

ILÍDIO ENC. JESUS NETO MESTRE

A REDE DE TRANSPORTES INTER-URBANOS DE PASSAGEIROS
E A SUA ADEQUAÇÃO AO MODELO DE ORDENAMENTO DA
REGIÃO(*)

TOMO A

MESTRADO EM CIÊNCIAS ECONÓMICAS E EMPRESARIAIS

UNIDADE DE ECONOMIA
E ADMINISTRAÇÃO
DA
UNIVERSIDADE
DO ALGARVE

INSTITUTO SUPERIOR
DE ECONOMIA E GESTÃO
DA
UNIVERSIDADE TÉCNICA
DE LISBOA

ORIENTADOR: PROF. DR. ADRIANO PIMPÃO

FARO, SETEMBRO DE 1996



ILÍDIO ENC. JESUS NETO MESTRE

A REDE DE TRANSPORTES INTER-URBANOS DE PASSAGEIROS
E A SUA ADEQUAÇÃO AO MODELO DE ORDENAMENTO DA
REGIÃO

MESTRADO EM CIÊNCIAS ECONÓMICAS E EMPRESARIAIS

UNIDADE DE ECONOMIA
E ADMINISTRAÇÃO
DA
UNIVERSIDADE
DO ALGARVE

INSTITUTO SUPERIOR
DE ECONOMIA E GESTÃO
DA
UNIVERSIDADE TÉCNICA
DE LISBOA

Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Ciências
Económicas e Empresariais

Trabalho orientado pelo Professor Doutor Adriano Pimpão

FARO, SETEMBRO DE 1996

UNIVERSIDADE DO ALGARVE	
SERVIÇO DE DOCUMENTAÇÃO	
17 108 100	31923/1
E 56	
H 55 x R 01	

15/11

Agradecimentos

À Fátima Almeida e à Maria João pelo excelente trabalho de apoio bibliotecário e de localização da bibliografia;

Ao Dr. Pinheiro Henriques, ao Luis M. Pires e à Cristina Laginha pelas sugestões que deram;

Ao Senhor Professor Adriano Pimpão pelo tema que me propôs;

À minha esposa e aos meus filhos pela paciência que tiveram.

RESUMO

O trabalho ora apresentado sob o título “ *A rede de transportes inter-urbanos de passageiros e a sua adequação ao modelo de ordenamento da região*” compõe-se de duas partes distintas.

A **Parte A**, teórica, abrange seis capítulos. Pretende ser um resumo amplo, mas não exaustivo, dos contributos de grande número de autores e ou investigadores para o conhecimento das relações que regem a tripla dependência entre a localização das funções residenciais, a localização das actividades económicas e o sistema de transportes (de passageiros); e também o comportamento dos utentes face àquele dependência.

Procurou-se apresentar diferentes abordagens, do conceito de acessibilidade, transcrevendo-se as correspondentes relações matemáticas associadas (cap.2); incluindo *uma medida geométrica* da acessibilidade global de uma região (cap.3).

Pela sua importância, facilidade de aplicação e domínio de utilização merecem destaque os métodos baseados no modelo gravitacional. Descrevem-se as diferentes fases de aplicação do modelo gravitacional e caracterizam-se os resultados obtidos em cada uma, desde a calibragem até à distribuição modal das deslocações (cap. 4).

Abordam-se os modelos de escolha modal e passa-se em revisão a teoria(s) que os suporta. Apresentam-se as críticas mais comuns, com referência aos pontos fortes e fracos das diferentes metodologias, sejam as ditas clássicas como as referidas por modernas (cap.5).

Merece igualmente destaque o tratamento económico do conceito de acessibilidade, que no Cap.6 procuramos resumir sob o título de Teoria Económica da Acessibilidade.

A segunda parte do trabalho (Parte B) trata exclusivamente da aplicação do modelo gravitacional à avaliação do sistema de transporte de passageiros da

“sub-região” formada pelos concelhos de Olhão, Faro, S. Brás de Alportel e Loulé, com referência ao 4º trimestre de 1994.

A população base é de 142000 habitantes, dos quais 39000 residem em lugares com menos de 500 habitantes (314), gerando 72000 deslocações pendulares diárias, dentro de uma área de 1239 Km².

Os dados de input são constituídos pelas deslocações pendulares, entre todas as sedes de freguesia, dos activos residentes na área do estudo e ocupados no trimestre de referência.

Palavras Chave: Transportes, Acessibilidade, Modelos, Ordenamento.

ABSTRACT

The attached work present under the title "*A rede de transportes inter-urbanos de passageiros e a sua adequação ao modelo de ordenamento da região*", is divided in two distinct sections.

The first section, part A, exclusively theoretical, comprises six chapters. It expects to be a large resume, but not exhaustive taken from the contribution of a large number of authors and /or investigators who for the enlargement of the knowledge on the relations of the accessibility between homes, business activities and transport systems, and also the passenger's reactions to that dependence.

We endeavoured to approach different subjects of accessibility's concept, by transcribing its mathematic correspondences thereof (chap.2), also including a geometrical measure of global accessibility for one region (chap. 3).

By its importance, application and utilization facilities, must be considered the methods based on the gravity model.

It is described herein the different phases of gravity model's applications and the results obtained are duly shown, as from the calibration until the modal distribution of trips (chap. 4). It's also approached the modal choose as well as the theoric by which they are supported (chap. 5). It is shown the most commum appreciations relating to strengths and weeknesses of the methodologies applied, either the classics or the modern ones.

It is also deserved the importance of the economic concept of accessibility, which is resumed under the title of "Economic Theory of Accessibility" (chap.6).

The second section (Parte B) is subjected exclusively to the gravity model application on the evaluation of passengers transport systems for the *sub-region* compound by the councils of Olhão, Faro, São Brás de Alportel and Loulé.

The population based on, is about 142000 inhabitants, which 39000 of them lives in localities with less than 500 inhabitants; producing 72000 regular trips, dayly, within a area of 1239 Km².

Data Input, related to 4th trimester of 1994, are based on the regular trips between all the Parishes made by the workers living in those areas.

Key Words: Transports, Accessibility, Models, Planning.

INDICE

Parte A

Capítulo 1.	Pag.:
Introdução	1
Capítulo 2.	
2.1 Formalização da acessibilidade	2
2.1.1 Acessibilidade de Hansen	2
2.1.2 As Isocronas	2
2.1.3 Acessibilidade Gravitacional	
2.2 Formulações de $f(d_{ij})$	
2.2.1 Função Hiperbólica	9
2.2.2 Função Exponencial negativa	10
2.2.3 Função Gaussiana	10
2.3 Utilização da acessibilidade para estimar a repartição modal da distribuição das deslocações.	11
2.4 O índice de acessibilidade como critério de avaliação de um sistema de transporte de passageiros	13
Capítulo 3	
3.1 Medidas de acessibilidade em áreas metropolitanas	16
3.1.1 Acessibilidade relativa e acessibilidade global	16
3.2 Um índice de acessibilidade global: uma extensão	17
3.2.1 Sensibilidade do índice global de acessibilidade ao número de localidades	18
3.2.1.1. Modelo linear	18
3.2.1.2. Modelo bidimensional	20
Capítulo 4. Distribuição espacial das deslocações	
4.1 Introdução	22
4.2 Definição da matriz de deslocações	22
4.3 Análise convencional de uma região	23
4.4 Preparação dos dados de input	24
4.4.1 A matriz base das deslocações anuais	22
4.4.2 Dados sobre a rede de transportes	25
4.5 Selecção do modelo TDM	25
4.5.1 Modelo de Fratar	25

4.5.2 O modelo das oportunidades	26
4.5.3 O modelo Gravitacional (MG)	27
4.6 Calibragem do modelo (Factores de atrito)	29
4.6.1 Factor de atrito representado por F. descontínua	31
4.7 Validação do modelo	33
4.8 Outros aspectos importantes	
4.8.1 Conversão da matriz PA numa matriz OD	33
4.8.2 Exemplo numérico	35
4.9 Métodos expeditos e tópicos especiais	
4.9.1 Análise por métodos expeditos	36
4.10 Sumário das características dos modelos	37
4.10.1 Modelo de Fratar	38
4.10.2 modelo das oportunidades	38
4.10.3 modelo gravitacional	38

Capítulo 5. Distribuição modal

5.1 A escolha do modo de transporte	39
5.1.1 Desenvolvimento e classificação dos modelos de escolha modal	39
5.2 Os modelos da primeira geração	40
5.3 os modelos da segunda geração	44
5.3.1 O método do IAURP	46
5.4 O Valor do tempo e do conforto	49
5.5 Os modelos da terceira geração	53
5.5.1 A teoria da utilidade na base da escolha modal	52
5.5.2 Modelos de base estatística	56
5.6 A escolha do itinerário	58

Capítulo 6. Teoria Económica da acessibilidade

6.1 Aspectos fundamentais	61
6.2 Bases da teoria da acessibilidade urbana	62
6.3 Avaliação do serviço prestado ao utente:	
O acesso aos locais de trabalho	67
6.3.1 Cálculo da Utilidade	67
6.4 Lei da probabilidade da Utilidade bruta associada a uma deslocação	68
6.5 Um indicador económico global	70
6.6 Aplicações à previsão do tráfego, ao urbanismo e aos sistemas de transportes	71

6.6.1 Geração de tráfego	71
6.6.2 Distribuição de tráfego	72
6.6.3 Análise de tendências de urbanização	72
6.7 A lei de probabilidade da utilidade bruta R associada a um destino	73
6.8 Alguns resultados obtidos a partir das leis de probabilidade	77
6.9 Verificação do modelo gravitacional de distribuição do tráfego	79
6.9.1 Restrições	80
6.10 Determinação de X_0	80
6.11 Cálculo e representação dos indicadores de acessibilidade	82
6.12 Cálculo da utilidade líquida final	85

Parte B

... /...

Bibliografia

Parte A

Capítulo 1.

INTRODUÇÃO

A **acessibilidade** desempenha um papel importante nas teorias do desenvolvimento urbano e regional, sendo-lhe atribuído o estatuto de variável fundamental na determinação das rendas fundiárias, nas densidades de ocupação e tipos de utilização dos solos.

Diversos autores e investigadores têm centrado esforços no sentido de se compreender a influência da acessibilidade na geração das deslocções no interior das áreas urbanas, entre os aglomerados de uma mesma zona geográfica e também entre os principais aglomerados de zonas geográficas contíguas, ie, na questão de conhecer o modo como as alterações da acessibilidade associadas aos investimentos em infra-estruturas de transportes afectam a procura.

Entretanto, face aos consensos em torno das **variadas definições**, instituições e investigadores de todo o mundo têm produzido denso trabalho na procura de métodos capazes de todos os factores que permitam obter a sua quantificação de forma objectiva .

*Uma das definições que mais consenso obtém, define **acessibilidade** como uma medida local da facilidade de aceder, a partir de um ponto do espaço, a um ou vários pontos do espaço geográfico, por uma motivação ligada a uma dada necessidade, utilizando um determinado meio de transporte (ou um conjunto de meios). A acessibilidade assim definida assenta num conceito fisico ligado ao espaço geográfico, ao tempo e a um dado sistema de actividade, tendo de ser considerada em termos relativos e em termos absolutos.*

Acessibilidade relativa refere-se à facilidade de acesso entre dois pontos de uma mesma zona, enquanto a **acessibilidade absoluta** se pode definir como a

facilidade de acesso de um dado ponto do espaço ao conjunto de todos os pontos constituintes desse espaço.

O espaço aqui invocado não é euclideo, isto é, as distâncias envolvidas têm necessariamente de estar subordinadas às características orográficas do território. Assim, as distâncias são medidas ao longo do eixo médio da via utilizada no percurso de cada deslocação efectuada por cada um dos diferentes meios de transporte.

Com a noção de distância assim definida, a formulação matemática da acessibilidade impõe duas condições aos limites:

- é máxima à distância nula, e
- é nula a distância infinita.

Qualquer que seja o meio de transporte, a velocidade de deslocamento é fisicamente limitada e, tal como o espaço, o tempo necessário para ligar dois pontos de um qualquer percurso, nunca pode anular-se.

Assim, tempo e distância constituem-se em elementos limitativos da acessibilidade (elementos resistentes).

O sistema de actividades localizando os seus diferentes elementos em distintos pontos do espaço geográfico, determina outros tantos pólos de atracção/geração de deslocações; ie, o sistema de utilização do solo condiciona e caracteriza a natureza das deslocações dos utentes.

Para caracterizar o deslocamento (i-j) é necessário relacioná-lo com o meio de transporte (ou conjunto de) utilizado, bem como com a infra-estrutura de suporte (caminho rural, estrada, caminho de ferro, etc.).

Fácilmente se estabelece a analogia com um condutor eléctrico que opõe uma dada impedância à corrente que o atravessa com uma determinada intensidade,

permitindo-nos conhecer a correspondente admitância: ou seja, estabelece-se a acessibilidade como a medida da mobilidade entre dois pontos do espaço, com padrões de ocupação do solo diferentes, ligados por uma infra-estrutura de transporte caracterizada por uma determinada "resistência" á ligação (por modo de transporte) entre esses dois pontos do espaço.

Um outro elemento integrante da definição introduzida é a medida da acessibilidade.

Medir a acessibilidade implica, por isso, admitir um valor de referência estabelecido, eventualmente, de forma normativa. A heterogeneidade das situações e a multiplicidade de metodologias propostas por diferentes autores e instituições de pesquisa, inviabilizam a normalização de critérios de avaliação, tornando difícil o estabelecimento de padrões de referência local, regional e ou nacional.

As metodologias mais comuns adoptam como medidas da facilidade de deslocação dos residentes de uma dada região o tempo de acesso a uma ou mais localidades centrais (de referência) por cada modo de transporte acessível; um custo generalizado de deslocação função do valor dos tempos parcelares consumidos nas deslocações e do grau de conforto proporcionado pelos modos utilizados; e mais recentemente avaliando a utilidade global que os utentes retiram das deslocações que o sistema¹ lhes proporciona.

¹ O sistema aqui considerado é um conjunto formado por diversos sub-sistemas: o sistema de actividades económicas fornecedor de bens e serviços, o sistema residencial, o sistema de transportes (a rede viária, os transportes públicos, etc.).

Capítulo 2.

2.1 FORMALIZAÇÃO DA ACESSIBILIDADE

A operacionalização do conceito de Acessibilidade tem levado a formalizações matemáticas diversas, suportadas em teorias que vão desde abordagens físico-mecânicas até à análise comportamental.

Das formalizações que têm sido propostas, as mais utilizadas resultam de teorias simples assentes, em regra, em analogias electro-mecânicas [Merlin].

2.1.1 ACESSIBILIDADE DE HANSEN

Uma das medidas frequentemente referidas por alguma literatura especializada é a *acessibilidade de Hansen* [Hansen], definida por

$$A_i = \sum_j \frac{S_j}{d_{ij}^p}, \quad (2-1)$$

onde as variáveis tem o seguinte significado:

A_i : índice de acessibilidade da zona i ,

S_j : totalidade das actividades desenvolvidas na zona j ,

d_{ij} : distância entre i e j

p : constante.

De uma forma geral pode escrever-se²

$$A_i = \sum_j s_j f(d_{ij}) \quad (2-2)$$

sendo $f(d_{ij})$ o valor da *função distância* entre i e j .

A acessibilidade pode medir-se em relação a diversas actividades (acessibilidade ao local de trabalho, acessibilidade aos equipamentos sociais, acessibilidade aos locais de residência, etc.). Pode também referir-se em relação aos diferentes sistemas de transportes, grupos socio-económicos, etc, e referida a diferentes horas do dia.

²- V. Formula geral da acessibilidade gravitacional.

Dividindo-se pelo nº total de actividades desenvolvidas no interior de uma dada região (a região objecto do estudo), o quociente obtido designa-se por *acessibilidade relativa da região* (índice normalizado da acessibilidade):

$$A_i = \frac{\sum_j S_j f(d_{ij})}{\sum_j S_j} \quad (2-3)$$

Logaritmizando obtém-se o índice de acessibilidade logarítmica $A'_i = \log A_i$.

Sintetizando, pode referir-se que o índice de acessibilidade fornece uma medida da localização de uma dada zona/região relativamente a um leque de actividades de referência e/ou ao sistema de transportes que a serve.

O índice de acessibilidade é, assim, uma medida do número de destinos disponíveis ao alcance da população da zona em estudo.

[Dalvi] utiliza uma expressão do mesmo tipo da de Hansen, para definir o índice de acessibilidade A_i

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_j e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (2-4)$$

com o seguinte significado atribuído às variáveis:

A_i = Acessibilidade da zona i às oportunidades apresentadas pelas zonas $j=1\dots n$

W_j = medida da atractividade da zona j

c_{ij} = custo de deslocação de i para j

A partir de A_i assim definido obtém-se a acessibilidade de uma zona como sendo uma função do custo generalizado de deslocação para todas as restantes zonas da região em estudo, e da atractividade dessas zonas.

A acessibilidade tem influência na capacidade geradora de deslocações, tanto da parte de zonas geradoras como de zonas de atracção.

É de constatação imediata que a facilidade de deslocação é maior para os indivíduos residentes nas proximidades dos equipamentos (comércios, bancos, escolas, etc.) do que para os residentes em locais afastados. Também é de constatação fácil que a melhoria da acessibilidade para as deslocações a pé no interior de zonas urbanas, traduz normalmente uma redução do índice de acessibilidade para deslocações motorizadas (T.P., automóvel privado) nos espaços geográficos internos a essas zonas; pelo que o índice de acessibilidade se constitui em variável importante na avaliação do potencial de geração de deslocações entre zonas de emissão e de recepção.

2.1.2 AS ISÓCRONAS

Os indicadores para o traçado das isocronas avaliam-se tendo em conta todas as oportunidades de deslocação no interior de uma dada superfície limitada por uma isocrona traçada a partir do centróide da zona em estudo.

Podem calcular-se para um modo particular de transporte a partir do respectivo tempo de utilização ponderado pelo tempo de utilização de todos os modos disponíveis nessa zona, ou pelo tempo referente ao melhor modo.

Considerando todas as oportunidades de deslocação contabilizadas entre duas curvas afastadas de um dado tempo, pode-se elaborar para cada zona, considerada no seu centróide, o seu histograma de oportunidades.

Os intervalos de tempo serão limitados superiormente por um valor α "*cut-off point*", tradução prática do *tempo máximo de deslocação a partir do qual o número de oportunidades ainda acessíveis pode ser considerado nulo*.

Segundo [Ingram] citado por [Bonnafus], α pode definir-se de forma arbitrária dentro de uma dada política de transporte, ou extraído a partir da monitorização das deslocações observadas no interior da zona geográfica em estudo.

O tempo médio necessário (ponderado) para atingir uma dada oportunidade a partir da zona i , é dado por

$$t_{im} = \sum_{k=0}^{k=N} O_k (2k + 1) \frac{T}{2} \quad (2-5)$$

sendo

$N = \alpha / T$, onde T representa o intervalo de tempo entre duas isocronas e;

O_k = percentagem de oportunidades de deslocação no intervalo T .

As insuficiências desta representação ligam-se à necessidade de traçar as isocronas para cada centróide, e à dificuldade de explicitação das diferentes parcelas do tempo total de deslocação. É limitada a sua utilização prática.

2.1.3 ACESSIBILIDADE GRAVITACIONAL

Este indicador obtém-se a partir da analogia com a força de atracção entre dois corpos no espaço, regulada pelas leis da gravidade de Newton. É uma analogia corrente no domínio da Economia dos Transportes, onde diversos modelos de distribuição de tráfego foram desenvolvidos em torno deste princípio.

No que se refere à acessibilidade estipula-se que a repartição das deslocações entre zonas do espaço é determinada pelo potencial de atracção de cada zona, concentrado no seu centróide, e pela impedância da ligação entre cada par de centróides.

O indicador de acessibilidade procura quantificar a intensidade da ligação entre o elemento gerador da deslocação, caracterizado pelo número de oportunidades oferecidas por uma dada zona j que se pretende atingir a partir de outra zona i , e a impedância dessa ligação os seus elementos resistentes (tempo, distância).

A representação matemática é do tipo

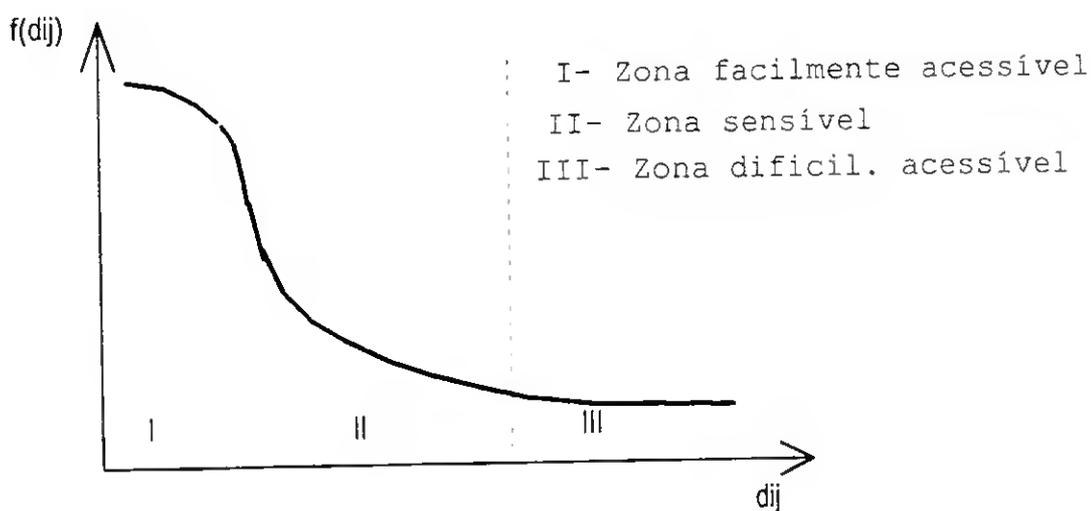
$$A_{ij} = O_j f(d_{ij}) \quad (2-6)$$

onde

O_j = número de oportunidades de deslocação oferecidas pela zona j;

d_{ij} = distância entre as zonas i e j.

A função $f(d_{ij})$ é monótona decrescente, representando uma transformação não linear do tempo e do espaço num sistema de actividades de uma dada população [Milles].



Vários autores referem relações expressas por curvas do tipo da representada, onde se evidenciam claramente três zonas de comportamento :

I - Numa região imediatamente circundante ao núcleo urbano, representada pela primeira parte da curva, a acessibilidade é pouco

sensível à distância ao centro. São o número e as características das oportunidades oferecidas, as variáveis mais influentes.

II - Esta zona caracteriza-se por uma elevada sensibilidade à distância ao centro urbano. A capacidade de atracção das oportunidades oferecidas na vizinhança do centróide decresce muito rapidamente à medida que nos afastamos do centro.

III - A acessibilidade ao centro já não determina as deslocações de utilizadores oriundos das zonas afastadas. Apenas o número e qualidade das oportunidades oferecidas ao utilizador determinam as suas deslocações.

2.2 FORMULAÇÕES DE $f(d_{ij})^3$

2.2.1 Função hiperbólica.

O Institut de Recherche des Transports utiliza a função:

$$f(d_{ij}) = \frac{1}{d_{ij}^{\beta}} \quad (2-7)$$

Esta expressão conduz a sobrestimar a acessibilidade em zonas vizinhas do centro, e não evidencia o decréscimo suave verificado experimentalmente na zona I. Assim, na medida em que d_{ij} representa uma distância generalizada, i.e., dependente do afastamento físico, de barreiras psicológicas, da disponibilidade de transporte, do tempo de percurso e do custo global, se $T_{ij} \rightarrow 0$:
 $f(d_{ij}) \rightarrow \infty$ Para contornar a questão estabelece-se, de forma arbitrária o domínio da função.

2.2.2 Função exponencial negativa

$$f(d_{ij}) = Ke^{-\alpha d_{ij}} \quad (2-8)$$

onde

$k = \max f(d_{ij})$ na zona que contém o centróide i , i.e.,

$$ke^{-\alpha d_{ij}} \xrightarrow{d_{ij} \rightarrow 0} k$$

2.2.3 Função gaussiana

$$f(d_{ij}) = ke^{-\frac{d_{ij}^2}{V}} \quad (2-9)$$

Esta expressão foi proposta por [INGRAM] na sequência das insuficiências reveladas pelas anteriores formulações.

V é uma constante que pretende representar todas as particularidades da zona em estudo.

$$K = \max f(d_{ij}) \therefore f(d_{ij}) \rightarrow K, d_{ij} \rightarrow 0.$$

As acessibilidades, definidas através de alguma das formulações apresentadas, devem ser calculadas por cada tipo de motivação/oportunidade com que se confrontam as populações/utentes.

O número de oportunidades aqui consideradas avalia-se a partir de diversos elementos de carácter estatístico disponíveis para cada zona/região (população residente, nº de alojamentos, nº de postos de trabalho oferecidos, nº de lugares

³- V. também "Distribuição Espacial das Deslocações" sub-título "Calibragem do Modelo"

no sistema escolar, nº de deslocações pendulares por grupo de motivações, repartição modal, etc.).

O cálculo dos valores de A_{ij} , permite obter um valor global A_i para cada origem (zona i):

$$A_i = \sum_j \frac{O_j f(d_{ij})}{n} \quad (2-10)$$

A ponderação de cada zona i por um coeficiente p_i proporcional ao seu peso relativo, calculado por cada grupo de motivações, permite definir a acessibilidade média de cada zona dentro da região em estudo:

$$\bar{A} = \frac{\sum_i p_i A_i}{\sum_i p_i} \quad (2-11)$$

No caso particular da acessibilidade ao local de trabalho, referida como exemplo, em que a deslocação genérica d_{ij} representa o trajecto entre o domicílio e o local de trabalho, é razoável definir p_i em função da população activa da zona i .

2.3 UTILIZAÇÃO DA ACESSIBILIDADE PARA ESTIMAR A REPARTIÇÃO MODAL DA DISTRIBUIÇÃO DAS DESLOCAÇÕES.

Utiliza-se o modelo gravitacional, em que

$$V_{ij} = \frac{s_j f(d_{ij})}{\sum_j s_j f(d_{ij})} \times P_i = \frac{A_{ij}}{A_i} \times P_i \quad (2-12)$$

com V_{ij} : deslocações entre a zona i e a zona j

P_i : deslocações geradas na zona i

S_j : nº de oportunidades oferecidas pela zona j

A expressão de V_{ij} com o numerador (A_{ij}) medindo a acessibilidade relativa e o denominador (A_i) a acessibilidade absoluta, evidencia a dependência entre a distribuição das deslocações no interior de uma região e as suas acessibilidades.

$$f(d_{ij}) = \exp [-C_{ij} / x_0] \quad (2-12a)$$

$$C_{ij} = M_{ij} + k p T_{ij} \quad (2-12b)$$

M_{ij} : custo da viagem (função do modo de transporte utilizado)

k : grau de desconforto do modo utilizado pelo indivíduo em causa na deslocação (i,j)

p : valor do tempo dos indivíduos considerados

T_{ij} : duração de percurso (i,j) pelo modo considerado

Coeficientes propostos por pela [OCDE]

Modo de transporte	Categoria de utilizador	K
Veículo automóvel	Utilizador do veículo	1
	Não utilizador	∞
Bicicleta / motorizada	Jovens	2
	Adultos/meia idade	2.5
	Idosos	∞

A taxa de acessibilidade Q_i de uma dada zona medida pela relação entre a sua acessibilidade em Transporte Público e em Transporte privado pode estabelecer-se como:

$$Q_i = \frac{\sum_j S_j f_t(d_{ij})}{\sum_j S_j f_a(d_{ij})} \quad (2-13)$$

$f_t(d_{ij})$: função da extensão da rede de TP

$f_a(d_{ij})$: idem da rede viária aberta ao tráfego de automóveis particulares.

2.4 O ÍNDICE DE ACESSIBILIDADE COMO CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRANSPORTES DE PASSAGEIROS.

Na planificação, ou na avaliação, de um sistema de transportes de uma região os diferentes tipos de ocupação dos solos e os seus sistemas de transportes podem ser avaliados a partir do cálculo dos seus índices de acessibilidade [OCDE, anexo D].

O índice de acessibilidade, por escalões de rendimento familiar, B_{hk} calcula-se a partir de [Koenig]

$$B_{hk} = \sum_i \left[\frac{P_{hi} \times A_{ik}}{\sum_i P_{hi}} \right] \quad (2-14)$$

[Obs: média ponderada da soma dos A_{jk} com o número de famílias da zona no escalão de rendimentos h (P_{hi})]

com

$$A_{ik} = \sum_j \frac{S_j}{T_{ijk}} \quad (2-14a)$$

e em que as variáveis têm o seguintes significados:

A_{ik} : índice de acessibilidade da zona i para o sistema de transporte K

S_j : nº de *postos de trabalho* na zona j

T_{ijk} : *tempo de percurso* porta a porta (p-p) entre i e j utilizando o sistema de transporte k

B_{hk} : índice de acessibilidade para as famílias do *escalão de rendimento* h utilizando o sistema de transporte k

P_{hi} : Número de *famílias* com rendimentos no *escalão* h residindo na zona i

O índice de acessibilidade assim obtido compara-se com *um valor de referência* B_{hb} , obtendo-se o **ganho médio de acessibilidade** C_{hk} para as famílias do escalão h que utilizam o sistema de transporte k , em relação ao índice b do sistema de referência :

$$C_{hk} = B_{hk} - B_{hb} \quad (2-15)$$

As diversas alternativas podem comparar-se também a partir dos tempos de percurso de cada um dos sistemas de transporte, e da redução nos custos de deslocamento, medidos com base no sistema adoptado como referência.

A *Utilidade Líquida (média)* U_i que um indivíduo residente na zona i obtém das suas deslocações pode exprimir-se por [Koenig]:

$$U_i = X_0 \log A_i + K \quad (2-16)$$

e assenta nas seguintes hipóteses:

a) Comportamento racional do indivíduo, que para qualquer destino potencial conhecido avalia

- a utilidade bruta da deslocação (o interesse que a deslocação lhe merece)

- o custo global (inconvenientes resultantes do transporte utilizado)

- a utilidade líquida (diferença entre a utilidade bruta e o custo global)

b) Distribuição probabilística da utilidade bruta, ie, conhece-se a probabilidade de um destino qualquer escolhido ao acaso representar uma utilidade bruta nula, média ou elevada.

O parâmetro X_0^4 está associado ao valor intrínseco que cada grupo homogéneo (escalão de rendimento) de indivíduos atribui às deslocações realizadas sob cada grupo de motivações.

⁴ - V. Cap. "Teoria da Acessibilidade".

Capítulo 3.

3.1 MEDIDAS DE ACESSIBILIDADE EM ÁREAS METROPOLITANAS

O conceito de acessibilidade, como expresso nas páginas anteriores, é interpretado como uma medida das dificuldades para vencer distâncias.

As medidas propostas pelos diversos autores já citados, se não diferem pela definição já não coincidem nas formulações.

Constata-se que, referindo-se a maioria às acessibilidades relativas entre diferentes pontos de um território, não quantificam uma medida global da acessibilidade para cada região; i.e. não se encontra uma medida de comparação directa e imediata entre regiões diversas [Allen].

Para clarificar esta posição, é suficiente considerar duas zonas A e B, com quatro funções residenciais ou profissionais localizadas em A (a_1, a_2, a_3 e a_4) e três locais em B (b_1, b_2, b_3). Os índices de acessibilidade normalmente apresentados referem-se às acessibilidades relativas daqueles locais. Se se pretender conhecer uma medida da facilidade de deslocação em A ou em B, em geral tal medida não existe ou quando existe não é comparável.

3.1.1 ACESSIBILIDADE RELATIVA E ACESSIBILIDADE GLOBAL

Partindo do conceito de acessibilidade relativa entre localidades [Ingram] define o índice de acessibilidade integral (A_i) de uma área onde existam N actividades por

$$A_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}, i = 1, 2, \dots, N; j \neq i \quad (3-1)$$

em que a_{ij} é a medida da acessibilidade relativa.

Estes índices quantificam os diferentes níveis de acesso entre pontos no interior dessa zona, não permitindo estabelecer comparações entre zonas de regiões diferentes. Para colmatar esta lacuna é desejável a obtenção de uma medida normalizada da acessibilidade global de cada região, ie, independente da escolha modal dos utentes.

3.2 UM ÍNDICE DE ACESSIBILIDADE GLOBAL: UMA EXTENSÃO.

Os índices a_{ij} e A_i não são adequados para comparar duas ou mais áreas de zonas distintas, dado que o seu domínio de validade se restringe à zona geográfica que integra as localidades avaliadas.

No entanto, a partir do índice de acessibilidade integral de um local é possível obter um novo índice de acessibilidade de toda uma região integrando o índice de acessibilidade relativa sobre todos os pontos dessa área [Allen].

Seja

$$A'_i = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N a_{ij}, j \neq i, i = 1, \dots, N. \quad (3-2)$$

Definindo a_{ij} como o tempo médio de deslocação entre duas localidades de uma determinada região (i-j), A'_i é o tempo médio de deslocação entre i e uma localidade j, escolhida aleatoriamente na zona; ie, a localidade com tempo médio de acesso A'_i é o ponto médio da rede estabelecida entre todos os (i,j) (V. Fig 1).

Calculando a média dos A'_i obtém-se:

$$E(A_i) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N A'_i = \frac{1}{N(N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}, j \neq i \quad (3-3)$$

O valor de $E(A_j)$ é normalizado pelo número de localidades da região, sendo por isso comparável entre diferentes regiões.

Assim, se a_{ij} representa o tempo médio de deslocação entre dois pontos i e j , então $E(A_j)$ é uma medida do tempo médio de deslocação entre dois locais seleccionados aleatoriamente entre todos os N locais da região considerada.

O valor normalizado $E(A_j)$, é, assim, um índice global de acessibilidade de toda a região, representando uma medida do grau de conectividade entre todas as localidades da rede urbana regional.

Podem atribuir-se-lhe diferentes significados, designadamente *a medida da distância média entre localidades da região* (um índice quantificador da superfície total da região) .

Se se utiliza o tempo/custo médio de viagem entre duas quaisquer dessas localidades como índice de acessibilidade relativa, então E tem o significado de uma medida da separação média entre as localidades da região (índice de qualidade do sistema de transportes).

3.2.1 SENSIBILIDADE DO ÍNDICE GLOBAL DE ACESSIBILIDADE AO NÚMERO DE LOCALIDADES N .

3.2.1.1 Modelo linear.

A aplicabilidade prática do índice de acessibilidade global E , acima definido, exige que a expressão (14) seja rapidamente convergente com N .

Uma via de comunicação pode ser representada por um segmento de recta de comprimento X , dividido em N partes iguais, e em que exista uma localidade em cada ponto intermédio i ($i=1...N$) dessa via; com funções residenciais ou outras nas N localidades longo da via.



Fig. 1. Espaço linear $[X_i = (2i-1)X/2N]$

Denotando por d_{ij} a distância (i,j) entre duas localidades, temos

$$d_{ij} = |X_i - X_j| = \frac{[|i-j| \cdot X]}{N} \quad (3-4)$$

Se a *acessibilidade relativa* a_{ij} é dada pela *distância* d_{ij} ($a_{ij} = d_{ij}$), então a partir (12) e de (15) obtém-se A_i :

$$A_i = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{(i-j) \cdot X}{N} + \sum_{j=i+1}^N \frac{(j-i) \cdot X}{N} = \frac{[i \cdot (i-1) + (N-i+1) \cdot (N-i)] \cdot X}{2N}, \quad i=1, \dots, N \quad (3-5)$$

A partir das as equações (13) e (14) obtém-se:

$$E = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i}{N-1} \right) = \frac{X}{2N^2 \cdot (N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N [(i-1) \cdot i + (N-i+1) \cdot (N-i)] = \frac{X}{3} + \frac{X}{3N} \quad (3-6)$$

Verifica-se, assim, que $E \rightarrow X/3$ quando $N \rightarrow \infty$.

Ou seja, $X/3$ é a *distância média entre dois pontos aleatórios localizados sobre o segmento de recta*.

3.2.1.2 Modelo Bidimensional

Considere-se uma região rectangular de lados Y e X, divididos respectivamente em J e I partes iguais, ie, com I*J zonas. No ponto médio (i,j) de cada zona admite-se uma localidade.

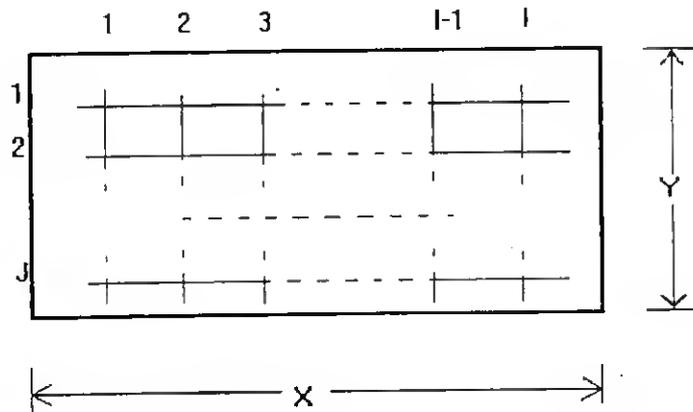


Fig. 2 Espaço rectangular contínuo.

A acessibilidade relativa é dada, também, pela distância entre localidades, com os percursos seguindo os contornos de cada zona.

Nestas condições a distância total é independente de cada dimensão sendo as equações obtidas a partir do caso linear [Allen].

A partir da fig.2:

$$A_{ij} = \frac{[i.(i-1).(I-i+1).(I-i)] \cdot X}{2I} + \frac{[j.(j-1).(J-j+1).(J-j)] \cdot Y}{2J} \quad (3-7)$$

com $i=1, \dots, I$ e $j=1, \dots, J$, obtém-se:

$$E = \frac{X}{3} + \frac{X}{3I} + \frac{Y}{3} + \frac{Y}{3J} \quad (3-8)$$

Para I e J grandes o índice E fica insensível aos valores exactos das dimensões da área em estudo:

$$E = \frac{X}{3} + \frac{Y}{3} \quad (3-9)$$

Esta expressão pressupõe percursos rectilíneos, por troços, entre localidades consideradas aleatoriamente localizadas na região em estudo.

Em trabalhos de aplicação efectuados nos USA, utilizando a metodologia apresentada, [Allen] refere um erro máximo inferior a 12% relativamente a dados obtidas sobre cartografia digitalizada da região considerada.



Capítulo 4

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS DESLOCAÇÕES

4.1 INTRODUÇÃO

Um processo de distribuição de deslocações (" Trip Distribution Method") consiste em estimar o número de deslocações entre diferentes zonas de uma área geográfica; no interior de uma área urbana ou entre áreas urbanas de uma mesma região.

A estimativa dos quantitativos actuais, e futuros, das deslocações geradas/atraidadas pelas diferentes zonas de uma determinada região, constitui um dos elementos básicos para as análises de curto e de longo prazo em planeamento de transportes.

Face à lentidão e aos elevados custos dos métodos baseados em entrevistas e contagens, vários investigadores, em diversas instituições de pesquisa, têm-se dedicado ao desenvolvimento de modelos de geração-distribuição das deslocações (modelos TDM) [Allen], procurando compreender as relações/padrões associados às deslocações intra e inter-urbanas, bem como ao estabelecimento de modelos simplificados e económicos.

[Easa] refere diversos estudos empíricos que atribuem ao modelo gravitacional melhores propriedades do que outros modelos TDM.

4.2 DEFINIÇÃO DA MATRIZ DE DESLOCAÇÕES (TM)

Existem dois tipos de matrizes de distribuição de deslocações (TM): matrizes de produção-atracção (PA) e matrizes de origem-destino (OD).

Numa matriz PA, as linhas e as colunas representam as zonas de produção e de atracção das deslocações, respectivamente. O elemento genérico T_{ij} , representa o nº de deslocações (viagens) produzidas na zona i e atraídas pela zona j .

Nesta matriz não se estabelece o sentido das deslocações e o número de zonas de produção é geralmente igual ao número de zonas de atracção, n . A soma de cada linha P_i representa o número de viagens produzidas na zona i , enquanto a soma das colunas A_j indica o das viagens atraídas para j ($\sum P_i = \sum A_j = T$).

Numa matriz OD é necessário definir o sentido da deslocação. Na atribuição do tráfego aos itinerários, as linhas e as colunas representam as zonas origem e destino, respectivamente.

O elemento genérico T_{i-j} representa o número de viagens com origem em i destinadas a j , ie, tem subjacente um sentido para a deslocação.

Na matriz OD, geralmente obtida a partir de contagens, a soma das linhas O_i representa o número de deslocações com origem em cada zona i , e a das colunas D_j o total de deslocações destinadas a cada zona j .

4.3 ANÁLISE CONVENCIONAL DE UMA REGIÃO

A distribuição das deslocações engloba as seguintes fases (num processo de planeamento em quatro etapas) :

- (1) Preparação dos dados de input;
- (2) Selecção do modelo TDM;
- (3) Calibragem e validação;
- (4) Previsão.

4.4 PREPARAÇÃO DOS DADOS DE INPUT.

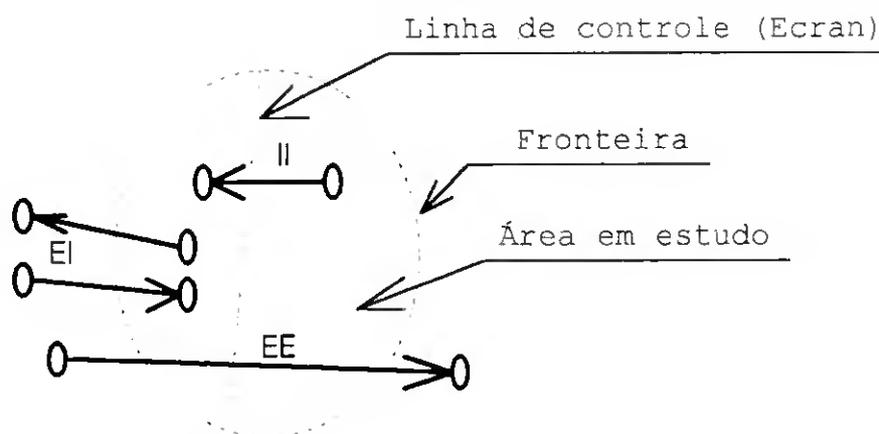
4.4.1 A MATRIZ-BASE DAS DESLOCAÇÕES ANUAIS .

A matriz base contém, em regra, três tipos de deslocações:

Deslocações internas à zona em estudo (I-I),

Deslocações de zonas exteriores para o interior da zona em estudo (E-I) e

Deslocações de atravessamento originadas numa zona exterior e com destino a outra zona exterior (E-E).



(Tipos de deslocações em área urbanas: E= exteriores, I= interiores)

Adaptado de Easa (1993), com modificações.

O conhecimento e a quantificação das deslocações dos tipos EI e EE obriga, em geral, a inquéritos e contagens nos postos de atravessamento da fronteira da região em estudo. Quanto às deslocações II e uma parte das EI, recorre-se a inquéritos domiciliários.

Tanto para construção das matrizes PA como das OD a preparação e condução dos contagens e dos inquéritos requer trabalhos prévios cuidados, designadamente no caso das contagens na estrada, autorização das entidades fiscalizadores do trânsito, selecção dos pontos de contagem e dos dias da semana.

Os inquéritos (domiciliários, telefónicos, via postal) são ainda mais exigentes na medida em que exigem prévio dimensionamento da amostra e selecção do

domicílio a inquirir e dependem sobremaneira da preparação dos inquiridores e da colaboração do inquirido [Vitorino], [CETUR], [Meyer].

Se para a construção das matrizes PA as modernas tecnologias permitem obter resultados de grande fiabilidade e baixos custos nas contagens de tráfego [Ortuzar], as OD ainda continuam dependentes dos resultados dos inquéritos.

4.4.2 DADOS SOBRE A REDE DE TRANSPORTES.

São necessários dois tipos de dados para uma análise TD: os tempos de viagem inter-zonas (ZZ) e os tempos intra-zona (IZ).

Os tempos de viagem a considerar incluem, em geral, duas ou mais parcelas: o tempo de percurso, os tempos para tomar e largar o veículo (os tempos de espera em T.P., o estacionamento, etc.) e o percurso a pé [McShane].

4.5 SELECÇÃO DO MODELO TDM

Um modelo TDM é uma relação matemática multifuncional entre as deslocações geradas, as deslocações atraídas, a rede de transportes e as características sócio-económicas da região em estudo.

Os modelos mais comuns são o de Fratar, o das oportunidades e o modelo gravitacional (com variantes).

4.5.1 MODELO DE FRATAR

Apoia-se nos seguintes pressupostos:

1- A distribuição, no futuro, do nº. de viagens geradas numa dada zona-origem para as diferentes zonas-destino é proporcional aos respectivos valores actuais;

2- No futuro, a distribuição é afectada pelos factores de crescimento das correspondentes zonas-destino.

A expressão do modelo de Fratar é a seguinte

$$t_{ij}^f = t_{ij}^0 \frac{O_i^f}{O_i^0} \frac{D_j^f}{D_j^0} \frac{\sum_{k=1}^n t_{ik}^0}{\sum_{k=1}^n \frac{D_k^f}{D_k^0}} \quad (4-1)$$

onde as variáveis têm os seguintes significados:

O_i^f e O_i^0 : N° de viagens com origem em i no ano f e no ano 0 .

D_j^0 e D_j^f : N° de viagens destinadas à zona j no ano f e no ano 0 .

t_{ij}^f e t_{ij}^0 : N° de viagens de i para j no ano f e no ano 0 .

Este modelo não leva em conta alterações na rede de transportes, sendo por isso mais utilizado nas previsões de curto prazo e nas de muito longo prazo.

4.5.2 O MODELO DAS OPORTUNIDADES

Baseia-se no princípio de que a probabilidade do utente escolher um destino particular qualquer é directamente proporcional ao número de oportunidades que pode satisfazer nesse destino, e inversamente proporcional ao número das que pode satisfazer na origem [Ruiter].

4.5.2 MODELO GRAVITACIONAL (MG)

O modelo gravitacional é o de maior utilização no planeamento de redes de transportes, nomeadamente na análise TD.

Os fundamentos deste modelo assentam directamente nas leis de Newton, designadamente a primeira que aqui se poderá enunciar como "as deslocações produzidas numa dada zona (região) são atraídas para outras zonas numa razão directa do número de oportunidades oferecidas pela zona de atracção e na razão inversa do custos de deslocação entre zonas PA" [Horowitz].

Isto significa que, neste modelo, o número de viagens entre duas zonas, simultâneamente emisoras-receptoras, está directamente relacionado com o nível de actividade dessas zonas e inversamente com a distância-tempo que as separa.

Existem diversas versões deste modelo sendo a do Bureau of Public Roads (**BPR**) uma das mais utilizadas e cuja expressão matemática é a seguinte [Easa]:

$$T_{ij} = P_i \left[\frac{A_j F_{ij} K_{ij}}{\sum_{k=1}^n A_k F_{ik} K_{ik}} \right] \quad (4-2)$$

T_{ij} : deslocações produzidas na zona i atraídas pela zona j.

P_i : Deslocações totais com origem em i

A_j : Deslocações totais atraídas para j

F_{ij} : Factor de atrito (ou impedância) para as deslocações i-j. É função do tempo de viagem t_{ij} .

K_{ij} : Factor socio-económico para as deslocações $i-j$.

i : zona de produção (ou origem) $i=1, \dots, n$.

j : zona de atracção (ou destino) $j= 1, \dots, n$.

O modelo *distribui* a produção de cada zona i pelas n zonas de atracção j , em função da capacidade relativa de atracção de cada uma destas zonas.

As **restricções** a observar são as seguintes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^j T_{ij} \\ \sum_{i=1}^n T_{ij} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} P_i \\ A_i \end{array} \right\}; \quad \forall i, j \quad (4-2a)$$

O modelo satisfaz a primeira restrição enquanto para a segunda é necessário recorrer a um processo iterativo na fase de calibragem.

Para representar o **tempo de viagem** (tempo necessário para efectuar um percurso definido pelo par $i-j$), por analogia com a resistência total oposta à passagem da corrente eléctrica num dado sentido num troço de um circuito, utiliza-se o termo **impedância**.

Impedância pode, assim, representar indistintamente o **tempo de viagem**, o **custo**, a **distância** ou qualquer **combinação** destes factores. É um factor obtido a partir da soma ponderada de tempos e custos de diversa natureza.

O parâmetro K_{ij} representa uma medida da **influência dos factores socio-económicos** no tempo de viagem entre cada par $(i-j)$, não representados pelos restantes parâmetros. Depende especialmente da *liberdade de escolha* modal do utente.

O MG estipula que o número de viagens produzidas na zona i (P_i) se distribuem para cada uma das zonas destino j (T_{ij}) segundo a sua atractividade ($A_i \sum A_j$) e a sua acessibilidade [$F_{ij} \sum F_{ij}$]. Isto significa que

$$\text{N}^\circ \text{ Viagens entre } i \text{ e } j = \frac{\text{N}^\circ \text{ de viagens produzidas em } i \times \text{coef. característico de atractividade e acessibilidade de } i}{\text{Coef. global de atractividade e de acessibilidade de toda a área em estudo}}$$

Assim, a zona j recolhe uma fracção das viagens produzidas a partir de i que depende da sua importância relativa no âmbito do agrupamento em que se insere, isto é, a i associa-se um "share" (*medida do seu peso relativo no agrupamento*). Daí a designação de "modelos de share" com que se referem os modelos de características semelhantes ao gravitacional.

Na prática, quando se procura conhecer a distribuição das viagens geradas numa zona i pelas diferentes zonas destino j , distinguem-se as diferentes motivações para viajar de uma zona origem i para outra zona destino j , na medida em que motivações diferentes produzem distribuições diferentes, já que diferentes são as características de atractividade associadas a cada zona de destino (zonas industriais, comércio, lazer, serviços, universidades, etc).

4.6 CALIBRAGEM DO MODELO

A calibragem consiste em ajustar a expressão matemática do modelo, estimando os respectivos parâmetros, de tal modo que os resultados produzidos se ajustem aos valores observados.

A calibragem deste modelo decorre em simultâneo com a definição dos *factores de atrito* F_{ij} e de outros factores representativos da influência global das condições socio-económicas de cada zona (*a impedância*). Os

factores de atrito são a medida da influência do tempo de viagem na *impedância total*.

O processo é do tipo iterativo, dependente da função escolhida para F_{ij} , adoptando-se geralmente como solução inicial dos parâmetros a estimar os resultados conhecidos de uma região com características similares.

Algumas funções frequentes são⁵:

$$F_{ij} = t_{ij}^{-\beta} \quad (\text{potência}) \quad (\text{a})$$

$$F_{ij} = \exp(-\beta t_{ij}) \quad (\text{exponencial}) \quad (\text{b})$$

$$F_{ij} = t_{ij}^{\alpha} \exp(-\beta t_{ij}) \quad (2 \text{ parâmetros}) \quad (\text{c})$$

$$F_{ij} = \text{Função descontínua} \quad (\text{BPR}) \quad (\text{d})$$

onde α e β são os parâmetros de calibragem.

Os dados de partida necessários (input's do modelo) são:

- 1- Tabela de viagens O-D, por cada motivação (tabela de referência).
- 2- Tabela de tempos de viagem entre cada par de zonas (i,j), incluindo o tempo de viagem intra-zonas
- 3- Tabela dos factores de atrito inter-zonas (solução base inicial).

O procedimento a seguir [Khisty], [Gray] consiste em aferir os F_{ij} até que o modelo reproduza, com uma aproximação julgada satisfatória, a distribuição obtida a partir de uma tabela de referência ; esquematizando-se do seguinte modo:

⁵- V. também "Acessibilidade Gravitacional", sub-título: "Formulações de $f(d_{ij})$ "

- a- estabelecer a distribuição de T_{ij} pela totalidade dos pares (i-j), a partir dos input's;
- b- os totais A_j (viagens atraídas para cada zona), calculados pelo modelo comparam-se com os dados de input inicial A_j^0 .
- c- se a fase b- revelar discrepâncias significativas, ajustam-se novos A_j nas zonas onde se verificarem essas diferenças;
- d- corre-se o modelo até haver ajustamento julgado satisfatório entre os valores de referência A_j^0 e os valores calculados A_j .
- e- comparam-se os tempos de viagem obtidos pelo modelo com os valores de input (tabela de valores de tempo médio de viagem entre cada par i-j). Se as diferenças observadas forem significativas o processo continua repetindo-se o mesmo procedimento⁶.

4.6.1 FACTOR DE ATRITO REPRESENTADO POR UMA FUNÇÃO DESCONTÍNUA (BPR)

No procedimento adoptado pelo BPR ignoram-se os K_{ij} na calibragem, sendo no entanto levados em conta na validação [BPR], considera-se K desdobrado em dois factores: uma parcela de atracção e uma parcela de atrito.

Inicia-se com a parcela de atrito unitária, e balançam-se as atracções na fase seguinte. Na prática o processo pára quando as diferenças entre os

⁶ - Para funções contínuas de dois parâmetros v. diversa bibliografia in [Easa].

tempos médios gerados e os observados forem inferiores a um erro limite fixado ($\approx 3\%$) [Khisty], [Easa, b].

A expressão geral que permite obter os factores de ajustamento (factores de atrito e factores de atracção) é [Khisty]:

$$F^q = F^{q-1} \left[\frac{MD}{MC^{q-1}} \right] \quad (4-3)$$

sendo F^q o valor obtido na iteração q ($q=1, F^0=1$), MD e MC os valores procurado e calculado, respectivamente.

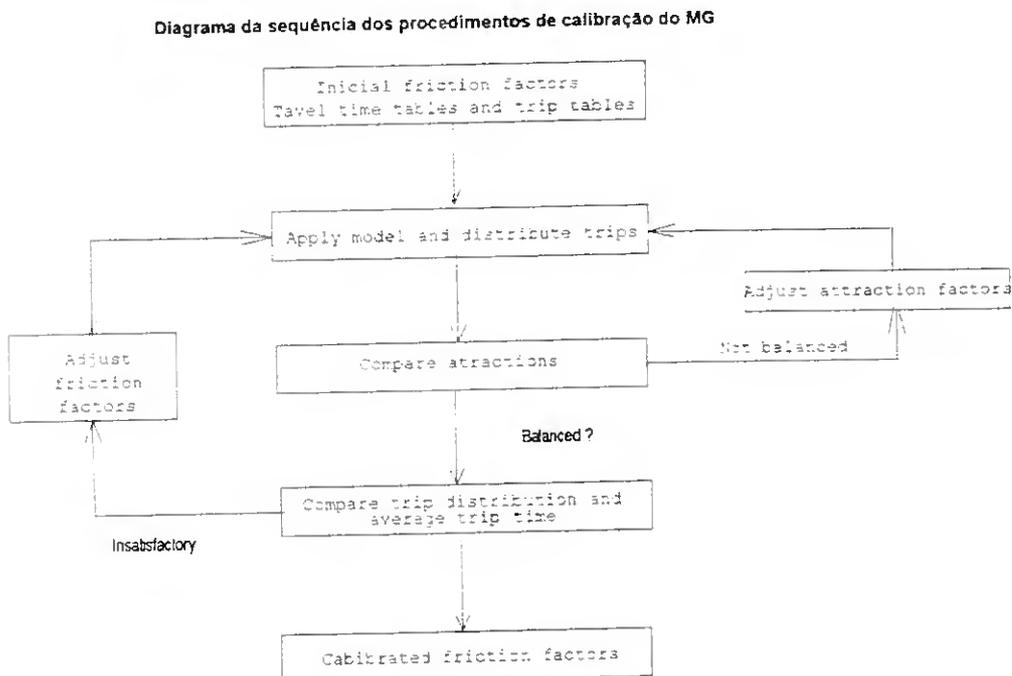


Fig. 1- (Reproduzida de Khisty, pag. 448)

4.7 VALIDAÇÃO DO MODELO

Os resultados obtidos através da aplicação do modelo devem ser avaliados tendo em conta aspectos de carácter comportamental (psicológicos) e socio-económicos; revelando a prática que os factores sócio-económicos (parâmetros K_{ij}) são necessários apenas no tratamento de grandes áreas urbanas, estando normalmente associandos às deslocações entre o centro urbano ("Central Business District-CBD") e as zonas periféricas.

O efeito dos factores sócio-económicos avalia-se comparando os valores observados das deslocações com os valores obtidos pelo modelo calibrado, devendo calcular-se os K_{ij} para motivações específicas.

Os K_{ij} só devem, no entanto, ser utilizados se se verificarem discrepâncias acentuadas entre os valores observados e os valores calibrados, e neste caso quando existir evidente justificação sócio-económica para tal.

4.8 OUTROS ASPECTOS IMPORTANTES.

4.8.1 Conversão da matriz PA numa matriz OD.

Num procedimento de afectação (volumes e sentidos) a matriz OD pode obter-se a partir da matriz PA .

Se, p. exemplo, entre as zonas Z_1 e Z_2 se produzem 100 deslocações ($T_{12}=100$), e a proporção de deslocações λ originadas numa zona de produção é de 0.4, então o número de deslocações originadas em Z_1 e atraídas para Z_2 é $T_{1-2}=40$; e de Z_2 para Z_1 , $T_{2-1}=60$.

As expressões para obter os elementos da matriz OD a partir da matriz PA, são [Bromage]:

$$T_{i-j} = \lambda T_{ij} - (1-\lambda) \cdot T_{ji} \quad (4-4)$$

e

$$T_{j-i} = \lambda T_{ji} - (1-\lambda) \cdot T_{ij} \quad (4-4a)$$

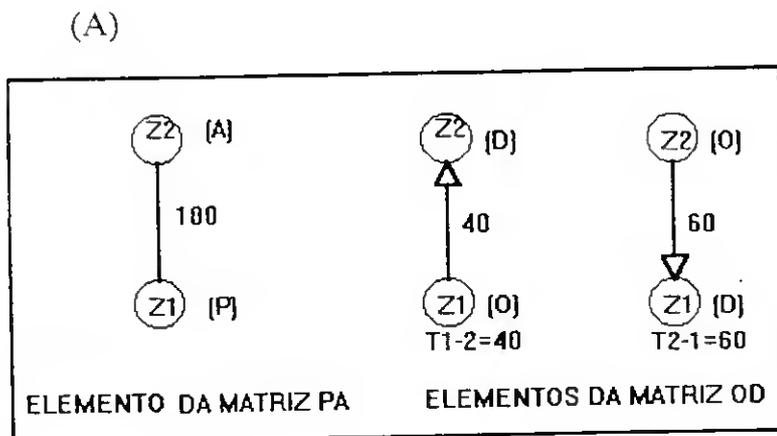
Note-se que :

- a) $T_{j-i} + T_{i-j} = T_{ij} + T_{ji}$
- b) Os elementos diagonais são iguais em ambas as matrizes,
- c) Na prática, para períodos inteiros de 24 h, toma-se $\lambda = 0.5$ donde resultam matrizes OD simétricas.

4.8.2 Exemplo numérico (Adaptado de [Easa,b])

A) Elemento da matriz de intercâmbio (PA) e os correspondentes elementos da matriz OD.

B) Exemplo numérico.



(B)

		Z. de atracção	
		1	2
Zona prod.	1	20	100
	2	40	60

		Z. destino	
		1	2
Zona orig.	1	20	64
	2	76	60

4.9 MÉTODOS EXPEDITOS E TÓPICOS ESPECIAIS

4.9.1 ANÁLISE POR MÉTODOS EXPEDITOS.

O [NCHRP] usa um procedimento baseado na transposição de parâmetros a partir do modelo gravitacional:

$$T_{ij} = P_i \left(\frac{A_j F_{ij}}{\sum_{k=1}^n A_k F_{ik}} \right) \quad (4-5)$$

sendo

T_{ij} : Deslocações (viagens) produzidas na zona i atraídas para a zona j;

P_i : Número de deslocações produzidas na zona i (*produção de i*)

A_j : Atracção da zona j

F_{ij} : Factor de atrito entre ij, função de t_{ij} ;

i = zona de produção (i = 1, ..., n);

j = zona de atracção (j = 1, ..., n);

n = número de zonas

a relação (5) pode reescrever-se como

$$T_{ij} = R_i A_j F_{ij} \quad (4-5a)$$

onde

$$R_i = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^n A_j F_{ij}} \quad (6)$$

R_i é um índice de produção, constante para cada zona i.

$A_j F_{ij}$ é o factor de atracção de cada zona j, e

$\sum A_j F_{ij}$ é o índice de acessibilidade da zona i.

4.10 SUMÁRIO DAS CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS

As características principais dos modelos apresentados são as seguintes [Easa,b]:

4.10.1 Modelo de Fratar:

Vantagens:

- Simples
- Adequado para situações em que se não dispõe da matriz de tempos (custos)
- Não requer operações de calibragem
- Adequado para pequenas áreas com relativa estabilidade urbana-demográfica
- Bastante usado para extrapolação/previsões de curto-prazo
- Fácil de utilizar em conjunto com o modelo gravitacional
- Software disponível.

Limitações:

- Insensível às características da rede
- Inadequado nas situações em que se verifiquem alterações significativas nos padrões de uso dos solos
- Dependente do erro cometido na determinação do factor de crescimento.

4.10.2 Modelo das oportunidades:

Vantagens:

- Formulado sobre a teoria do comportamento individual dos utentes;
- É um modelo de resposta a alterações demográficas, de urbanismo; ie, de política económica e de ordenamento;
- Calibrado a partir de técnicas estatísticas;
- Exige o balanceamento da matriz após a calibragem

Limitações:

- Não permite a introdução de um factor de crescimento K_{ij}
- Os resultados dependem dos tempos de viagem relativos em cada zona e não dos respectivos valores absolutos.

4.10.3 Modelo gravitacional:

Vantagens:

- Admite as impedâncias sob a forma de funções contínuas ou descontínuas;
- Leva em conta os factores sócio-económicos K_{ij} ;
- Necessita das matrizes de tempos ZZ e IZ ;
- Pode ser usado em conjunto com o modelo de Fratar;
- Software disponível.

Limitações:

- É necessário o recurso a técnicas estatísticas para a sua calibragem, na medida em que não admite os resultados directos imediatos das alterações entretanto ocorridas na distribuição das deslocações ;
- Dificuldade na previsão dos factores de crescimento futuros;
- As impedâncias são consideradas constantes ao longo do tempo.

Capítulo 5

DISTRIBUIÇÃO MODAL

Para o planeamento de um sistema de transportes é indispensável conhecer a distribuição das preferências dos utentes por cada modo de transporte que lhes é oferecido. Esta informação obtém-se a partir das escolhas contabilizadas de cada modo de transporte servindo uma dada população/zona.

5.1 A ESCOLHA DO MODO DE TRANSPORTE.

5.1.1 DESENVOLVIMENTO E CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE ESCOLHA MODAL

Segundo [Stopher] podem distinguir-se os seguintes tipos de modelos:

a- **Descritivos**, de carácter empírico.

Podem ser *predictivos*, procurando explicar as relações entre os diferentes elementos do modelo, para daí obter os valores das previsões; e os modelos de *planificação*, que permitem fazer uma avaliação entre diversas alternativas.

b- **Determinísticos**, cujos resultados caracterizam apenas um estado da natureza

c- **Probabilísticos**, que estabelecem uma lei de probabilidade para diversos estados possíveis.

d- **Analíticos**, para avaliação dos efeitos de certos acontecimentos possíveis, pelo recurso a técnicas de simulação.

e- **Estáticos**, independentes do tempo; e

f- **Dinâmicos** ou temporais.

g- **Agregados**, considerando para cada indivíduo os valores médios das variáveis do grupo; e **desagregados**, que consideram os comportamentos individuais.

h- **Unidireccionais**, em que cada etapa do processo não interfere nas seguintes; ou **multidireccionais**.

i- **Analógicos** assentes geralmente numa analogia física.

j- **Progressivos**, que a partir de acontecimentos determinam as respectivas consequências, em sucessivas etapas; e

k- **Regressivos**, que partindo de objectivos estabelecidos determinam as correspondentes causas; e

l- Métodos de análise Estatística/ Gráfica/ Econométrica.

5.2 OS MODELOS DA PRIMEIRA GERAÇÃO

Segundo [Merlin], no início dos estudos sobre planeamento de sistemas de transportes, a repartição modal dos utentes era considerada parte residual ou não integrava mesmo os objectivos dos estudos.

Particularmente nos EUA, o objectivo prioritário do planeamento de sistemas de transportes era o estabelecimento da rede urbana de auto-estradas. Os transportes públicos eram tomados apenas como um modo de deslocação residual, utilizados por uma faixa marginal da população menos protegida pela fortuna e/ou pelos ainda não motorizados.

Nos modelos ditos de primeira geração, a repartição modal (da procura) precedia, frequentemente, a repartição geográfica das deslocações originadas em cada zona. Foram modelos concebidos para a previsão do tráfego automóvel, nos países desenvolvidos, que não se adequavam às situações resultantes de alterações nos padrões da oferta de transportes públicos.

Nas décadas 50/60, em resultado de alterações significativas no campo sócio-económico e no urbanismo, os Transportes Públicos deixam de ser tratados

como a parte residual dos sistemas de transportes, ao serviço das classes mais desfavorecidas.

O modelo de [Adams], desenvolvido para a cidade de Detroit, é um modelo agregado, descritivo e determinístico, na forma de uma regressão múltipla semi-logarítmica:

$$Y = a + b_1 \log P + b_2 \log \varepsilon + b_3 \log T + b_4 \log U + b_5 \log S \quad (5-1)$$

Y- proporção das deslocações efectuadas em TP

P- população em idade de se deslocar de forma independente e com regularidade

S- área urbanizada

U- coeficiente de utilização do solo, função do afastamento ao centro, às zonas industriais/comerciais.

$$\varepsilon = \left(\frac{T}{E}\right)^\alpha \left(\frac{L}{E}\right)^\beta \left(\frac{L}{A}\right)^\gamma \quad \text{é o factor económico} \quad (5-2)$$

L- N° de alojamentos

E- N° de postos de trabalho

A- n° de automóveis

o nível de serviço T é dado por

$$T = \frac{K}{P^{1.5} S^{0.25}} \left(\frac{V_{TC}}{V_A} \right)^{0.5} \quad (5-2a)$$

K- N° de viaturas x milhas

V_{TC} - Velocidade dos TP

V_A - Velocidade dos automóveis.

A crítica que se faz aos modelos desta família é, genericamente, do seguinte teor:

- Sendo empíricos, não são de aplicação geral.

Sendo modelos essencialmente descritivos, e além disso construídos no pressuposto do declínio progressivo dos TP, em favor do automóvel particular, é muito discutível a sua aplicação para previsão de médio/longo prazos.

Um outro modelo [Merlin] é representado pela expressão

$$A_i^K = \sum_j E_j f^k(d_{ij}) \quad (5-3)$$

onde $f^k(d_{ij})$ é a impedância para o modo K.

Esta formulação estabelece curvas de afetação entre TP e automóvel particular em função da acessibilidade A aos locais de trabalho por um ou outro dos modos concorrentes.

Algumas das **variáveis com influência mais determinante na escolha do modo** de transporte são:

- A distância. É possível identificar uma distância que maximize a função "procura de TP".
- A densidade residencial. O nível de utilização cresce com a densidade populacional da zona.
- A taxa de motorização m_a . O uso de TP decresce com o aumento de m_a .
- O congestionamento. A utilização dos TP aumenta com a dificuldade de circulação e estacionamento no interior das zonas urbanas.

- O nível de serviço dos TP. A procura dos TP aumenta com a melhoria do nível de serviço (medida geralmente pelo tempo de espera e pela distância a percorrer a pé).

A segunda série de modelos da primeira geração, centra-se na previsão da repartição modal das deslocações entre pares O-D (i,j).

O modelo da *Traffic Research Corporation*, citado in [Merlin], é um modelo gráfico que estabelece famílias de curvas de afectação em função da relação entre os tempos de percurso em TP e em automóvel, por níveis de serviço e por níveis de rendimento dos utilizadores (80 curvas: 5 classes de rendimento, 4 razões de custos, 4 razões de tempos de percurso).

O modelo de *Saint-Paul - Minneapolis*, citado in [Merlin], é de base estatística e apresenta a forma de uma regressão semi-logarítmica.

$$Y = a - b_1 \log [t^{TC} / t^A] - b_2 \log R + b_3 \log D + b_4 \log W + b_5 TS \quad (5-4)$$

Y- proporção das deslocações efectuadas em TP

t^{TC} e t^A - tempos de percurso em TP e em automóvel, respectivamente

R- Rendimento da classe considerada

D- Densidade residencial (Pop./Superfície urbanizada :P/S)

W- Densidade de postos de trabalho (Nº de PT/Superfície urbanizada : E/S)

TS- tarifa de estacionamento.

Na expressão entram variáveis auto-correlacionadas, pelo que os resultados obtidos são, em geral, de fraco nível. Podem obter-se valores $Y > 1$ e $Y < 0$!

5.3 OS MODELOS DA SEGUNDA GERAÇÃO.

Os primeiros modelos não tinham uma base teórica nem assentavam sobre uma análise explicativa, daí resultando uma capacidade insuficiente para aplicação em trabalhos de previsão.

As insuficiências reveladas deram origem ao surgimento dos modelos de (segunda geração) assentando sobre as seguintes noções de base: a *teoria da utilidade* e o *valor do tempo*.

Os primeiros modelos desenvolvidos nesta fase ficaram conhecidos por *modelos de base*, como resultado da sua larga aceitação.

[Warner], em tese de doutoramento desenvolveu um modelo econométrico com vista à procura de uma regra de decisão da escolha modal estabelecida pelos utentes, em função das características dos indivíduos e dos deslocamentos que efectuam.

O modelo assentava nos pressupostos de que é possível estabelecer uma afectação do tipo binário para cada indivíduo-modo de transporte em função do valor relativo de uma variável discriminante Z ($Z \geq Z_0, Z \leq Z_0$); e de construir a curva da probabilidade $P(Z)$ de um indivíduo escolher um dado modo de transporte A em função do valor de Z .

A expressão do **modelo de Warner** é:

$$Z = a_0 + a_1 \log t_2/t_1 + a_2 \log C_2/C_1 + a_3 \log R + (a_4 \cdot \log R) / m_a \quad (5-5)$$

onde

t_1, t_2 - tempos de percurso para os modos 1 e 2

C_1, C_2 - custos de deslocação nos modos 1 e 2

R - Rendimento do agregado familiar

m_a - taxa de motorização (n° veículos/adulto)

sendo

$$P(z) = \frac{e^{\alpha z + \beta}}{1 + e^{\alpha z + \beta}} \quad (5-6)$$

que se pode escrever na forma

$$\alpha z + \beta = \log \frac{P(z)}{1 - P(z)} \quad (5-6a)$$

A curva de probabilidade $P(z)$ fornece a curva de afectação dos utentes pelos dois modos concorrentes.

[Quarmby] utiliza o **conceito de desutilidade da deslocação** por um dado meio de transporte (como função linear das variáveis tempo e custo associadas), e expande o modelo de Warner para captar o efeito de um maior número de variáveis sócio-económicas, e das diferenças em tempo e custo da deslocação (surge a noção de *custo generalizado da deslocação*), na escolha do modo de transporte.

Propõe a **função custo generalizado** da deslocação

$$Z = \sum_i \lambda_i \cdot x_i, \quad (5-7)$$

onde

x_i - variáveis de tempo e de custo

λ_j - peso das variáveis

A probabilidade de escolha de cada modo de transporte é calculada através de uma função logística (f. logística de Warner).

[Stopher] propõe uma função linear às diferenças de custo e tempo de deslocação para calcular a probabilidade de o utilizador escolher o modo de transporte 1, em alternativa ao modo 2:

$$P = \alpha (C_2 - C_1) - \beta (T_2 - T_1) + \gamma \quad (5-8)$$

onde α , β e γ são parâmetros a determinar em função das classes de rendimento do agregado familiar do indivíduo.

Segundo [Merlin], o modelo de Warner e os derivados que se lhe seguiram são considerados os de uso mais difundido.

5.3.1 O MÉTODO DO IAURP

Num estudo de natureza explicativa sobre o comportamento dos passageiros dos TP na região de Paris, baseado em dois inquéritos de grande difusão, os investigadores do [IAURP] mostraram a influência dos factores tempo, custo e conforto na escolha de um dado modo de deslocação.

O método consistiu em definir diversas escolhas equivalentes de modos de transporte a partir de uma medida global de desconforto, função das diferenças de tempo de percurso por cada um de dois modos de transporte e do nº de transbordos que os utentes faziam no Metro de Paris para atingir diversos pontos situados a distâncias conhecidas de um ponto central de referência comum.

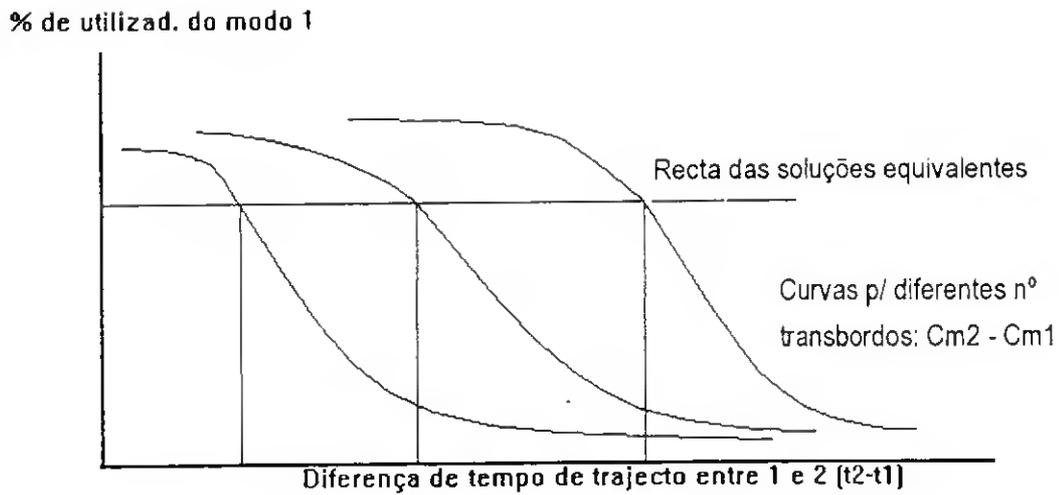


Fig. 1. Princípio do método do IAURP *(Adaptado de P. Merlin)*

Estabeleceram-se várias equivalências, como p.ex. entre desconforto (medido pelo nº de transbordos no metro) e tempo de viagem, tempo e diferença de custo.

O custo generalizado de deslocação é dado por:

$$G = C + \lambda.t + \sum_k \mu_k.C_k, \quad (5-9)$$

onde C_k é o K ésimo elemento de conforto

e μ_k é o seu contra-valor monetário

% de utentes que utilizam o autocarro

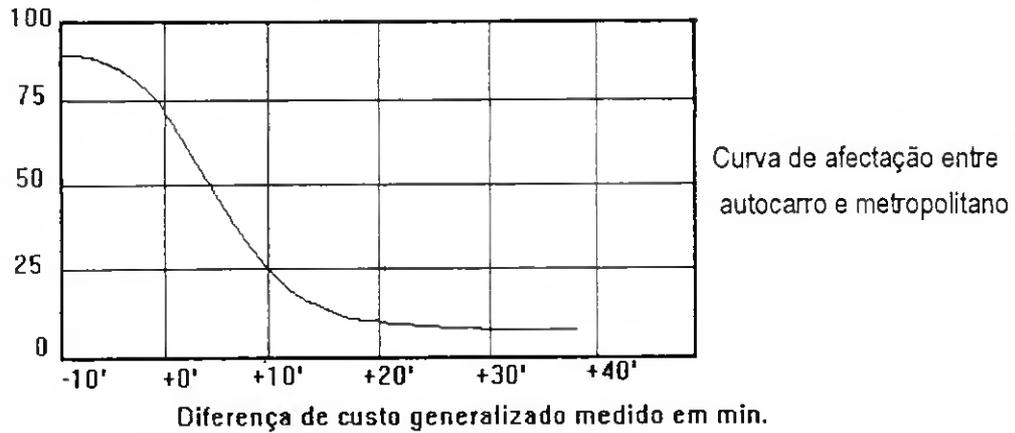


Fig. 2- Adaptado de P. Merlin.

A curva final representa a proporção de utentes de um modo de transporte em função da diferença de custos relativa ao modo alternativo; traduz ainda uma variabilidade de comportamento conforme com a distribuição de Gauss. Este modelo não ultrapassa os inconvenientes de ser um modelo agregado com tradução gráfica, de operacionalidade reduzida.

5.4 O VALOR DO TEMPO E DO CONFORTO

A questão da escolha entre um de dois itinerários para aceder a um determinado destino a partir da mesma origem, sendo um gratuito e mais lento, e o outro taxado com portagem, mas mais rápido; levou ao estudo da influência do rendimento disponível dos utentes na escolha modal, bem como do valor que o utente atribui ao conforto que cada um dos diferentes modos de transporte lhe proporciona.

As abordagens tradicionais do problema são:

- *O método do rendimento* que consiste em valorizar o tempo do utente pelo seu salário. O utente valoriza igualmente o tempo de lazer e o tempo de trabalho, ou seja, remunera o seu tempo de trajecto ao mesmo preço do tempo de trabalho.

- *O método do custo puro* pressupõe que a escolha entre itinerários alternativos se faz com base numa arbitragem entre tempo gasto vs preço pago; não sendo considerada a influência de variáveis, tais como conforto, segurança, salário do utente, nem se define um ponto de indiferença.

- *O método misto*. Segundo [Merlin] as insuficiências dos dois métodos anteriores conduzem a outro método para identificar as situações de indiferença entre alternativas, e avaliar a influência do nível de rendimento dos utentes (influência dos salários na escolha modal) e as características da deslocação.

De acordo com esta metodologia, para dois modos de transporte concorrentes 1 e 2, o rendimento disponível Y do utente é dado por [Merlin]:

$$Y_1 = S.(K-L-t_1) - C_1$$

$$Y_2 = S.(K-L-t_2) - C_2 \quad (5-10)$$

donde resulta a diferença

$$Z = Y_1 - Y_2 = S.(t_2 - t_1) + C_2 - C_1 \quad (5-11)$$

tendo as variáveis o seguintes significados:

S- Salário do utente

K- Stock de tempo

t₁- tempo de trajecto pelo modo 1

t₂- tempo de trajecto pelo modo 2

C₁- custo do transporte pelo modo 1

C₂- custo do transporte pelo modo 2

A diferença Z corresponde ao valor da portagem (ou taxa) a incidir sobre o modo 1 que produz uma "deslocação" do utente para o modo 2.

Os valores de Z são obtidos, para cada modo de transporte (em alternativa!), através de inquéritos aos utentes, e apresentados sob a forma de curvas de probabilidade.

No entanto a esta metodologia ainda se aponta o facto de não revelar o valor atribuído pelo utente ao seu tempo (valor percebido do tempo), nem levar em conta a qualidade relativa de cada modo de transporte.

As insuficiências apontadas a este método constituíram o ponto de partida para o desenvolvimento dos chamados *modelos de escolha modal da segunda geração*.

Diversos estudos [Merlin] para o [IAURP], relativos à questão da escolha dos itinerários, levaram à **distinção entre o preço e o valor do tempo**:

O preço do tempo é o valor suplementar efectivamente pago por um ganho de tempo (acréscimo de preço por uma viagem mais rápida), enquanto que

O valor do tempo é o montante que o utente está disposto a pagar por uma hipotética economia de tempo.

Assim o **preço do tempo tem carácter objectivo**, e como tal, refere-se ao universo de todos os utentes; enquanto que o valor, subjectivo, se refere apenas aos utentes em condições de poderem escolher entre modos alternativos [Merlin]. **A influência dos elementos de conforto** de cada modo de transporte têm sido estudados por diversos investigadores e instituições (IAURP), relacionando a importância do conforto na escolha modal.

MEDIDA DO CONFORTO (Reproduzido de P. Merlin)

COEFICIENTES DE DESCONFORTO (PENALIZAÇÃO, A MULTIPLICAR PELA DURAÇÃO CORRESPONDENTE)
PARA AS MIGRAÇÕES (DESLOCAÇÕES) PENDULARES

ESTUDO			COEFICIENTES DE PENALIZAÇÃO				PROCURA
Cidade	Autores	Data da publicação	Correspond	Espera	Percurso a pé	Viajar em pé	DE ESTACIONAMENTO
Paris	IAURP	1963,64,66	2	3(1)	1.75		0.4 a 1.4 FF (2)
Paris	RATP	1972	2.2 (8)			1.2 (8)	
Leeds	Quarmby	1967	1.5	2			
Leeds	Daly & Zachary	1975		2.2 a 2.6 (7)	1.6 a 2.0 (7)		
Liverpool	LGORU			1.6	2.9		
Manchester	Roger e al.	1973		3.6	2.6		
Leicester				2.5	2.5		
Leeds				3.0	3.5		
Manly (Aus.)	Hensher	1972	1.5	2			
Heidhoven	Richards e Ben Akiva	1975			2		
Estocolmo	Alders, Ansen e al.	1975	2 (3)	3 (5)		1.4 (4)	
S. Francisco	Train e Mc'Fadden	1975		8 a 11 (6)	1.4		

- (1) 3 vezes a espera teórica dos autocarros, mas apenas 1,5 vezes a espera efectiva
 (2) 1.4 FF em 1962 para as 10 'coroas' do centro de Paris, 0.4 FF para as 10 'coroas' periféricas
 (3) 2.14 SKr: cerca de 8 min (tempo de ocupação de um lugar sentado nos veículos: 16 S. Km/h)
 (4) 22.6 SKr/h em vez de 16.0 SKr/h
 (5) Este coef. aplica-se ao Metro. Atinge 1.2 nos autocarros.
 (6) Para a primeira espera. Dai a explicação de um coef. tão elevado
 (7) O intervalo resulta de dois modelos diferentes. Os coef. são aplicáveis ao trajecto de autocarro.
 (8) Valores médios: o método da RATP conduz a uma penalização fixa, por exemplo para uma correspond. - 5 min + 1.25 x tempo de corresp.

5.5 OS MODELOS DA TERCEIRA GERAÇÃO

5.5.1 A TEORIA DA UTILIDADE NA BASE DA ESCOLHA MODAL

[Becker] integra o tempo como variável explícita da F. Utilidade U do utente, e estabelece as relações :

$$U = U(L, T, t_i, b_i) \quad (5-12)$$

com as restrições:

$$\sum_i b_i p_i + \sum_i t_i c_i = T \cdot S \quad \text{R. orçamental} \quad (a)$$

$$L + T + \sum_i t_i = K \quad \text{R. Tempo} \quad (b)$$

L - Tempo de lazer

T - Tempo de trabalho

b_i - Quantidade consumida do bem b_i

t_i - Tempo de trajecto para consumir um bem b_i

p_i - Preço do bem b_i

c_i - C. transporte por unidade de tempo para consumir o bem b_i

S - Salário horário

Maximizando U , s. a. restrições (a) e (b)

$$\text{Max} U \quad : \quad V = U - \mu \cdot \left(\sum_i b_i p_i + \sum_i t_i c_i - T \cdot S \right) - \lambda \cdot \left(L + T + \sum_i t_i - K \right) \quad (5-13)$$

verificam-se as relações [Becker]:

$$\frac{\delta V}{\delta L} = U'_L - \lambda = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda = U'_L \quad (5-14)$$

(utilidade marginal do "tempo livre" constante).

$$\frac{\delta V}{\delta T} = U'_T + \mu \cdot S - \lambda \quad \Rightarrow \quad U'_T = U'_L - \mu \cdot S \quad (5-14a)$$

(a utilidade marginal do trabalho é a diferença entre a U. M. do lazer diminuída da retribuição pelo trabalho - o salário).

$$\frac{\delta V}{\delta b_i} = U'_{b_i} - \mu p_i, \quad \Rightarrow \quad \mu = \frac{U'_{b_i}}{p_i} \quad (5-14b)$$

(constância da relação entre a U. M. e o preço de um bem).

$$\frac{\delta V}{\delta t_i} = U'_{t_i} - \mu c_i - \lambda = 0 \quad \Rightarrow \quad U'_{t_i} = \lambda - \mu c_i \quad (5-14c)$$

(igualdade entre a U.M. do tempo de percurso e o tempo de lazer acrescido do custo de transporte).

Segundo [Watson] *o utente decide pela escolha de um dado modo ponderando entre o tempo necessário e o custo da deslocação.*

A psicologia do comportamento e a teoria económica da utilidade foram utilizadas por Stopher e Meyburg [Stopher] para ajustarem uma função logística à afectação das deslocações (i,j) entre diversas alternativas de transporte concorrentes (problema da repartição das escolhas modais).

[Merlin] refere que as principais críticas apontadas ao método clássico (modelos da 1ª e 2ª gerações), centram-se na fraca capacidade para previsões de médio/longo prazo (limita-se genericamente a projectar no futuro a situação actual), e à insuficiência em traduzir o comportamento dos utentes.

As propostas alternativas (surgidas no início da década de 70), visavam

o desenvolvimento de metodologias que não implicassem o mecanismo sequencial dos métodos clássicos: geração, distribuição, escolha modal, afectação à rede.

Nesse sentido surgiram modelos econométricos, teóricamente apoiados na teoria da utilidade, designadamente o modelo de escolha modal de **Mclynn/Watkin**, [McLynn].

5.5.2 MODELOS DE BASE ESTATÍSTICA

Estes modelos assentam sobre quatro famílias de métodos estatísticos :

- Regressão linear
- Análise discriminante
- Distribuição normal de Gauss
- Análise logística (função logística).

Na **regressão linear** define-se uma variável Z , função das características s_i do utente e do deslocamento x_j , que ele pretende efectuar utilizando um determinado modo [Merlin]:

$$Z = a_0 + \sum_i b_i s_i + \sum_j c_j x_j , \quad (5-15)$$

Z pode ser a probabilidade ($0 \leq z \leq 1$) de o utente utilizar um modo k , ou ser uma variável discriminante à qual se associa a decisão do utente: toma o transporte k ou escolhe a sua alternativa consoante $z > z_0$, ou $z < z_0$.

Na **análise discriminante** estratifica-se a população utente do sistema de transportes em dois grupos utilizadores de modos concorrentes .

A *função discriminante* é [Merlin]:

$$Z_i = a_0 + \sum_j b_{ij} f_j (x_k, x'_k) \quad (5-16)$$

sendo $f_j (x_k, x'_k)$ uma função da característica j dos modos k e k' .

Um indivíduo i escolherá o modo k se o seu discriminante $Z_i > Z_0$, e o modo alternativo se $Z_i < Z_0$.

As análises baseadas numa função normal de Gauss assentam no pressuposto de que a probabilidade de um indivíduo i optar por um modo de transporte k (é atraído para) segue aquela distribuição.

$$p_i(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_i(k)} e^{-\frac{1}{2}u^2} \cdot du \quad (5-17)$$

sendo $z(k)$ função das características do utente e do modo k .

A análise logística assenta na hipótese de que a probabilidade do indivíduo i escolher um modo k segue uma função de distribuição logística:

$$p_i(k) = \frac{e^{z_i(k,k')}}{1 + e^{z_i(k,k')}} \quad (5-17)$$

O tratamento pela análise logística revela sobre os anteriores algumas vantagens [Merlin]:

- Formulação mais directa e mais simples do que recorrendo à distribuição de Gauss;
- Não está limitado a dois modos de transporte alternativos, podendo estender-se para maiores repartições de escolha;

5.6 A ESCOLHA DO ITINERÁRIO.

A esta questão interessa essencialmente a repartição previsional do tráfego na rede viária, pelos diversos itinerários entre nós dessa rede.

A afectação visa obter dois tipos de respostas distintas, mas complementares:

- Repartir o tráfego pelos diversos itinerários sem considerar eventuais restrições de capacidade;
- Idem, sujeito às restrições de capacidade.

Da comparação dos dois resultados resulta a identificação de eventuais melhoramentos necessários nas infra-estruturas.

Destes trabalhos resultaram as primeiras formulações para estimar o valor do tempo λ .

[Dawson] propõe a seguinte relação:

$$\lambda = \frac{[P + C \cdot (L_1 - L_2)]}{(t_1 - t_2)} \quad (5-18)$$

enquanto [Claffey] apresenta o modelo logístico

$$\log \left(\frac{z}{1-z} \right) = e^{P - C(L_2 - L_1) - \lambda(t_2 - t_1) + (a_2 - a_1) - \mu \Delta V} \quad (5-19)$$

tendo as variáveis os seguintes significados:

P- portagem

C- custo de transporte por unidade de distância percorrida (a percorrer),

L₁, L₂- distâncias pelo percursos 1 e 2

t₁, t₂ - tempos de percurso,

a₁, a₂ - custos totais de sinistralidade de cada itinerário,

μ- valor percebido dos ganhos de velocidades,

ΔV- diferença total dos ganhos/percas de velocidade entre os itinerários alternativos.

μ e λ - coef. estimados experimentalmente.

São métodos de "puro custo", não levam em conta o nível de rendimento dos utentes e pressupõem atitudes racionais perante todos os elementos do custo.

A afectação do tráfego aos diferentes itinerários de uma rede viária, implica o conhecimento das condições nominais de circulação em cada um dos diversos troços (tempos de percurso e volumes de tráfego).

Uma expressão-tipo utilizada para *avaliar o tempo de percurso* é a seguinte (Fórmula do BPR) [Khisty, p.460-461]:

$$T_v = T_0 \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\frac{V}{C} \right)^\beta \right] \quad (5-20)$$

sendo

T_v - duração do trajecto com um volume de tráfego V

T₀- duração do trajecto no "limite de fluidez máxima" ou

"condições de tráfego zero"= T_cx0.87

V- Volume de tráfego (n° veiculos/unidade de tempo/ quilómetro de via);

C- Capacidade efectiva da via (0.75x Volume de saturação).

As duas metodologias mais utilizadas nos problemas de afectação são do tipo **tudo ou nada** (todo o tráfego é afectado ao itinerário mais rápido), e as **curvas de afectação** [BPR].

[Irwin] num estudo sobre a rede viária de Toronto, propôs a seguinte fórmula:

$$t_{ij}^k = \frac{(T_{ij}^k)^{-\beta}}{\sum_k (T_{ij}^k)^{-\beta}}, \quad (5-21)$$

(T_{ij}^k) - tempo de percurso entre (i,j) pelo itinerário k, e β é um parâmetro a estimar.

Em ambas as técnicas as restrições de capacidade impostas obrigam a adoptar procedimentos iterativos, recalculando em cada ciclo os novos valores da velocidade.

Para velocidades diferentes resultam diferentes custos globais, que por sua vez interferem na afectação do itinerário e na escolha modal.

TEORIA ECONÓMICA DA ACESSIBILIDADE

6.1 ASPECTOS FUNDAMENTAIS.

A satisfação que um residente numa dada zona obtém a partir das deslocações que realiza no seu meio urbano depende da qualidade da oferta de serviços de transporte à sua disposição e também do interesse intrínseco dos destinos que tem possibilidade de atingir.

Perante um sistema de transportes homogéneo as possibilidades de um utente satisfazer determinada necessidade crescem com a quantidade dos destinos que tenha possibilidades de atingir e o interesse dos possíveis destinos cresce com a qualidade da oferta disponível: o nº de empregos oferecidos traduz a probabilidade de o utente encontrar um que lhe interessa.

A "acessibilidade" do utente à satisfação de uma determinada necessidade cresce com a oferta e decresce com os "custos de acesso".

Assim, para um residente de uma zona i em procura de um local de trabalho, um indicador da acessibilidade ao emprego pode representar-se por [Koenig]:

$$A_i = \sum_j E_j \cdot k_{ij} \quad (6-1)$$

E_j - nº de empregos susceptíveis de serem oferecidos na zona j .

k_{ij} - coef. função do tempo:

$$k_{ij} = e^{-\frac{c_{ij}}{x_0}} \quad (6-2)$$

$$A_i = \sum_j E_j \cdot e^{-\frac{c_{ij}}{x_0}} \quad (6-3)$$

Este indicador A_j reflete as condições de transporte C_{ij} e também a variedade da escolha oferecida pelas estruturas urbanas E_j .

A base teórica do raciocínio empírico precedente assenta nos dois pressupostos seguintes:

a) O utente comporta-se racionalmente, ie, otimiza a utilidade líquida do transporte.

Assim, no acesso ao emprego, procura maximizar a diferença entre o salário e o custo generalizado anual de transporte.

b) O utente avalia a probabilidade de o emprego obtido numa dada zona j , ter um interesse elevado, médio, baixo.

A **utilidade líquida** que o utente de uma zona i retira da utilização de um dado meio de transporte para aceder à satisfação de uma dada necessidade numa zona j , é a **maior que pode obter de entre todos os destinos possíveis de satisfazerem a dita necessidade.**

A utilidade líquida provável pode representar-se por uma expressão do tipo [Koenig, parte 1]

$$U_i = X_0 \cdot \log A_i + Cte \quad (6-4)$$

6.2 BASES DA TEORIA DA ACESSIBILIDADE URBANA (TA).

As bases da *T.A.* assentam na insuficiência dos indicadores utilizados (até ao início da década de 70) para avaliar o nível do serviço oferecido pelos sistemas de transportes (urbanos) aos utentes.

A avaliação dos Sistemas de Transportes (S.T.) baseava-se nos chamados *indicadores de consumo*, que não permitiam distinguir dois factores cruciais, e antagónicos, associados a uma deslocação urbana: *os factores de motivação e os factores resistentes*.

De entre os indicadores de consumo utilizados são de referir os gastos em transportes ou o tempo total consumido nas deslocações urbanas, avaliados para o universo da população servida por dado modo ou infra-estrutura de transporte ou ainda referida a um determinado nível de rendimento/extracto social.

Este tipo de indicadores permitiam estabelecer como objectivo exclusivo da planificação o de reduzir o custo generalizado das deslocações urbanas, ignorando o valor intrínseco dessas deslocações, percebido pelo utente; de onde advinham com frequência contradições nos resultados.

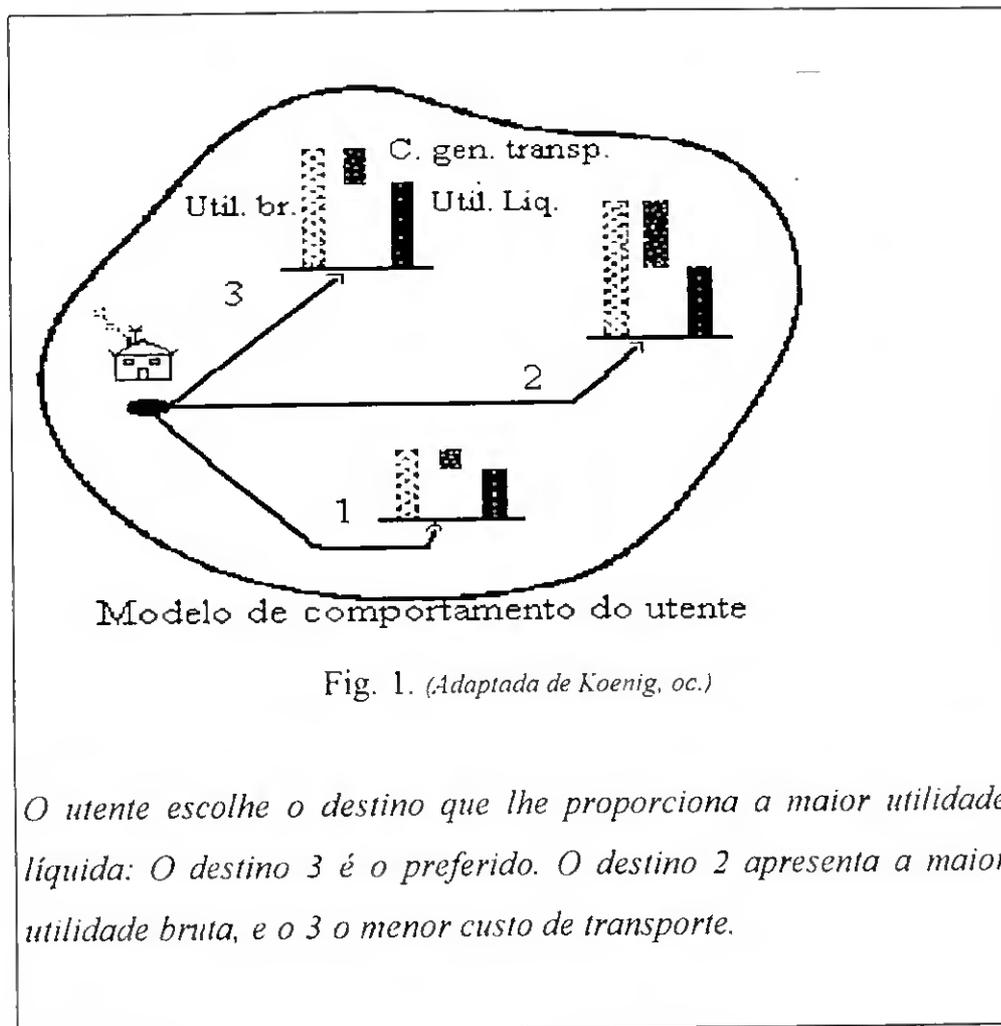
A teoria da acessibilidade considera o efeito simultâneo dos factores resistentes (custo e tempo) e dos factores de motivação (interesse apresentado pela deslocação).

A satisfação final que um utente obtém numa dada deslocação é a medida da diferença entre o "valor" (interesse) intrínseco que o destino lhe oferece e o "custo" do transporte para o atingir.

De acordo com os pressupostos admitidos (comportamento racional) o utente associa a cada destino que tem possibilidades de atingir uma dada "utilidade bruta" e avalia todos os que podem satisfazer-lhe determinada necessidade calculando para cada um a respectiva utilidade líquida, pela diferença entre a

utilidade bruta e o custo generalizado do transporte para o atingir, e escolhe o que lhe maximiza esta diferença.

Pela TA procura avaliar-se a utilidade associada ao acesso dos utentes aos diversos destinos (pontos de interesse) de um sistema urbano utilizando um dado sistema de transportes.

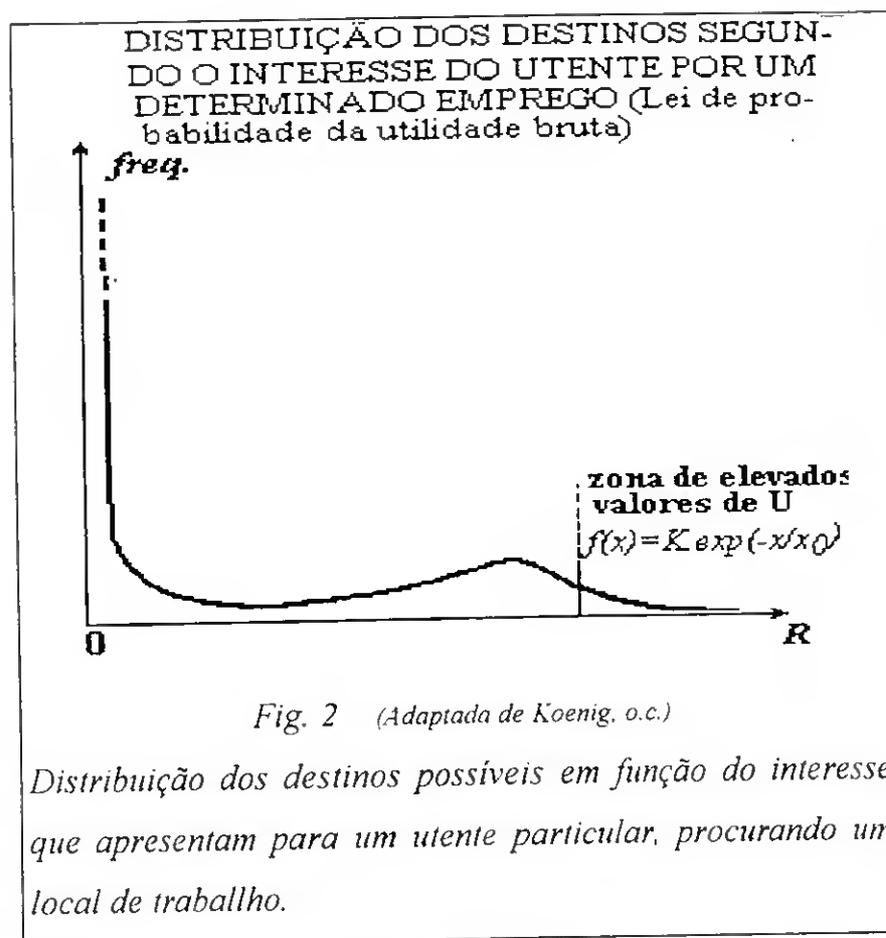


Como não é possível conhecer, na prática, a utilidade bruta associada a cada destino, avalia-se a utilidade média provável obtida por um utente de determinadas características socio-económicas, residente numa dada zona, a

partir da repartição por níveis de interesse (baixo, médio e alto) dos destinos possíveis.

A utilidade bruta que um determinado utente associa a um destino qualquer tomado ao acaso, é uma variável aleatória (x) com densidade de probabilidade⁷:

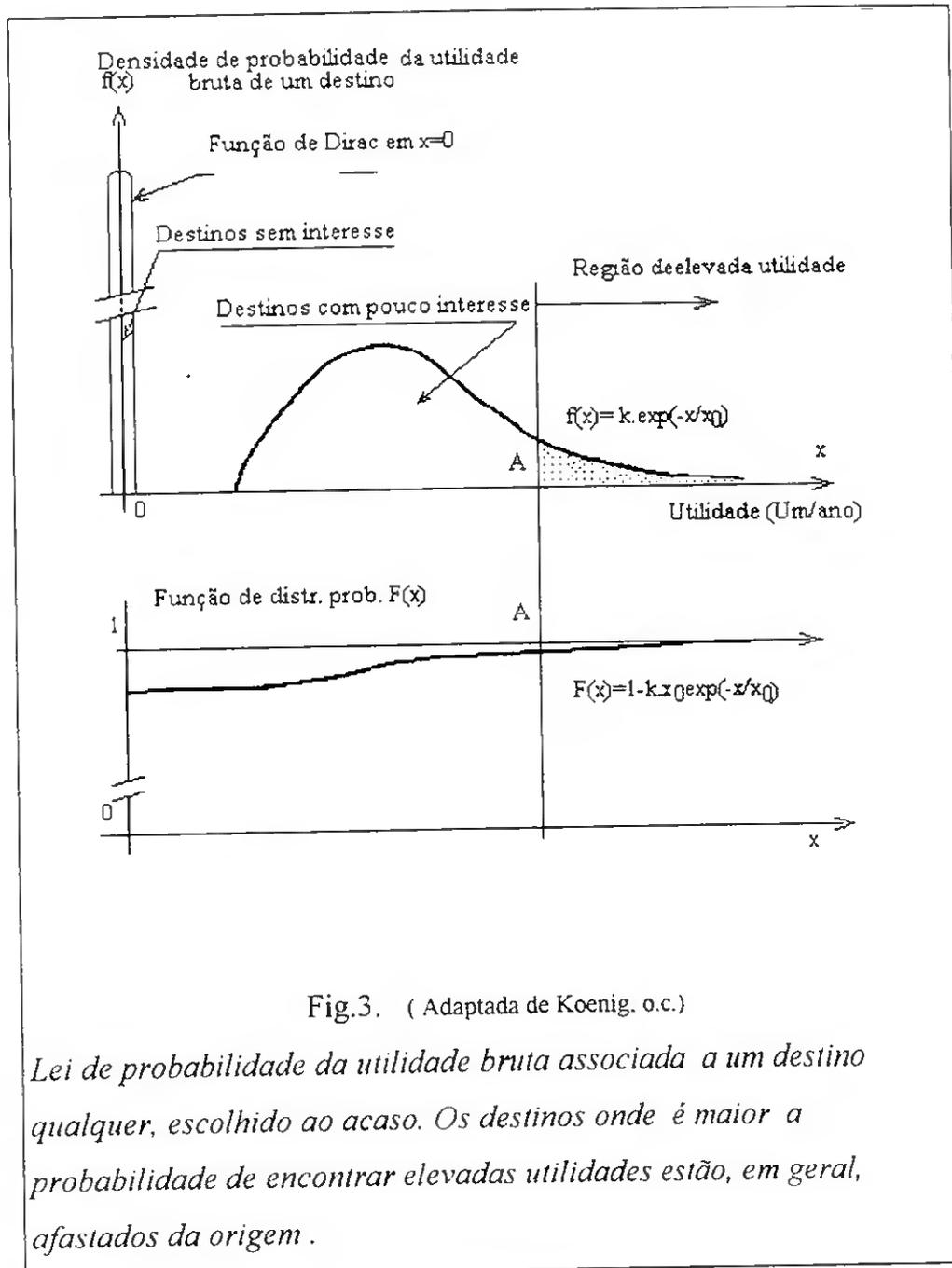
$$f(x) = k \cdot e^{-\frac{x}{\theta}} \quad (6-5)$$



Por primitivação de (6-5) obtém-se a F.D.P. da utilidade bruta R:

⁷ - Ver parágrafo " Lei de probabilidade associada a R"

$$F(x) = 1 - k \cdot x_0 \cdot e^{-\frac{x}{x_0}} \quad (6-6)$$



6.3 AVALIAÇÃO DO SERVIÇO PRESTADO AO UTENTE : O ACESSO AOS LOCAIS DE TRABALHO.

6.3.1 CÁLCULO DA UTILIDADE.

A utilidade líquida média que um utente residente numa zona i , obtém pelo acesso a um local de trabalho, é dada por ⁸:

$$\bar{U}_i = x_0 \cdot \log A_i + C_0 \quad (6-7)$$

$$\text{sendo } A_i = \sum_{j=1}^n E_j \cdot e^{-\frac{c_{ij}}{x_0}} \quad (6-7a)$$

E_j - nº de empregos na zona j

n - nº de zonas

c_{ij} - custo generalizado anual das deslocações entre a zona do domicílio dos utentes e a zona dos empregos j .

x_0 - coeficiente de distribuição da utilidade bruta.

A constante C_0 só depende das características sócio-económicas do utente considerado: $C_0 = x_0 \cdot [\log(kx_0) + C]$, $C > 0.557$ (const. de Euler) [Koenig, pag. 10-11].

A expressão (7-7) representa a *relação fundamental da teoria da acessibilidade* e mede a utilidade final oferecida pelo sistema urbano ao utente considerado; permitindo as seguintes considerações [Koenig]:

⁸ - A utilidade líquida é uma VA. Obtém-se a partir da utilidade bruta de cada destino possível, subtraindo a cada um os respectivo custo de transporte, e escolhendo o valor máximo resultante. O valor médio desta VA é dado por (3), e a var. $\text{VAR}(U_i) = \Pi^2 / 6 X_0^2$.

- a- A_j é o indicador de acessibilidade aos empregos, e caracteriza a liberdade de escolha do utente. Representa o número de destinos possíveis, em função de um factor de atenuação (custo de transporte). A satisfação do utente (económica) não é proporcional ao indicador de acessibilidade, mas ao logaritmo de A_j .
- b- A expressão permite avaliar a influência das condições de transporte e da estrutura do sistema urbano sobre o nível de serviço prestado ao utente.
A utilidade \bar{U}_j cresce com a melhoria do sistema de transportes (c_{ij} a decrescerem) e com o aumento de E_j .
Se E_j for multiplicado por e ($e = 2.7$) a utilidade de acesso aos empregos cresce x_0 .
- c- Revela que a liberdade de escolha tem um preço.

6.4 LEI DA PROBABILIDADE DA UTILIDADE BRUTA ASSOCIADA A UMA DESLOCAÇÃO.

Esta lei só é definida para as zonas de utilidade elevada.

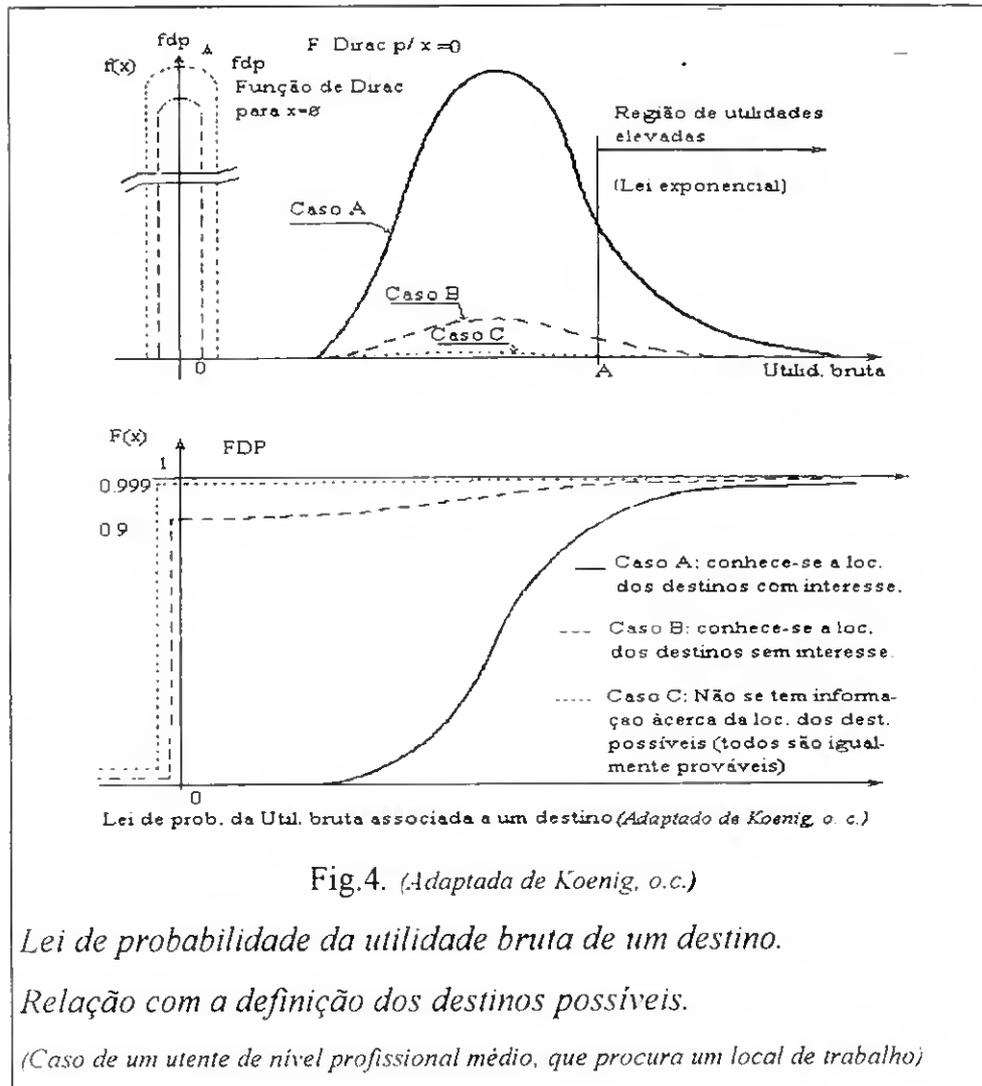
A utilidade líquida provável U'_i , que um utente pode obter pelo acesso aos bens e serviços que o sistema urbano lhe proporciona, é a maior de entre todos os destinos possíveis.

Para um utente da zona i :

$$U'_i = x'_0 \cdot \log A'_i + C \quad (6-8)$$

$$\text{com } A'_i = \sum_j E'_j e^{-\frac{c_{ij}}{x'_0}} \quad (6-8a)$$

c_{ij} é o custo generalizado de deslocação entre i - j (ida e volta);
 A'_j é a acessibilidade gravitacional aos diferentes destinos da zona i ,
sendo E'_j o número de destinos possíveis na zona i .



Agrupando as diversas motivações que levam o utente a deslocar-se numa única designada por "motivações não ligadas ao trabalho", e considerando a utilidade média associada a todos os utentes de uma zona e categoria sócio-económica como "zero de referência"; a utilidade líquida obtida por um utente particular é:

$$U'_i = x'_0 \cdot (\log A'_i - \overline{\log A'_i})^9 \quad (6-9)$$

Representa diferença entre a utilidade obtida por um utente particular (p. ex. os residentes de uma freguesia rural) e a utilidade média obtida pelos utentes dessa região com o mesmo nível de rendimento, pelo acesso a bens e serviços.

A diferença de utilidade significa uma variação do rendimento do utente em relação à média da região, devido ao facto de se deslocar em condições melhores ou piores do que a média.

Para um mesmo nível de rendimento a utilidade líquida é maior ou menor consoante o utente acede com menores ou maiores custos generalizados aos destinos onde procura a satisfação das suas necessidades de bens e serviços.

6.5 UM INDICADOR ECONÓMICO GLOBAL

Agregando os indicadores de utilidade dados pelas expressões (6-7) [acesso ao trabalho] e (6-9) [acesso a bens e serviços], obtém-se um indicador da eficiência económica global que um sistema de transportes (ou um sistema urbano) proporciona a cada utente particular.

Assim a utilidade global de um utente de uma zona i é dada por [Koenig]

$$U_i = \overline{U}_i + U'_i \quad (6-10)$$

$$U_i = x_0 \cdot \log A_i + N \cdot x'_0 (\log A'_i - \overline{\log A'_i}) \quad (6-10a)$$

N é o número de deslocações anuais por motivos "não trabalho" efectuadas pelos membros do agregado familiar do utente.

⁹- $\overline{\log A'_i}$ é a média de $\log A'_i$ para todo o aglomerado/zona em estudo.

A partir do indicador global são possíveis análises sectoriais por diferentes motivações de deslocação, por categoria socio-económica dos utentes; podendo-se quantificar as consequências económicas de desigualdades sociais entre os residentes de zonas bem e mal servidas de transportes, ou avaliar o nível de competitividade dos TP relativamente ao transporte individual.

Faz pouco sentido o cálculo da diferença entre dois valores do indicador A_i (mas sim de U_i) pelo que, na prática utilizam-se indicadores derivados N^{Θ}_i (nº de destinos a menos de Θ minutos de i).

6.6 APLICAÇÕES À PREVISÃO DO TRÁFEGO, AO URBANISMO E AOS SISTEMAS DE TRANSPORTES.

6.6.1 GERAÇÃO DE TRÁFEGO.

Na aplicação dos modelos clássicos a primeira fase consiste em calcular o tráfego gerado/captado por uma dada zona. Este volume é função de diversas variáveis sócio-económicas da população abrangida: número de postos de trabalho, rendimento de cada agregado familiar, taxa de motorização, etc.

Entretanto o número de deslocações dos utentes também depende do nível do serviço oferecido pelo sistema de transportes e da qualidade da oferta de bens.

Os indicadores clássicos (velocidade e duração média das deslocações) não são adequados para avaliar o nível global do "serviço" oferecido aos utentes.

Os indicadores de acessibilidade, ao permitirem avaliar simultaneamente o sistema de transporte (custo generalizado) e a qualidade da oferta de cada destino (número e qualidade das oportunidades), constituem uma variável explicativa adequada á geração de tráfego.

6.6.2 DISTRIBUIÇÃO DE TRÁFEGO.

A probabilidade P_{ij} de que o melhor destino procurado por um utente da zona i se encontre numa dada zona j é dada por [Koenig] :

$$P_{ij} = \frac{E_j \cdot e^{-\frac{c_{ij}}{x_0}}}{\sum_j E_j \cdot e^{-\frac{c_{ij}}{x_0}}} \quad (6-11)$$

6.6.3 ANÁLISE DE TENDÊNCIAS DE URBANIZAÇÃO.

Os indicadores de acessibilidade representando o nível do serviço oferecido aos utentes de uma dada zona urbana, são também adequados para avaliar a propensão para novos utentes aí se estabelecerem.

Assim, através de cartas de acessibilidade podem avaliar-se os impactos esperados de diferentes variantes de uma infra-estrutura de transportes sobre o sistema urbano.

A probabilidade de um novo utente se fixar numa dada zona i é dada por:

$$P_i = \frac{O_i A_i \cdot e^{-\frac{c_i}{x_0}}}{\sum_j O_j A_j \cdot e^{-\frac{c_j}{x_0}}} \quad (6-12)$$

O_i = Número de locais disponíveis para um novo alojamento;

A_i = Acessibilidade aos locais de trabalho (se a facilidade de acesso ao emprego for a principal razão da escolha);

C_i = Custo de instalação corrigido por um factor de localização (positivo para uma localização melhor do que a média da zona, negativo no caso contrário), expresso em UM/ano.

6.7 A LEI DE PROBABILIDADE DA UTILIDADE BRUTA R ASSOCIADA A UM DESTINO.

Uma parte dos destinos (locais de trabalho) não têm utilidade para os utentes, seja por estarem ocupados ou por não terem valor intrínseco. A experiência revela que para um utente particular 90% dos destinos possíveis não têm interesse e que para os restantes 10%, onde a utilidade esperada apresenta valores superiores a um mínimo aceitável A , a f.d.p. é uma exponencial decrescente [Koenig, parte 2] :

$$f(x) = k \cdot e^{-\frac{x}{x_0}} \quad (\text{para } x > A) \quad (6-13)$$

sendo a função de distribuição de probabilidade da utilidade bruta R (FDP) dada por

$$F(x) = 1 - \int_x^{\infty} f(x) dx \Rightarrow F(x) = 1 - k \cdot x_0 \cdot e^{-\frac{x}{x_0}} \quad (x > A) \quad (6-14)$$

onde x_0 e k são parâmetros a ajustar para cada motivo de deslocação considerado.

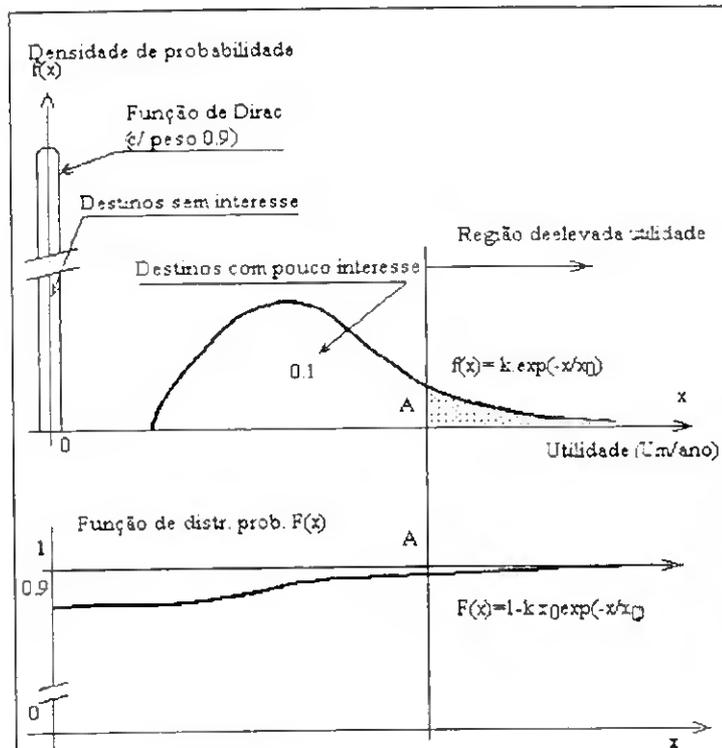


Fig.5. (Adaptada de Koenig, o.c.)

Lei de probabilidade da utilidade bruta associada a um destino. Cerca de 90% dos destinos possíveis, não representam mais do que 10% dos que apresentam valores aceitáveis da utilidade (no caso do utente que procura um emprego).

A Utilidade final líquida média dos destinos com interesse esperada pelo utente residente numa dada zona i , $E(U)$, é a mesma independentemente do grau de conhecimento quanto ao nível de interesse apresentado pelos diversos destinos, e dada por [Koenig, p.36-37]:

$$E(U) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot dF(x) \quad (6-15)$$

$$\text{Com } F(x) = \prod_{h=1}^E \left[1 - kx_0 e^{-\frac{x - c_h}{x_0}} \right] \quad \text{e} \quad A_i = \sum_j E_j \cdot e^{-\frac{c_{ij}}{x_0}}$$

Pelo desenvolvimento de (6-15) obtém-se:

$$E(U_i) = \bar{U}_i = x_0 \cdot [\log A_i + \log(kx_0) + C] \quad (6-15a)$$

onde:

c_{ij} = custo generalizado de transporte entre i-j; e

$C \cong 0.577$ (Constante de Euler)

A expressão anterior expressa o resultado fundamental da teoria da acessibilidade:

$$\bar{U}_i = x_0 \cdot \log A_i + K \quad (6-16)$$

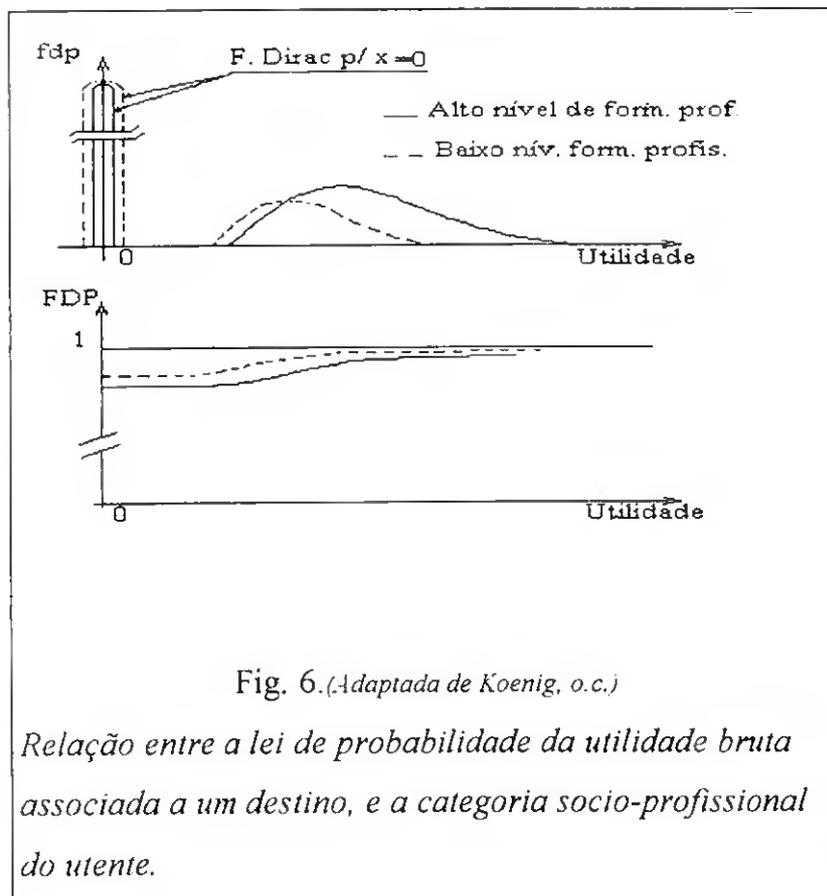
A constante K traduz as condições sócio-económicas do utente considerado (ie, de x_0 e de k).

A probabilidade de um dado destino satisfazer uma determinada necessidade de um utente não é independente da categoria sócio-profissional (CSP) do utente (no caso da procura de um local de trabalho): o universo da escolha é diferente caso o utente seja um trabalhador qualificado ou um indiferenciado.

A lei de probabilidade sofre para cada caso uma translação homóloga à utilidade associada a cada destino.

A utilidade líquida final U que um utente de um sistema urbano pode obter pela satisfação das suas necessidades de bens e serviços aos quais acede utilizando o

sistema de transportes, é a mais elevada das utilidades líquidas u_h oferecidas pelos diversos destinos h que lhe estão acessíveis.



6.8 ALGUNS RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DAS LEIS DE PROBABILIDADE.

A partir das expressões (6-15) e (6-15a), com $kx_0 = 1$ obtém-se

$$E(U_i) = \bar{U}_i = x_0 \cdot [\log A_i + C] \quad (6-17)$$

A partir dos resultados anteriores a utilidade bruta R que um utente do sistema urbano com residência fixa na zona i obtém de um emprego k , caracteriza-se pelas funções fdp e FDP de u_k [Koenig]:

$$f_k(x) = \frac{1}{x_0} \cdot \frac{-x + c_k}{x_0} = \frac{a_k \cdot z(x)}{x_0} \quad (6-18)$$

e

$$F_k(x) = 1 - a_k \cdot z(x) \quad (6-19)$$

$$\text{com } a_i = e^{-\frac{c_i}{x_0}} \quad \text{e} \quad z = z(x) = e^{-\frac{x}{x_0}}$$

A utilidade global líquida U_i é a maior das utilidades u_k oferecidas pelos E empregos dessa zona acessíveis a partir de i :

$$F(x) = \prod_{k=1}^{k=E} F_k(x) = \prod_{k=1}^{k=E} \left[1 - e^{-\frac{x - c_k}{x_0}} \right] = \prod_{k=1}^{k=E} [1 - a_k \cdot z(x)] \quad (6-20)$$

Para todos os empregos das j zonas acessíveis a partir de i :

$$F(x) = \prod_{j=1}^n \left[1 - e^{-\frac{x+c_j}{x_0}} \right]^{E_j} = \prod_{j=1}^n \left[1 - a_j \cdot z(x) \right]^{E_j} \quad (6-21)$$

em que $a_j = e^{-\frac{c_j}{x_0}}$ é o factor de acessibilidade de cada zona.

Se os E empregos de j acessíveis a partir de i estissem à mesma distância, equivalia a ter um *custo equivalente* ζ idêntico para todos (**hipótese reduzida-HR**) [Koenig] :

Neste caso a utilidade líquida V_i oferecida a um residente de $c_i = \zeta$ é:

$$G(x) = \left[1 - e^{-\frac{x+\zeta}{x_0}} \right]^E = [1 - \alpha \cdot z(x)]^E \quad (6-22)$$

Verifica-se que¹⁰ :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 < z(x) = e^{-\frac{x}{x_0}} < 1 \\ \alpha = \frac{e}{E} \sum_{i=1}^E a_i \end{array} \right. \Rightarrow G(x) \cong F(x) \quad (6-23)$$

São também equivalentes as seguintes relações

$$\alpha = \frac{1}{E} \cdot \sum_{j=1}^n E_j \cdot a_j \quad (6-24a)$$

$$E \cdot e^{-\frac{\zeta}{x_0}} = \sum_{i=1}^E e^{-\frac{c_i}{x_0}} \quad (6-24b)$$

$$E \cdot e^{-\frac{\zeta}{x_0}} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot e^{-\frac{c_i}{x_0}} \quad (6-24c)$$

¹⁰- A hipótese que considera todos os destinos localizados à mesma distância de i (custo de deslocação equivalente) designa-se por "Hipótese reduzida". com a FDP de U dada por G(x). Para cada transformação verifica-se que $G(x) > F(x)$, sendo $G(x) - F(x) < e^{-1000}$

6.9 VERIFICAÇÃO DO MODELO GRAVITACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TRÁFEGO.

Se considerarmos a região a estudar composta por n zonas origem-destino, cada zona i tendo E_i destinos ($\sum_{i=1}^n E_i = E$), a FDP da utilidade líquida proporcionada pelos E_i destinos da zona i é dada por:

$$F_i(x) = \left[1 - a_i \cdot e^{-\frac{x}{x_0}} \right]^{E_i} \quad (6-25)$$

com $a_i = e^{-\frac{c_i}{x_0}}$ e c_i = custo anual de transporte $i \leftrightarrow j$.

Um utente residente em i escolherá aí o seu local de trabalho se a utilidade líquida proporcionada for superior à de qualquer outro local em toda a região a que tem acesso.

A probabilidade de um residente em i escolher um destino (local de trabalho) em i é dada por [Koenig]

$$P_i = \frac{E_i \cdot a_i}{\sum_j E_j \cdot a_j} = \frac{E_i \cdot a_i}{E \cdot \alpha} \quad (6-26)$$

com erro relativo inferior 10^{-3} , e

$$\alpha = \frac{1}{E} \sum_{k=1}^E a_k$$

(média dos índices a_k dos E destinos da região).

A expressão (7-26) traduz o pressuposto base do modelo gravitacional de que a distribuição de tráfego é proporcional ao número de oportunidades oferecidas (E) e inversamente proporcional à um factor de atrito entre zonas.

6.9.1 RESTRIÇÕES

A distribuição dos utentes (activos) de uma zona i pelas zonas j é proporcional à qualidade da oferta dessas zonas, ie:

$$\lambda_{ij} = E_j \cdot e^{-\frac{c_{ij}}{x_0}} \quad (6-27)$$

e o número de residentes em i que são atraídos para trabalhar em j é dado por:

$$t_{ij} = H_i \cdot A_i \cdot E_j \cdot \lambda_{ij} \quad i, j = 1, \dots, n \quad (6-28)$$

As restrições impostas ao sistema de equações anterior são:

$$\begin{cases} \sum_j t_{ij} = A_i \\ \sum_i t_{ij} = E_j \end{cases} \quad (6-29)$$

Sendo:

λ_{ij} = factor de condutância entre i - j

E_j = nº de destinos da zona j (nº de empregos)

c_{ij} = custo de transporte i - j .

H_i = coef. de proporcionalidade

A_i = nº de "emissões" de i

6.10 DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO X_0

A função de distribuição gravitacional da forma exponencial é a mais adequada para calcular o volume de deslocações origem-destino¹¹, como função do tempo-custo de viagem:

¹¹ - V. 2.2.2

$$f(t) = e^{-\alpha \cdot t_{ij}} \quad (6-30)$$

Na teoria da acessibilidade utiliza-se

$$f(t) = e^{-\frac{c_{ij}}{x_0}} \quad (6-30a)$$

sendo c_{ij} o custo generalizado de transporte para as deslocações pendulares domicílio-local de trabalho, que depende de:

- a) número de deslocações anuais - N
- b) da valorização que o utente faz do tempo de viagem - θ
- c) da distância percorrida - d_{ij}
- d) da tarifa ou custo médio de cada quilómetro percorrido - γ
- e) de um coeficiente característico do modo de transporte utilizado
- f) (grau de conforto) - k.

c_{ij} é dado por:

$$c_{ij} = N \cdot (\theta \cdot K \cdot t_{ij} + \gamma \cdot d_{ij}) \quad (6-31)$$

$$c_{ij} = N \cdot (\theta \cdot K \cdot t_{ij} + \gamma \cdot v \cdot t_{ij}) \quad (6-31a)$$

Destas expressões tira-se

$$\frac{c_{ij}}{x_0} = \alpha \cdot t_{ij} \Rightarrow \frac{c_{ij}}{t_{ij}} = \alpha \cdot x_0$$

E por substituição

$$x_0 = \frac{N (K \cdot \theta + \gamma \cdot v)}{\alpha} \quad (6-32)$$

6.11 CÁLCULO E REPRESENTAÇÃO DOS INDICADORES DE ACESSIBILIDADE

Definiremos cada categoria de utentes por:

- a) Características sócio-económicas (k , x_0 , τ - atractividade do emprego, salário de referência e valor do tempo), e por
- b) Possibilidades de acesso aos diferentes modos de transporte (coef. de acessibilidade e de desconforto k_m)

Para o utente p que seleccionou um dado destino, tem-se:

- a) A utilidade líquida da deslocação $U(p)$
- b) A utilidade bruta pretendida com a deslocação $R(p)$
- c) O custo generalizado da deslocação $c(p)$

$$U(p) = R(p) - c(p) \quad (6-33)$$

$$c(p) = k(p) \cdot \tau(p) \cdot \theta(p) + \zeta(p) \quad (6-34)$$

sendo

$k(p)$ = coef. de desconforto para o trajecto considerado

$\tau(p)$ = valor do tempo

$\theta(p)$ = tempo de trajecto

$\zeta(p)$ = puro custo da deslocação

Para a zona i , com $N_i = \sum_j n_{ij}$ utentes de uma determinada categoria,

definem-se as seguintes relações, válidas para cada modo de transporte m :

$$c_{ijm} = k_m \cdot \tau \cdot \theta_{ijm} + \zeta_{ijm} \quad (6-35)$$

$$t_{ijm} = \frac{1}{\tau} \cdot c_{ijm} = k_m \cdot \theta_{ijm} + \frac{1}{\tau} \cdot \zeta_{ijm} \quad (6-36)$$

θ_{ijm} = tempo de transporte i-j ,

ζ_{ijm} = custo monetário de transporte i-j ;

c_{ijm} = custo generalizado de deslocação i-j,

t_{ijm} = tempo generalizado de deslocação i-j.

Admitindo que o utente considerado adopta um comportamento racional, então

$$c_{ij} = \min(m) c_{ijm} \text{ e } t_{ij} = (c_{ij} / \tau) = \min(m) t_{ijm} \quad (6-37)$$

$$U_i = \frac{1}{N_i} \sum_{p=1}^{N_i} U(p) \text{ (Utilidade líquida média de um utente de i)} \quad (6-38)$$

$$R_i = \frac{1}{N_i} \sum_{p=1}^{N_i} R(p) \text{ (Utilidade bruta média)} \quad (6-38a)$$

$$c_i = \frac{1}{N_i} \sum_{p=1}^{N_i} c(p) = \frac{1}{N_i} \sum_j n_{ij} \cdot c_{ij} \text{ (c.gen. médio)} \quad (6-37a)$$

$$t_i = \frac{1}{N_i} \sum_{p=1}^{N_i} t(p) = \frac{1}{N_i} \sum_j n_{ij} \cdot t_{ij} = \frac{1}{\tau} \cdot c_i \text{ (t. Gen.médio)} \quad (6-39)$$

Extendendo a todo o aglomerado obtém-se para a população abrangida:

$$N = \sum_i N_i$$

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_i N_i \cdot U_i \text{ (Utilidade líquida média)} \quad (6-40)$$

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_i N_i \cdot R_i \quad (\text{Utilidade bruta média}) \quad (6-40a)$$

$$\bar{c} = \frac{1}{N} \sum_i N_i \cdot c_i \quad (\text{custo generalizado médio}) \quad (6-41)$$

$$\bar{U} = \bar{R} - \bar{c} = x_0 \cdot \log \tilde{A} + U_0 - \bar{c} \quad (6-40b)$$

sendo

$$\log \tilde{A} = \frac{1}{N} \cdot \sum_i N_i \cdot \log A_i \quad (6-42)$$

6.12 CÁLCULO DA UTILIDADE LÍQUIDA FINAL

6.12.1 (CÁLCULO DE U_i FIXANDO-SE U_0)

Admitem-se conhecidas as características SEP da categoria do utente considerado:

- características sócio económicas e o custo do tempo
- os modos de transporte acessíveis, e os respectivos coeficientes de desconforto.

	Fórmula de U_i	Convenção adoptada
A	$U_i = \bar{S} - \bar{c} + x_0 \log \frac{A_i}{\bar{A}}$	No acesso aos locais de trabalho considerar $\bar{R} = \bar{S}$ (Salário médio da categoria SEP)
B	$C_i = -U_i = \bar{c} - x_0 \log \frac{A_i}{\bar{A}}$ ou $T_i = \bar{t} - \frac{x_0}{\tau} \log \frac{A_i}{\bar{A}}$	Comparar U_i com \bar{R} . A representação em termos de $U_i - \bar{R}$, equivale a fazer $\bar{R} = 0$ no cálculo de U_i , ie, U_0 assume um valor : $\bar{R} = 0 \rightarrow \bar{U} = -\bar{c}$
C	$U_i = x_0 \cdot \log \frac{A_i}{\bar{A}}$	Calcular $U_i - \bar{U}$, que é equivalente a calcular U_i considerando $\bar{U} = 0$.
D	$U_i = x_0 \cdot \log \frac{A_i}{A^*}$	Significa comparar U_i com a utilidade obtida pelos utentes do mesmo conjunto SEP, cuja acessibilidade é dada por A^* . É equivalente a calcular U_i fazendo $U=0$ para $A=A^*$.
Obs: Adaptado de Koenig, o.c., p.87-93		

**PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO PARA UMA DADA CATEGORIA
SEP DE UTENTES DO SISTEMA URBANO/TRANSPORTES**

	Procedimento	Variáveis a obter	Notas
1	Calcular θ_{ijm} e ζ_{ijm} para cada modo m.	θ_{AP} θ_{TP} θ_{2R} θ_{MP} ζ_{AP} ζ_{TP} ζ_{2R} ζ_{MP}	
2	Fixar, para os modos acessíveis, o custo do tempo τ . e os coef. de desconforto k_m .		k_{AP} , k_{TP} , k_{2R} e k_{MP} .
3	Calcular o custo generalizado c_{ijm} para cada modo m.	C_{AP} C_{TP} C_{2R} C_{MP}	
4	Calcular o custo e o tempo gen. c_{ij} e t_{ij}	$c \rightarrow (c_i)$, $t \rightarrow (t_i)$	$C_{ij} = \min_m c_{ijm}$ $t = \frac{1}{\tau} \cdot c$
5	Calcular a utilidade U_i e o tempo equivalente T_i		
<i>Nota: AP-Automóvel particular, TP- transp. público, 2R- bicicleta, MP- marcha a pé</i>			
<i>Obs: Adaptado de Koenig, o.c., p.94</i>			

BIBLIOGRAFIA

[Adams], W. Adams. " Factors Influencing Transit and automobile Use in Urban Areas". HWRB Bulletin. Citado in [Merlin].

[Allen], Allen, W. B. and alt." Aecessibility Measures of U. S. Metropolitan Areas", Transp. Res. Bolletin, Vol.27B, nº6, p.439-449, 1993.

[Becker], Becker, G.S. (1965) " A Theory of the Allocation Time". Economic Journal, v.75. Citado in [Merlin].

[Bien], G. Bien (1975) "Une Application du Concept d'Utilité à l'Étude des Reseaux de Transports Publics". IRT, Arcueil.

[Bonnafus], Bloy, E., Bonnafus, A., Cusset, M. et Gerardin, B. "Évaluer la Politique des Transports", Económica, Paris, 1977.

[BPR] (1965) "Calibrating and Testing a Gravity Model for any Size Urban Area". USDep. Of Commerce, BPR, Washington DC. Citado in [Easa, b].

[Bromage], Bromage, E.J.(1991)" The Higway Emulator Model. V.4". Central Transp. Planning Staff. Boston, Mas. Citado in [Easa, b].

[CCRA], Anuário Estatístico do Algarve. CCRA, 1994.

[CETUR], Centre d'Études des Transports Urbains. Les Études de Prevision de Traffic en Millieu Urbain- Guide Technique. Ministère des Transports, Bagneux.

[Claffey], Claffey, P. (1961), "Characteristics of Passenger car Travel on Tole Roads and comparable Free Roads". HWR Boletin, nº 306. Citado in [Easa, b].

[Dalvi], Dalvi, M. Q. and Martin, R. M. (1976) " The measurement of Aecessibility: Some Preliminary Results", Transportation, nº 5, p.175-198.

[Dawson], Dawson, R. (1962) " An Analysis ofThe Road Improvement Schemes". London, HMSO, Road Research Tecn. Paper, nº 50. Citado in [Easa, a].

[Easa, a], Said M. Easa, " Urban Trip Distribution in Praticce, I e II", Journal of Transp. Eng., Vol.19, nº6, Nov./Dez. 93.

[Easa, b], Said M. Easa, " Traffic Assignment in Praticce: Overview and Guidelines for Users", Journal of Transp. Eng., vol. 117, nº 6, Nov/Dec.1991.

[CCRA], Anuário Estatístico do Algarve. CCRA, 1994.

[Gray]. Robert H. Gray, "Estimating Gravity Model Parameters: a Simplified Approach Based on the Odds Ratio", Transp. Res. Bolletin, Vol.17B, nº2, p.117-131, 1983.

[Hansen], Hansen, W. G. (1959), "How Aecessibility Shapes Land Use", Citado in [Allen].

[Horowitz], Horowitz, A.J. (1990) " Quick Response System II Reference Manual" (Win ver.), Urban Transp. Studies. Univ. Of Wiscosin. Milwakee, Wis.

[Hutchinson], Hutchinson, B. G. (1974) " Principles of Urban Transport Systems Planning", McGraw-Hill, NY. Citado in [Easa, a].

[IAURP], Institut d'Aménagement et Urbanisme de la Region Parisienne," Études des Divers Facteurs Influençant le Comportement des usagers des Lignes de SNCF de Banlieue". Citado in [Merlin].

[Ingram], Ingram, D.R.(1971) "The Concept of Aecessibility: A Search of Operational Form". Regional Studies, 5, n°2, p.103-107, Jul 1971.

[Irwin], Irwin, N., Sims, L., Mori, B. and Schibula, S. (1989). Transportation Planning Models in Canada. Roads and Transp. Assoc. Of Canada, Ottawa, Ontario.

[Khisty], C. Jotin Khisty (1990), "Transportation Engeneering- An Introduction". Prentice Hall. Englewood Cliffs, NY.

[Koenig], Koenig, I. G. (1975) "Une Theorie de l'Accessibilité Urbaine. Un Nouvelle Outil au Service de l'Amenageur". SETRA, Paris.

[McLynn], McLynn, M. and Watkins, R. (1965)"Multimode Assignment Model", National Bureau of Standards, Whashington.

[McShane], McShane, W. and Roess, R. (1990) " Traffic Engineering". Prentice Hall, Englewood Cliffs, NY.

[Merlin], Merlin, P."Les Méthodes de Planification : La Planification des Transports Urbains", Masson, Paris, 1984.

[Meyer], Meyer, M. and Miller, E. (1984). "Urban Transportation Planning: A Decision Oriented Approach". Mcgraw-Hill, NY.

[Milles], E. Milles, " A Note on the Role of Distance in Migration", Journal of Reg. Science, vol 12, n°3, p.475-478, Dec.72.

[OCDE] (1974) " Besoins de Transports Pour les Communautés Urbaines. La Planification des Transports de Personnes". OCDE, Paris.

[Ortuzar], Ortuzar, J. D. and Willumsen, L. G. (1990). "Modeling Transport". Jhon Willey, NY.

[PDMF], Plano Director Municipal de Faro

[PDMO], Plano Director Municipal de Olhão

[PDMSBA], Plano Director Municipal de S. B. Alportel

[PDML], Plano Director Municipal de Loulé

[Quarmby], Quarmby, D. "A Choice of Travel Mode for The Journey to Work: Some Findings". Journal of Transp. Eng. Planning, vol.3, nº 1, 1967. Citado in [Merlin].

[Ruiter], Ruiter, E.R. (1967), "Towards a Better Understanding of the Intervening Opportunities Model". T. Research, 1(1). p. 45-76. Citado in [Easa, a].

[Stopher], Stopher, P. and Meyburg, A.(1975) " Urban Transportation Modeling and Planning". Lexington Books, Lexington, Mas. Citado in [Merlin].

[Vitorino], Vitorino, Ana Paula. "X" Tese de Mestrado, IST.

[Warner], S. Warner " Stochastic Choice of Mode In Urban Travel: A Study in Binary Choice". Tese. Citado in [Merlin].

[Watson], Watson, P. (1974) " The Value of Time: Behavioral Model of Choice". Lexington Books, Lexinton, Mas.

NCRHP] National Corporation Higway Research Program. USDep. Of Transportation. Citado in [Easa, b].

