3	30	10	5,88	60	5,7	6	14,8	45,89	16	105
	Máximo	154,33	14,1	812,8	73	185,2	1078,2	17,3	10	28	50	73,01	170,56
	N (dimensão)	11	11	8	8	42	17	7	10	3	2	6	4
Coeficiente de Absorção de Água A_w [kg/(m ² s ^{0,5})]	Média	0,013	0,057				0,175						
	Mediana	0,010	0,050				0,184						
	Desvio-padrão	0,006	0,021				0,022						
	Coef. Variação	0,434	0,369	Sem dados disponíveis			0,124	Sem dados disponíveis					
	Mínimo	0,01	0,0398				0,15						
	Máximo	0,0196	0,08				0,19						
	N (dimensão)	3	3				3						

A Fig.5.1. ilustra os valores médios e os desvios-padrões da Massa Volúmica em cada material.

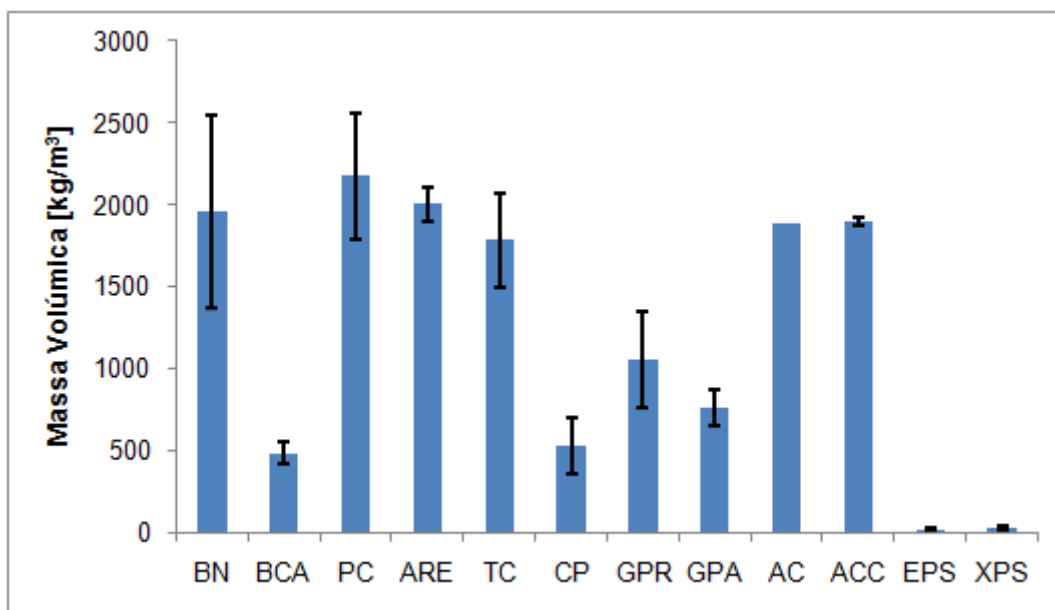


Fig.5.1. – Média e desvio-padrão da massa volúmica (ρ) em diversos materiais

Por observação da Fig.5.1. e dos valores do Quadro 5.15., concluímos o seguinte sobre a distribuição da Massa Volúmica (ρ) nos diversos materiais:

- A massa volúmica média é bastante diferente na maioria dos materiais analisados;
- No cômputo geral, as dispersões não são muito elevadas, embora se registem algumas diferenças assinaláveis entre alguns materiais;
- A afirmação anterior é corroborada pelos coeficientes de variação que assumem valores considerados médios e baixos, comparativamente falando. A maior dispersão da massa volúmica é verificada no isolamento EPS, que apresenta um coeficiente de variação igual a 34,7%. No isolamento XPS ($c_v = 30,3\%$), betão normal ($c_v = 30,0\%$), contraplacado ($c_v = 32,5\%$) e gesso projectado ($c_v = 27,6\%$) também se observam valores consideravelmente altos quando comparados com os dos restantes materiais;
- Os restantes materiais apresentam coeficientes de variação mais baixos, sendo de destacar o da massa volúmica na argamassa de cimento ($c_v = 0$), que indica ausência de dispersão. Esta situação poderá ser resultado da reduzida dimensão da amostra, sendo praticamente impossível que não exista qualquer dispersão de valores caso a disponibilidade de dados fosse maior.

A Fig.5.2. ilustra os valores médios e desvios-padrões da Condutibilidade Térmica nos diversos materiais.

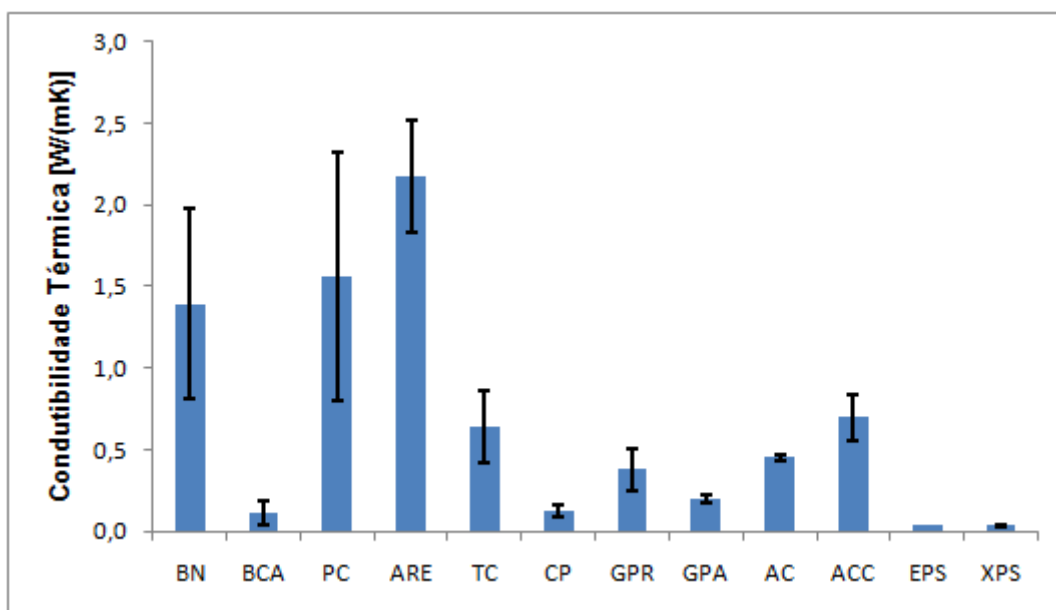


Fig.5.2. – Média e desvio-padrão da condutibilidade térmica (λ) em diversos materiais

Analisando a Fig.5.2., juntamente com os respectivos dados descritivos do Quadro 5.15., é possível retirar as seguintes conclusões sobre a Condutibilidade Térmica (λ) nestes materiais:

- As médias da condutibilidade térmica registam diferenças acentuadas, destacando-se a média da condutibilidade térmica no arenito ($\bar{x} = 2,174 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) como sendo a mais elevada. Contudo, é de notar que nos isolamentos a condutibilidade térmica apresenta médias semelhantes entre si;
- Pela Fig. 5.2., observa-se que a dispersão desta propriedade é pouco uniforme neste conjunto de materiais;
- O coeficiente de variação traduz numericamente esta discrepância na variabilidade das amostras. As distribuições do betão celular autoclavado, betão normal e pedra calcária são pouco homogêneas, sendo a primeira a que apresenta um coeficiente de variação maior ($c_v = 67,2\%$);
- As distribuições da condutibilidade térmica no tijolo cerâmico, contraplacado e gesso projectado, mostram coeficientes de variação que variam entre 34,2% e 35,4%. Estes conjuntos de valores apresentam dispersões inferiores às dos materiais referidos no item anterior, contudo a sua homogeneidade é bastante baixa;
- Para os restantes casos, o coeficiente de variação é relativamente baixo, sendo que o menor valor registado na condutibilidade térmica da argamassa de cimento ($c_v = 3\%$). Como tal, conclui-se que nestas amostras os seus valores não se afastam significativamente da média.

A Fig.5.3. representa os valores médios e desvios-padrões do Calor Específico nos diversos materiais.

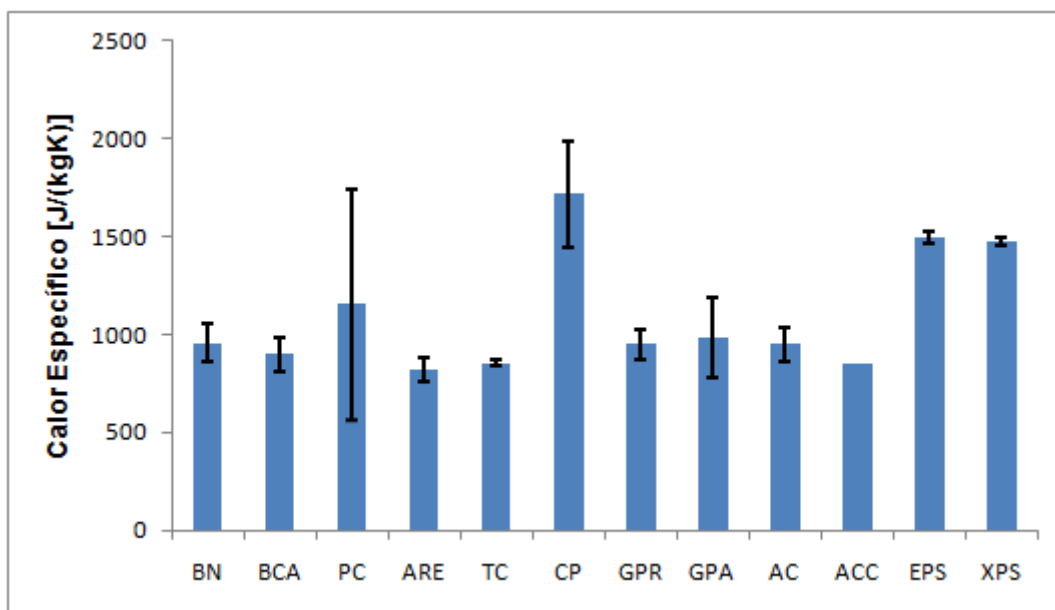


Fig.5.3. – Média e desvio-padrão do calor específico (c) em diversos materiais

Por observação da Fig. 5.3. e das medidas descritivas do Quadro 5.15. respeitantes ao Calor Específico (c) nos diversos materiais, é possível retirar-se as seguintes ilações:

- Verifica-se uma certa harmonia nos valores médios do calor específico na maioria dos materiais. Só os casos dos isolamentos e, sobretudo, do contraplacado é que se destacam do panorama geral;
- As amostras exibem baixas dispersões de valores em praticamente todos os materiais, excepto na relativa à pedra calcária;
- O coeficiente de variação vem traduzir numericamente esta situação, indicando um maior valor na pedra calcária ($c_v = 50,9\%$). Esta é, portanto, a distribuição menos homogênea de todas, seguida pelas distribuições do gesso em painel ($c_v = 20,6\%$) no contraplacado ($c_v = 15,8\%$), com dispersões francamente inferiores;
- O menor coeficiente de variação verificado diz respeito à argamassa de cimento e cal ($c_v = 0\%$), sendo esta a distribuição com menor dispersão (é de lembrar a ressalva efectuada atrás sobre a dimensão reduzida desta amostra).

Segue-se a Fig.5.4., que esquematiza a relação entre as médias e os desvio-padrões da Permeabilidade ao Vapor de Água nos materiais considerados.

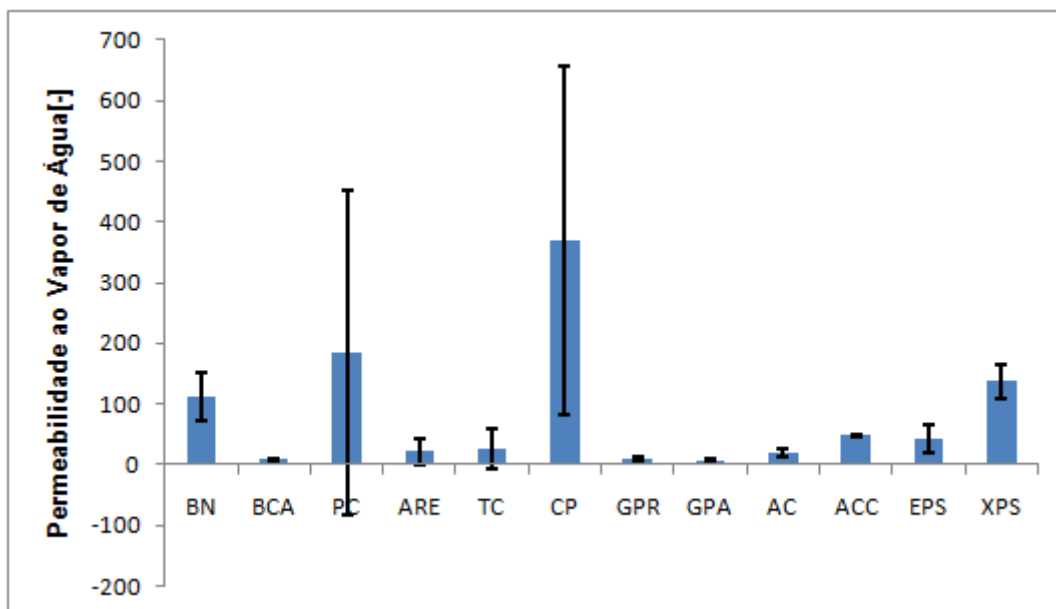


Fig.5.4. – Média e desvio-padrão da permeabilidade ao vapor de água (μ) em diversos materiais

Analisando a Fig.5.4. e as medidas descritivas do Quadro 5.16., concluímos o seguinte sobre a Permeabilidade ao Vapor de Água (μ) nos diversos materiais:

- O valor do factor μ médio revela grandes discrepâncias nos diferentes materiais. A sua média no contraplacado atinge o seu valor mais elevado ($\bar{x} = 369,664$), sendo este o material menos permeável, ao passo que no gesso em painel regista o seu valor mais pequeno ($\bar{x} = 7,954$), sendo este o material mais permeável;
- Conclui-se, portanto, que os valores médios da permeabilidade ao vapor de água, traduzida pelo factor μ , são bastante característicos do material em questão na maioria dos casos;
- À semelhança da média, a dispersão dos valores destas amostras é bastante variável. Contudo, apesar das diferenças, é possível reparar que na generalidade dos materiais os valores desta propriedade apresentam dispersões bastante mais elevadas do que as registadas nas propriedades anteriores;
- Verifica-se que existem três distribuições com extrema variabilidade; em duas delas o valor do desvio-padrão ultrapassa o valor da média, o que implica que o coeficiente de variação seja superior a 100%. Essas distribuições são as da pedra calcária ($c_v = 145,3\%$), tijolo cerâmico ($c_v = 122,6\%$) e arenito ($c_v = 97,7\%$);
- Observando os valores máximos e mínimos destas distribuições é possível explicar, em parte, a elevadíssima dispersão destes valores. A amplitude (diferença entre o valor máximo e mínimo) de cada uma delas é muito acentuada quando comparada com a média (por exemplo, a amplitude da distribuição da permeabilidade ao vapor de água, μ , na pedra calcária é igual a 782,8, enquanto que a sua média é igual a 184,188);

- As distribuições cuja dispersão é menor dizem respeito ao gesso em painel ($c_v=13,9\%$) e argamassa de cimento e cal ($c_v=6,1\%$). As restantes, apresentam variabilidades bastante mais elevadas, variando os respectivos coeficientes de variação entre os 20,8% e 77,4%;

Por fim, apresenta-se a Fig.5.5., que esquematiza a relação entre as médias e os desvios-padrões do coeficiente de absorção de água em três materiais.

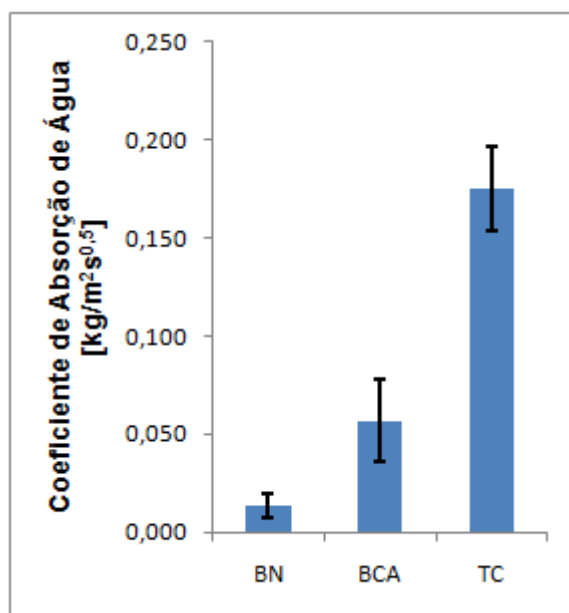


Fig.5.5. — Média e desvio-padrão do coeficiente de absorção de água (A_w) no betão normal, betão celular autoclavado e tijolo cerâmico

Através da Fig.5.5. e das medidas descritivas do Quadro 5.16., podemos fazer a seguinte análise sobre o coeficiente de Absorção de Água nos diversos materiais estudados:

- A média dos valores desta propriedade não é semelhante nos três materiais, destacando-se o coeficiente de absorção médio no tijolo como sendo o maior;
- A dispersão é também variável, verificando-se que a amostra menos homogénea é a correspondente ao betão normal (com coeficiente de variação igual a $c_v=43,4\%$);
- No tijolo cerâmico, dada a amplitude da média, verifica-se uma dispersão menor, com um coeficiente de variação igual a 12,4%. Assim, esta distribuição não apresenta grandes desvios da média.

Termina assim a análise descritiva das propriedades higrotérmicas recolhidas na literatura. É importante ressaltar que as conclusões retiradas desta reflexão não poderão ser extrapoladas directamente para as propriedades em geral, dado que as amostras apresentam dimensões reduzidas — o intervalo de confiança nos resultados é tanto menor quanto menores forem as dimensões das amostras tratadas. No entanto, estas conclusões permitem ter uma ideia do que poderá acontecer num

domínio mais generalizado, ao mesmo tempo que indicam o caminho de tratamento e análise estatística de propriedades higrotérmicas da literatura, definidas por um só parâmetro.

A inclusão de certas medidas estatísticas (como a média e o coeficiente de variação) em bases de dados para simulação numérica ou em catálogos de materiais contribui para uma melhor compreensão e previsão do comportamento de soluções construtivas quando sujeitas a acções da humidade e temperatura.

5.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS RECOLHIDAS E AS PROPRIEDADES HIGROTÉRMICAS DO CAPÍTULO 4

O Quadro 5.17. apresenta as medidas descritivas das propriedades higrotérmicas calculadas no presente capítulo, passíveis de serem comparadas com as medidas descritivas calculadas no Cap.4.

Quadro 5.17. – Medidas descritivas das propriedades higrotérmicas nos diversos materiais

PROPRIEDADES	MEDIDAS DESCRITIVAS	MATERIAIS					
		Arenito (Cap. 4)	Arenito (Cap. 5)	Argamassa de cimento e cal (Cap. 4)	Argamassa de cimento e cal (Cap. 5)	Tijolo cerâmico (Cap. 4)	Tijolo cerâmico (Cap. 5)
Massa Volúmica [kg/m ³]	Média	1989	2002	1024	1895	1834	1782
	Mediana	1989	1959	1030	1895	1832	1826
	Desvio-padrão	13,682	106	18,069	21	72,501	292
	Coef. Variação	0,007	0,053	0,018	0,011	0,040	0,164
	Assimetria	-0,529	1,679	-0,611	0,000	0,141	-2,731
	N (dimensão)	30	8	30	2	33	38
Condutibilidade Térmica [W/(m·K)]	Média	2,402	2,174	0,225	0,700	0,704	0,639
	Mediana	2,420	2,315	0,225	0,700	0,754	0,600
	Desvio-padrão	0,130	0,340	0,026	0,141	0,082	0,226
	Coef. Variação	0,054	0,156	0,117	0,202	0,116	0,354
	Assimetria	-0,713	-0,447	0,523	0,000	-1,01	-0,233
	N (dimensão)	6	8	5	2	6	31
Calor Específico [J/(kg·K)]	Média	882,670	816,500	1090,030	850	861,000	851,226
	Mediana	873,500	815,000	1113,470	850	859,500	850,000
	Desvio-padrão	40,043	62,719	60,445	0	11,781	14,796
	Coef. Variação	0,045	0,077	0,055	0,000	0,014	0,017
	Assimetria	0,451	-0,203	-0,376	0,000	1,509	-2,806
	N (dimensão)	6	8	5	2	6	31
Permeabilidade ao Vapor [-]	Média	16,464	21,500	6,149	47,945	10,210	26,755
	Mediana	16,464	15,000	6,144	47,945	10,597	18,510
	Desvio-padrão	0,523	21,010	0,097	2,906	1,783	32,807
	Coef. Variação	0,032	0,977	0,016	0,061	0,175	1,226
	Assimetria	0,000	2,722	0,213	0,000	-0,931	3,855
	N (dimensão)	2	8	5	2	3	42
Coeficiente de Absorção de Água [kg/(m ² s ^{0,5})]	Média	0,140	Sem dados disponíveis	0,127	Sem dados disponíveis	0,251	0,175
	Mediana	0,180		0,096		0,312	0,184
	Desvio-padrão	0,090		0,057		0,105	0,022
	Coef. Variação	0,647		0,451		0,418	0,124
	Assimetria	-1,613		0,589		-1,732	-1,583
	N (dimensão)	3		5		3	3

No Capítulo 4 efectuou-se o tratamento estatístico de dados de propriedades higrotérmicas em cinco materiais distintos, com o objectivo de caracterizar devidamente essas distribuições de valores.

Os dados das propriedades higrotérmicas do referido capítulo fazem parte do projecto *Annex 55*, da IEA, e dizem respeito a materiais específicos. Estes, são provenientes de locais/produtores específicos, cujos nomes, por motivos de confidencialidade, não foi possível revelar. Contudo, não quebrando o sigilo imposto, é possível identificar que a pedra é um arenito (tradução genérica de *sandstone*) e que o gesso engloba dados de gesso cartonado e projectado. Esta junção dos dados de dois gessos distintos foi uma opção tomada com o intuito de aumentar a dimensão da amostra; estes dados, como dizem respeito apenas à permeabilidade ao vapor de água, são muito próximos, permitindo assim fazer uma análise que se resume, no fundo, ao “gesso pintado”. Quanto ao tijolo e argamassa, trata-se de tijolo cerâmico e argamassa de cimento e cal.

Por outro lado, no âmbito do Capítulo 5, foram recolhidos na literatura valores de propriedades higrotérmicas em alguns materiais genéricos que coincidem, em certos casos, com os materiais do Capítulo 4.

Como tal, torna-se interessante efectuar uma reflexão sobre as principais diferenças e semelhanças das medidas que caracterizam os dados do Cap.4, relativos a materiais específicos, e os dados do Cap.5, relativos a materiais genéricos, tentando aferir se existe algum encaixe entre ambos. Serão abordadas todas as propriedades higrotérmicas anteriormente estudadas, excepto a porosidade total e a saturação capilar, por motivos de escassez de valores na literatura. As propriedades no isolamento também não serão analisadas, não tendo sido encontrados dados relativos a isolamentos correspondentes ao do Capítulo 4.

Analisando os valores do Quadro 5.17. e as Fig.5.6 e 5.7, relativos às distribuições das várias propriedades higrotérmicas no **arenito**, podemos retirar as conclusões que a seguir se descrevem.

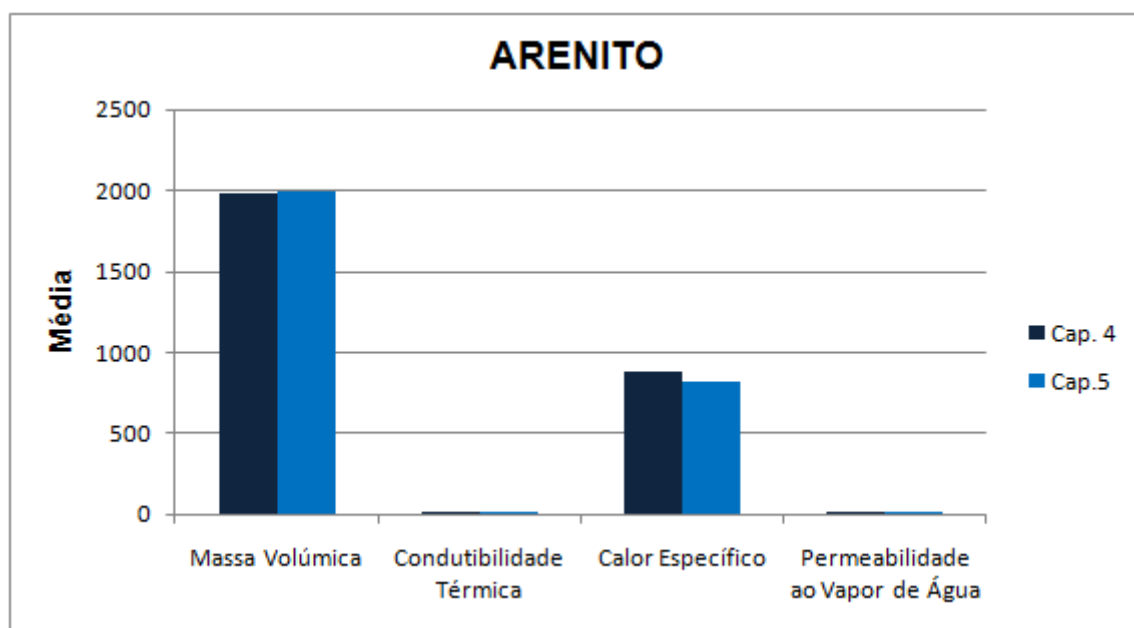


Fig.5.6. – Comparação dos valores médios das quatro propriedades analisadas no arenito

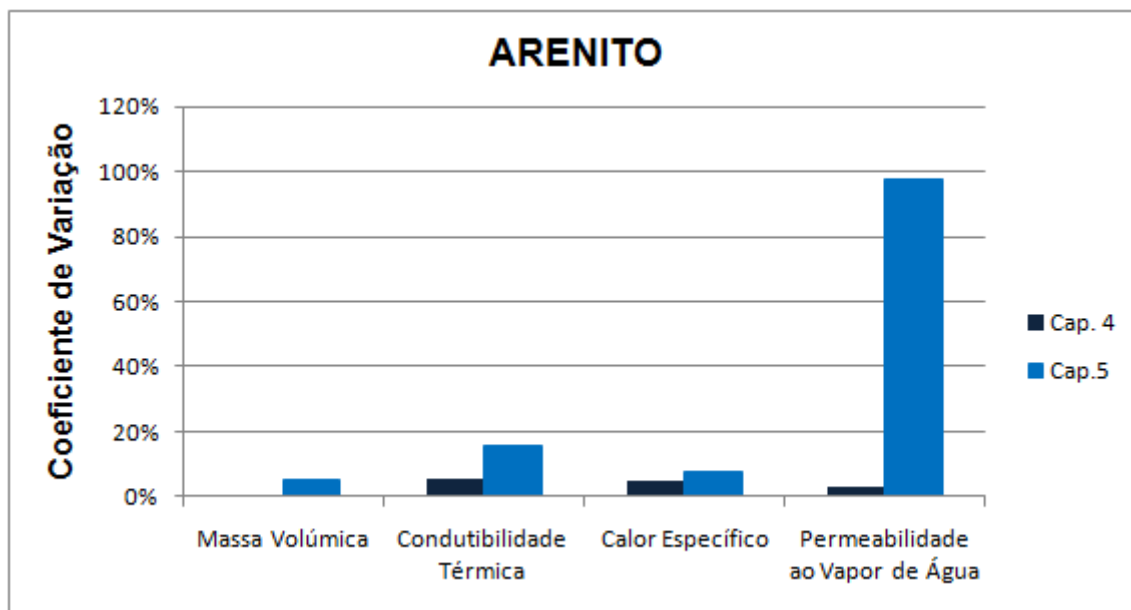


Fig.5.7. – Comparação dos coeficientes de variação das quatro propriedades analisadas no arenito

Massa Volúmica [kg/m^3] no arenito:

- Conclui-se que as distribuições dos Cap.4 e 5, relativas à massa volúmica no arenito, diferem essencialmente na sua forma, sendo bastante semelhantes quanto à dispersão e centralidade. Ambas as distribuições são muito homogêneas;
- O coeficiente de assimetria apresenta uma diferença acentuada, sendo negativo no Cap.4 ($g_1 = -0,529$) e positivo no Cap.5 ($g_1 = 1,679$). Isto indica que a forma das distribuições é distinta: uma é ligeiramente assimétrica à esquerda e outra é assimétrica à direita;
- É importante referir que a dimensão do conjunto de valores da literatura ($N=8$) é muito inferior à do Cap.4 ($N=30$), o que pode influenciar as medidas de dispersão.

Condutibilidade Térmica [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] no arenito:

- Conclui-se que a distribuição desta propriedade no arenito é semelhante em ambas as amostras (Cap.4 e 5), apesar de uma ligeira diferença na dispersão dos dados. Ainda assim, a dispersão é baixa em ambos os casos;
- Mais concretamente falando, a dispersão apresenta-se um pouco mais elevada nos dados da literatura (Cap.5), sendo que o seu coeficiente de variação é de $c_v = 15,6\%$, ao passo que o do Cap. 4 é $c_v = 5,4\%$;

Calor Específico [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] no arenito:

- Conclui-se que a distribuição desta propriedade é relativamente semelhante nas amostras dos Cap.4 e 5, diferindo essencialmente na sua forma. A dispersão é baixa em ambos os casos;

- O coeficiente de assimetria é positivo no Cap. 4 ($g_1 = 0,451$) e negativo no Cap.5 ($g_1 = -0,203$). Como tal, a forma das distribuições é distinta: uma é assimetria à direita e outra à esquerda, respectivamente.

Permeabilidade ao Vapor de Água (μ [-]) no arenito:

- A distribuição da permeabilidade ao vapor de água no arenito é muito distinta nas amostras analisadas (dos Cap.4 e 5). A média, a dispersão e a sua forma exibem todas diferenças significativas. A amostra do Cap. 5 apresenta uma dispersão extremamente elevada ($c_v = 97,7\%$), ao contrário da amostra do Cap. 4 ($c_v = 3,2\%$) de dispersão muito baixa;
- Estes factos, acima descritos, podem estar relacionados com a dimensão pequena das amostras e com a existência de valores discrepantes na amostra do Cap.5 – que inflacionam muito a dispersão em amostras pequenas;
- Quanto ao centro das amostras, é de salientar que a média apresenta uma discrepância assinalável ($\bar{x} = 21,500$ no Cap.5 e $\bar{x} = 16,464$ no Cap. 4);
- O coeficiente de assimetria também evidencia diferenças: é nulo no Cap. 4 (distribuição simétrica) e positivo nos dados do Cap.5 ($g_1 = 2,722$ – distribuição assimétrica à direita).

Passamos agora à análise comparativa entre as distribuições das propriedades higrotérmicas na **argamassa de cimento e cal**. Por observação do Quadro 5.17. e Fig.5.8. e 5.9.:

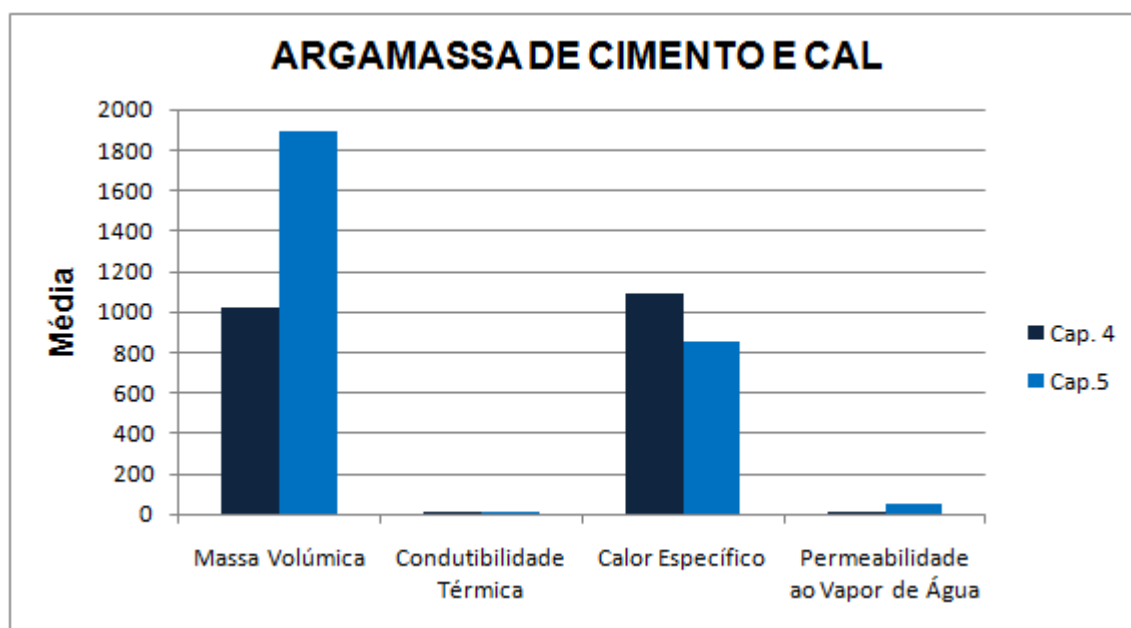


Fig.5.8. – Comparação dos valores médios das quatro propriedades analisadas no argamassa de cimento e cal

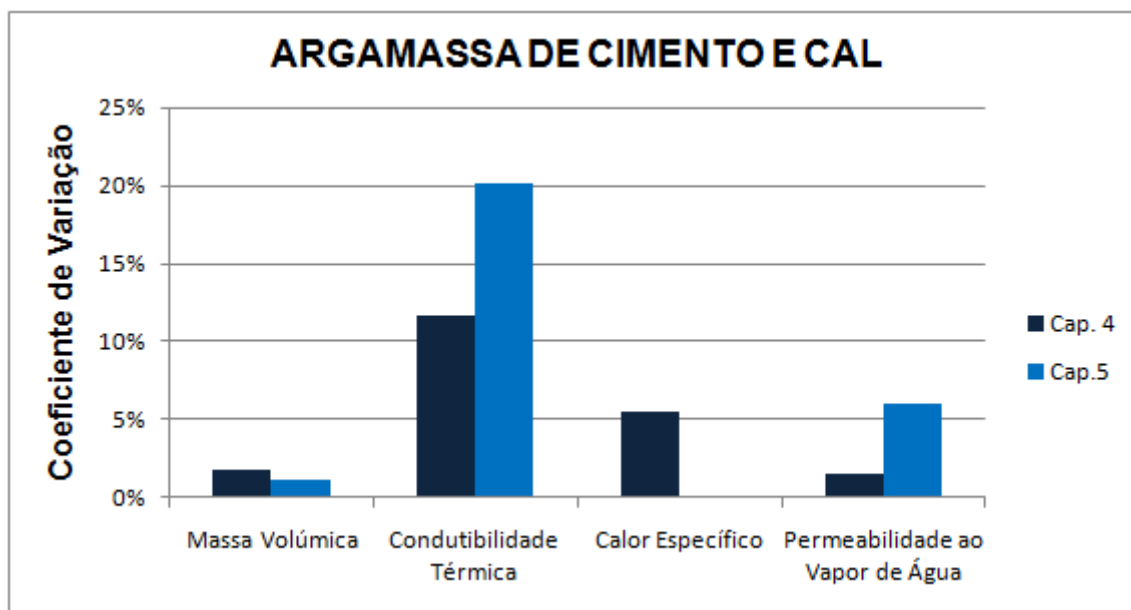


Fig.5.9. – Comparação dos coeficientes de variação das quatro propriedades analisadas na argamassa de cimento e cal

Massa Volúmica [kg/m^3] na argamassa de cimento e cal:

- Conclui-se que não é possível considerar que a distribuição da massa volúmica na argamassa de cimento e cal seja semelhante em ambas as amostras do Cap.4 e 5, uma vez que a sua centralidade e forma diferem significativamente. A homogeneidade dos valores é elevada em ambos os casos;
- A amostra do Cap. 4 é assimétrica à esquerda ($g_1 = -0,611$) e a amostra do Cap.5 é completamente simétrica ($g_1 = 0$). Esta simetria deve-se, provavelmente, à dimensão muito pequena da amostra desta última distribuição ($N=2$).

Condutibilidade Térmica [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] na argamassa de cimento e cal:

- Conclui-se que as amostras da condutibilidade térmica neste material são relativamente distintas, existindo diferenças sobretudo ao nível da centralidade e ao nível da forma. A dispersão também é um pouco diferente, contudo, as amostras são consideravelmente homogêneas;
- As condutibilidades térmicas médias são significativamente superiores na amostra dos dados do Cap. 5 ($\bar{x} = 0,700 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) quando comparadas com a amostra do Cap. 4 ($\bar{x} = 0,225 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$);
- O coeficiente de assimetria também evidencia diferenças: é nulo na amostra do Cap.5 (distribuição simétrica) e positivo na amostra do Cap. 4 ($g_1 = 0,523$ – distribuição assimétrica à direita).

Calor Específico [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] na argamassa de cimento e cal:

- Conclui-se que ambas as amostras apresentam distribuições consideravelmente diferentes – tendência central e forma distintas. A dispersão é extremamente baixa em ambos os casos, chegando mesmo a ser nula na amostra do Cap.5;

- O coeficiente de assimetria é nulo na amostra do Cap.5 e negativo nos dados do Cap.4 ($g_1 = -0,376$). Como tal, a forma das distribuições é distinta, uma é simétrica e outra é assimétrica à esquerda, respectivamente.

Permeabilidade ao Vapor de Água (μ [-]) na argamassa de cimento e cal:

- Conclui-se que as distribuições são pouco semelhantes, devendo-se sobretudo à grande discrepância registada nas medidas de tendência central e medidas de forma. A dispersão em ambos os casos é baixa – elevada homogeneidade;
- As medidas de tendência central apresentam valores francamente discrepantes ($\bar{x} = 6,149$ no Cap.4 e $\bar{x} = 47,945$ no Cap.5);
- O coeficiente de assimetria é nulo na amostra do Cap.5 e positivo nos dados do Cap.4 ($g_1 = 0,213$). Como tal, as distribuições são simétrica e assimétrica à direita, respectivamente.

Posto isto, passamos à análise comparativa entre as distribuições das propriedades higrotérmicas no **tijolo cerâmico**, por observação do Quadro 5.17. e Fig.5.10. e 5.11:

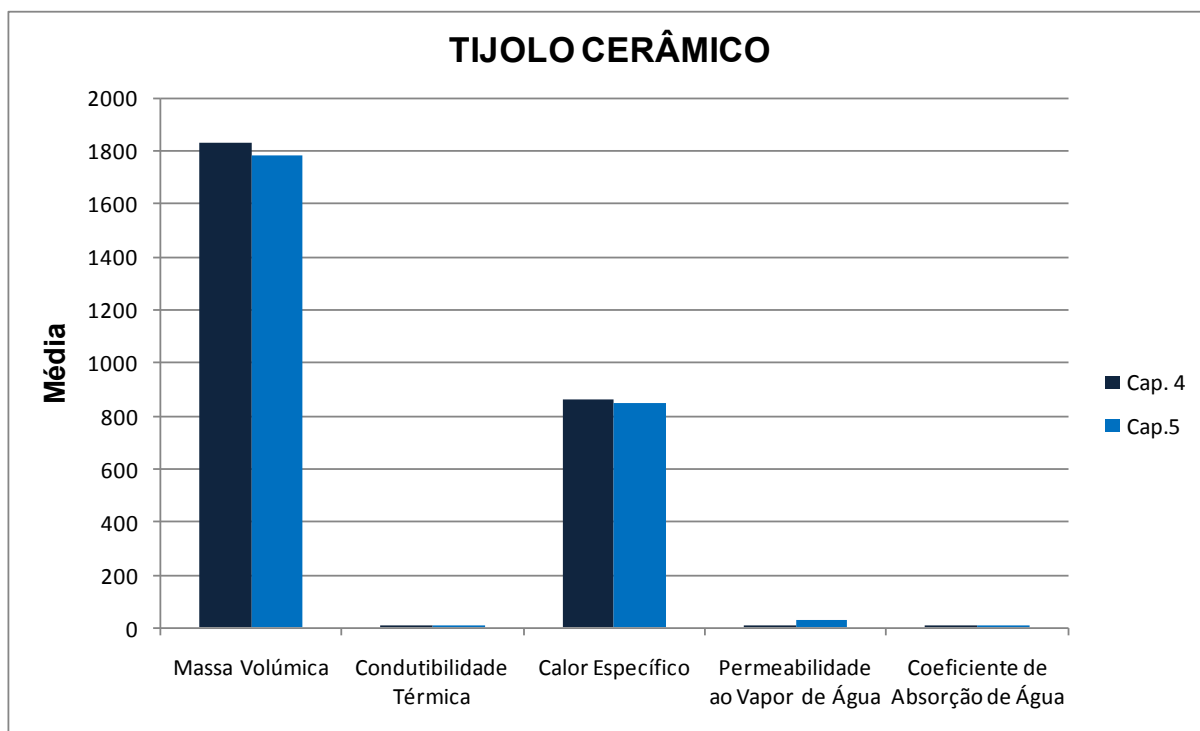


Fig.5.10. – Comparação dos valores médios das quatro propriedades analisadas no tijolo cerâmico

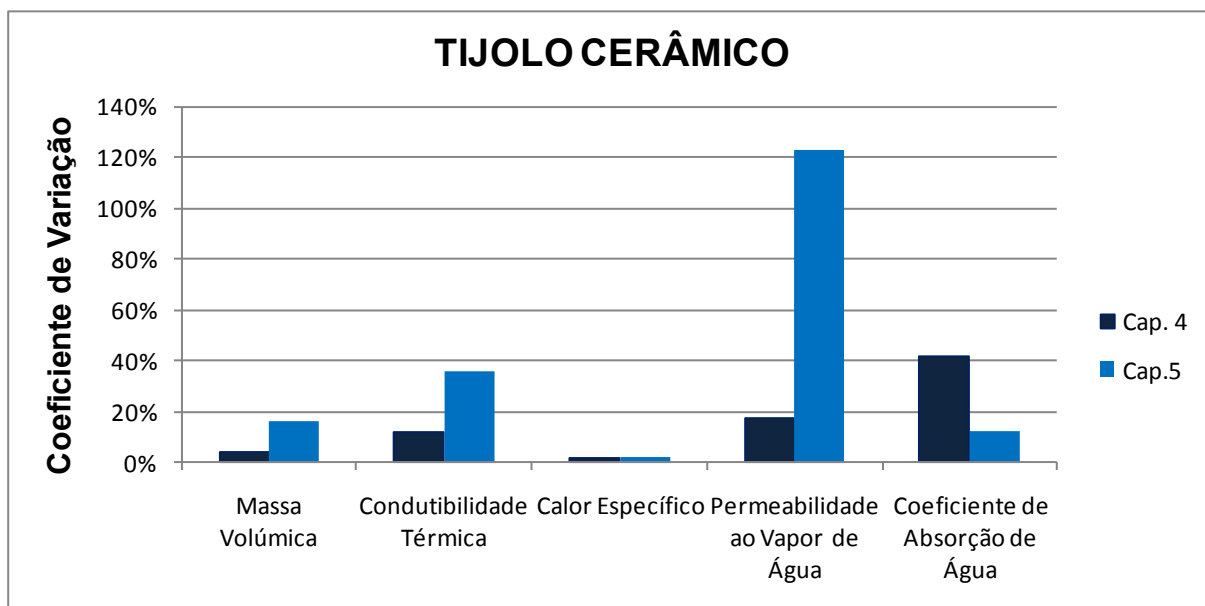


Fig.5.11. – Comparação dos coeficientes de variação das quatro propriedades analisadas no tijolo cerâmico

Massa Volúmica [kg/m^3] no tijolo cerâmico:

- Conclui-se que a distribuição da massa volúmica neste material, relativa às amostras do Cap.4 e 5, é semelhante nas suas características com excepção da forma. É de salientar a grande homogeneidade exibida em ambos os casos ($c_v = 4\%$ e $c_v = 16,4\%$, respectivamente);
- As distribuições diferem, então, na forma, uma vez que o coeficiente de assimetria é negativo na distribuição dos dados da literatura – $g_1 = -2,731$ assimetria à esquerda – e é positivo na distribuição dos dados do Cap. 4 – $g_1 = 0,141$, ligeira assimetria à direita.

Condutibilidade Térmica [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] no tijolo cerâmico:

- É possível concluir que existem algumas diferenças no que toca à dispersão e centralidade das duas amostras. A forma, no entanto, revela-se semelhante;
- Assim, observando os valores médios, verifica-se que estes diferem um pouco: $\bar{x} = 0,704 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ no Cap.4 e $\bar{x} = 0,639 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ no Cap.5. A dispersão é significativamente mais elevada na amostra do Cap.5 ($c_v = 35,4\%$) do que na amostra do Cap.4 ($c_v = 11,6\%$);

Calor Específico [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] no tijolo cerâmico:

- Conclui-se que a distribuição do calor específico no tijolo cerâmico é bastante semelhante em ambas as amostras, diferindo apenas na forma das mesmas. A dispersão de valores é baixa em ambos os casos;
- Assim, a sua diferença reside no coeficiente de assimetria que revela diferenças na forma – a distribuição do Cap.5 é assimétrica à esquerda ($g_1 = -2,806$) e a distribuição do Cap. 4 é assimétrica à direita ($g_1 = 1,509$).

Permeabilidade ao Vapor de Água (μ [-]) no tijolo cerâmico:

- Conclui-se que a distribuição desta propriedade no tijolo cerâmico, nas amostras do Cap.4 e 5, não é de todo semelhante. As diferenças são consideráveis quanto à sua centralidade, no entanto, é na dispersão e forma que se acentuam as disparidades. É de ressaltar que, no fundo, estas distribuições são pouco comparáveis dada a grande diferença entre as dimensões das amostras;
- Verifica-se uma certa discrepância na média, sendo que o seu valor na amostra do Cap.5 ($\bar{x} = 26,755$) é superior quando comparado com os da distribuição do Cap. 4 ($\bar{x} = 10,210$);
- O coeficiente de variação acusa dispersões completamente distintas: se na amostra do Cap. 4 assume um valor não muito alto ($c_v = 17,5\%$), na amostra do Cap.5 verificamos que o seu valor ultrapassa os 100% ($c_v = 122,6\%$);
- Há que ter em conta a diferença na dimensão das duas amostras, que pode explicar a dispersão baixa da amostra do Cap. 4 ($N = 3$, ao contrário da amostra do Cap.5 em que $N = 42$);
- O coeficiente de assimetria indica que a forma das duas distribuições é também diferente: ligeiramente assimétrica à esquerda ($g_1 = -0,931$) na amostra do Cap.4 e assimétrica à direita ($g_1 = 3,855$) na amostra do Cap.5.

Coefficiente de Absorção de Água [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0,5})$] no tijolo cerâmico:

- As amostras do Cap.4 e 5 são significativamente distintas, dadas as diferenças da centralidade e dispersão. Apenas se assemelham na forma;
- Verifica-se que as medidas de tendência central apresentam valores discrepantes ($\bar{x} = 0,251$ no Cap.4 e $\bar{x} = 0,175$ no Cap.5), dada a amplitude de valores desta propriedade;
- A dispersão é consideravelmente superior na amostra do Cap.4 ($c_v = 41,8\%$) do que na amostra do Cap.5 ($c_v = 12,4\%$), indicando que a dispersão, no primeiro caso, é significativa e, no segundo caso, é baixa;

Apresenta-se na página seguinte o Quadro 5.18. que indica os valores das medidas descritivas da permeabilidade ao vapor no gesso (projectado e cartonado) nas amostras do Cap.4 e do Cap.5.

Quadro 5.18. – Medidas descritivas das permeabilidade ao vapor e água no gesso

PROPRIEDADES	MEDIDAS DESCRITIVAS	MATERIAL	
		Gesso (Cap. 4)	Gesso (Cap. 5)
Permeabilidade ao Vapor μ [-]	Média	9,379	8,826
	Mediana	9,770	8,33
	Desvio-padrão	1,497	2,591
	Coef. Variação	0,160	0,290
	Assimetria	-0,610	0,294
	N (dimensão)	9	17

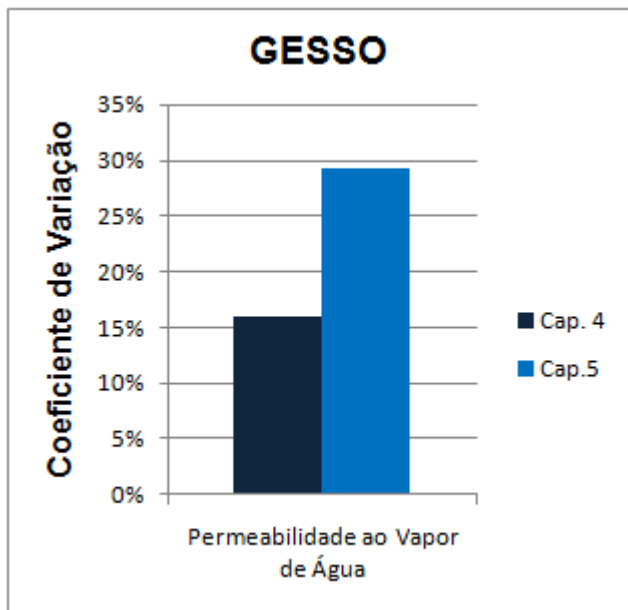


Fig.5.12. — Comparação dos valores médios da permeabilidade ao vapor de água no gesso

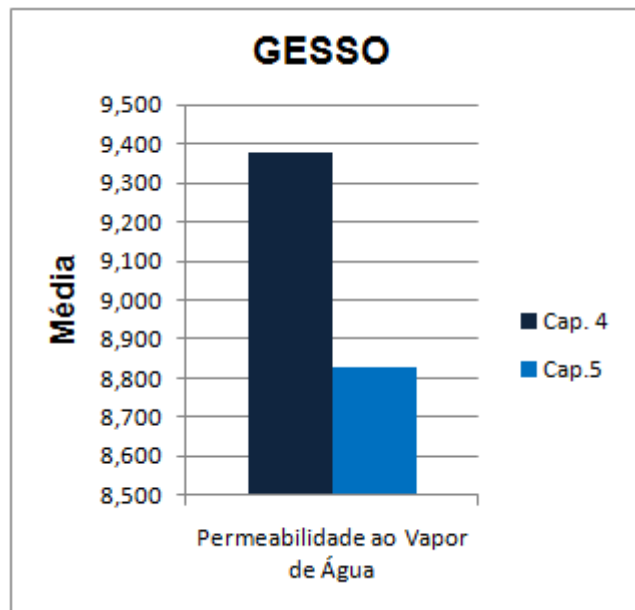


Fig.5.13. — Comparação dos coeficientes de variação da permeabilidade ao vapor de água no gesso

Efectuando uma análise comparativa dos valores do Quadro 5.18. e das Fig.5.12. e 5.13., retiramos as seguintes conclusões:

- As distribuições são distintas em todas as suas características – centralidade, dispersão e forma. A dispersão é baixa no Cap.5 ($c_v = 16\%$) e já considerável no Cap.4 ($c_v = 29\%$);
- O coeficiente de assimetria indica que a forma das duas amostras se distingue da seguinte maneira: a distribuição do Cap. 4 é assimétrica à esquerda ($g_1 = -0,610$) e a distribuição do Cap.5 é assimétrica à direita ($g_1 = 0,294$).

5.5. SÍNTESE DA ANÁLISE DO CAPÍTULO 5

O Capítulo 5 diz respeito ao tratamento estatístico e análise crítica de valores de propriedades higrotérmicas (definidas por um só parâmetro) que se encontram disponíveis na literatura. A disponibilidade de valores é escassa em algumas propriedades e ainda se resume a um leque de materiais bastante corrente.

Os parâmetros estatísticos mais importantes na caracterização das amostras das propriedades higrotérmicas dizem respeito à centralidade e dispersão das mesmas. Então, foi concretizada uma análise baseada na média e no coeficiente de variação das propriedades higrotérmicas abordadas nos Cap. 2 e 4, à exceção da saturação capilar e porosidade aberta total por motivos de escassez de dados.

Verificou-se que não existe uma grande uniformidade dos valores médios de cada propriedade nos diferentes materiais; excluindo-se o calor específico, cada propriedade apresenta um média bastante característica do material em questão. São exceções os casos da massa volúmica na argamassa de cimento e argamassa de cimento e cal e a condutibilidade térmica nos isolamentos EPS e XPS, que exibem médias aproximadas. No cômputo geral, o calor específico apresenta valores médios que evidenciam uma certa harmonia, excluindo os casos do calor específico no contraplacado e nos isolamentos EPS e XPS, que se destacam dos demais.

A representação da dispersão das amostras das propriedades higrotérmicas recolhidas encontra-se condensada na Fig.5.14. da página seguinte, onde as barras coloridas representam o valor do coeficiente de variação em cada propriedade. Retém-se o seguinte da análise da dispersão/homogeneidade destas amostras:

- A permeabilidade ao vapor de água é a propriedade que apresenta dispersões mais elevadas, podendo limitar bastante as conclusões retiradas de cálculos higrotérmicos que contabilizem esta propriedade;
- O calor específico é a propriedade que apresenta menor dispersão de valores na maioria dos materiais analisados, sendo sucedida pela massa volúmica que exibe, em metade dos materiais considerados, coeficientes de variação abaixo dos 20%;
- A condutibilidade térmica apresenta dispersões altas ou baixas, dependendo dos materiais. A sua maior dispersão é registada no betão celular autoclavado, $c_v = 67,2\%$, ao contrário da argamassa de cimento, cujo $c_v = 3\%$;
- Quanto ao coeficiente de absorção de água pouco se pode concluir, uma vez que só três materiais apresentam valores desta propriedade. Denota-se, contudo, que nos betões esta propriedade evidencia uma dispersão considerável, contrariamente ao que acontece no tijolo cerâmico;
- Analisando por grupo de material: no geral, o conjunto das propriedades na argamassa de cimento e cal corresponde ao grupo de amostras com dispersões mais baixas (todas elas com coeficientes de variação iguais ou inferiores a 20%). Há que lembrar a ressalva da dimensão das amostras, extremamente reduzida ($N=2$), que pode influenciar estes resultados;

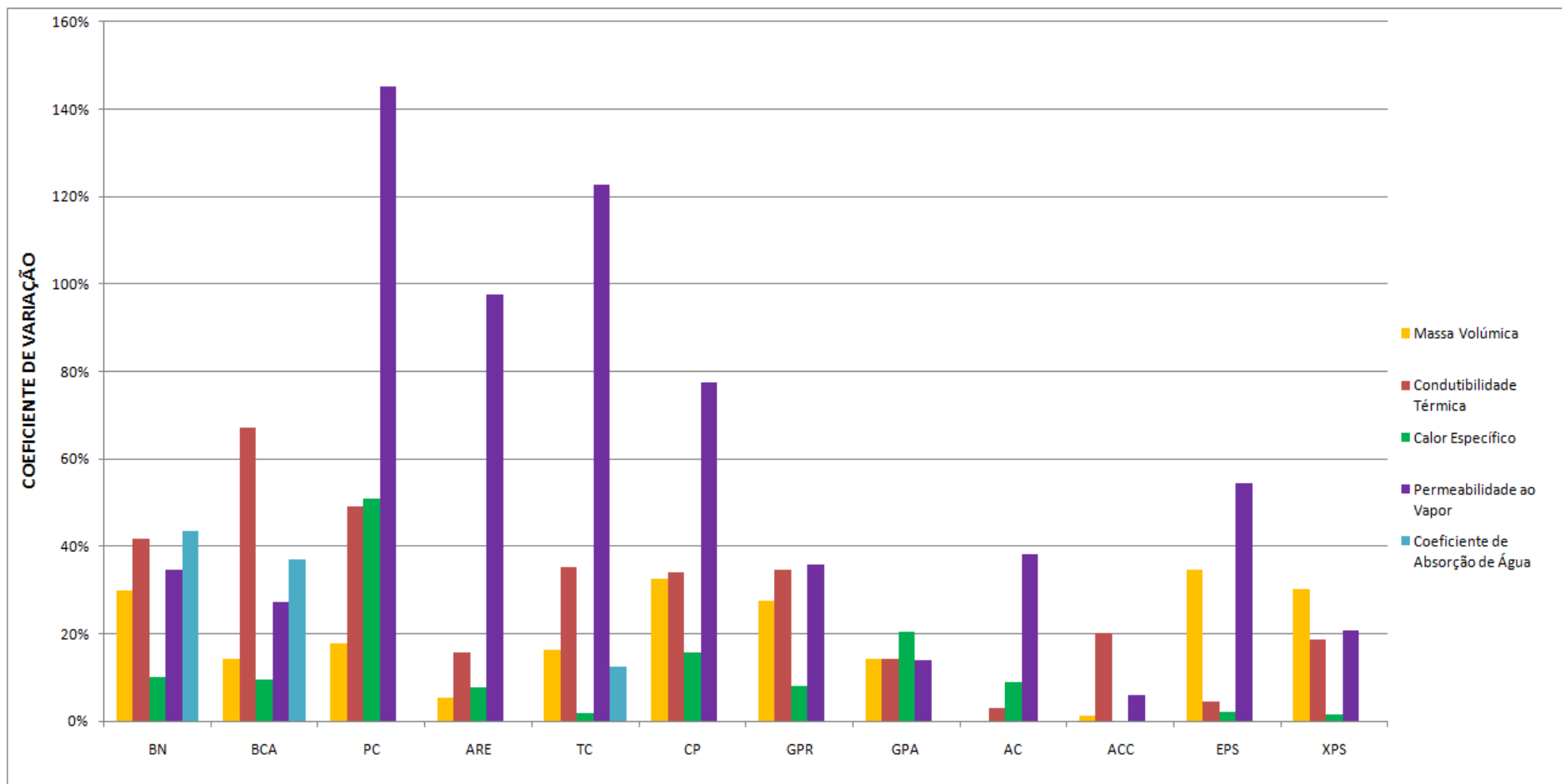


Fig.5.14. – Comparação dos coeficientes de variação das propriedades higrotérmicas nos diversos materiais

- As amostras de gesso em painel e de arenito também apresentam dispersões baixas em todas as propriedades, à excepção da permeabilidade ao vapor de água no arenito que quase atinge os 100%;
- Pelo contrário, o material cujo conjunto das propriedades exhibe maior dispersão de valores diz respeito à pedra calcária, com três amostras que apresentam coeficientes de variação que superam os 40%;
- No tijolo cerâmico a permeabilidade ao vapor de água evidencia a maior dispersão do conjunto de propriedades – cujo coeficiente de variação excede os 100% – ao passo que o calor específico constitui a amostra menos dispersa. Já no gesso em painel, esta situação inverte-se: a permeabilidade ao vapor de água apresenta a menor dispersão de valores e o calor específico a maior dispersão. Conclui-se, portanto, que a dispersão pode permutar de “grau” para os mesmos pares de propriedades e materiais.

É de notar que a média e a dispersão das propriedades higrotérmicas no tijolo cerâmico advêm de amostras consideráveis ($N > 30$); isto significa que as conclusões que lhes dizem respeito constituem aproximações satisfatórias do que acontece nessas propriedades a um nível geral no tijolo cerâmico.

Os valores da média e do coeficiente de variação, de propriedades da literatura, poderão então ser incluídos em bases de dados de simulação numérica e em catálogos de consulta, de forma a otimizar a avaliação real do comportamento higrotérmico dos elementos construtivos.

Com as conclusões retiradas em cima, verifica-se que deverá existir um grande cuidado na escolha dos materiais quanto à sua permeabilidade ao vapor de água. Refira-se, por exemplo, que na concepção de um edifício face à sua resistência à difusão do vapor de água (μ), é muitas vezes utilizada em paredes (e outros elementos construtivos) a regra de se garantir que o somatório dos valores de μ , nas camadas situadas pelo interior do isolamento, seja pelo menos cinco vezes superior ao das camadas que se situam pelo exterior. Ora, ao se projectar/simular o comportamento de uma parede apenas tendo em conta o valor de referência da literatura do factor μ , dos vários materiais constituintes, o mais provável é não se conseguir, na realidade, cumprir essa regra dada a grande variabilidade dos seus valores.

Assim, contabilizando-se a dispersão dos valores da propriedade, e não apenas o valor da média, é possível obter uma determinada amplitude do comportamento do elemento construtivo na realidade. Além disto, permite-se aferir com mais precisão a necessidade, ou não, de outro tipo de intervenção para evitar a ocorrência de condensações interiores, como por exemplo a utilização de barreiras pára-vapor.

Por fim, foi efectuada uma análise comparativa entre as propriedades higrotérmicas do Capítulo 4 e as propriedades higrotérmicas da literatura, do presente capítulo. A Fig. 5.15. ilustra os valores do coeficiente de variação em cada propriedade. As barras estão agrupadas por propriedades e por Capítulo.

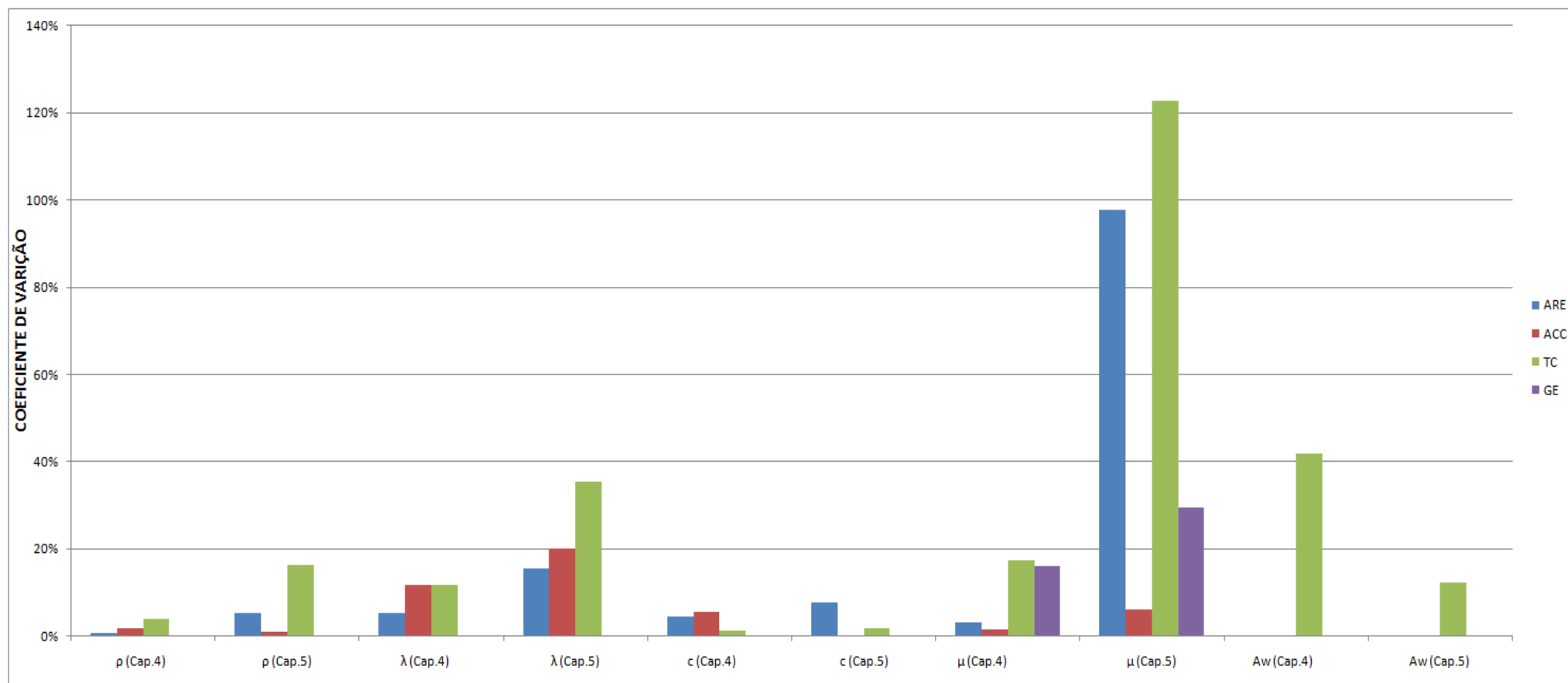


Fig.5.15. – Comparação dos coeficientes de variação das propriedades higrotérmicas do Cap.4 e Cap.5

Observando a dispersão de cada propriedade nos quatro materiais considerados, verifica-se que existe uma grande homogeneidade das propriedades analisadas no Cap.4 (todas com $c_v < 20\%$). A única excepção diz respeito ao coeficiente de absorção da água, no tijolo cerâmico.

A dispersão das amostras do Cap. 5 varia conforme o material. Registam-se dispersões muito elevadas na condutibilidade térmica e, em especial, na permeabilidade ao vapor de água – com coeficientes de variação muito elevados em alguns materiais, ultrapassando os 100% no caso do tijolo cerâmico.

Dado que a forma das distribuições constitui uma característica não muito relevante em termos de simulação numérica, serão apenas contabilizadas para as seguintes sínteses conclusivas os valores médios e a dispersão:

- As amostras no arenito são semelhantes em todas as propriedades, à excepção da permeabilidade ao vapor de água. Poderá afirmar-se, assim, que este material específico se encaixa no respectivo material genérico na maioria das propriedades;
- Não são tão evidentes as semelhanças entre as amostras das propriedades no tijolo cerâmico específico (do Cap.4) e as amostras das propriedades no tijolo cerâmico genérico (Cap.5), sobretudo ao nível da permeabilidade ao vapor de água. Por conseguinte, não é possível afirmar que na generalidade das propriedades analisadas, existe compatibilidade entre o material específico e o material genérico em questão. De facto, apenas se comprova o encaixe nas propriedades da massa volúmica e calor específico;
- Na argamassa de cimento e cal não se registam quaisquer semelhanças, contudo, as amostras de valores recolhidos no Cap.5 são muito diminutas e provêm da mesma fonte, o que pode influenciar bastante estas diferenças registadas;
- É importante referir que, apesar de muitas amostras dos Capítulos 4 e 5 exibirem dispersões baixas, detecta-se que, na sua maioria, a dispersão é superior nos dados do Capítulo 5. Este facto é expectável, dado que as amostras do Capítulo 5 dizem respeito a propriedades de materiais genéricos, cuja variabilidade é geralmente superior à das propriedades de materiais específicos, como as do Capítulo 4.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Foram aplicadas, com sucesso, as ferramentas estatísticas adequadas ao tratamento de dados estocásticos de propriedades higrotérmicas, no contexto de construção de bases de dados para simulação numérica.

O cumprimento dos objectivos parciais, traçados no primeiro capítulo, permitiu extrair as principais conclusões do desenvolvimento deste trabalho. Apresentam-se, de seguida, essas conclusões.

A abordagem aos programas de simulação numérica do comportamento higrotérmico dos edifícios, permitiu retirar as seguintes ilações:

- A simulação numérica assume um papel fundamental como ferramenta de apoio a decisões ao nível construtivo, pois evidenciam a adequabilidade de materiais e tecnologias construtivas para a prevenção/solução de patologias decorrentes da acção higrotérmica;
- O número existente de programas de simulação numérica do comportamento higrotérmico de edifícios é vasto, contudo, a sua maioria não está disponível ao público em geral. Estes programas diferem a vários níveis: direcções consideradas para a transferência de humidade, tipo de regime, dados para simulação e vertentes de análise no domínio da higrotérmica;
- As propriedades higrotérmicas dos materiais integram o conjunto de dados necessários para a simulação e variam qualitativa e quantitativamente de programa para programa;
- Os modelos de cálculo mais simples, utilizados pelos programas de simulação numérica, requerem um único parâmetro para definir cada propriedade. Já os modelos de maior complexidade requerem parâmetros definidos em função da humidade e temperatura.

Quanto às normas que estipulam os procedimentos de determinação das propriedades higrotérmicas em laboratório, foi possível aferir o que existem normas várias para a determinação de cada propriedade, sendo estipuladas por organismos de normalização nacional, regional e internacional tais como o IPQ, CEN e ISO.

A recolha de informação sobre as incertezas dos dados de propriedades higrotérmicas, e suas respectivas causas, permitiu concluir que:

- A incerteza dos dados é inevitável e está relacionada, no seu âmago, com a variabilidade intrínseca ao próprio material e com a actividade laboratorial que efectua as medições;

- Foi demonstrado que as causas das incertezas podem ser classificadas segundo duas vertentes: a vertente das propriedades definidas por um só parâmetro e a vertente das propriedades definidas por parâmetros em função da humidade e temperatura;
- Em propriedades definidas por um só parâmetro, as incertezas dizem respeito à variabilidade induzida pela actividade humana, actividade experimental e ao seu agrupamento de dados segundo patamares de classificação de materiais (material específico, material genérico e categoria de material);
- Em propriedades definidas por parâmetros em função da humidade e temperatura, as causas das incertezas estão correlacionadas com os modelos de simulação utilizados e com aproximações de valores. Estas, também são afectadas pela variabilidade associada às propriedades definidas por um só parâmetro.

A procura de ferramentas estatísticas adequadas ao tratamento de dados de propriedades higrotérmicas resultou nas seguintes observações:

- As propriedades higrotérmicas definidas por um só parâmetro podem ser caracterizadas com recurso à estatística descritiva, que utiliza medidas estatísticas e gráficos que traduzem a sua tendência central, variabilidade (ou dispersão) e forma;
- Em especial, as caixas-de-bigodes são diagramas importantes para a visualização da variabilidade, tendência central, *outliers* e assimetria das amostras;
- O recurso a testes estatísticos, como os testes *K-S* e Qui-Quadrado, permite verificar o ajuste das amostras de dados de propriedades a curvas de leis teóricas, como a curva da lei Normal ou Exponencial. A grande vantagem do ajustamento dos dados a estas curvas é a de reduzir o número de parâmetros necessários para caracterizar devidamente as amostras das propriedades;
- Quando os testes não confirmam nenhum ajustamento a curvas de leis teóricas, é possível caracterizar os dados das amostras através de funções de frequências, que estimam a probabilidade dos valores das propriedades ocorrerem em determinados intervalos.

A análise dos resultados obtidos do tratamento estatístico efectuado em dados de propriedades higrotérmicas em cinco materiais específicos, suportou as seguintes conclusões:

- Os valores tipo e a forma das amostras na massa volúmica e porosidade aberta total apresentam-se variáveis conforme o material considerado. A utilização dos testes *K-S* e Qui-Quadrado confirmou o ajuste da curva normal a estas duas propriedades no tijolo cerâmico e na pedra. Estas conclusões podem ser extrapoladas para a população geral, dada a dimensão destas amostras;
- Nas restantes propriedades analisadas, os valores tipo e a forma das respectivas amostras também se mostraram, na sua generalidade, característicos do material em questão. Refiram-se as excepções do calor específico (de valores tipo mais aproximados) e da saturação capilar (cuja forma é assimétrica à esquerda em todos os materiais). Juntamente com as propriedades do ponto anterior, nos materiais onde não se confirmou nenhum ajuste a leis teóricas, estas propriedades foram caracterizadas através de funções de frequências e não por curvas teóricas;
- A variabilidade (dispersão) observada em todas as amostras foi bastante baixa, excluindo-se o coeficiente de absorção de água. Esta variabilidade baixa era expectável, dado que se trata de propriedades medidas em materiais específicos;

- A avaliação do factor de resistência ao vapor de água, no gesso pintado, permitiu estabelecer uma relação entre a aplicação de um primário de acrílico e a diminuição acentuada da permeabilidade ao vapor. Por outro lado, também se verificou uma relação existente entre a aplicação de pintura no gesso e o aumento da dispersão dos valores medidos.

Foi concretizada a composição de Quadros Resumos com todas as características estatísticas destas amostras, relevantes para uma base de dados de propriedades higrotérmicas.

A recolha de dados de propriedades higrotérmicas na literatura permitiu concluir que ainda é escassa a informação disponível, existindo um rol extenso de materiais cujas propriedades ainda não foram medidas.

A análise dos resultados obtidos do tratamento estatístico efectuado em dados de propriedades higrotérmicas recolhidas na literatura, sustenta as seguintes afirmações:

- Os valores médios da maioria das amostras das propriedades analisadas, são característicos dos materiais. As amostras do calor específico são excepção, pois evidenciam valores médios mais aproximados;
- Em 7 dos 12 dos materiais analisados, a propriedade cujas amostras evidenciam maior dispersão é a permeabilidade ao vapor de água. Em contrapartida, o calor específico, em 8 dos 12 dos materiais considerados, constitui a propriedade com menor dispersão de valores. A condutibilidade térmica e coeficiente de absorção de água encontram-se no intermédio;
- Deve existir um cuidado redobrado na concepção de edifícios e nas simulações higrotérmicas, em especial quanto ao factor de resistência ao vapor (que caracteriza a permeabilidade ao vapor de água). Este cuidado deve estender-se, também, à condutibilidade térmica e coeficiente de absorção de água pois também evidenciam uma variabilidade considerável em certos materiais.

Análise comparativa entre os resultados das propriedades higrotérmicas do projecto *Annex 55* e das propriedades recolhidas na literatura, permite concluir:

- Comparando todas as características fundamentais (ou seja, exceptuando a forma das distribuições), só as amostras das várias propriedades no arenito específico (Cap.4) se assemelham às amostras do arenito genérico (Cap.5). Existe, portanto, um certo encaixe dos dados do arenito específico nos dados do arenito genérico;
- Não são tão evidentes essas semelhanças entre as propriedades no tijolo cerâmico específico (do Cap.4) e as propriedades no tijolo cerâmico genérico (Cap.5), não sendo possível inferir o tal encaixe entre o material específico e o genérico;
- Na argamassa de cimento e cal não se registam quaisquer semelhanças;
- A maioria das amostras do Cap.5 exibem dispersões superiores às do Cap.4. Facto compreensível visto que as amostras do Capítulo 5 dizem respeito a propriedades de materiais genéricos, cuja variabilidade é naturalmente superior à das propriedades de materiais específicos, do Capítulo 4.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com o objectivo de produzir melhorias em trabalhos que desenvolvam o tema desta dissertação no futuro, sugere-se a recolha de mais dados, tanto ao nível dos materiais específicos como dos genéricos.

Desta forma, seria possível extrapolar conclusões e ajustar curvas a todas as propriedades, criando-se uma base de dados mais fundamentada e completa.

O desenvolvimento de modelos de simulação numérica que incluam a dispersão dos valores das propriedades, que permite traduzir nos seus resultados a amplitude real do comportamento higrotérmico de elementos construtivos, seria uma aposta muito forte na optimização dos programas existentes.

BIBLIOGRAFIA

- ABNT (2003) Projeto 02:135.07-001/2. Desempenho térmico de edificações. *Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. <http://www.labcon.ufsc.br/anexosg/137.pdf> 3 Junho, 2011.
- ASTM (1999) C 351-92b. *Test method for mean specific heat of thermal insulation*.
- ASTM (2000) C 20. *Test method for water absorption, bulk density, apparent porosity and apparent specific gravity of fired white ware products*.
- Azevedo, S.C. (2011). *Influência do teor de água no comportamento de materiais de construção*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. http://run.unl.pt/bitstream/10362/5260/1/Azevedo_2011.pdf 15 Maio de 2011.
- C580/CT 58 (1988) NP 2254. Materiais plásticos. Materiais celulares. *Determinação da condutividade térmica com o aparelho de placas*.
- CEN (1997) NP EN ISO 10545-3. *Parte 3: Determinação da absorção de água, da porosidade aberta, da densidade relativa aparente e da massa volúmica global*. Pavimentos e revestimentos cerâmicos. Instituto Português da Qualidade. Portugal.
- CEN (2000) EN 12524. Building materials and products. *Hygrothermal Properties - Tabulated design values*.
- CEN (2001) EN ISO 12572. Hygrothermal performance of building materials and products. *Determination of water vapour transmission properties*.
- CEN (2002) EN ISO 15148. Hygrothermal performance of building materials and products. *Determination of water absorption coefficient by partial immersion*.
- Delgado, J.M.P.Q., Ramos, N.M.M., Barreira, E., Freitas, V.P. (2010). *A Critical Review of Hygrothermal Models used in Porous Building Materials*. Journal of Porous Media, Vol. 13, Nr. 3, pp. 221–230, Begell House. Inc., New York.
- Esteves, E. (2009). *Introdução à Teoria das Probabilidades*. pp. 13. <http://w3.ualg.pt/~eesteves/docs/Probabilidades09.pdf>. 7 de Maio de 2011.
- Freitas, V.P., Pinto, P.S. (1998). *Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção - Condensações Internas*, Nota de Informação Técnica, NIT002, LFC, Porto.
- Freitas, V.P., Torres, M.I., Guimarães, A.S. (2008). *Humidade Ascensional*. FEUP edições, Porto.
- Grunewald, J., Zhao, J. (2010). *How to quantify material data uncertainty*. Project IEA-ECBCS, Input to RAP-RETRO Annex 55.
- Guilford, J. P. (1965). *Fundamental Statistics in Psychology and Education*. McGraw-Hill, New York.
- Guimarães, R. C., Cabral, J. S., (1997). *Estatística*. Edição Revista. McGraw-Hill, Porto.
- Hainaut, L. (1997). *Conceitos e Métodos da Estatística*. Uma variável a uma dimensão, Volume I, 2ª Edição, Serviço de Educação da Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Henriques, C., Reis, M. (2009). *Variáveis Aleatórias – Conceitos básicos*. pp. 6. <http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/psarabando/Ambiente%202009-2010/Slides/Vari%C3%A1veis%20Aleat%C3%B3rias/Vari%C3%A0veis%20Aleat%C3%B3rias.pdf> 6 de Maio de 2011.

Hoaglin, D. C., Mosteller, F., and Tukey, J. W. (1983). *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. John Wiley & Sons, New York.

IEA (2011). *Annex 55 Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting - Probability Assessment of Performance & Cost (RAP-RETRO)*. <http://www.ecbcs.org/annexes/annex55.htm>. Março 2011.

IPQ (1973) NP 616. *Madeiras. Determinação da massa volúmica*. Instituto Português da Qualidade. Portugal.

ISO (1991) ISO 8302. *Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus*.

Kumaran, M.K. (1996). *Heat Air and Moisture Transport. Final Report, Vol 3, Task 3: Material Properties*. International Energy Agency, Annex 24, Laboratorium Bouwfysica, K.U. – Leuven, Belgium.

Lanzinha, J., Freitas, V.P. (1998). *Propriedades Higrotérmicas de Materiais de Construção – Um Catálogo*. 6^{as} Jornadas de Construções Civas – Humidade na Construção, 26 de Novembro de 1998, pp. 127-131, FEUP, Porto.

LFC (2007). Laboratório de Física das Construções, *Condutibilidade térmica*, FEUP. <http://paginas.fe.up.pt/~lfc-scc/ensaio07.html>. 21 de Maio de 2011.

LFC (2010). Laboratório de Física das Construções, *Wufi-Pro – Introdução*, FEUP. <http://paginas.fe.up.pt/~wufi/Introducao.html>. 24 de Maio de 2011.

LNEC (2008). Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *Porosímetro*. <http://www.lnec.pt/organizacao/dm/npc/porosimetro>. 21 de Maio de 2011.

McNemar, Q. (1969). *Psychological Statistics*. John Wiley & Sons, New York.

Morais, C.M. (2005). *Escala de medida, Estatística Descritiva e Inferência Estatística*. pp. 8. <http://www.ipb.pt/~cmmm/conteudos/estdescr.pdf>. 28 de Abril de 2011.

NORDTEST (1996) NT BUILD 472. *Building Materials: degree of capillary saturation*.

Oliveira, P.M. (2006). *Estatística*. Sebenta, versão 3.1 de 2006/2007, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Pavliková, M., Pavlík, Z., Černý, R. *Hygric and thermal properties of materials used in historical masonry*. <http://flyashbricksinfo.com/construction/hygric-and-thermal-properties-of-materials-used-in-historical-masonry.html/3>. 6 Junho de 2011.

Plagge, R., Scheffler, G., Grunewald, J. (2005). *Automatic Measurement of Water Uptake Coefficient of Building Materials*. 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Reykjavik. http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_026.pdf. 3 Junho 2011.

Pina dos Santos, C.A., Vasconcelos de Paiva, J.A. (1990). *Coefficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. LNEC, Lisboa.

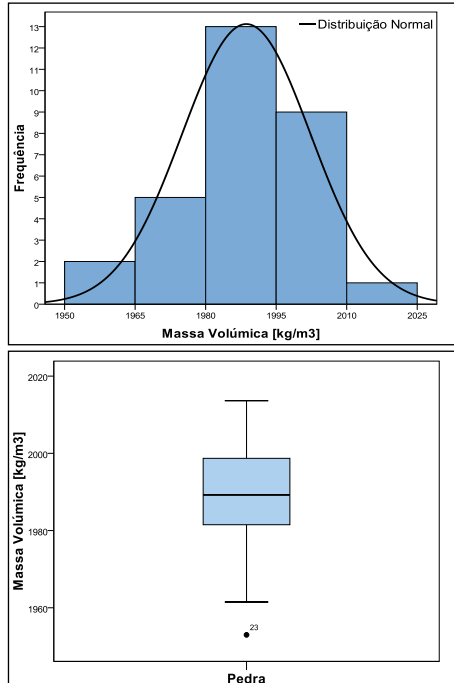
Qiu, X., Haghighat, F., Kumaran, M.K. (2003). *Moisture transport across interfaces between autoclaved aerated concrete and mortar*. <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc46411/nrcc46411.pdf>. 3 Junho 2011.

Ramos, N.M.M. (2007). *A Importância da Inércia Higroscópica no Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Ramos, N.M.M., Delgado, J.M.P.Q., Barreira, E., Freitas, V.P., (2009). *Propriedades Higrotérmicas utilizadas em Simulação Numérica*. PATORREB 2009, Actas do 3º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Vol. I, 18 a 20 de Março de 2009, pp. 429 e 430, FEUP, Porto.
- Roels, S., Vandersteen, K., Carmeliet, J. (2002). *Measuring and simulating moisture uptake in a fractured porous medium*, Department of Civil Engineering, K.U. –Leuven, Belgium.
<http://www.ehu.es/enedi/publicaciones/14-Tesis%20Doctorales/BIBLIOGRAFIATesisInAKI/%5B61%5D%20Roels%202002.pdf>. 2 de Junho 2011.
- Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H. (2003). HAMSTAD. WPI: Final Report. *Moisture transfer properties and materials characterization*. Laboratory of Building Physics, K.U. –Leuven, Belgium.
<http://www.ehu.es/enedi/publicaciones/14-Tesis%20Doctorales/BIBLIOGRAFIATesisInAKI/%5B59%5D%20Roels%202003.pdf> 2 de Junho 2011.
- Sastre, R.S. (2000). *Proprietats dels materials i elements de construcció*. Edicions UPC, Barcelona.
- Silva, L. (2007). *Análise Técnico Financeira de Paredes Exteriores em Panos Simples*. pp. 107. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
<http://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/150732/1/dissertacao.pdf>. 5 Junho de 2011.
- Sousa, J. M. M. S. (1996). *Caracterização da Capilaridade de Revestimentos de Fachada*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- SPSS: <http://www.spss.com/>. 26 de Fevereiro de 2011.
- Straube, J., Burnett, E.F.P. (1991). *Overview of hygrothermal (HAM) analysis methods*. pp.83 e 84.
<http://www.astm.org/BOOKSTORE/MNL40PDF/Ch5.pdf>. 16 de Maio de 2011.
- Tesárek, P., Černý, R., Drchalová, J., Rovnaníková, P. *Thermal and Hygric Properties of Gypsum: Reference Measures*. http://www.tpl.fpv.ukf.sk/engl_vers/thermophys/proceedings/03/tesarek.pdf. 6 Junho de 2011.
- Ungkoon, Y. Sittipunt, C., Namprakai, P., Jetipattaranat, W., Kim, K., Charinpanitkul, T. (2007). *Analysis of Microstructure and Properties of Autoclaved Aerated Concrete Wall Construction Materials*. <http://www.cheric.org/PDF/JIEC/IE13/IE13-7-1103.pdf>. 2 Junho de 2011.
- WUFI Light 5.0: http://www.wufi.de/index_e.html. 4 Novembro de 2010.

ANEXO

PEDRA



TESTE KOLMOGOROV – DIST. NORMAL

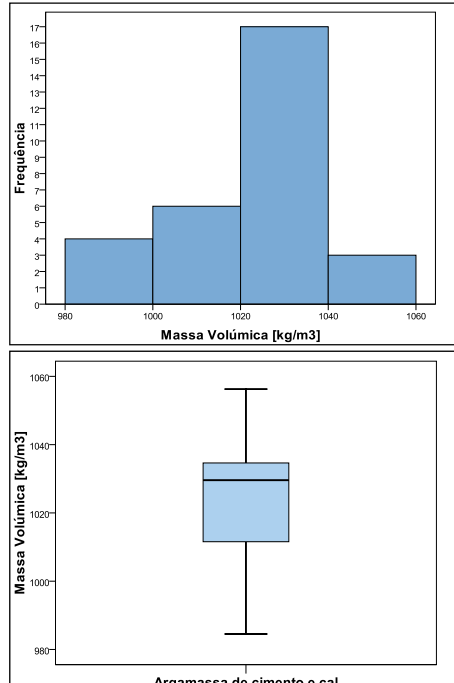
$valor-p = 0,974 > 0,05$, OK

Uma vez que o $valor-p$ é superior ao nível de significância adoptado (5%), pode considerar-se que a massa volúmica da pedra segue uma lei normal.

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 1988,647
 MEDIANA = 1989,279
 DESVIO-PADRÃO = 13,682
 ASSIMETRIA = - 0,529
 COEF. VARIAÇÃO = 0,69%
 N (DIMENSÃO) = 30

ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL



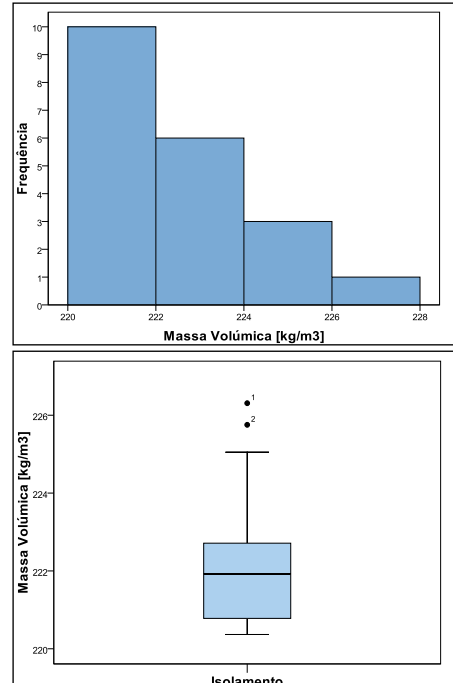
FUNÇÕES DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{4}{30} & \text{se } x \in]980; 1000] \\ \frac{6}{30} & \text{se } x \in]1000; 1020] \\ \frac{17}{30} & \text{se } x \in]1020; 1040] \\ \frac{3}{30} & \text{se } x \in]1040; 1060] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 1023,822
 MEDIANA = 1029,543
 DESVIO-PADRÃO = 18,069
 ASSIMETRIA = - 0,611
 COEF. VARIAÇÃO = 1,76%
 N (DIMENSÃO) = 30

ISOLAMENTO



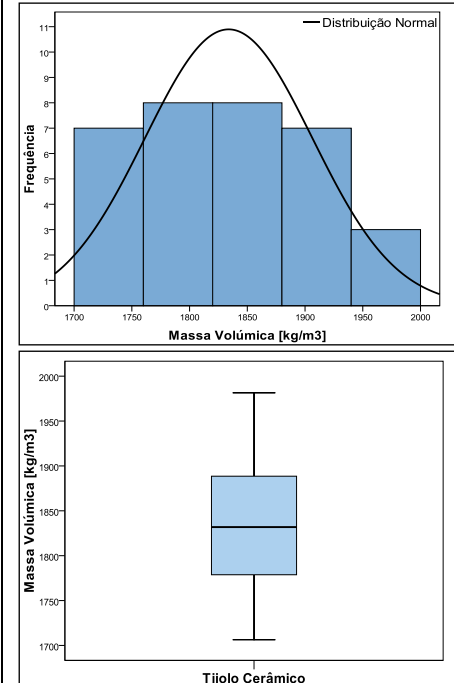
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{10}{20} & \text{se } x \in]220; 222] \\ \frac{6}{20} & \text{se } x \in]222; 224] \\ \frac{3}{20} & \text{se } x \in]224; 226] \\ \frac{1}{20} & \text{se } x \in]226; 228] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 222,254
 MEDIANA = 221,927
 DESVIO-PADRÃO = 1,813
 ASSIMETRIA = 1,099
 COEF. VARIAÇÃO = 0,82%
 N (DIMENSÃO) = 20

TIJOLO CERÂMICO



TESTE KOLMOGOROV - DIST. NORMAL

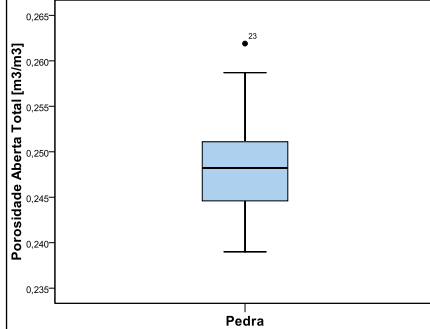
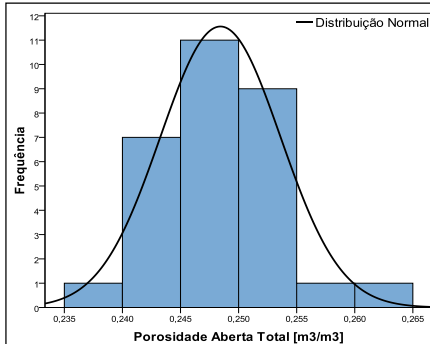
$valor-p = 0,945 > 0,05$, OK

Uma vez que o $valor-p$ é superior ao nível de significância adoptado (5%), pode considerar-se que a massa volúmica do tijolo cerâmico segue uma lei normal.

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 1833,856
 MEDIANA = 1831,625
 DESVIO-PADRÃO = 72,501
 ASSIMETRIA = 0,141
 COEF. VARIAÇÃO = 3,95%
 N (DIMENSÃO) = 33

PEDRA



TESTE KOLMOGOROV – DIST. NORMAL

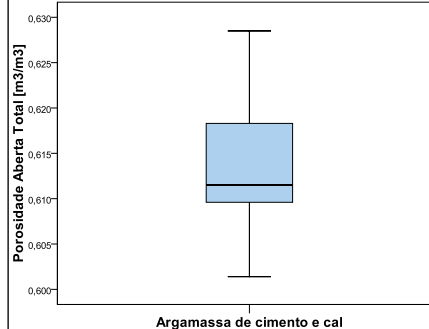
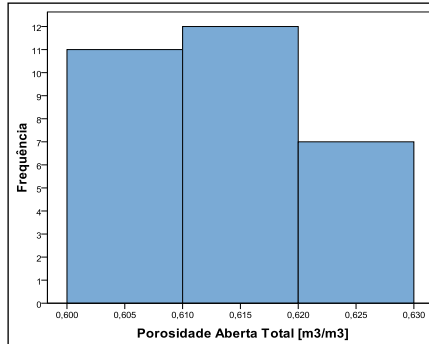
$\text{valor-}p = 0,981 > 0,05$, OK

Uma vez que o $\text{valor-}p$ é superior ao nível de significância adotado (5%), pode considerar-se que a porosidade da pedra segue uma lei normal.

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,248
 MEDIANA = 0,248
 DESVIO-PADRÃO = 0,005
 ASSIMETRIA = 0,528
 COEF. VARIAÇÃO = 2,08%
 N (DIMENSÃO) = 30

ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL



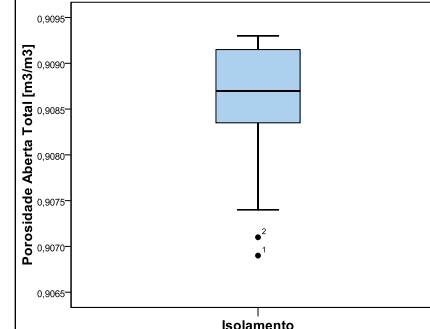
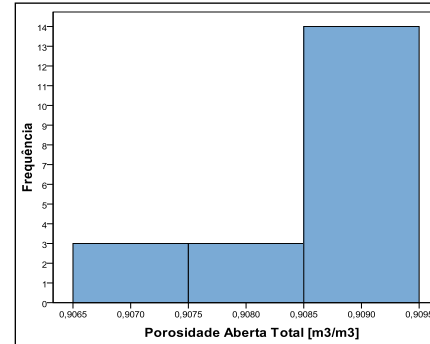
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{11}{30} & \text{se } x \in]0,60; 0,61] \\ \frac{12}{30} & \text{se } x \in]0,61; 0,62] \\ \frac{7}{30} & \text{se } x \in]0,62; 0,63] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,614
 MEDIANA = 0,612
 DESVIO-PADRÃO = 0,007
 ASSIMETRIA = 0,612
 COEF. VARIAÇÃO = 1,11%
 N (DIMENSÃO) = 30

ISOLAMENTO



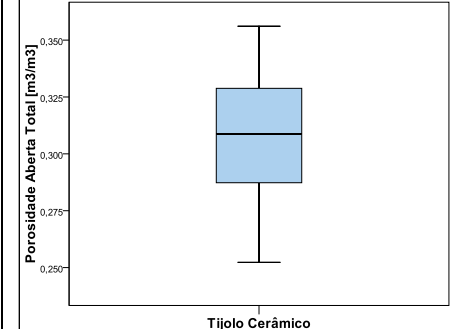
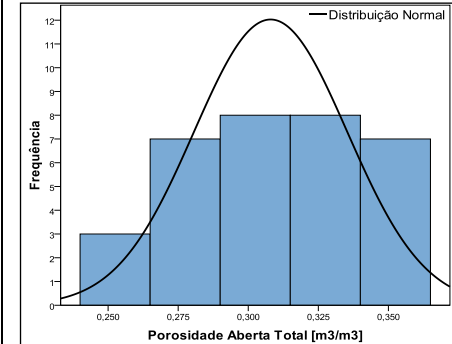
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{3}{20} & \text{se } x \in]0,9065; 0,9085] \\ \frac{14}{20} & \text{se } x \in]0,9085; 0,9095] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,909
 MEDIANA = 0,909
 DESVIO-PADRÃO = 0,001
 ASSIMETRIA = -1,094
 COEF. VARIAÇÃO = 0,08%
 N (DIMENSÃO) = 20

TIJOLO CERÂMICO



TESTE KOLMOGOROV – DIST. NORMAL

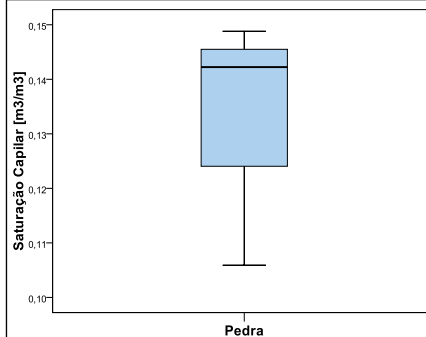
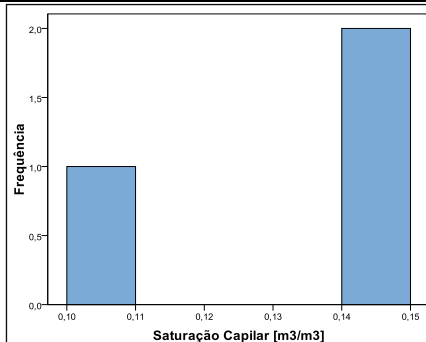
$\text{valor-}p = 0,946 > 0,05$, OK

Uma vez que o $\text{valor-}p$ é superior ao nível de significância adotado (5%), pode considerar-se que a porosidade do tijolo cerâmico segue uma lei normal.

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,308
 MEDIANA = 0,309
 DESVIO-PADRÃO = 0,027
 ASSIMETRIA = -0,142
 COEF. VARIAÇÃO = 8,88%
 N (DIMENSÃO) = 33

PEDRA



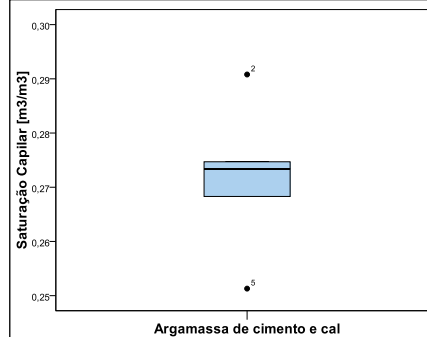
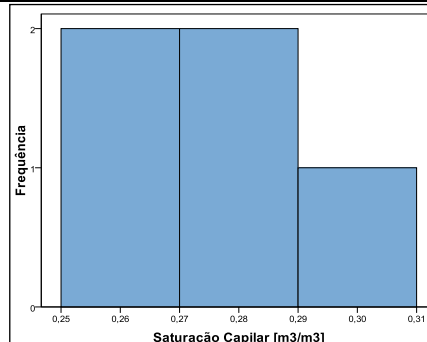
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{3} & \text{se } x \in]0,10; 0,11] \\ \frac{2}{3} & \text{se } x \in]0,14; 0,15] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,132
 MEDIANA = 0,142
 DESVIO-PADRÃO = 0,023
 ASSIMETRIA = - 1,574
 COEF. VARIAÇÃO = 17,40%
 N (DIMENSÃO) = 3

ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL



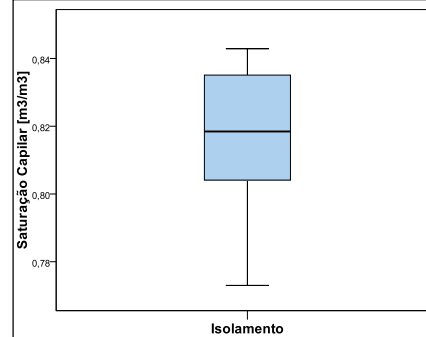
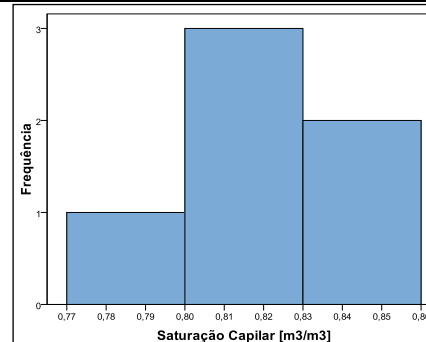
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2}{5} & \text{se } x \in]0,25; 0,29] \\ \frac{1}{5} & \text{se } x \in]0,29; 0,31] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,272
 MEDIANA = 0,273
 DESVIO-PADRÃO = 0,014
 ASSIMETRIA = - 0,223
 COEF. VARIAÇÃO = 5,10%
 N (DIMENSÃO) = 5

ISOLAMENTO



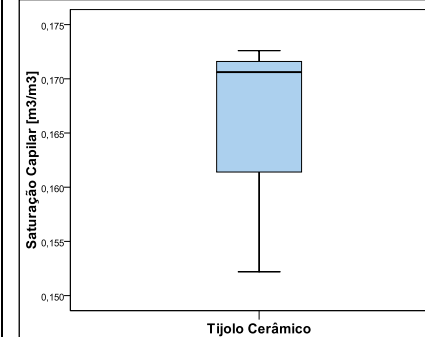
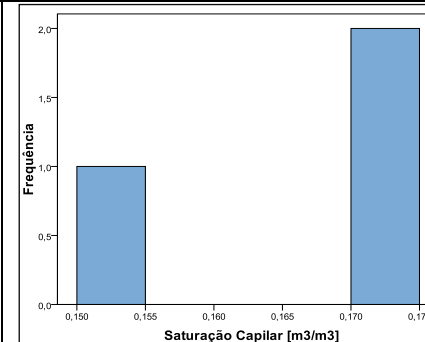
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{6} & \text{se } x \in]0,77; 0,80] \\ \frac{3}{6} & \text{se } x \in]0,80; 0,83] \\ \frac{2}{6} & \text{se } x \in]0,83; 0,86] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,815
 MEDIANA = 0,818
 DESVIO-PADRÃO = 0,025
 ASSIMETRIA = - 0,860
 COEF. VARIAÇÃO = 3,10%
 N (DIMENSÃO) = 6

TIJOLO CERÂMICO



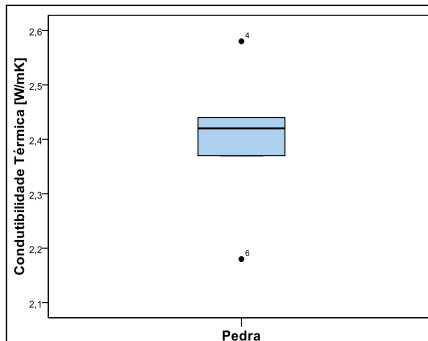
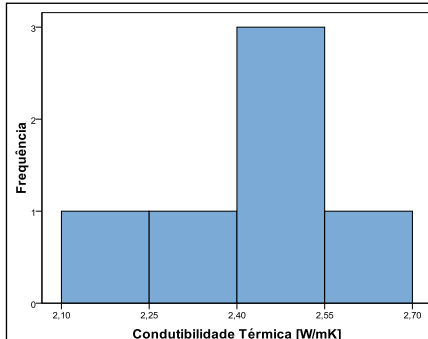
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{3} & \text{se } x \in]0,150; 0,155] \\ \frac{2}{3} & \text{se } x \in]0,170; 0,175] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,165
 MEDIANA = 0,171
 DESVIO-PADRÃO = 0,011
 ASSIMETRIA = - 1,671
 COEF. VARIAÇÃO = 6,70%
 N (DIMENSÃO) = 3

PEDRA



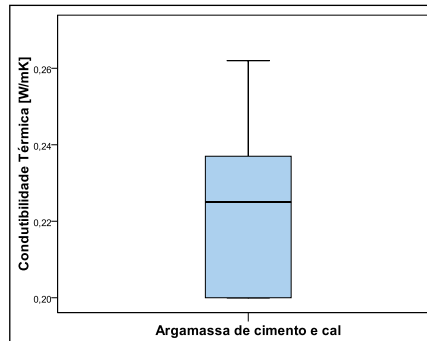
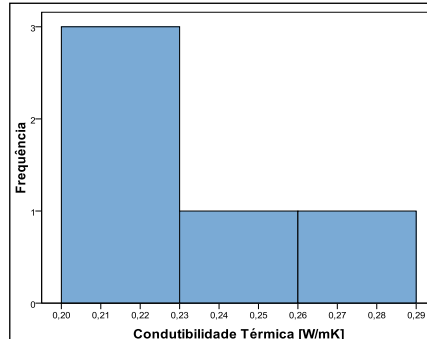
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{6} & \text{se } x \in]2,1; 2,4] \text{ e }]2,55; 2,70] \\ \frac{3}{6} & \text{se } x \in]2,4; 2,55] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 2,402
 MEDIANA = 2,420
 DESVIO-PADRÃO = 0,130
 ASSIMETRIA = - 0,713
 COEF. VARIAÇÃO = 5,40%
 N (DIMENSÃO) = 6

ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL



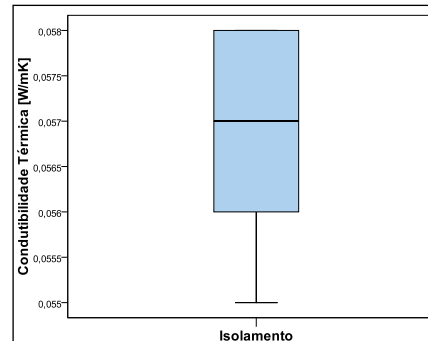
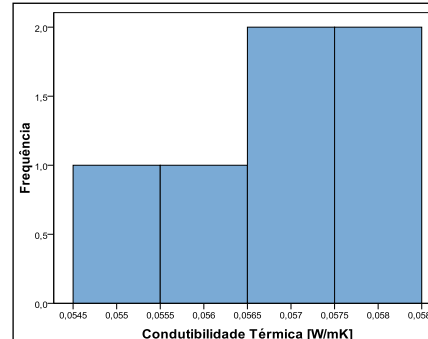
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{3}{5} & \text{se } x \in]0,20; 0,23] \\ \frac{1}{5} & \text{se } x \in]0,23; 0,29] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,225
 MEDIANA = 0,225
 DESVIO-PADRÃO = 0,026
 ASSIMETRIA = 0,523
 COEF. VARIAÇÃO = 11,70%
 N (DIMENSÃO) = 5

ISOLAMENTO



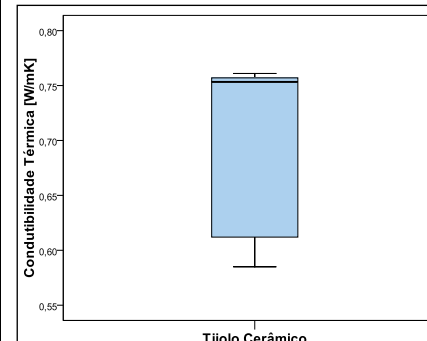
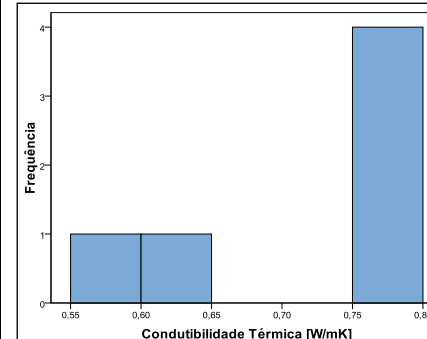
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{6} & \text{se } x \in]0,0545; 0,0565] \\ \frac{2}{6} & \text{se } x \in]0,0565; 0,0585] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,057
 MEDIANA = 0,057
 DESVIO-PADRÃO = 0,001
 ASSIMETRIA = - 0,668
 COEF. VARIAÇÃO = 2,10%
 N (DIMENSÃO) = 6

TIJOLO CERÂMICO



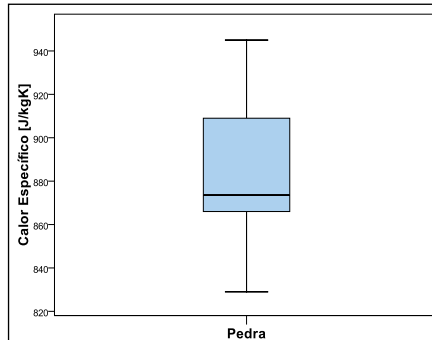
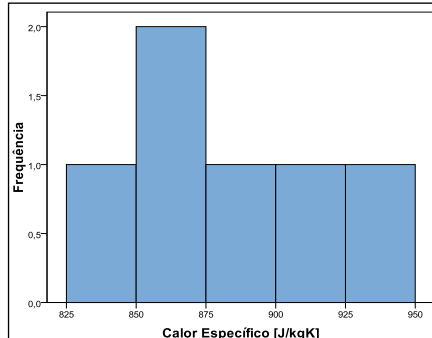
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{6} & \text{se } x \in]0,55; 0,65] \\ \frac{4}{6} & \text{se } x \in]0,75; 0,80] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,704
 MEDIANA = 0,754
 DESVIO-PADRÃO = 0,082
 ASSIMETRIA = - 1,010
 COEF. VARIAÇÃO = 11,60%
 N (DIMENSÃO) = 6

PEDRA



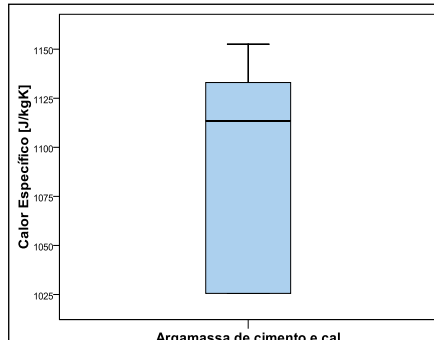
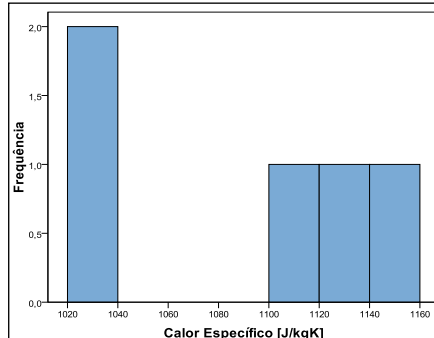
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{6} & \text{se } x \in]825; 850] \text{ e }]875; 950] \\ \frac{2}{6} & \text{se } x \in]850; 875] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 882,670
 MEDIANA = 873,500
 DESVIO-PADRÃO = 40,043
 ASSIMETRIA = 0,451
 COEF. VARIAÇÃO = 4,50%
 N (DIMENSÃO) = 6

ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL



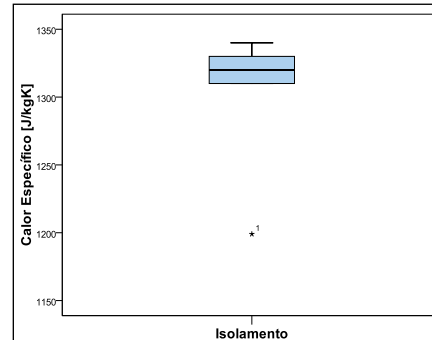
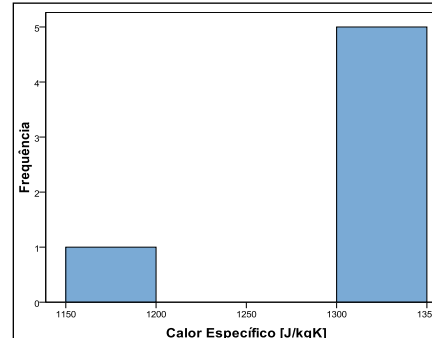
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2}{5} & \text{se } x \in]1020; 1040] \\ \frac{1}{5} & \text{se } x \in]1100; 1160] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 1090,030
 MEDIANA = 1113,470
 DESVIO-PADRÃO = 60,445
 ASSIMETRIA = -0,376
 COEF. VARIAÇÃO = 5,50%
 N (DIMENSÃO) = 5

ISOLAMENTO



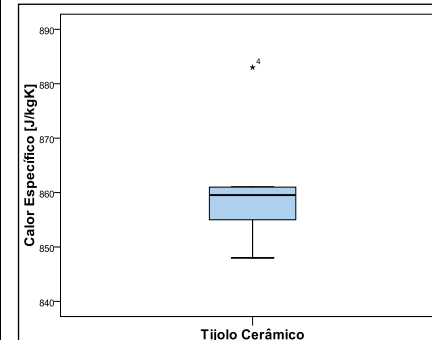
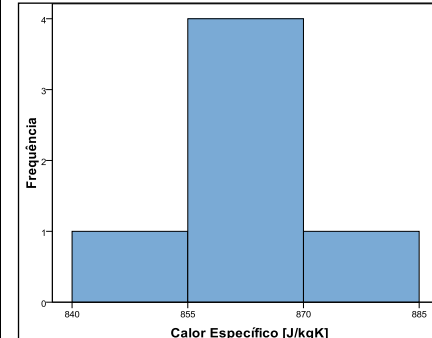
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{6} & \text{se } x \in]1150; 1200] \\ \frac{5}{6} & \text{se } x \in]1300; 1350] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 1303,170
 MEDIANA = 1320,000
 DESVIO-PADRÃO = 52,178
 ASSIMETRIA = -2,212
 COEF. VARIAÇÃO = 4,00%
 N (DIMENSÃO) = 6

TIJOLO CERÂMICO



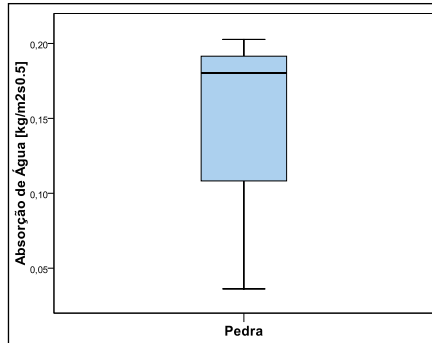
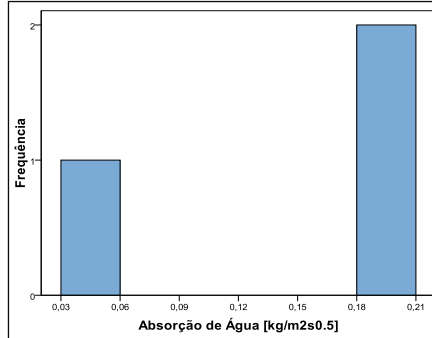
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{6} & \text{se } x \in]840; 855] \text{ e }]870; 885] \\ \frac{4}{6} & \text{se } x \in]855; 870] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 861,000
 MEDIANA = 859,500
 DESVIO-PADRÃO = 11,781
 ASSIMETRIA = 1,509
 COEF. VARIAÇÃO = 1,40%
 N (DIMENSÃO) = 6

PEDRA



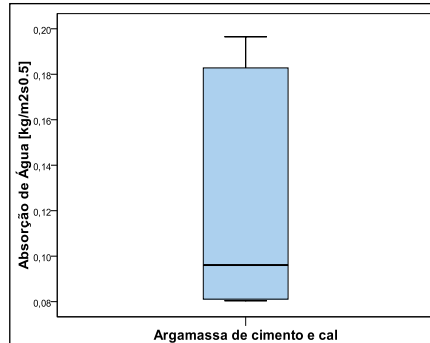
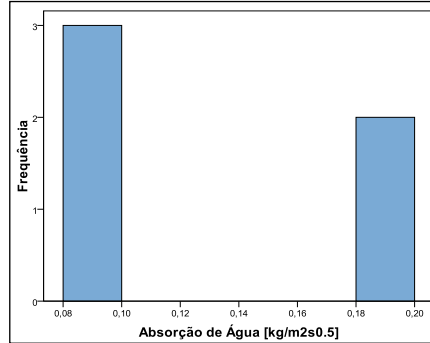
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{3} & \text{se } x \in]0,03; 0,06] \\ \frac{2}{3} & \text{se } x \in]0,18; 0,21] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,140
 MEDIANA = 0,180
 DESVIO-PADRÃO = 0,090
 ASSIMETRIA = - 1,613
 COEF. VARIAÇÃO = 64,70%
 N (DIMENSÃO) = 3

ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL



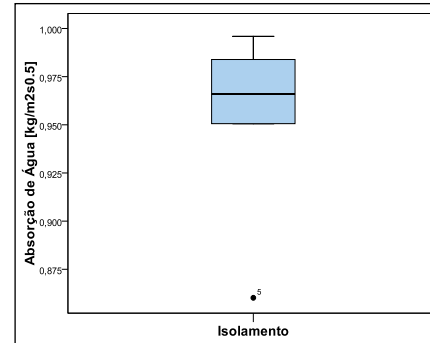
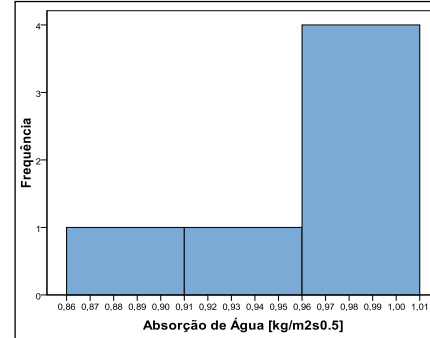
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{3}{5} & \text{se } x \in]0,08; 0,10] \\ \frac{2}{5} & \text{se } x \in]0,18; 0,20] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,127
 MEDIANA = 0,096
 DESVIO-PADRÃO = 0,057
 ASSIMETRIA = 0,589
 COEF. VARIAÇÃO = 45,10%
 N (DIMENSÃO) = 5

ISOLAMENTO



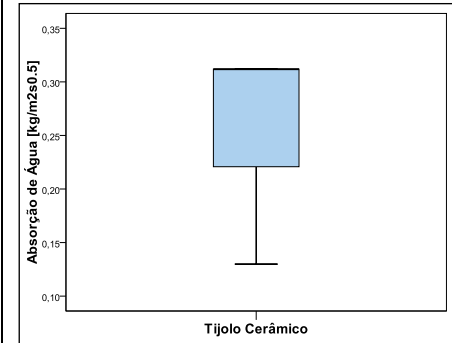
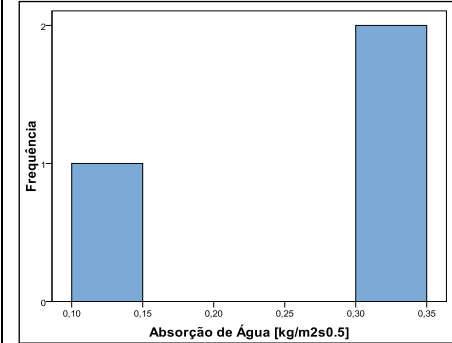
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{4} & \text{se } x \in]0,86; 0,96] \\ \frac{4}{4} & \text{se } x \in]0,96; 1,01] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,954
 MEDIANA = 0,966
 DESVIO-PADRÃO = 0,048
 ASSIMETRIA = - 1,875
 COEF. VARIAÇÃO = 5,10%
 N (DIMENSÃO) = 6

TIJOLO CERÂMICO

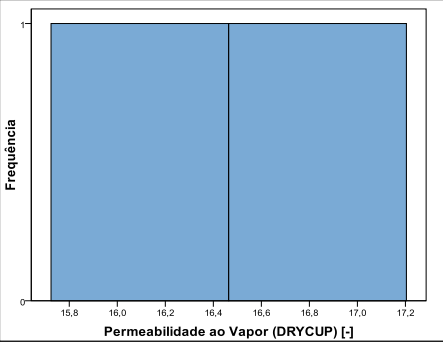
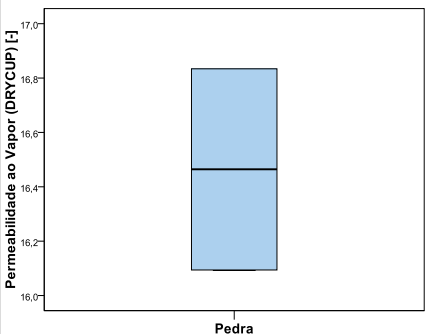
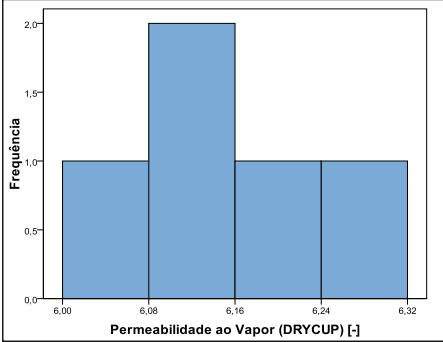
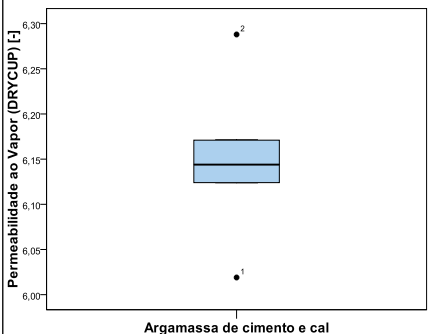
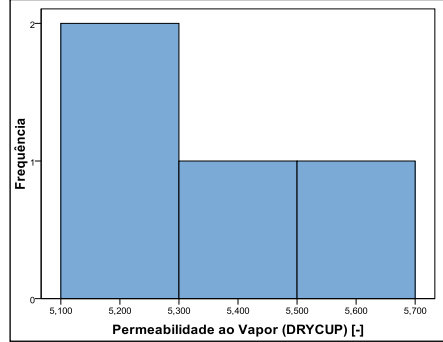
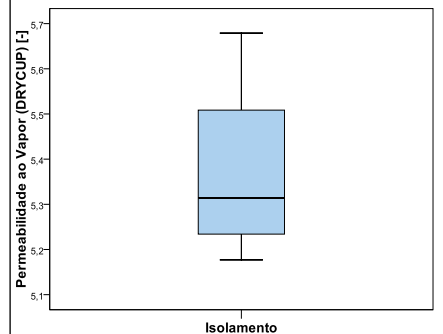
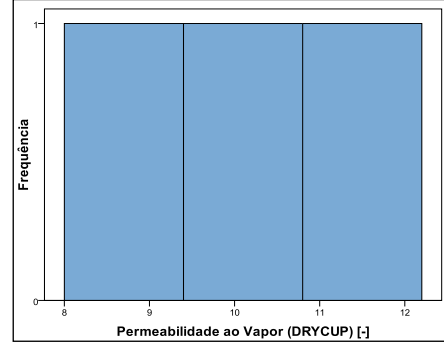
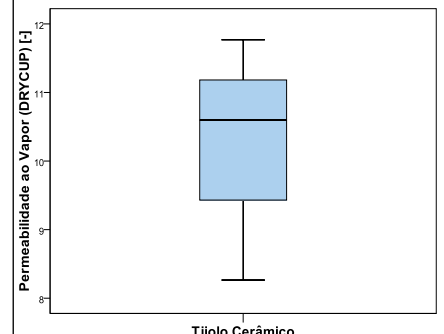


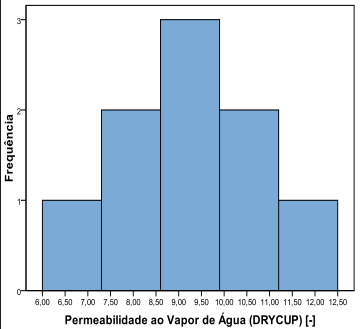
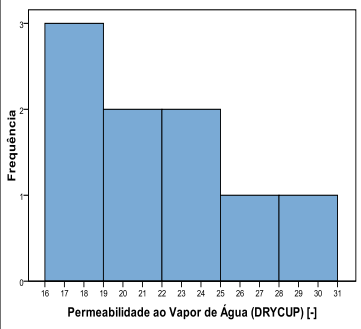
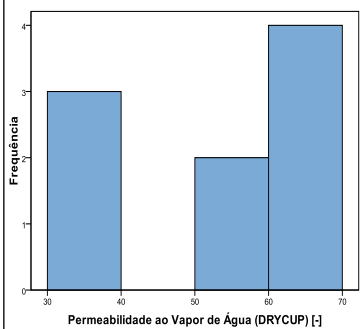
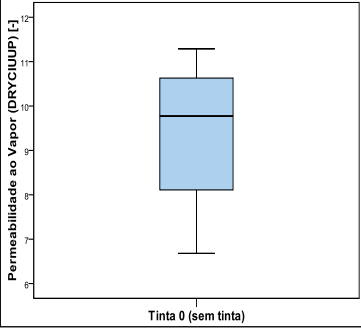
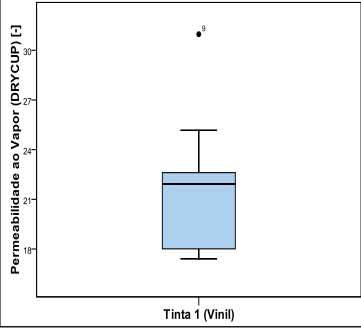
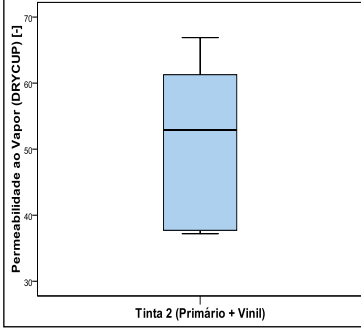
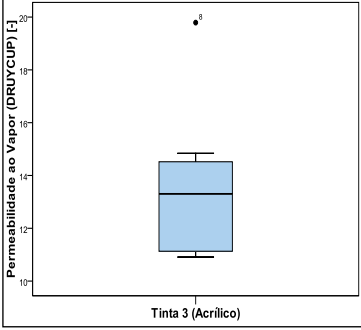
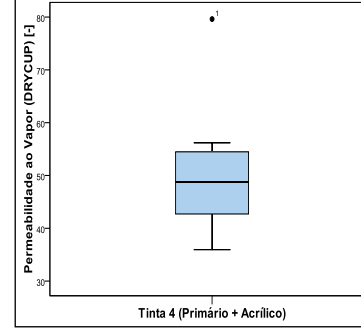
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{3} & \text{se } x \in]0,10; 0,15] \\ \frac{2}{3} & \text{se } x \in]0,30; 0,35] \end{cases}$$

MEDIDAS DESCRITIVAS

MÉDIA = 0,251
 MEDIANA = 0,312
 DESVIO-PADRÃO = 0,105
 ASSIMETRIA = -1,732
 COEF. VARIAÇÃO = 41,80%
 N (DIMENSÃO) = 3

PEDRA	ARGAMASSA DE CIMENTO E CAL	ISOLAMENTO	TIJOLO CERÂMICO
 	 	 	 
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{se } x \in]15,724; 17,204] \end{cases}$ MEDIDAS DESCRITIVAS MÉDIA = 16,464 MEDIANA = 16,464 DESVIO-PADRÃO = 0,523 ASSIMETRIA = 0,000 COEF. VARIAÇÃO = 3,20% N (DIMENSÃO) = 2	FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{5} & \text{se } x \in]6,00; 6,08] \text{ e }]6,16; 6,32] \\ \frac{2}{5} & \text{se } x \in]6,08; 6,16] \end{cases}$ MEDIDAS DESCRITIVAS MÉDIA = 6,149 MEDIANA = 6,144 DESVIO-PADRÃO = 0,097 ASSIMETRIA = 0,213 COEF. VARIAÇÃO = 1,60% N (DIMENSÃO) = 5	FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS $f(x) = \begin{cases} \frac{2}{4} & \text{se } x \in]5,10; 5,30] \\ \frac{1}{4} & \text{se } x \in]5,30; 5,70] \end{cases}$ MEDIDAS DESCRITIVAS MÉDIA = 5,371 MEDIANA = 5,315 DESVIO-PADRÃO = 0,216 ASSIMETRIA = 1,406 COEF. VARIAÇÃO = 4,00% N (DIMENSÃO) = 4	FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{3} & \text{se } x \in]8,00; 12,00] \end{cases}$ MEDIDAS DESCRITIVAS MÉDIA = 10,210 MEDIANA = 10,597 DESVIO-PADRÃO = 1,783 ASSIMETRIA = - 0,931 COEF. VARIAÇÃO = 0,175 N (DIMENSÃO) = 3

GESSO PINTADO					
PINTURA 0 (SEM TINTA)		PINTURA 1 (VINIL)		PINTURA 2 (PRIMÁRIO + VINIL)	
PINTURA 3 (ACRÍLICO)		PINTURA 4 (PRIMÁRIO + ACRÍLICO)			
					
					
					
FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{9} & \text{se } x \in [6,0; 7,3] \text{ e } [11,2; 12,5] \\ \frac{2}{9} & \text{se } x \in [7,3; 8,6] \text{ e } [9,9; 11,2] \\ \frac{3}{9} & \text{se } x \in [8,6; 9,9] \end{cases}$		FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS $f(x) = \begin{cases} \frac{3}{9} & \text{se } x \in [16; 19] \\ \frac{2}{9} & \text{se } x \in [19; 25] \\ \frac{1}{9} & \text{se } x \in [25; 31] \end{cases}$		FUNÇÃO DE FREQUÊNCIAS $f(x) = \begin{cases} \frac{3}{9} & \text{se } x \in [30; 40] \\ \frac{2}{9} & \text{se } x \in [50; 60] \\ \frac{4}{9} & \text{se } x \in [60; 70] \end{cases}$	
MEDIDAS DESCRITIVAS MÉDIA = 9,379 MEDIANA = 9,770 DESVIO-PADRÃO = 1,497 ASSIMETRIA = - 0,619 COEF. VARIAÇÃO = 15,97% N (DIMENSÃO) = 9		MEDIDAS DESCRITIVAS MÉDIA = 21,904 MEDIANA = 21,940 DESVIO-PADRÃO = 4,313 ASSIMETRIA = 1,087 COEF. VARIAÇÃO = 19,69% N (DIMENSÃO) = 9		MEDIDAS DESCRITIVAS MÉDIA = 51,942 MEDIANA = 52,870 DESVIO-PADRÃO = 11,935 ASSIMETRIA = - 0,283 COEF. VARIAÇÃO = 22,98% N (DIMENSÃO) = 9	
MEDIDAS DESCRITIVAS MÉDIA = 13,530 MEDIANA = 13,310 DESVIO-PADRÃO = 2,790 ASSIMETRIA = 1,474 COEF. VARIAÇÃO = 20,62 N (DIMENSÃO) = 9		MEDIDAS DESCRITIVAS MÉDIA = 50,931 MEDIANA = 48,745 DESVIO-PADRÃO = 13,231 ASSIMETRIA = 1,581 COEF. VARIAÇÃO = 25,98% N (DIMENSÃO) = 8			

