SCIENTIA PLENA VOL. 9, NUM. 7 2013
www.scientiaplena.org.br

Análise Multicritério de Materiais de Construção – sobre o uso da entropia como medida de importância

N. Hein[1]; A. Kroenke[2]; V. E. Wilhelm[3]

[1] *Programa de Pós-Graduação em Ciências Contábeis, Universidade Regional de Blumenau, 89012-900, Blumenau-SANTA CATARINA, Brasil*

[2] *Departamento de Matemática da Universidade Regional de Blumenau, 89012-900, Blumenau - SANTA CATARINA, Brasil; Programa Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 81531-980, Curitiba-PARANÁ, Brasil*

[3] *Programa Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 81531-980, Curitiba-PARANÁ, Brasil*

hein@furb.br; didlen@terra.com.br; volmirw@gmail.com

(Recebido em 15 de fevereiro de 2013; aceito em 11 de julho de 2013)

Resumo: O conjunto de fenômenos climáticos que assolaram a cidade de Blumenau (SC) em novembro de 2008 causaram, além da perda de vidas humanas, destruição de casas e comércios. Este artigo resultou da contribuição dos pesquisadores na reconstrução da cidade. O trabalho teve por objetivo apontar uma classificação de materiais utilizados na construção de um conjunto habitacional de 620 unidades, que levou em consideração os riscos de desabamentos de paredes tendo como opção quatro materiais possíveis. Os critérios utilizados foram os tipos de chuvas ocorrentes na região: convectiva, frontal e orográfica e os respectivos custos no uso de cada material. Usando o método da entropia máxima, foi realizada a análise tomando pesos determinados por um grupo de participantes da reconstrução blumenauense. O resultado apontou para o uso de blocos de cimento.

Palavras-chave: decisão multicritério. Entropia. Medida de importância.

Multicriteria Analysis of Construction Materials - about the use of entropy as a measure of importance

Abstract: The set of climatic phenomena that swept over the city of Blumenau (SC) in november 2008 caused, besides the loss of live, destruction of homes and businesses. This article resulted from the contribution of researchers in rebuilding the city. The study aimed to point to a classification of materials used in construction of a housing project of 620 units, which took into account the risks of collapsing walls on the use of four possible materials. The criteria used were the types of rainfall occurring in the region: convective, frontal and orographic and costs in the use of each material. Using the method of maximum entropy, analysis was performed using weights determined by a group of participants in the reconstruction Blumenau. The result pointed to the use of cement blocks.

Keyword: Multicriteria decision. Entropy. Measure of importance.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, vários têm sido os pesquisadores que aplicaram conceitos da física para explicar fenômenos econômicos criando um novo campo de pesquisa. Várias denominações foram propostas a este novo ramo de conhecimento. Farmer *et al.* (2005) denominaram a vertente como *Economical Physics*. Alternativamente, físicos preferem chamar a linha de *Phynance*, como sendo resultando da junção das palavras: física com finanças. Em uma analogia com os termos da biofísica, geofísica e astrofísica, foi introduzido por Stanley *et al.* (1996) o termo *Econophysics*, que legitima o estudo da economia por físicos.

Um dos conceitos estudados nesta emergente área do conhecimento é a entropia. Os físicos concordam que a entropia é uma categoria central em sua área. Contudo, existem muitas definições e interpretações distintas sobre o conceito. Tipicamente é compreendida como uma medida da desordem, incerteza, ignorância, dispersão, desorganização, ou ainda, carência de informação.

Para Ayres (1998), o termo entropia é muito usado, porém pouco estudado. Na interpretação econométrica, Golan (2002) considera que a entropia sobre um sistema econômico é uma medida da ignorância que o pesquisador quer saber daqueles valores momentâneos que representam à essência da população em análise. Allegrini *et al.* (2003) criticam o uso e o propósito da entropia como medida de desordem, apontando problemas de subjetividade. Com efeito, o conceito de ordem e desordem que dificulta sua definição e depende de questões que são extraídas do sistema. Contudo, a subjetividade entra no modelo no momento em que se escolhe a definição que se quer usar, que dê sustento às questões de interesse. Bais e Farmer (2005) vão mais além e quando questionam se é a entropia é um atributo subjetivo no domínio do observador ou, se pelo contrário, é uma propriedade intrínseca do sistema físico.

Com o intuito de discutir como a entropia pode contribuir no estabelecimento de ordenações (*rankings*), em cenários complexos em que muitos critérios são observados e analisados, é que se firma este artigo. A pergunta de pesquisa assim se apresenta: *de que material devem ser feitas as paredes do conjunto habitacional que se pretende construir em Blumenau?*

Declara-se assim o objetivo do artigo: avaliar um conjunto de materiais de construção, por meio da análise entrópica multicriterial, na construção de 620 unidades habitacionais destinadas aos atingidos pelas cheias do Rio Itajaí-Açu no ano de 2008 na cidade de Blumenau. Para tanto é imperativo o estudo do conceito de entropia e sua utilização na tomada de decisões multicriteriais, assim na próxima seção haverá uma discussão do conceito de entropia na física iniciada por Clausius em 1865 (BENTES, *et al*, 2009). Na sequência a visão de Shannon (1948) na avaliação da informação em trânsito e, por último, porém não menos importante, aplicar um algoritmo derivado de Zeleny (1982) para avaliação de uma situação prática discutida por Hein (2009) que determinou o *ranking* de possíveis áreas a serem ocupadas para a construção de novas habitações.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O termo entropia vem do grego “*εντροπία*”, ou seja, *εν* ~ em e *τροπία* ~ movimento. O conceito foi introduzido por Clausius em 1865 (BENTES, *et al*, 2009), para explicar como as tendências da temperatura, pressão, densidade e gradientes químicos desaparecerem no tempo. Neste contexto, Clausius desenvolveu a segunda lei da termodinâmica que postula que a entropia em um sistema isolado tende a diminuir continuamente até alcance um valor de equilíbrio. Clausius provou que nesta situação o trabalho atinge um valor mínimo. Matematicamente, ele descreveu a entropia E, como sendo dada por $dE = \frac{dQ}{T}$, onde dQ representa o calor fluindo e T a temperatura absoluta. Pregogine (1967) enumerou os requisitos que T deve satisfazer:

(i) T é positiva;

(ii) T é uma função universal da temperatura sobre o sistema, medida segundo alguma propriedade arbitrária;

(iii) T é uma função crescente da temperatura empírica sobre o sistema.

Clausius não define explicitamente entropia. O que o item (i) permite é a determinação somente das variações de entropia e que, portanto, é impossível obter valores absolutos.

Matematicamente, a segunda lei da termodinâmica pode ser expressa como $dE \geq 0$, onde dE=0 se o processo for reversível, e dE>0 se o processo for irreversível, ou seja, quando não é possível fazer um sistema retornar ao estado em que se encontrava antes de uma dada ação ter sido efetuada sobre o sistema fechado.

A estrutura da Segunda Lei da Termodinâmica é dada já na primeira lei, conhecida como Princípio da Conservação de Energia, que postula que a energia total em um sistema é conservado. A existência da conservação da energia em sistemas isolados faz voltar o princípio aos trabalhos de Newton. Os experimentos de Joule mostraram que os fenômenos térmicos são sujeitados as leis da mecânica, ou seja, a Primeira Lei da Termodinâmica determina que dU=dQ-dW, onde dU representa a troca interna de energia, dQ o calor fluindo e dW é o trabalho realizado pelo sistema. Desta equação é possível derivar duas conclusões. A primeira é que em sistemas isolados a energia não muda; a outra é relativa ao fato que em processos cíclicos todo trabalho produzido é convertido em calor e *vice-versa*.

Uma interpretação alternativa do conceito de entropia na termodinâmica foi proposta por Ebeling (1992), que considerou que a entropia pode ser expressa em termos de distância do equilíbrio, em que o valor da energia ou sua relativa ocupação no espaço (ou fase) em substituição usual do entendimento de medida de desordem.

Especificamente a contribuição de Shannon (1948) no estudo da entropia ultrapassou os conceitos restritos da termodinâmica e pôde ser aplicada em vários contextos em que probabilidades podem ser definidas. De acordo com Bais e Farmer (2005), a entropia da termodinâmica pode ser vista como sendo um caso especial da entropia de Shannon, sendo suas medidas um conjunto de probabilidades dentro do espaço/estado como um todo. Baseada na fórmula de Hartley (1928), Shannon derivou sua medida de entropia e estabeleceu a Teoria da Informação.

Sejam $A=\{a_1,a_2,a_3,...,a_n\}$ um conjunto discreto finito de elementos e p uma função de densidade de probabilidade sobre. O montante de informação necessária para caracterizar totalmente todos os elementos do conjunto foi definido por Hartley como sendo $I(A_n) = \log_2 n$.

Para uma distribuição de probabilidade $p_i \equiv p(X = i), (i = 1,2,..., n)$ sobre uma dada variável aleatória X, a entropia de Shannon foi definida como segue: $E(X) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \ln p_i$, com a convenção de que $0.\ln\left(\frac{0}{z}\right) = 0$, para $z \geq 0$ e que $z.\ln\left(\frac{z}{0}\right) = \infty$.

A razão pela escolha da função logarítmica foi, de acordo com Shannon (1948), por três motivos, a saber: (i) ela é mais usual. Com efeito, parâmetros como tempo, processamento de sinais, número de substituições, etc., tendem a ser lineares com o uso do logaritmo sobre o número de possibilidades. (ii) é mais próxima à intuição do que propriamente uma medida, sendo que intuitivamente induz a uma comparação linear entre critérios comuns. (iii) é matematicamente mais apropriada. Quando analisadas as limitações operacionais, é mais fácil tratar com logaritmos.

Outro fato importante a ser assinalado é o $p_i \leq 1$, sendo que o logaritmo de uma fração é negativo e que a entropia deve ser positiva, daí o sinal negativo diante da expressão. Caso $p_i = 1$ para dado i, a variável aleatória X assume valores x_i de certeza, e assim E(X)=0.

Shannon (1948) e Khinchin (1949) provaram que a função de entropia é única segundo as seguintes condições:

(1) Para um dado n e $\sum_{i=1}^{n} p_i = 1$ é preciso que $E(p_1,p_2,...,p_n)$ seja máxima para todos os $p_i = \frac{1}{n}$;

(2) A função deve satisfazer $E(p_1,p_2,...,p_n,0) = E(p_1,p_2,...,p_n)$, ou seja, a inclusão de um evento impossível não deve alterar o valor de E;

(3) Se A e B forem dois conjuntos finitos de eventos, não necessariamente independentes, a entropia E (A, B), para a ocorrência conjunta dos eventos A e B, é dada pela entropia do conjunto A sozinho, somando-se média ponderada da entropia condicional $E_i(B)$ para B dada a ocorrência do i-ésimo evento em A, ou seja, $E(A,B) = E(A) + \sum_{k} p_i E_i(B)$, onde o evento Ai ocorre com probabilidade p_i.

Dionísio *et al.* (2006, p.31) afirmam que de acordo com "o princípio da entropia máxima e mínima informação é possível encontrar a distribuição de probabilidade que mais se ajusta aos dados", na qual é minimizado o uso inadvertido de qualquer tipo de informação que não a explicitamente disponível, podendo ser encarado como um ramo da inferência estatística (Maasoumi, 1993).

No caso de variáveis aleatórias X, não negativas e absolutamente contínuas e com função de densidade de probabilidade p, Shannon definiu entropia como sendo: $E(X) = -\int p(x)\ln p(x)dx$, e é sobre este conceito que se apoiará o método a seguir.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Ao tratar de problemas decisórios em cenários complexos, em que muitos critérios estão em tratamento, o peso da importância do atributo (λ_i), conferido ao i-*ésimo* atributo como medida de importância relativa em uma dada situação de decisão, é diretamente relacionado a quantidade de informação intrínseca gerada por um conjunto de possíveis alternativas de cada i-*ésimo* atributo e, em paralelo, à subjetividade associada as importâncias, reflete a cultura, psicologia e meio em que vive o tomador de decisão.

Zeleny (1982, p.188) destaca duas componentes na formação do peso λ_i:

(a) Conceito de relatividade estável *a priori* atribuindo importância w_i, refletindo a cultura individual, cultural, genética, psicológica, social e ambiental (meio);

(b) Relatividade instável, conceito contexto-dependente da importância informacional λ_i, baseado em um conjunto particular de possíveis alternativas, de uma dada situação decisória. Esses pesos são sensíveis a qualquer mudança em ambos os conjuntos X (valores da matriz de decisão) e D (valores normalizados da matriz de decisão), e as flutuações nas quantidades de informação intrínseca gerada por ambos.

A importância do atributo se torna operacional somente se a quantidade intrínseca da informação transmitida para o tomador de decisão do i-*ésimo* atributo pode ser mensurado. Pode-se ajustar uma medida de entropia para concordar com o propósito.

Quanto mais distintos e diferenciados forem os escores, ou seja, quanto maior for o contraste de intensidade entre os valores do i-*ésimo* atributo, maior é a soma da "informação decisória" contida nela e transmitida pelo atributo.

Seja $d_i = \left(d_i^1, d_i^2, \ldots, d_i^m\right)$ os valores normalizados, onde: $d_i^k = \dfrac{x_i^k}{x_i^*}$, que caracteriza o conjunto D, em termos do i-*ésimo* atributo. Define-se $D_i = \sum_{k=1}^{m} d_i^k ; i = 1,2,\ldots,n$. A medida de entropia do contraste de intensidade para o i-*ésimo* atributo é calculado por $e(d_i) = -\alpha \sum_{k=1}^{m} \dfrac{d_i^k}{D_i} \mathrm{Ln}\left(\dfrac{d_i^k}{D_i}\right)$, onde $\alpha = \dfrac{1}{e_{max}} > 0$ e e_{max}=Ln(m). Lembrando ainda que $0 \leq d_i^k \leq 1$ e $d_i^k \geq 0$. Caso todos os d_i^k forem iguais para um dado i, então $\dfrac{d_i^k}{D_i} = \dfrac{1}{n}$ e $e(d_i)$ assume valor máximo, isto é, e_{max}=Ln(m). Ao se fixar $\alpha = \dfrac{1}{e_{max}}$, determina-se $0 \leq e\left(d_i\right) \leq 1$ para todos os d_i´s. Essa normalização é necessária para efeito comparativo. A entropia total de D é definida por: $E = \sum_{i=1}^{n} e\left(d_i\right)$.

Há duas observações a serem feitas, a primeira é a de que quanto maior for $e(d_i)$, menor é a informação transmitida pelo i-*ésimo* atributo e a segunda é o caso $e(d_i)=e_{max}$=Ln(m), então o i-*ésimo* atributo não transmite informação e pode ser removido da análise decisória. Devido ao peso $\tilde{\lambda}_i$ ser inversamente relacionado a $e(d_i)$, usa-se $1-e(d_i)$ ao invés de $e(d_i)$ e normaliza-se para assegurar que $0 \leq \tilde{\lambda}_i \leq 1$ e $\sum_{i=1}^{n} \tilde{\lambda}_i = 1$.

Assim: $\tilde{\lambda}_i = \frac{1}{n-E}\left[1 - e(d_i)\right] = \frac{\left[1 - e(d_i)\right]}{n-E}$.

Qualquer mudança dinâmica em X ou D pode afastar a decisão do ponto "ideal". Isso, nesse caso, pode introduzir mudanças nas d_i´s e que causam, correspondentemente, mudanças nas intensidades de contraste relativas.

Mudanças irão refletir um novo conjunto de $\tilde{\lambda}_i$´s, ou seja, a remoção ou adição de uma alternativa pode incrementar a intensidade de contraste e isso produz informação decisória adicional. O oposto também pode ocorrer. A riqueza informacional pode ser diminuída nestes casos. Efeitos similares podem ser removidos ou incluídos.

A menor divergência nos escores de d_i^k farão menores as diferenças entre $\tilde{\lambda}_i$, tornando o i-*ésimo* atributo menos importante. Casos os escores dos atributos sejam iguais, então $\tilde{\lambda}_i = 0$.

Ambos os pesos: w_i e $\tilde{\lambda}_i$, são determinantes na importância de modo paralelo. Se w_i=0 então todo $\tilde{\lambda}_i$=1, o que não justifica fazer o i-*ésimo* atributo importante. Se $\tilde{\lambda}_i$=0, então todo atributo com w_i=1 se torna irrelevante para o tomador de decisão.

Uma maneira (hipótese possível) para atribuir importância lado a lado, pode ser formulado por $\lambda_i = \tilde{\lambda}_i w_i$, ou após a normalização: $\lambda_i = \frac{\tilde{\lambda}_i w_i}{\sum_{i=1}^{n} \tilde{\lambda}_i w_i}$.

4. UMA APLICAÇÃO DO MÉTODO

Em novembro de 2008, a região do Vale do Itajaí foi assolada por fortes chuvas. O aumento anormal do volume de precipitação pluviométrica começou a ser sentido a partir de agosto. Devido a fatores geográficos e climáticos, de tempos em tempos as catástrofes se repetem.

Os fatores geográficos decorrem do fato do Vale do Itajaí, nome em homenagem ao rio que corta a região, se distribuir no sentido leste-oeste, sendo que a jusante do rio encontra-se a leste onde deságua no Oceano Atlântico.

Muitas foram as cidades atingidas, muitas foram as perdas humanas e econômicas. O total de vítimas superou uma centena e os danos materiais ultrapassaram três bilhões de dólares. O encontro das massas frias vindas do sul e as correntes da Amazônia que circulam em sentido anti-horário sobre a região ficaram retidas durante quase quatro meses, fazendo aumentar, dia a dia, os riscos de enchentes e deslizamentos.

O problema, que foi solucionado, veio a *posteriori* com a aquisição da área de baixo risco (HEIN, 2009), para a construção das 624 moradias. Contudo, os projetos de análise dos terrenos de baixo risco e do material a ser utilizado na construção correram em simultâneo. A ferramenta de apoio à decisão teve o trabalho de verificar junto aos órgãos de meteorologia a existência de dados sobre as chuvas que ocorrem na região.

Para este problema proposto foram definidos dois critérios. O primeiro considera as probabilidades de não haver desabamentos, um para cada tipo de chuva, podendo ser assim estendido e entendido como três subcritérios e, o segundo critério, considera o custo por metro quadrado de cada material de construção. Os materiais são as alternativas. Assim, o problema se configura como sendo multicriterial com quatro alternativas e quatro critérios. Conhecidos os pesos atribuídos pela equipe de construção a cada critério tem-se configurado um problema, tipicamente se ajustando a problemas decisórios multicriteriais.

Somaram-se a este cenário as enxurradas entre os dias 22 e 23 de novembro. Somente nestes dois dias o volume pluviométrico foi de 494,4mm/m^2, e o mês finalizou com 1001,7mm/m^2. Obviamente, tratou-se de pontos fora da série temporal (*outliers*). A ocorrência do desastre vai desde motivações geradas pelo fenômeno climático *El Niño*, até resultados do aquecimento global.

Devido a sua posição e dimensão, a cidade mais atingida em termos absolutos foi Blumenau. A cidade com cerca de 300 mil habitantes é cortada pelo Rio Itajaí Açu, ou seja, toda a precipitação (descontados infiltração e evaporação) do vale obrigatoriamente passa pelo centro da cidade.

O número de desabrigados foi elevado, fazendo com que a municipalidade fosse obrigada a destinar áreas de baixo risco para construção de conjuntos habitacionais. A escolha da área livre de risco foi comandada por um grupo de técnicos que envolvia desde pessoal do corpo financeiro (PMB) e corpo técnico (engenheiros, geólogos e meteorologistas).

Em um dos projetos em andamento, verificou-se a possibilidade da construção de 624 moradias, distribuídos em 78 edifícios de três andares (sem elevador), com quatro apartamentos por andar, sendo que o térreo serve de estacionamento. A construção foi projetada em alvenaria, com portas e janelas em alumínio.

A situação foi pensada levando em consideração os tipos de chuvas que a região recebe, a saber, a convectiva, frontal e orográfica. Cada uma possui características que exigem do material usado diferentes resistências. O uso de algum deles pode ser mensurado pela probabilidade de não desabamento.

Basicamente, há quatro opções regionais, ou seja, quatro tipos de materiais: tijolo simples (M_1), tijolo de seis furos (M_2), tijolo de oito furos (M_3) e blocos de cimento (M_4). O de modelo simples caracteriza-se por ser maciço, possuir alta resistência, pequeno volume, entretanto seu preço é alto. O de seis furos é de tamanho médio, sua resistência é baixa devido a sua estabilidade na construção. O mesmo ocorre com o de oito furos, porém os dois modelos são mais baratos. Os blocos de cimento levam a vantagem por serem mais leves e volumosos, contudo seus vazados não podem ser preenchidos com concreto em um projeto como esse, pois aumentaria em muito os custos e o peso da construção torna-se elevado. Enfim, cada material possui suas vantagens e suas desvantagens, sejam elas técnicas e/ou financeiras.

Os graus de proteção (%) e os preços dos materiais instalados são fornecidos no quadro-1. Estes foram obtidos durante a pesquisa, bem como os pesos dados a cada um deles, que foram estipulados por um conjunto de técnicos da defesa civil e engenheiros responsáveis pela obra. Naturalmente, o peso dado ao custo por m^2 foi o maior entre os demais.

Quadro-1: Dados técnicos dos materiais e pesos associados (tipos de chuvas e preços).

Critérios/ Alternativas	Convectiva $Pr[C_1]$	Frontal $Pr[C_2]$	Orográfica $Pr[C_3]$	Preço (R$/m^2)
M_1	25	45	25	18,90
M_2	30	40	30	16,70
M_3	35	45	30	15,60
M_4	30	25	20	17,80
Peso	2	3	1	4

Fonte: dados da pesquisa

O quadro-1 pode ser entendido como sendo uma matriz de decisão. Nela, costumeiramente, têm-se as alternativas nas linhas e os estados naturais nas colunas. Os quatro materiais citados: tijolo simples (M_1), tijolo de 4 furos (M_2), tijolo de 6 furos (M_3) e bloco de cimento (M_4), devem ser entendidos como sendo o conjunto de alternativas: $A=\{M_1, M_2, M_3, M_4\}$. O conjunto de estados naturais é formado pelos critérios de resistência de cada material à chuva e seu preço por m^2. Designando a chuva convectiva por C, a frontal por F, a orográfica por O e o preço por P, estabelece-se o conjunto de estados naturais: $S=\{C, F, O, P\}$.

Para que nenhum dos critérios prevaleça sobre os demais e para evitar problemas de escala, como é o caso específico do problema, ou seja, probabilidades (%) e preço (R$/m^2) procedeu-se a normalização dos dados. Os valores nas colunas foram divididos pelo maior valor na coluna, ou seja, $d_i^k = \dfrac{x_i^k}{x_i^*}$. Contudo, o problema que se apresenta é de minimização de riscos e custos, deve-se inverter a identidade de modo que $d_i^k = \dfrac{x_i^*}{x_i^k}$, obtendo os valores constados no quadro-2.

Quadro-2: Entropia dos dados técnicos

Critérios/ Alternativas	Convectiva	Frontal	Orográfica	Preço
M_1	1	0,556	0,800	0,825
M_2	0,833	0,625	0,667	0,934
M_3	0,714	0,556	0,667	1
M_4	0,833	1	1	0,876
Soma	3,380	2,737	3,134	3,635

Fonte: dados da pesquisa

Do quadro-2 pode-se calcular que: $\begin{cases} e_{max} = Ln(m) - Ln(4) = 1{,}386 \\ \alpha = \dfrac{1}{e_{max}} = \dfrac{1}{1{,}386} = 0{,}721 \end{cases}$

Dividindo todos os elementos das colunas pela sua soma, ou seja, $\dfrac{d_i^k}{D_i}$ chega-se ao quadro-3:

Quadro-3: Dados técnicos normalizados em relação a entropia.

Critérios/ Alternativas	Convectiva	Frontal	Orográfica	Preço
M_1	0,296	0,203	0,255	0,227
M_2	0,246	0,228	0,213	0,257
M_3	0,212	0,203	0,213	0,275
M_4	0,246	0,366	0,319	0,241
Soma	1	1	1	1

Fonte: dados da pesquisa

Lembrando que $e(d_i) = -\alpha \sum_{k=1}^{m} \dfrac{d_i^k}{D_i} Ln\left(\dfrac{d_i^k}{D_i}\right)$, as entropias parciais resultam nos seguintes valores: $e(d_1)$=0,994 $e(d_2)$=0,998 $e(d_3)$=0,989 e, $e(d_4)$=0,998 A soma das entropias parciais resulta na entropia total do sistema, é dada por E= 0,994+0,998+0,989 = 3,979.

Os pesos da importância dos atributos são definidos por $\tilde{\lambda}_i = \dfrac{1}{n - E}\left[1 - e(d_i)\right]$, logo:

$$\tilde{\lambda}_1 = \frac{1}{n - E}\left[1 - e(d_i)\right] = \frac{1}{4 - 3{,}913}\left[1 - 0{,}999\right] = 0{,}286$$

$$\tilde{\lambda}_2 = 0{,}095$$

$$\tilde{\lambda}_3 = 0{,}523$$

$$\tilde{\lambda}_4 = 0{,}095$$

Sabe-se que os pesos iniciais para cada Estado Natural (materiais de construção) foram definidos como valendo w_1=0,2, w_2=0,3, w_3=0,1 e w_4=0,4. Então, lembrando que: $\lambda_i = \frac{\tilde{\lambda}_i w_i}{\sum_{i=1}^{n} \tilde{\lambda}_i w_i}$, pode-se calcular:

$$\lambda_1 = \frac{\tilde{\lambda}_i w_i}{\sum_{i=1}^{n} \tilde{\lambda}_i w_i} = \frac{0{,}286 \times 0{,}2}{0{,}286 \times 0{,}2 + 0{,}095 \times 0{,}3 + 0{,}523 \times 0{,}1 + 0{,}095 \times 0{,}4} = 0{,}325$$

$\lambda_2 = 0{,}162$

$\lambda_3 = 0{,}297$

$\lambda_4 = 0{,}216$

Lembrando que, devido ao peso $\tilde{\lambda}_i$ ser inversamente relacionado a e(d_i), usa-se 1-e(d_i) ao invés de e(d_i) e normaliza-se para assegurar que $0 \le \tilde{\lambda}_i \le 1$ e $\sum_{i=1}^{n} \tilde{\lambda}_i = 1$, calculando as diferenças (d^*-d_i) obtém-se o quadro-4.

Quadro-4: Distância entrópica ao cenário limite.

Critérios/ Alternativas	Convectiva	Frontal	Orográfica	Preço
M_1	0	0,434	0,200	0,125
M_2	0,167	0,375	0,333	0,066
M_3	0,286	0,434	0,333	0
M_4	0,167	0	0	0,124

Fonte: dados da pesquisa

Multiplicando os desvios $\lambda_i(d^*$-$d_i)$, tem-se o quadro-6, que pondera os novos pesos dos atributos com as distâncias entrópicas. Nele, cada alternativa é avaliada segundo sua pontuação (média ponderada) ao cenário objetivado, ou seja, maior segurança e menor custo (simultaneamente). Determina-se o maior valor para cada alternativa, sendo que a alternativa que se elege é a que mais se aproxima ao cenário desejado (mínimo). O somatório dos dados ($\sum$) e dos quadrados dos mesmos ($\Sigma\lambda^2(d^*$-$d_i)^2$) serve de confirmação da alternativa a ser eleita e também como critério técnico para ordenação de alternativas.

Quadro-6: Maximin dos valores finais ponderados.

Critérios/ Alternativas	Convectiva	Frontal	Orográfica	Preço	Max	Σ	$\Sigma\lambda^2(d^*$-$d_i)^2$
M_1	0	0,070	0,059	0,027	0,070	0,156	0,053
M_2	0,054	0,061	0,099	0,014	0,099	0,228	0,044
M_3	0,093	0,070	0,099	0	0,099	0,262	0,027
M_4	0,054	0	0	0,027	**0,054**	**0,081**	**0,004**

Fonte: dados da pesquisa

Como os valores associados à alternativa-4 são os menores, neste caso 0,054, esta será a alternativa eleita, pois é a solução mais próxima dentre as usadas como referência no Quadro-2. Pode-se observar um *ranking* de alternativas, no caso: alternativa M_4 com 0,054 em primeiro lugar, alternativa M_1 com 0,070 em segundo lugar, e M_2 e M_3 com 0,099 aparecem empatados tecnicamente. Com isso, considerando o ranking obtido, deve-se escolher blocos de concreto para a construção do conjunto habitacional.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A tragédia pela qual passaram várias cidades do Médio Vale do Itajaí ficará na história. Muitos habitantes perderam suas casas e seus bens adquiridos com muito esforço. Muitas vítimas e prejuízos incalculáveis.

Visto que o fenômeno figura como histórico, resta aos responsáveis pela reconstrução dos lares afetados identificarem áreas que possam ser classificadas como de baixo risco e que as construções figurem como sendo mais seguras do que as anteriores. Para isso, a utilização de materiais de construção seguros às intempéries climáticas da qual a região é sujeitada (no limite).

Este trabalho objetivou apontar para uma classificação de materiais a serem usados na construção de um conjunto habitacional de 620 unidades, que levou em consideração os riscos de desabamentos de paredes no uso de quatro materiais propostos (tijolo comum, tijolo de sés furos, tijolo de oito furos e blocos de cimento). Também foram avaliados tipos de chuva ocorrentes na região: convectiva, frontal e orográfica e os respectivos custos (por metro quadrado) no uso de cada material mencionado.

Trabalhando com o conceito de entropia, foi realizada a análise usando pesos determinados por um grupo de participantes da reconstrução blumenauense. O resultado à questão da pesquisa aponta para o uso de blocos de concreto. Em segundo lugar ficaram os tijolos simples (maciços). Com a avaliação da entropia presente nos dados houve uma readequação dos pesos inicialmente dados a favor da segurança, ou seja, mesmo que o peso maior havia sido atribuído ao custo por m^2 de material de construção, o modelo designou um material resistente e de custo moderado. Como segunda opção o mais caro entre os listados inicialmente, contudo o mais bem avaliado tecnicamente.

---

1. Farmer, J.D., Shubik, M. e Smith, E. Economics: the text physical science? *arXiv:physics/0506086* v1, 2005.
2. Stanley, H.E., Amaral, L.A.N. e Canning, D., Gopikrishman, P., Lee, Y. e Liu, Y. Economics: can physiscs contribute to the science of economics? *Physica* A, 269, p.156-169, 1996.
3. Ayres, R.U. (1998), Eco-thermodynamics: economics and the second law. *Ecological Economics*, 26, p.189-209.
4. Golan, A. (2002).Information and entropy econometrics Editor´s View. *Journal of Econometrics*, 107, p.1-15.
5. Allegrini, P., Guintolli, M., Grigollini, P. e West, B.J. From knowledge, khowability and the search for objective radomness to a new vision of complexity. *arXiv:cond-mat/0310646* v.1, 2003.
6. Bais, F.A. e Farmer, J.D. The physisics informationtheory on in the light of thermodynamics, statistical mechanics and nonlinear dynamics. *Draft*, 2005.
7. Bentes, s. e Manezes, R. e Mendes, D. Entropic measures in nonlinear dynamics. In: Salgueiro, M.F.; Mendes, D. Martins, L.F. (org.). *Temas em métodos quantitativos*. V.6. Lisboa: Sílabo, 2009.
8. Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communications. *Bell Systems Tech*., 27, p. 379-423, 623-656.
9. Zeleny, M. *Multiple Criteria Decision Making*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1982.
10. Hein, Nelson e KROENKE, Adriana. (2009). Análise Hierárquica na Avaliação de Áreas para Construção de Conjuntos Habitacionais. In: *ERPOsul*, 2009, Porto Alegre. Anais do ERPOsul.
11. Prigogine, I. *Introduction to thermodynamics of irreversible process*. 3a ed., New York: University of Brussels Interscience Publishers, 1967.
12. Ebeling, W. (2000). On the relation between various entropy concepts and the valoric interpretation. *Psysica A*, 182, p. 429-439.
13. Hartley, R.V.L. (1928). Transmission of information. In: *Bell Systems Technical Journal*, 7 (3), p. 535-6.563.
14. Khinchin, A.J. *Mathematical foundations of information theory*. New York: Dover Publications, 1957.
15. Dionisio A., Menezes R.,e Mendes D. A. O princípio da entropia máxima. *Temas em métodos quantitativos*. V.6. Lisboa: Sílabo, 2009.
16. Maasoumi, E. e Racine, J. (2002). Entropy and predictability of stocks market returns. In: *Journal of Econometrics*, 107, p. 291-312.