

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DA LÓGICA DIFUSA NA
DEFINIÇÃO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS DE EDIFÍCIOS**

AUTOR: PAULO ANDRÉ RABELO ALKMIM

Ouro Preto, setembro de 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DA LÓGICA DIFUSA NA DEFINIÇÃO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS DE EDIFÍCIOS

AUTOR: PAULO ANDRÉ RABELO ALKMIM

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Maria Claret de Gouveia

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construções Metálicas

Ouro Preto, setembro de 2007.

APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DA LÓGICA DIFUSA NA DEFINIÇÃO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS DE EDIFÍCIOS

AUTOR: PAULO ANDRÉ RABELO ALKMIM

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 04 de setembro de 2007, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Ernani Carlos de Araújo (UFOP)

Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro (UFOP)

Profa. Dra. Aline Werneck Barbosa de Carvalho (UFV)

*A meus pais, José Paulo e Maria da Consolação,
à minha esposa Karine e
aos meus filhos Mateus e André.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Ouro Preto que possibilitou a realização deste trabalho;

Ao meu orientador, Antonio Maria Claret, por acreditar e me ajudar nesse novo desafio;

Aos colegas que sempre estavam ao meu lado nos bons momentos de descontração, mas também nos momentos difíceis de indecisão e esforço, ao Adriano pela amizade e apoio desde o começo em especial ao Marquinho por ser o principal responsável por eu ter iniciado nesta jornada, pelo apoio, e por sempre ser um grande amigo;

Aos professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Construções Metálicas que contribuíram muito para o aperfeiçoamento da minha formação;

A José Luis Rangel e a Francisco Lemos pela ajuda e direcionamento nos momentos de indecisão e dúvidas;

À minha esposa e filhos pelo apoio, amor e pela compreensão nos momentos de ausência;

E a Deus, por tudo!

“Tão próximas as leis da matemática estejam da realidade, menos próximas da certeza elas estarão. E tão próximas elas estejam da certeza, menos elas se referirão à realidade”

Albert Einstein

RESUMO

Atualmente, em meio à grande variedade de processos e sistemas construtivos disponíveis no mercado, o profissional da construção civil frequentemente se depara com várias questões do tipo: Qual sistema estrutural é o mais eficiente para o meu empreendimento? Deve ser em aço ou em concreto? Deve ser industrializado ou artesanal, ou deve ser ainda uma combinação de mais de um sistema?

Essas escolhas são de fundamental importância para a eficiência da obra e para o sucesso do empreendimento. É importante salientar que tais definições devem ser feitas antes mesmo do projeto arquitetônico, visto que um bom projeto de arquitetura deve ter sua concepção baseada nos princípios e peculiaridades de cada sistema.

Porém normalmente as respostas para estas perguntas estão apoiadas apenas na própria experiência do profissional ou em simples listas comparativas com vantagens de cada sistema estrutural, que não fornecem informações suficientes para uma avaliação correta de cada uma delas.

Neste trabalho se desenvolveu um modelo de tomada de decisão quanto à definição de sistemas estruturais de edifícios. Este modelo pode orientar o profissional da construção civil na avaliação dos diversos parâmetros que influem na concepção e projeto de edifícios e é capaz de eleger a alternativa de sistema estrutural mais eficiente para um determinado empreendimento com características específicas.

O modelo foi desenvolvido de acordo com os princípios da Lógica Difusa (Fuzzy Logic). Esta lógica é aplicada quando não se tem uma base de dados consistente e precisa. Como vários dos fatores que influem na determinação do melhor sistema estrutural para uma determinada edificação (fatores técnicos, econômicos, construtivos, ambientais e estéticos) estão sujeitos a um alto grau de incertezas e de subjetividade, a análise destes fatores pelos meios tradicionais se torna muito difícil, mas com a aplicação dos métodos da Lógica Difusa, consegue-se obter resultados bastante satisfatórios.

ABSTRACT

In those day's there is many different types of civil construction systems to place trade business. Requests for guidance from several construction workers often came out on questions as: Which structural system is more efficient to my business? It should be made steel or concrete? Which one should one choose: craftsman or manufacturer? May be both systems?

The choice that we make is the most important thing to get successful by the end of the business. The definitions how to establish the project must be taken before the architectural project that is because a good one must is based in concepts and peculiarities in each structural systems.

However, the answers to those questions are based only in the personal experience to the professional or on comparative lists which describe advantages of each structural system. In spite of these lists do not given enough informations to professionals make decisions the way there it should.

As we confront problems (without solutions) there is no viable alternative but to face and solve history's accumulated problems. Solutions must come from research for this reason in this job was developed a ideal of making decisions when we talk about structural building systems. This ideal can guide the professional of civil construction systems to analyze a number of parameters that can influence the conception on building projects and be able to elect an alternative of structural system more efficient to a undertaking which has special characteristics.

The ideal was developed in agreement which the principle of "Fuzzy Logic", this logic is applied when does not have one base of input powerful and preciseness. Several factors can influenced to establish the better structural system for a building (technical, economics, ambiental and constructive factors) and to be subject a high level of doubts and subjective, the analyses of those factors for the traditional ways become more difficulty but applied the Fuzzy Logic we can achieve good results.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO	01
1.1 – Introdução	01
1.2 – Objetivos	05
1.2.1 – Objetivos Gerais	05
1.2.2 – Objetivos Específicos	05
1.3 – Estrutura do Trabalho	06
 CAPÍTULO 2	
A LÓGICA DIFUSA	07
2.1 – Introdução à Lógica Difusa	07
2.2 – Conceitos Básicos	10
2.3 – Sistema de Controle Difuso	12
2.4 – Operações com Conjuntos Difusos	15
2.5 – Características das Funções de Pertinência	17
2.6 – Desfuzificação (Defuzzification to Escalars)	20
2.7 – Variáveis Lingüísticas (Linguagem Natural)	23
2.8 – Lógica Difusa e Teoria da Probabilidade	24
2.9 – Geração de Conhecimento e Base de Dados	27
2.10 – Tomada de Decisão Baseada em Sistemas Difusos	28
2.10.1 – Formas de Imprecisão	28
2.10.2 – Formas de Tomada de Decisão	29

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA	31
CAPÍTULO 4 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS	33
4.1 – Variáveis que Influem no Processo Decisório Relativo à Tomada de Decisão Quanto a Sistemas Estruturais.	33
4.1.1 – Fatores Construtivos	33
4.1.2 – Fatores Econômicos	35
4.1.3 – Fatores Estruturais	37
4.1.4 – Fatores Ambientais	38
4.1.5 – Fatores Arquitetônicos	39
4.1.6 – Fatores de Segurança	40
CAPÍTULO 5 GERAÇÃO DA BASE DE DADOS E CONFIGURAÇÃO DO MODELO DIFUSO	42
5.1 – Definição da Geração de Conhecimento Base de Dados	42
5.1.1 – Base de Dados	44
5.2 – Definição da Forma de Tomada de Decisão e Configuração Geral do Modelo Difuso	45
5.3 – Configuração do Modelo para Definição de Sistemas Estruturais de Edifícios	50
CAPÍTULO 6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO	52
6.1 – Exemplo 01	52
6.2 – Exemplo 02	60

CAPÍTULO 7	
CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
7.1 – Considerações Finais	68
7.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros	71
BIBLIOGRAFIA	73
ANEXOS	77

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

FIGURAS:

Figura 1.1	Possibilidade de intervenção e custos acumulados ao longo da produção de um empreendimento	02
Figura 2.1	Altura segundo critérios nítidos	11
Figura 2.2	Altura segundo critérios difusos	11
Figura 2.3	Homens altos e homens baixos	11
Figura 2.4	Típico modelo de sistema difuso	12
Figura 2.5	Gradação das temperaturas segundo critérios difusos	14
Figura 2.6	Resposta do sistema segundo critérios difusos	14
Figura 2.7	União e intersecção entre os conjuntos A e B	15
Figura 2.8	Complemento do conjunto A	16
Figura 2.9	Elementos de uma função difusa	17
Figura 2.10	Protótipo de uma função difusa	17
Figura 2.11	Função normal	17
Figura 2.12	Função subnormal	17
Figura 2.13	Funções convexas	18
Figura 2.14	Função não convexa	18
Figura 2.15	Intersecção de dois conjuntos convexas	18
Figura 2.16	Intersecção = normal	19
Figura 2.17	União = não convexo	19
Figura 2.18	Forma teórica de uma função de pertinência	19
Figura 2.19	Forma prática de uma função de pertinência	19
Figura 2.20	Conjuntos de cortes alfa	19
Figura 2.21 (a, b, c)	Exemplo de um típico processo fuzzy	20
Figura 2.22	Princípio da máxima pertinência	21
Figura 2.23	Método do centróide	21
Figura 2.24	Método da media ponderada	22
Figura 2.25	Média da máxima pertinência	22
Figura 2.26	Centro da maior área	22

Figura 2.27	Restrições lingüísticas (modificadores das variáveis lingüísticas)	24
Figura 2.28	Função de distribuição de probabilidade para peso de homens adultos	25
Figura 2.29	Função de pertinência para peso de homens adultos	26
Figura 4.1	Variáveis que influem na tomada de decisão em relação à sistemas estruturais de edifícios	41
Figura 5.1	Modelo de tomada de decisão com três variáveis	45

QUADROS:

Quadro 2.1	Algumas áreas de aplicação da lógica difusa em engenharia civil	09
Quadro 5.1	Escala lingüística adotada para a primeira parte do questionário	43
Quadro 5.2	Escala lingüística adotada para a segunda parte do questionário	44

A415a Alkmim, Paulo André Rabelo.
Aplicação dos métodos da lógica difusa à definição de sistemas estruturais de edifícios [manuscrito] /Paulo André Rabelo Alkmim. - 2007.

xiii, 115f.: il., color.; graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Maria Claret de Gouveia.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.
Área de concentração: Construção Metálica.

1. Lógica difusa - Teses. 2. Sistemas difusos - Teses. 3. Otimização estrutural - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – INTRODUÇÃO

Recentemente o Brasil vem passando por um processo de modernização na construção civil, onde uma série de fatores contribuem para o estabelecimento de um ambiente favorável para que estas mudanças ocorram, como a abertura do mercado nacional, a maior estabilidade econômica do país, o processo de globalização, o desenvolvimento de pesquisas tecnológicas por universidades e centros de pesquisa e a maior conscientização de usuários e compradores tornando o mercado extremamente competitivo. Este processo de modernização leva ao surgimento de novas tecnologias e processos construtivos, e tende a mudar os atuais modos de produção e também a visão de projeto dos profissionais.

Em meio à grande variedade disponível desses processos e sistemas construtivos, os profissionais da área de construção civil freqüentemente se deparam com várias questões logo no início do planejamento da obra: Qual sistema estrutural é o mais adequado para este empreendimento? Deve ser em aço ou em concreto? Deve ser um sistema industrializado ou artesanal, ou deve ser ainda uma combinação de ambos os sistemas? Essas escolhas são de fundamental importância para a eficiência da obra e para o sucesso do empreendimento, pois a escolha correta do sistema estrutural e do sistema construtivo pode reduzir substancialmente o custo de um empreendimento e pode, até mesmo, determinar se o investimento é viável ou não. É importante salientar que tais definições devem ser feitas antes mesmo do projeto arquitetônico, visto que um bom projeto de arquitetura deve ter sua concepção baseada nos princípios e peculiaridades de cada sistema, e que uma vez tomada a decisão, qualquer modificação implica em mais gastos. Segundo HELENE (1992) *apud* CASTRO (1999), os custos evoluem em uma progressão geométrica na medida em que se posterga a tomada de decisões ao longo das fases de projeto. HAMMARLUND e JOSEPHSON (1992), *apud*

BAUERMANN (2002), diz que as possibilidades de intervenção diminuem à medida que o projeto passa a ser desenvolvido (figura 1.1), tendendo a serem nulas na etapa da construção.

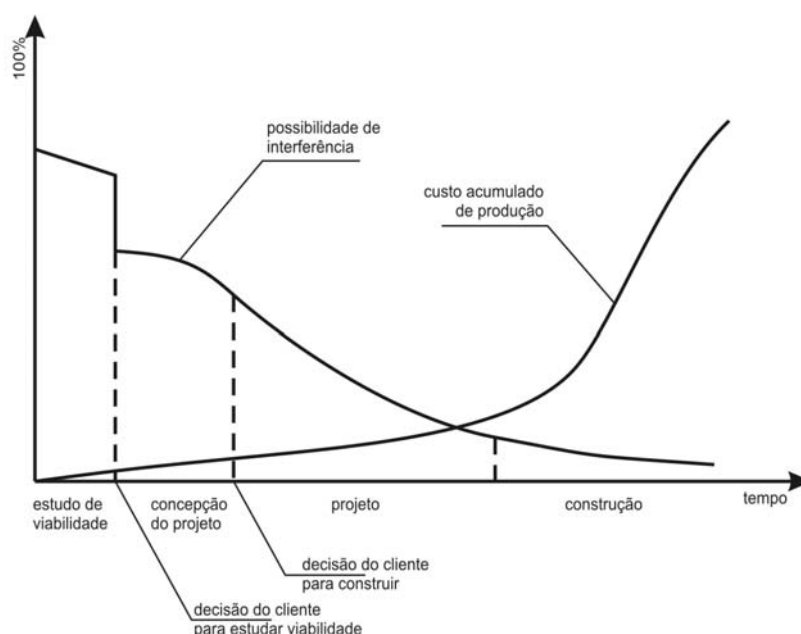


Figura 1.1 – Possibilidade de intervenção e custos acumulados ao longo da produção de um empreendimento de construção.
 Fonte: HAMMARLUND e JOSEPHSON (1992) apud BAUERMANN (2002).

Porém normalmente as respostas para estas perguntas estão apoiadas apenas na própria experiência do profissional ou na simples comparação de extensas listas de vantagens de cada sistema estrutural, que não fornecem informações suficientes para uma avaliação correta de cada uma delas. Atualmente, um outro fator que contribui para influenciar o profissional da construção civil no momento de tomar a decisão quanto ao sistema estrutural a ser adotado é o marketing ou “*lobby*” das empresas que tentam disseminar seus sistemas construtivos a todo custo. No caso dos sistemas estruturais, podemos citar principalmente as concreteiras e as siderúrgicas. Porém, como cada obra tem características muito peculiares, esta maneira de tomada de decisão pode ser falha e colocar em risco o sucesso do empreendimento, além de não ser embasada numa metodologia científica.

“A escolha do sistema construtivo não deve ser uma competição entre os diferentes tipos de estrutura, mas uma decisão com base nas características de cada sistema. E a decisão de qual é o mais adequado, deve passar pela análise do maior número possível de aspectos representativos da obra, priorizando as características mandatórias e também as desejáveis”. (PINHO, 2005)

A princípio, existem algumas características de cada tipo de sistema que são de conhecimento geral dos profissionais, mas que diante de uma análise mais profunda em relação a determinado empreendimento, podem não ser verdadeiras ou simplesmente não serem aplicáveis a determinada obra. Então até que ponto o profissional pode se apoiar nesse “*conhecimento geral*” para tomar suas decisões? Sabe-se que as estruturas em aço são rápidas na execução, mas isso exclui as estruturas de concreto? O concreto pré-moldado é tão rápido quanto o aço. Diante do “*conhecimento geral*”, sabe-se também que estruturas de concreto são indicadas para vãos de até 6 metros e que as estruturas de aço custam mais caro, mas existem opções como o concreto protendido e lajes nervuradas de concreto que vencem grandes vãos sem problemas e, em muitos empreendimentos, a aplicação do aço nas estruturas tem um valor muito inferior ao concreto. Sendo assim, podemos ver que não se deve generalizar e nem restringir a tomada de decisão em relação aos sistemas estruturais a uma análise superficial.

Atualmente em todo o mundo, a engenharia e a computação têm desenvolvido softwares bastante avançados que contemplam diversos tipos de sistemas estruturais e que são capazes de calcular, dimensionar e detalhar edifícios com grande rapidez e eficiência. O projetista define o sistema estrutural a ser adotado (aço, concreto, madeira, misto, etc.), entra com a geometria da estrutura e os parâmetros do projeto e o programa fornece o melhor resultado para um sistema mais eficiente possível. Mas para isso, o tipo de estrutura a ser usado já deve estar definido, e poderia ser que outro sistema estrutural se mostrasse mais eficiente. Além disso, para o projetista fornecer a geometria e os parâmetros de cálculo, o projeto arquitetônico já tem que estar totalmente definido, o que, como já foi dito, exigiria uma pré-definição do sistema

estrutural. Deste modo, vemos que estes softwares são eficientes apenas após o sistema estrutural e o projeto arquitetônico estarem definidos.

Sendo assim, para a definição do melhor sistema estrutural a ser adotado, e tendo em vista as diversas variáveis que intervêm durante o processo de concepção e construção de um edifício, torna-se necessário o desenvolvimento de um modelo ou de uma ferramenta, baseada numa metodologia científica, capaz de dar suporte à tomada de decisão em relação a escolha de um sistema estrutural para um determinado empreendimento e que leve em conta suas características e particularidades, de modo que a obra possa atingir maior eficiência possível.

Diversos fatores influem na determinação do sistema estrutural de uma determinada edificação (fatores técnicos, econômicos, construtivos, ambientais e estéticos), e grande parte deles estão sujeitos a um alto grau de incertezas e de subjetividade. O que torna mais difícil a análise destes fatores pelos meios tradicionais.

Deste modo, a “Teoria da Lógica Imprecisa” ou “Teoria da Lógica Difusa” (Fuzzy Logic Theory) pode ser muito bem aplicada a este caso. Esta lógica é empregada em situações onde os problemas admitem mais de uma solução - como a maioria dos que se apresentam na vida real. Permite analisar separadamente cada uma das variáveis que influem na tomada de decisão e lhes atribuir valores, transformando as incertezas em valores numéricos, os quais podem ser representados graficamente de maneira que se possa chegar a uma fácil interpretação dos resultados obtidos. Além disso a “Lógica Difusa” também é indicada sempre que contamos com um grande número de variáveis que influem em um dado sistema, sendo utilizada para determinar a melhor alternativa dentro deste sistema.

“Sempre que temos alguma incerteza em nossos dados ou em nossas regras, o uso da teoria difusa será uma alternativa de solução atraente”.(XEXÉO, 2002)

1.2 – OBJETIVOS

1.2.1 – OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo que agrupe os critérios mais representativos para a tomada de decisão quanto à seleção do melhor sistema estrutural a ser adotado em um determinado empreendimento com características específicas. Este modelo que poderá orientar o profissional da construção civil, está fundamentado numa metodologia científica baseada nos princípios da “Lógica Difusa” de modo que consegue avaliar os diversos parâmetros que influem na concepção e no projeto de edifícios. Com o uso do modelo o profissional pode eleger o melhor sistema estrutural o que permite chegar a uma proposta mais eficiente, do ponto de vista estrutural, econômico, estético e construtivo. Futuramente, para que o modelo se torne mais eficiente, será necessário que ele seja aperfeiçoado de maneira a agregar outros tipos de sistemas estruturais.

Com este trabalho, introduz-se uma nova linha de investigação na Universidade Federal de Ouro Preto, pois a Lógica Difusa pode ser aplicada nas mais diferentes áreas de conhecimento, como por exemplo, na área de incêndio, estruturas e de conforto ambiental dentre outras, não se restringindo apenas à engenharia, também pode ser aplicada nas áreas biológicas, humanas, econômicas, etc.

1.2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Verificar o “Estado da Arte” no que diz respeito à Teoria da Lógica Difusa;

Criar um questionário para ser submetido a especialistas da área de construção civil para verificar o resultado da aplicação de diferentes sistemas estruturais em diferentes tipologias de edificações de forma que se possa estabelecer os aspectos relevantes de cada uma das variáveis que influenciam no processo de tomada de decisão em relação ao sistema estrutural a ser adotado.

1.3 – ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho organiza-se conforme a estrutura apresentada a seguir:

Capítulo 2 contém uma introdução à Lógica Difusão que se torna necessário pelo fato de ser um assunto ainda incipiente no Brasil e pouco disseminado. Esta introdução é importante inclusive para que se possa entender a metodologia aplicada neste trabalho. Nesta introdução à Lógica Difusa, apresenta-se um breve histórico, mostrando como foi criada e seu desenvolvimento, bem como suas diversas aplicações em várias áreas de conhecimento. Ainda neste capítulo, mostram-se os conceitos básicos de sua utilização, suas propriedades e exemplos simplificados de aplicação.

No capítulo 3, apresenta-se a metodologia aplicada para o desenvolvimento deste estudo, juntamente com suas etapas e fases.

O capítulo 4 contém a definição das diversas variáveis que influem no processo decisório relativo à tomada de decisão quanto a sistemas estruturais de edifícios.

No capítulo 5, mostra-se como foi realizada a obtenção da base de dados (geração de conhecimento), a definição da forma de tomada de decisão e dos valores de entrada, a configuração do modelo difuso propriamente dito, a determinação das funções de pertinência e os processos de fuzzificação e desfuzzificação.

No capítulo 6, o modelo gerado é submetido a uma verificação com dois exemplos, onde são criadas duas situações hipotéticas para dois empreendimentos com características e demandas diferentes. Neste capítulo também são comentados os resultados obtidos.

Finalmente, no capítulo 7, são feitas as considerações finais e são apresentadas as conclusões e também as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

A LÓGICA DIFUSA

2.1 – INTRODUÇÃO À LÓGICA DIFUSA

A teoria da “Lógica Difusa” (Fuzzy Logic) tem sua origem em 1965, quando o matemático Lotfi Zadeh, de Berkeley, apresentou ao mundo seu trabalho intitulado “Conjuntos Difusos”, trabalho esse que mais tarde emprestou seu nome a esta lógica, e que exaltava as virtudes da imprecisão, em contraposição à lógica clássica ou lógica exata baseada nos princípios de Aristóteles.

Na lógica clássica dos conjuntos, um dado elemento em um “universo” ou domínio, pertence ou não a um determinado conjunto. Mas os conjuntos de Zadeh são indefinidos; então, alguns elementos pertencem a esses conjuntos e outros não, e existem ainda outros que pertencem até certo ponto. Assim sua teoria se mostrou como uma nova abordagem para o tratamento de incertezas.

Existem conjuntos que podem ser bem definidos, como é o caso do conjunto dos números naturais: um número pertence ou não a esse conjunto; ou como no caso do conjunto de homens e do conjunto de mulheres. Nestes casos, a lógica clássica pode ser muito bem aplicada, mas é quando nos deparamos com um conjunto que não possui uma fronteira claramente definida ou que seja impreciso, como é o caso do conjunto de homens altos e do conjunto de homens baixos, onde seria o limite entre homens altos e baixos? Se por exemplo fixarmos este limite em 1,80 m estaríamos dizendo que alguém com 1,79 m é baixo? Nestes casos o conceito do “sim e não” da lógica clássica deixa de ser satisfatório e temos que introduzir questões de gradação onde os conjuntos deixam de ser precisos. Outro caso em que a lógica clássica não se apresenta de maneira satisfatória é quando trabalhamos com temperatura, pois não existe um limite definido entre o que é quente e o que é frio, este limite é muito subjetivo. Podemos dizer que a característica fundamental da Lógica Difusa é a possibilidade de poder quantificar as

ambigüidades do pensamento humano, os quais são impossíveis de se expressar com a Lógica Clássica Boleana.

Podemos dizer que a lógica clássica é baseada num sistema binário como, por exemplo, 0 e 1 que correspondem ao sim e não; se uma coisa não é 0, ela tem que ser 1, mas quando passamos para a Lógica Difusa, passam a existir infinitos números entre 0 e 1, podemos ter 0,1; 0,004; 0,5 entre muitos outros, e assim não teríamos apenas o sim e o não como resposta mas o “mais ou menos”, o “só um pouquinho”, o “talvez”, o “depende”, etc. O conceito da Lógica Difusa está na Função de Pertinência $\mu(\chi)$, esta função determina numericamente até que ponto um elemento pertence ou não a um determinado conjunto, ou seja, o grau de pertinência do elemento. Os conjuntos difusos são apropriados para representar noções vagas, frequentemente encontradas no mundo real, como por exemplo, alto, quente, frio, rápido, etc., e é a função de pertinência que define a fronteira destes conjuntos. Assim,

“A principal motivação da teoria dos conjuntos fuzzy é o desejo de construir uma estrutura formal quantitativa, capaz de capturar as imprecisões do conhecimento humano, isto é, como esse conhecimento é formulado na linguagem natural. Essa teoria objetiva ser a ponte de união entre modelos matemáticos tradicionais e precisos de sistemas físicos, e a representação mental, geralmente imprecisa, desses sistemas.” (XEXÉO, 2002)

LIMA (2003), também destaca a importância desta teoria:

“Um aspecto interessante da teoria nebulosa é a possibilidade de se incluir em um modelo matemático conceitos intuitivos que na maioria das vezes são altamente imprecisos e conseqüentemente de difícil tratamento. A capacidade de capturar com clareza e concisão as várias nuances dos conceitos psicológicos utilizados pelos seres humanos em seu raciocínio usual, sem necessidade de enquadrá-lo em estados nítidos torna a lógica nebulosa uma importante ferramenta na modelagem de sistemas imprecisos.”

As primeiras aplicações da Lógica Difusa foram principalmente na engenharia mecânica, desenvolvendo sistemas de controle para temperatura de aparelhos de ar-condicionado e controle de frenagem de metrô no Japão. Mas a Lógica Difusa tem sido cada vez mais empregada nos mais diversos campos de conhecimento, nas áreas biológicas, exatas, humanas, econômicas dentre outras. Tem sido usada pela ciência para desenvolver modelos de análise, avaliação, modelação, otimização, tomada de decisões, controle, diagnóstico e interpretação de informação.

Apesar de ser uma ciência ainda incipiente no Brasil, os princípios da Lógica Difusa já são largamente empregados nos países da Europa, nos Estados Unidos e Japão em diversas áreas da ciência, desde a fabricação de eletrodomésticos até a criação da “Inteligência Artificial” dos computadores. Nestes países já existem inúmeras publicações a respeito da Lógica Difusa.

Mais precisamente em relação à aplicação da Lógica Difusa na construção civil, já existem muitos trabalhos desenvolvidos em várias partes do mundo que englobam diversas áreas de estudo pertinentes à engenharia como se pode observar no Quadro 2.1.

Área de Estudo	Aplicação
Análise Estrutural	Determinação de danos em estruturas, índices de segurança, reabilitação de estruturas, desenvolvimento de estruturas inteligentes, etc.
Construção	Inovação de métodos, planejamento, projetos, gestão, etc.
Hidráulica	Aproveitamento de recursos aquíferos, análise de recursos hidráulicos, otimização de recursos, etc.
Mecânica dos Solos	Classificação de solos, determinação de densidade relativa, etc.
Transporte	Análise de tráfego, acidentes, etc.
Engenharia Ambiental	Seleção de áreas para depósito de rejeitos, etc.

Quadro 2.1 – algumas áreas de aplicação da lógica difusa em engenharia civil
Fonte: MÁRQUEZ (2000)

2.2 – CONCEITOS BÁSICOS

Como já foi mencionado no item anterior, a Lógica Boleana é representada por um sistema binário, onde um elemento pertence ou não pertence a um conjunto, e os conjuntos são definidos por uma função característica. A função característica de um conjunto nítido A , subconjunto de X , declara que elementos de X pertencem ao conjunto A e que elementos não pertencem, mapeando o domínio X , conhecido como conjunto universo, no conjunto imagem $\{0,1\}$.

$$\chi_A : X \rightarrow \{0,1\}$$

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

Um conjunto nebuloso é uma extensão do conceito de conjunto nítido onde a imagem da função característica deixa de ser o conjunto $\{0,1\}$ e passa a ser o intervalo $[0,1]$. Passamos a chamar essa função de função de pertinência.

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1]$$

Nos conjuntos nítidos os valores de pertinência só podem ser 1 ou 0, nos conjuntos nebulosos esses valores podem assumir qualquer valor dentro deste intervalo.

Para ilustrarmos as diferenças entre o sistema clássico e o difuso, vamos recorrer a um exemplo com conjuntos envolvendo a altura das pessoas. Como já foi exposto anteriormente, de acordo com a Lógica Boleana, como poderíamos estabelecer o limite entre pessoas altas e baixas? A figura 2.1 ilustra a divisão dos conjuntos nítidos de pessoas altas e baixas. Se fixarmos este limite em 1,85 m. Neste caso, teríamos uma condição em que uma pessoa de 1,84 m estaria no mesmo conjunto de pessoas com 1,50 m, ou seja, o conjunto de pessoas baixas. Em muitos casos, esta resposta pode não ser satisfatória.

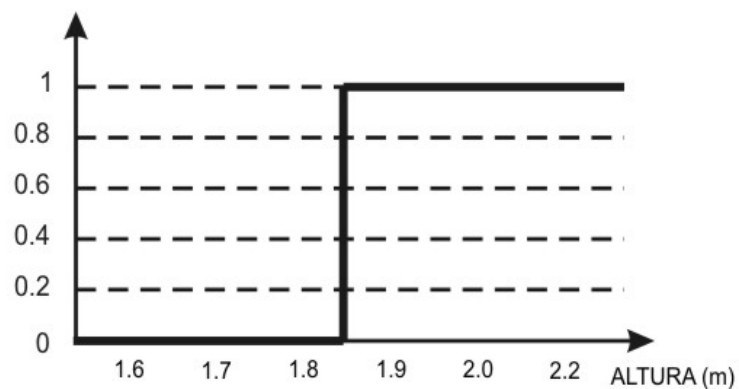


Figura 2.1 – Altura segundo critérios nítidos

De acordo com os critérios difusos, os conjuntos referentes à altura podem possuir diferentes graus de pertinência aos conjuntos, ou seja, podemos introduzir valores intermediários entre 0 e 1 (figura 2.2)

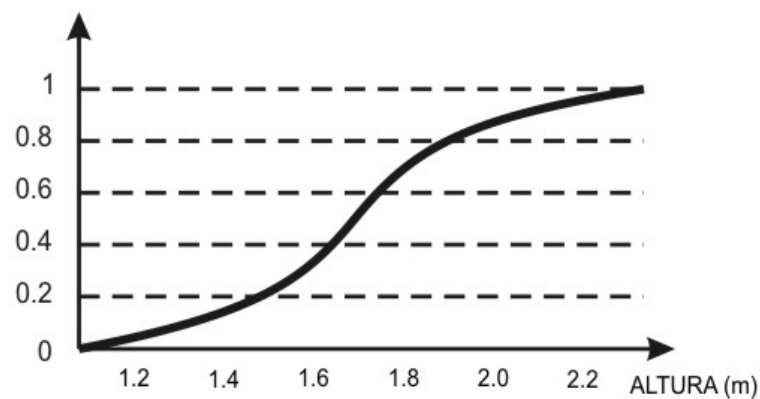


Figura 2.2 – Altura segundo critérios difusos

Se considerarmos esta curva como sendo uma curva representando os “homens altos”, podemos traçar uma outra como sendo a curva referente a “homens baixos”

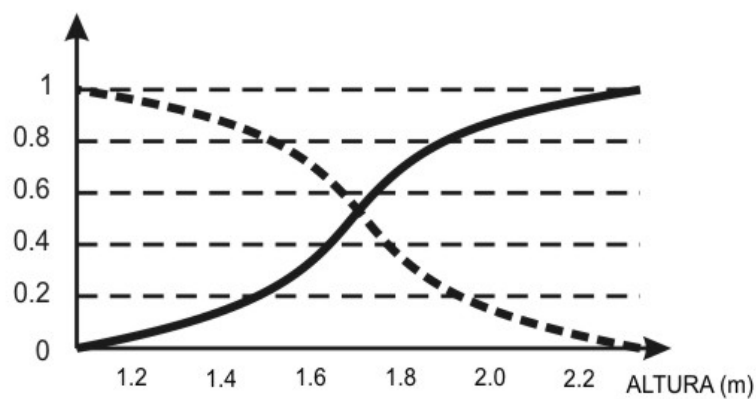


Figura 2.3 – Homens altos e homens baixos

2.3 – SISTEMA DE CONTROLE DIFUSO

A construção de um sistema difuso não é, em si, um processo complexo. Mesmo aplicado na modelagem de sistemas reais complexos, envolve algumas tarefas básicas mais ou menos comuns a qualquer aplicação:

- Escolha das variáveis antecedentes e conseqüentes (de entrada e de saída);
- Definição dos conjuntos difusos (funções de pertinência);
- Estabelecimento das relações entre as variáveis (regras);
- Interpretação da solução (obtenção de valor determinístico);
- Simulação do sistema (ensaios).

A partir disso podemos representar a forma de um típico sistema difuso como se mostra abaixo:

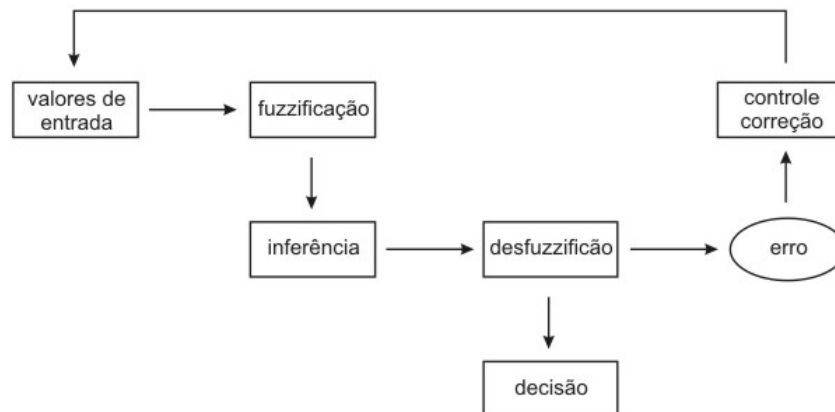


Figura 2.4 – Típico modelo de sistema difuso

- Fuzzificação: É a primeira etapa do sistema difuso, corresponde à transformação dos dados de entrada em cada conjunto difuso usando as funções de pertinência. Nesta etapa, todas as informações relativas à imprecisão ou incerteza associada às variáveis devem ser consideradas.

- Inferência: Uma vez realizada a fuzzificação dos dados de entrada, prossegue-se com o processo de inferência, cuja finalidade é relacionar as variáveis entre si, através das regras.

- Desfuzzificação: Esta etapa é a transformação do resultado final em um valor único e nítido, ou seja, é a tradução do processo de inferência em um valor numérico. Este processo pode ser realizado por vários métodos de acordo com a aplicação: valor que gera o grau de pertinência máximo; centróide do máximo e centróide das funções.

Os sistemas difusos podem ser aplicados no controle inteligente de equipamentos, a seguir descreve-se dois diferentes tipos de sistemas de controle de aparelhos de ar condicionado: o primeiro é binário e representa os equipamentos tradicionais; o segundo é baseado na Lógica Difusa.

No sistema convencional de controle, existe um termostato que controla a temperatura, e que possui um valor máximo e um mínimo para esta temperatura, vamos dizer que estes valores sejam 20 e 30 °C. Quando a temperatura no ambiente aumenta muito e chega a 30 °C, o motor é acionado e começa a refrigerar o ambiente até que esta temperatura chegue a 20 °C. Neste caso, o sistema não tem a capacidade de manter a temperatura constante, o ambiente necessariamente estará sofrendo variações na sua temperatura interna. Neste exemplo os valores 0 e 1 representam se o sistema está ou não está ligado, de acordo com a temperatura.

No sistema de controle baseado na Lógica Difusa, existe um controlador que reconhece as gradações da temperatura, e a este controlador são incorporadas regras de controle:

- Se a temperatura estiver gelada, então o motor deve ficar parado.
- Se a temperatura estiver fria, então o motor deve ficar devagar.
- Se a temperatura estiver certa, então o motor deve ficar em velocidade média.
- Se a temperatura estiver morna, então o motor deve ficar rápido.
- Se a temperatura estiver quente, então o motor deve ficar muito rápido.

Mas para entendermos o que significa uma temperatura “gelada” ou “morna”, precisamos considerar estes termos como conjuntos difusos. As temperaturas que indiquem perfeitamente o conceito, pertencerão 100% ao conjunto e as que não indicarem esse conceito de forma alguma, pertencerão 0% (não pertencerão), e finalmente, as temperaturas que fiquem no conceito intermediário receberão graus de

pertinência intermediários. A figura 2.5 mostra como o sistema “compreende” as informações da temperatura.

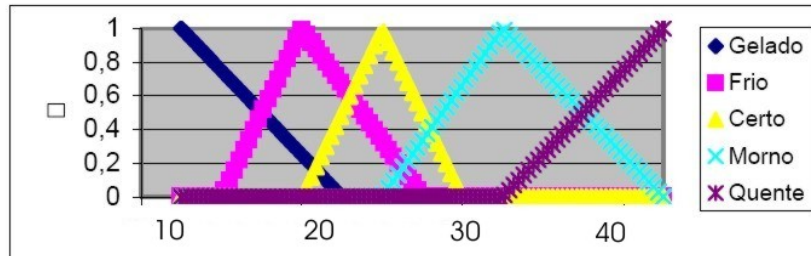


Figura 2.5 – Gradação das temperaturas segundo a critérios difusos

Na figura 2.6 pode-se observar a resposta do sistema em relação as temperaturas de acordo com as regras de controle.

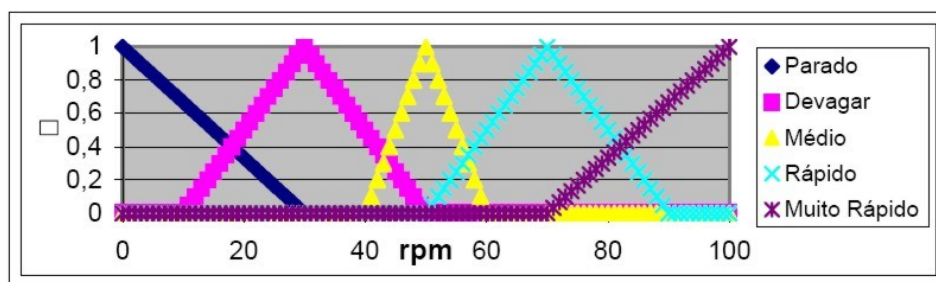


Figura 2.6 – Resposta do sistema segundo regras de controle difuso

O primeiro sistema descrito (tradicional) representa o funcionamento de um sistema de condicionamento de Volume de Ar Constante (VAC) e o segundo sistema, baseado na Lógica Difusa representa um sistema de Volume de Ar Variável (VAV) onde o motor funciona com diferentes rotações. O sistema VAV tem as vantagens de gerar grande economia de energia e de proporcionar maior conforto ambiental. Um sistema semelhante já está sendo empregado em sistemas de arrefecimento de automóveis.

2.4 – OPERAÇÕES COM CONJUNTOS DIFUSOS

Os conjuntos difusos também permitem que façamos operações com eles. As operações básicas são:

- Operações de União;
- Operações de Intersecção;
- Operações de Complemento.

Utilizando os conceitos de função de pertinência, a união dos conjuntos difusos podem ser representados da seguinte forma:

- A união dos conjuntos A e B ou $A \cup B$ fica definida da seguinte forma:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

- A intersecção dos conjuntos A e B ou $A \cap B$ fica definida da seguinte forma:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

- O complemento de um conjunto difuso A, é o conjunto definido pelo seu inverso, dado pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

As figuras a seguir representam graficamente as propriedades de união, intersecção e complemento.

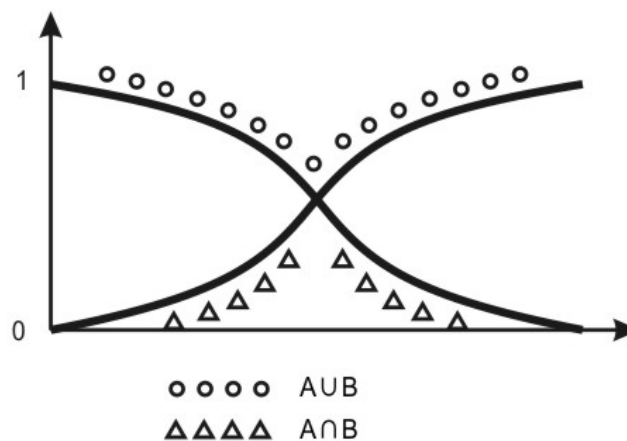


Figura 2.7 – União e intersecção entre os conjuntos A e B

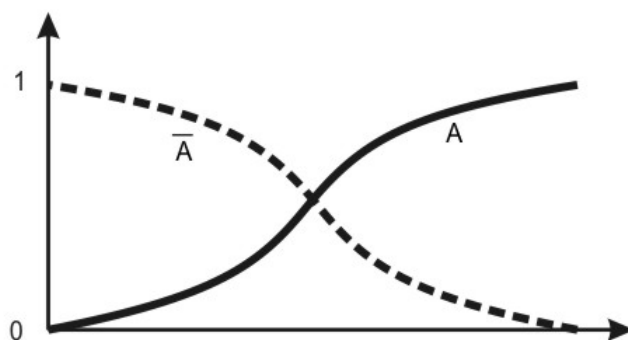


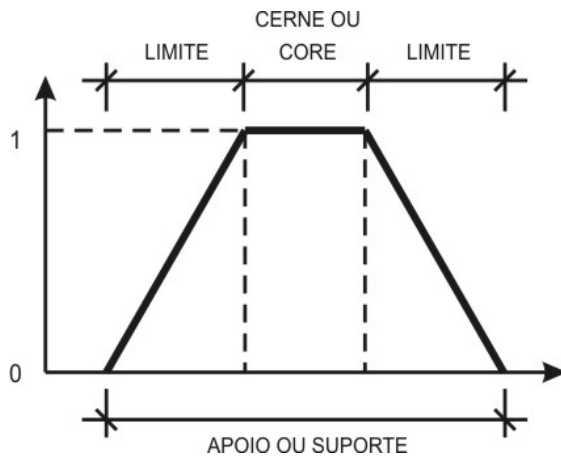
Figura 2.8 – Complemento do conjunto A

Ainda podemos realizar outros tipos de operações com os conjuntos difusos tais como: soma, produto, diferença e divisão. Porém os processos e métodos referentes a estes tipos de operações serão vistos mais adiante.

2.5 – CARACTERÍSTICAS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

O conjunto difuso é descrito por uma função de pertinência que possui algumas características e elementos.

ELEMENTOS



Cerne ou Core: pertinência completa

$$\mu_A(x) = 1$$

Limite: não possui pertinência completa

$$0 < \mu_A(x) < 1$$

Apoio ou Suporte: todos os elementos diferentes de zero

$$\mu_A(x) > 0$$

Figura 2.9 – Elementos de uma função difusa

Se houver apenas um elemento com pertinência completa (=1), este elemento se chama **protótipo**.

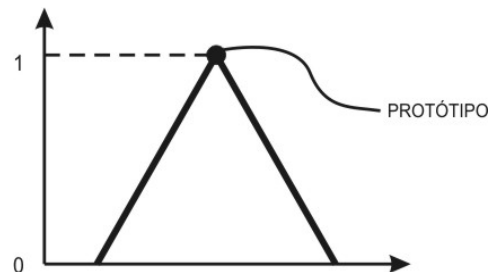


Figura 2.10
Protótipo de uma função difusa

Elementos com pertinência = 0,5 ($\mu_A(x) = 0,5$), são chamados de “*crossover points*”.

FUNÇÃO NORMAL E SUBNORMAL:

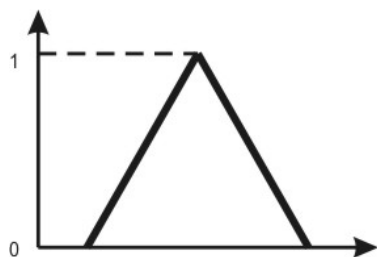


Figura 2.11 – **Função Normal:** tem ao menos um elemento com pertinência = 1

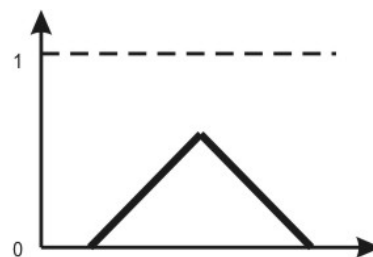


Figura 2.12 – **Função Subnormal:** não tem nenhum elemento com pertinência = 1

FUNÇÃO CONVEXA E NÃO CONVEXA

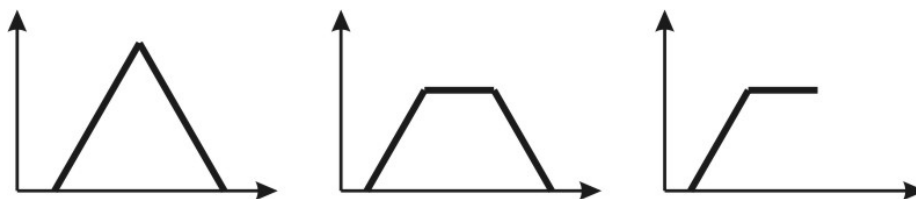


Figura 2.13 – Funções convexas



Figura 2.14 – Função não convexa

* A intersecção de dois conjuntos convexas será um conjunto convexo.

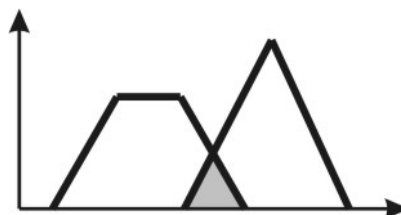


Figura 2.15 – intersecção de dois conjuntos convexas

ALTURA DE UM CONJUNTO DIFUSO

A altura (hgt) de um conjunto difuso é definida por: $\text{hgt}(a) = \max \{ (\mu_A(x)) \}$

Se $\text{hgt}(a) < 1$; o conjunto é subnormal.

VÁRIAS FORMAS

As formas mais comuns das funções de pertinência são as normais e convexas. Mas a partir de operações com os conjuntos difusos, é comum chegarmos a resultados subnormais e não convexas.



Figura 2.16 – Intersecção = Subnormal



Figura 2.17 – União = não convexo

* As funções podem se simétricas ou assimétricas.

APROXIMAÇÕES

Para podermos trabalhar com as funções difusas, é necessário que façamos algumas aproximações:

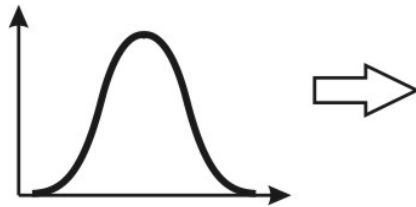


Figura 2.18 – Forma teórica de uma função de pertinência.

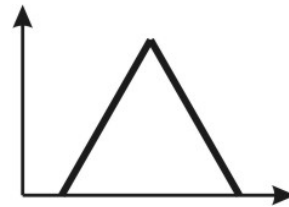


Figura 1.19 – Forma de uma função de pertinência na prática.

O primeiro modelo mostrado seria muito preciso para ser aplicado em uma base de dados difusa (com alto grau de incertezas); além disso, sua resolução implicaria em grande complexidade matemática. Assim, fazemos a aproximação da função de modo que não haja perda ou falha no resultado a ser obtido.

CORTE α

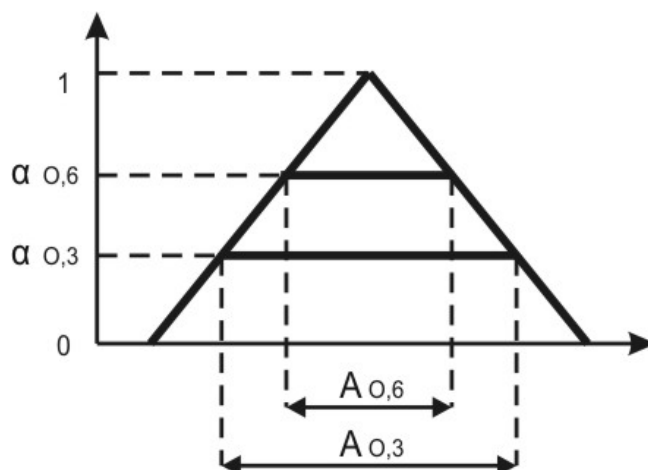


Figura 2.20 – Conjuntos de Corte – α para:
 α corte = 0,6
 α corte = 0,3

O cerne (core) de uma função A é o corte $\alpha = 1$ onde se define o conjunto A_1

O suporte de uma função A é o corte $\alpha = 0^+$ onde se define o conjunto A_{0+}

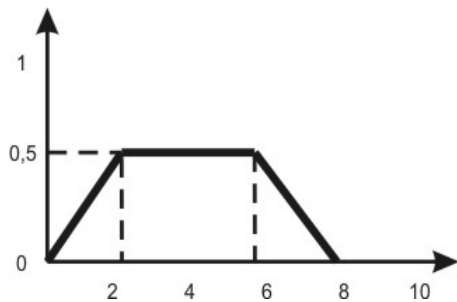
$$A_{0+} = \{ x / \mu A (x) > 0 \}$$

2.6 – DESFUZZIFICAÇÃO (DEFUZZIFICATION TO SCALARS)

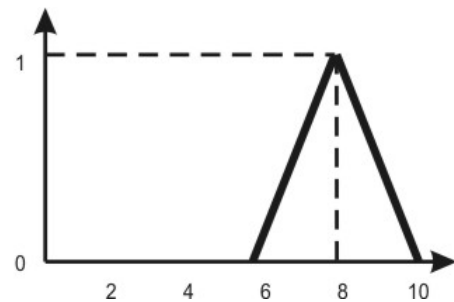
O processo de DESFUZZIFICAÇÃO, consiste em transformar um número difuso em um número escalar.

* escalar: variável que tem um único valor atribuído a ela

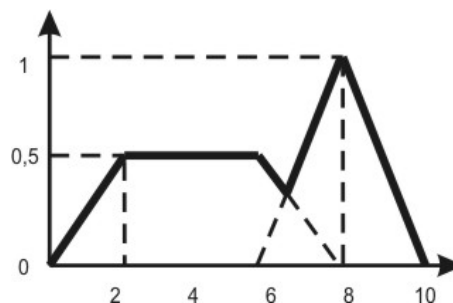
Exemplo típico de um processo fuzzy:



a) Primeira parte da saída fuzzy



b) Segunda parte da saída fuzzy



c) União de ambas as partes

Figura 2.21 a, b e c – Exemplo típico de um processo fuzzy.

Existem vários métodos propostos nos últimos anos para o processo de desfuzificação, a seguir serão mostrados cinco destes métodos.

Princípio da Máxima Pertinência (Método da Altura)

$$\mu_c(\zeta^*) \geq \mu_c(\zeta) \quad \text{para todo } \zeta \in Z$$

Onde ζ^* é o valor desfuzificado.

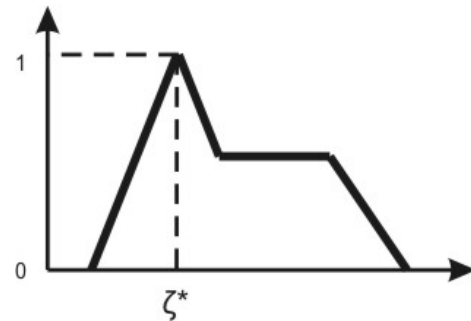


Figura 2.22 – Princípio da máxima pertinência.

Método do Centróide (Centro de Gravidade)

É o mais prevalecente e atrai fisicamente todos os métodos de desfuzificação.

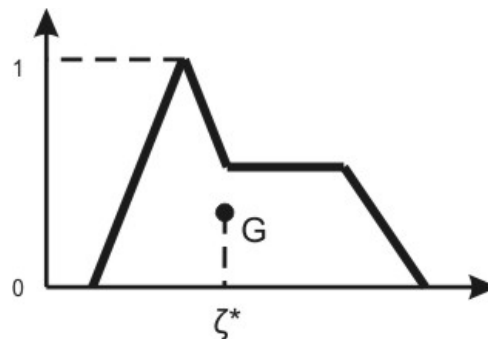


Figura 2.23 – Método do centróide.

Método da Média Ponderada

É um dos mais eficientes para aplicações computacionais;

É restrito a funções de pertinência simétricas;

Consiste na pesagem de cada função de pertinência por seu valor de pertinência de máximo.

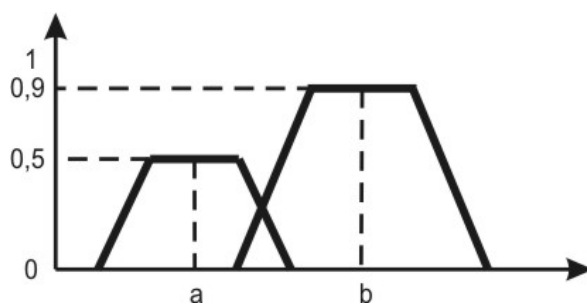


Figura 2.24 – Método da média ponderada.

Onde se aplica: $\zeta^* = a (0,5) + b (0,9) / 0,5 + 0,9$

Desde que o método seja limitado à funções de pertinência simétricas, os valores de **a** e **b**, são centróides das respectivas funções.

Média da Máxima Pertinência (Meio de Máximos)

É semelhante ao Método da Máxima Pertinência, a diferença é que o primeiro se aplica à funções com apenas um elemento com maior pertinência, neste caso, a máxima pertinência pode ser um planalto.

Onde :

$$\zeta^* = a + b / 2$$

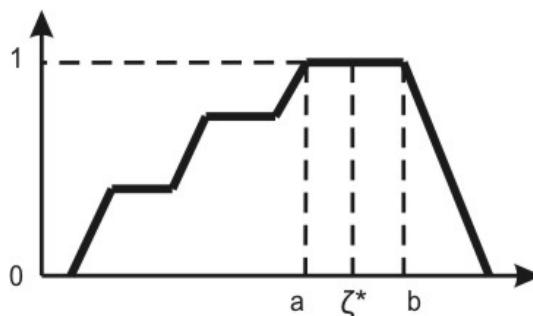


Figura 2.25 – Média da máxima pertinência.

Centro da Maior Área

Se aplica quando a função é não convexa, mas possui pelo ao menos 2 sub-regiões convexas. Então se calcula o centróide da sub-região de maior área.

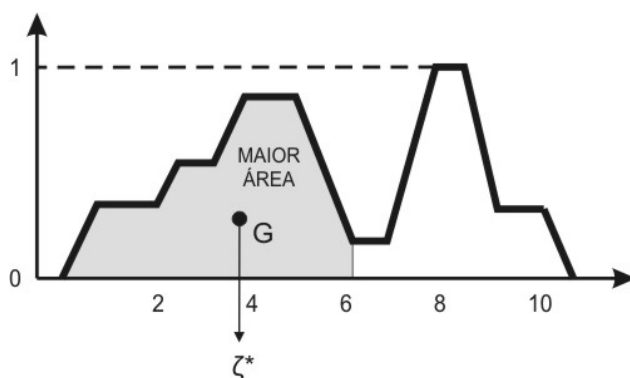


Figura 2.26 – Centro da maior área.

2.7 – VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS (LINGUAGEM NATURAL)

Além da função de pertinência, há um outro conceito bastante importante relacionado com conjuntos nebulosos, que é o de variável lingüística. Entende-se por variável um identificador que pode assumir um dentre vários valores. Deste modo, uma variável lingüística pode assumir um valor lingüístico dentre vários outros em um conjunto de termos lingüísticos. Estas variáveis têm seu valor expresso qualitativamente por um termo lingüístico (que fornece conceito à variável) e quantitativamente por uma função de pertinência.

As variáveis utilizadas em lógica difusa são chamadas de lingüísticas por não terem valores precisos, podendo ser definidas como na linguagem natural, representando um espectro de valores. Por exemplo, quando dizemos que a temperatura está normal, isso não significa um valor exato, mas um intervalo. Desta forma, definimos as variáveis difusas através de conjuntos para representar os intervalos conforme entendemos através das variáveis.

Restrições Lingüísticas

São os **modificadores** das variáveis lingüísticas, normalmente são os advérbios (muito, ligeiramente, rapidamente, aproximadamente...) e os adjetivos (leve, baixo, lento...).

Algumas expressões de restrições lingüísticas são conhecidas como **concentradores**, pois concentram os elementos de um conjunto difuso reduzindo o grau de pertinência de todos os elementos que estão só “em parte” no conjunto (ex. muito).

Também existem expressões de **dilatações (diluções)**; estas expressões dilatam um conjunto difuso aumentando a pertinência de elementos que estão “em parte” no conjunto (ex. ligeiramente, pouco).

Existe outra operação que é a **intensificação**. Esta operação é uma combinação entre concentração e dilatação. Este operador aumenta o grau de pertinência para elementos $\mu_A > 0,5$ e diminui este grau de pertinência para elementos $\mu_A < 0,5$.

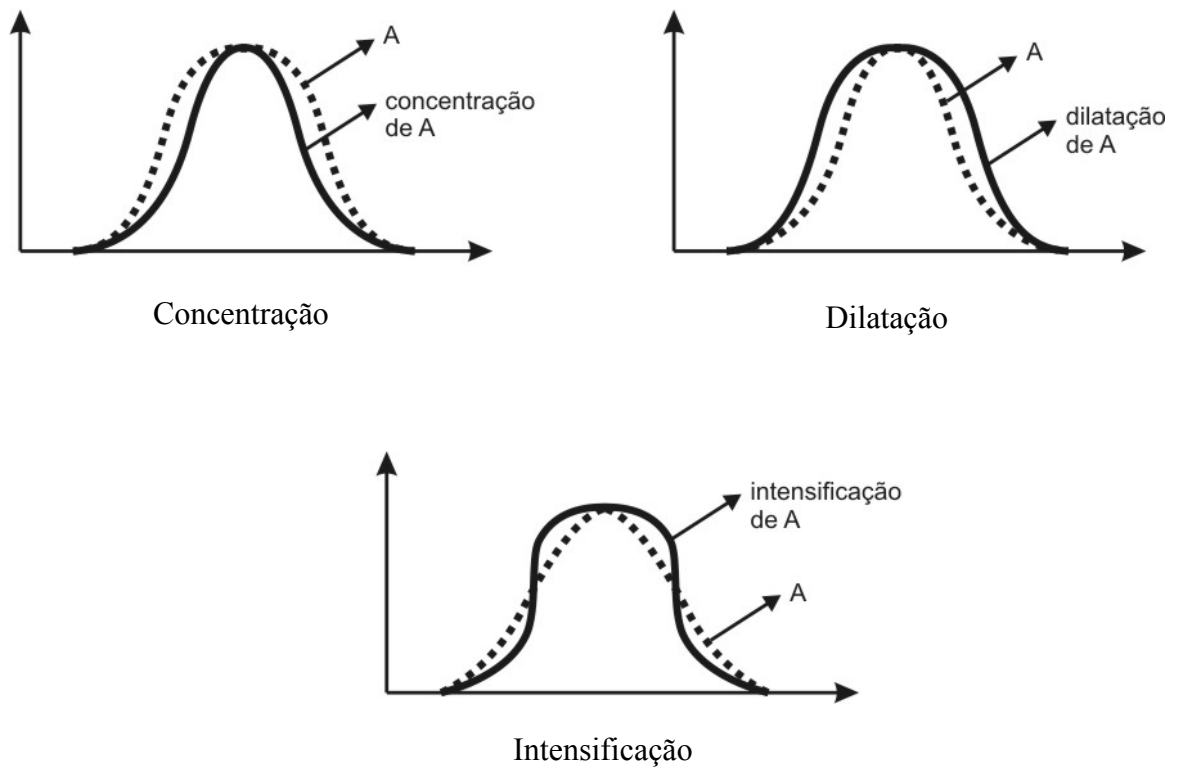


Figura 2.27 – Restrições Lingüísticas
(modificadores das variáveis lingüísticas)

2.8 – LÓGICA DIFUSA E TEORIA DA PROBABILIDADE

Como os conceitos da Lógica Difusa são relativamente novos, é comum muitas pessoas a relacionarem com a Teoria da Probabilidade e freqüentemente, os termos “pertinência” e “probabilidade” são confundidos e se pensa em função de pertinência como uma distribuição estatística.

Esta confusão surge por haver uma estreita relação entre as duas teorias e, sob certos aspectos, a Lógica Difusa (Método Possibilístico) se apresenta muito similar à Teoria de Probabilidades. No entanto, é importante percebermos a diferença entre elas para podermos melhor compreender a Lógica Nebulosa.

A Teoria da Probabilidade e a Lógica Difusa lidam, em geral, com tipos de incertezas distintas. A probabilidade, normalmente, é aplicada quando se tem uma base de dados forte e confiável, e a partir desta base pode-se determinar qual a probabilidade de um evento definido ocorrer ou não. Além disso, esta teoria não considera parâmetros

subjetivos. Os conjuntos difusos são usados quando não se tem uma base de dados precisos ou onde os dados podem possuir alto grau de incerteza e subjetividade.

2.8.1 - Exemplo da diferença na aplicação dos métodos probabilístico e possibilístico (Lógica Difusa) – Adaptado de LEMOS, 2003.

Modelo Probabilístico:

Suponha que quiséssemos descrever a distribuição do peso dos homens adultos na cidade de Ouro Preto.

Para podermos ter uma representação fiel da população, seria necessário milhares de exemplos. Depois disso, e depois de definido que a curva será representada por um intervalo de 50 a 150 kg, a distribuição ficou como mostrada na figura abaixo.

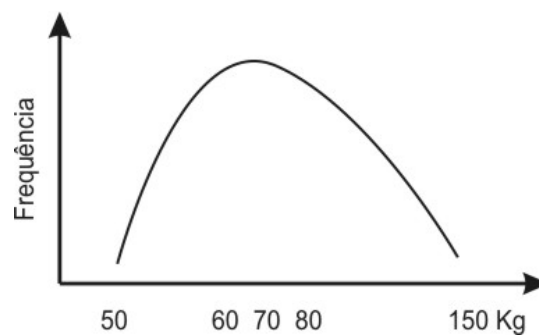


Figura 2.28 – Função da distribuição de probabilidade para peso de homens adultos

De acordo com a figura, pesos entre 60 e 80 kg tem uma frequência maior, ou seja, há mais chance ou probabilidade de se encontrar uma pessoa dentro desta faixa de peso. Deveria ser mostrado entretanto, que todos os outros pesos na faixa de 50 a 150 kg, pertencem a este conjunto de pesos, porém com um grau de pertinência diferente.

Modelo possibilístico (Lógica Difusa)

Suponha agora que desejássemos definir as pessoas com “peso médio” na cidade de Ouro Preto.

A Lógica Difusa se mostra como um modelo mais adequado para este caso. Uma pessoa com 150 kg certamente não pertencerá ao conjunto “peso médio”, e nem uma pessoa com 50 kg.

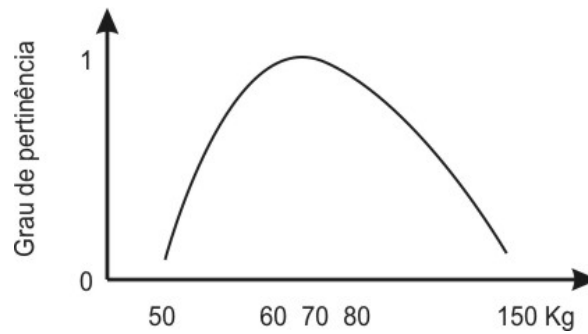


Figura 2.29 – Função pertinência para peso de homens adultos

O sentido da distribuição da figura acima é completamente diferente da distribuição da frequência (estatística) mostrada na primeira figura. Agora, esta figura representa uma expressão subjetiva “peso médio” como um conjunto difuso (não estatístico). Neste caso, a pessoa de 50 kg tem um grau muito baixo de pertinência neste conjunto, da mesma forma que uma pessoa de 150 kg.

2.9 – GERAÇÃO DE CONHECIMENTO E BASE DE DADOS

Para encontrarmos as informações ou variáveis lingüísticas que servirão de base para se montar o sistema difuso, podemos recorrer aos “Métodos de Levantamento de Conhecimento”, que são os seguintes:

- Intuição: onde o projetista escolhe as funções de pertinência de acordo com sua experiência na abordagem do problema.

Este método é baseado apenas na inteligência e conhecimento do ser humano. Nele as formas precisas das curvas não são importantes devido ao grau de incerteza das informações, porém o número de curvas (partições) é importante.

- Horizontal: é baseado em entrevistas com especialistas. Para um conjunto de valores os especialistas devem dizer se esses valores são ou não compatíveis com um termo; o valor estimado é a razão entre o número de respostas sim e o número de perguntas.

- Vertical: cada conjunto é levantado por meio de cortes-alfa. Sendo o corte-alfa um conjunto nítido que contém todos os elementos cujo grau de pertinência é maior que um valor alfa.

- Comparação par a par: é construída uma matriz comparando par a par em níveis de preferência, onde a partir de operações algébricas desenvolve-se a função de pertinência; é composta a partir de um número finito de elementos.

- Inferência: baseado em conhecimento prévio sobre o sistema em questão; baseado em regras (*IF-THEN Rules*) predeterminadas.

- Automáticos: baseado nos métodos de Redes Neurais e Algoritmos Genéticos.

A partir destes métodos, optou-se por aplicar na realização deste trabalho o “Método Horizontal” que é baseado nas informações obtidas de especialistas. Esta opção foi feita por gerar uma base de dados confiável e por otimizar o tempo disponível para a conclusão do trabalho.

2.10 – TOMADA DE DECISÃO BASEADA EM SISTEMA DIFUSO

Segundo ROSS (2004):

*“Quando entramos num processo de tomada de decisão diante de fatores carregados de subjetividade, por melhor que seja a nossa decisão, os resultados são incertos. Portanto, há uma diferença entre uma **decisão boa** e um **bom resultado**. Por exemplo, nós podemos tomar uma boa decisão e obter um resultado ruim, da mesma forma, pode acontecer o contrário diante dos eventos incertos que se tem quando os dados são subjetivos. Mas se tomarmos boas decisões há uma maior chance de ocorrerem bons resultados.”*

Um dos problemas de tomada de decisão consiste na escolha da melhor alternativa de acordo com critérios estabelecidos, a partir de uma certa quantidade de informações, com o propósito de atingir um objetivo estabelecido. *“Atualmente, a multidimensionalidade é a principal característica dos problemas de tomada de decisão do mundo real, tendo objetivos econômicos, ambientais, sociais e técnicos”* (SAKAWA, 1994).

2.10.1 – Formas de Imprecisão

Desde que a teoria dos conjuntos difusos foi criada como uma estrutura conceitual apropriada de tomada de decisão, tipicamente, três formas de imprecisão podem ser identificadas em tomada de decisão em ambientes difusos.

- Não completitude: quando não há dados suficientes como, por exemplo, ausência de alguns atributos ou alternativas;
- Imprecisão: quando há dificuldades na obtenção de conceitos precisos para melhor caracterizar atributos ou critérios;
- Ilusão da validade: detecção de saídas errôneas, tais como a seleção de alternativas, que não cumpram os critérios impostos.

2.10.2 – Formas de Tomada de Decisão

Na tomada de decisão em ambientes difusos, termos como multiobjetivos, multiatributos e multicritérios são, geralmente, usados indistintamente, embora haja diferenças entre eles:

- Tomada de decisão multiobjetivos (MODM): consiste de um conjunto de objetivos conflitantes, que não podem ser alcançados simultaneamente.

- Tomada de decisão multiatributos (MADM): escolha de uma alternativa em um conjunto de alternativas, caracterizada por seus atributos.

- Tomada de decisão multicriterial (MCDM): aplicada tanto à tomada de decisão, envolvendo multiobjetivos, quanto multiatributos. Neste caso, algumas considerações importantes devem ser feitas:

- a pressão do tempo reduz o número de critérios a serem considerados;

- quanto mais completa e precisa for a definição do problema, menos critérios são necessários;

- indivíduos que tomam decisão em sistemas estritamente hierárquicos, geralmente utilizam menos critérios do que indivíduos que lidam com outros tipos de sistemas;

- o isolamento de perturbações no ambiente reduz a necessidade de múltiplos critérios;

- o conhecimento maior (ou completo) e integrado do problema leva à utilização de mais critérios, enquanto que o conhecimento parcial (ou limitado) e não integrado restringe o número de critérios;

- organizações com cultura voltada para o planejamento central e tomadas de decisões coletivas apoiam-se na agregação e na redução de critérios, para alcançar um consenso.

Um dos elementos básicos na tomada de decisão de grupo é o conceito de maioria, isto é, a solução encontrada destaca a opinião mais aceitável pela maioria dos membros do grupo. Uma maioria menos rígida (uma concordância geral, sem a necessidade de uma inferência individual) pode auxiliar, certamente, a formação de modelos de decisão de grupo mais consistentes e humanizados.

Um outro elemento empregado, habitualmente, nas ciências de decisão é a média de pesos, através de parâmetros quantificáveis. Na coleta de informações, busca-se a estimativa do avaliador, que esteja mais próxima do modelo de requisitos. Sendo assim, os dados coletados e a apuração de seus resultados são essenciais neste processo e, sem isto, a avaliação poderia tornar-se irrealista.

Um modelo difuso de decisão adequado deve incluir processos de identificação, medição e combinação de critérios e alternativas, promovendo a modelagem conceitual da decisão e a avaliação em ambientes difusos.

A partir destas formas de tomada de decisão, e diante da natureza dos parâmetros e dos objetivos a serem satisfeitos, neste trabalho optou-se por aplicar a Tomada de Decisão Multiobjetivo (MODM).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Todo projeto de um edifício surge como consequência de uma necessidade social, e a realização de um projeto é o resultado da união de diversos fatores. Além da necessidade social, outros elementos determinam as características próprias de um projeto, tais como fatores técnicos, econômicos, ambientais e políticos, dentre outros. Deste modo, cada projeto é a solução para a conjunção de problemas multidisciplinares relacionados entre si, tudo isso, consequência da união formada pelo conjunto de atividades de análise, síntese, avaliação de informação e completada por atividades de decisão, assim se obtém como resultado uma solução final.

Como primeira experiência para a aplicação da Lógica Difusa na definição de sistemas estruturais para edifícios, foram avaliados apenas os sistemas estruturais em aço e em concreto armado moldado “in loco”. Neste estudo não foram contemplados sistemas em concreto armado de alta resistência, concreto armado protendido, concreto armado pré-fabricado, sistemas mistos dentre muitos outros. Isto, se deve em parte, ao prazo definido para a conclusão deste estudo, e por considerar que mesmo avaliando apenas dois sistemas, pode-se verificar a viabilidade do modelo e, posteriormente, agregar a ele outros sistemas estruturais com outras características.

Não foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito dos sistemas estruturais em aço e em concreto porque a metodologia da Lógica Difusa contempla outra maneira, que inclusive é considerada mais eficiente, para agregar ao modelo o conhecimento necessário acerca do assunto analisado. Para o “*levantamento de conhecimento*” para obtenção dos dados que serão utilizados na pesquisa foi usado o “método horizontal” que é baseado em entrevistas com especialistas. Por isso foi criado um questionário para ser submetido a especialistas da área de construção civil com vistas a verificar o resultado da aplicação de diferentes sistemas estruturais em diferentes tipos de edificações através de verificações. É importante consultar pessoas que conhecem bem o domínio do problema a ser tratado, ou cuja opinião sobre a significação da variável a ser modelada seja importante para a boa representação de cada uma das variáveis que

influem na tomada de decisão com relação ao sistema estrutural adotado. Com o resultado deste questionário, pode-se determinar quais são as variáveis que mais influem no processo com mais importância e também avaliar com que grau cada uma destas variáveis influi no processo de tomada de decisão.

Para a montagem do questionário, o primeiro passo consistiu na seleção das principais variáveis que podem influir na decisão quanto ao sistema a ser utilizado. Depois estas variáveis foram organizadas de acordo com os conceitos metodológicos da Lógica Difusa como se mostra mais adiante. A interpretação dos dados obtidos foi feita aplicando-se a metodologia dos “conjuntos difusos”, onde é realizada a “Fuzzificação” que transforma os valores de entrada nos valores correspondentes em cada conjunto difuso de maneira a calcular a opinião de consenso entre especialistas e ordenar as opções; prossegue-se realizando o processo de “inferência”, onde as regras difusas (*IF-THEN Rules*) são determinadas também a partir dos dados provenientes da consulta aos especialistas. O próximo passo é realizar a “Desfuzzificação”, processo onde se transforma o resultado final em um valor único e nítido.

Finalmente, para se verificar a validade do modelo, ele foi submetido a duas situações hipotéticas de empreendimentos, com características distintas onde também se fez a análise dos resultados obtidos e sua pertinência.

CAPÍTULO 4

DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

4.1 –VARIÁVEIS QUE INFLUEM NO PROCESSO DECISÓRIO RELATIVO À TOMADA DE DECISÃO QUANTO A SISTEMAS ESTRUTURAIS

Num primeiro momento, procurou-se eleger os principais fatores que podem influir de maneira efetiva na definição do sistema estrutural de um edifício. Então, estabeleceram-se as variáveis que seriam investigadas e levadas em consideração neste trabalho. Estas variáveis foram então divididas em seis grupos de modo a facilitar a análise de cada uma delas de acordo com suas características. Foram consideradas características relativas aos fatores construtivos, econômicos, estruturais, ambientais, arquitetônicos e de segurança. De acordo com estas premissas, um empreendimento para ser considerado bem sucedido deve, na medida do possível, equacionar e buscar o equilíbrio de todos estes fatores que devem ser encarados como objetivos e que definirão o projeto.

4.1.1 – Fatores Construtivos

Os fatores construtivos são representados pelas condições específicas de cada obra, estas são as situações possíveis de serem encontradas no decorrer da execução e que devem ser previstas e levadas em consideração na fase de concepção do empreendimento.

Armazenamento dos materiais na obra: este é um ponto importante que deve ser observado na escolha do sistema estrutural da edificação, pois um terreno pequeno pode inviabilizar determinado tipo de estrutura.

Interferência sobre o entorno: o uso de um determinado tipo de estrutura pode reduzir consideravelmente os impactos das atividades nas áreas vizinhas, principalmente em áreas residenciais, próximo a hospitais, escolas, etc. Deve-se avaliar

a interferência em relação à geração de ruídos, poeira, vibração, interferência no tráfego e tempo de execução da obra.

Disponibilidade de equipamentos: Esta característica exercerá maior influência em relação às características do executante da obra e em relação à possibilidade de acesso aos equipamentos que o local em que a obra se situa oferece. Dependendo da região e do contexto em que a obra está inserida, pode ser inviável o uso de determinado equipamento, como por exemplo uma grua.

Nível de especialização da mão de obra: um tipo de estrutura que requer um nível de mão de obra mais qualificado pode ser inviabilizado se não houver a disponibilidade desta mão-de-obra. É importante avaliar se o executante pode ter acesso a determinado tipo de mão de obra e qual a sua disponibilidade.

Velocidade de execução em relação ao prazo: provavelmente, este é um dos quesitos que tem maior poder de influência na decisão quanto ao tipo de sistema a ser usado, principalmente se os prazos são curtos. Neste caso o desempenho do sistema com estrutura em aço é bem mais vantajoso se comparado com a estrutura de concreto convencional moldado “*in loco*”.

Independência / compatibilidade de distintos trabalhos na obra: este item pode influenciar mais ou menos de acordo com o perfil da empresa executante da obra; varia de acordo com o tipo e quantidade de mão-de-obra no canteiro, a quantidade de empreendimentos da empresa e os prazos de execução da obra.

Adequação ao terreno: O tipo de estrutura a ser utilizado pode ser determinado pelo tipo de solo e configuração do terreno. As características do terreno e o modelo de estrutura influem no tipo de fundação a ser utilizado. Já com relação à topografia do terreno, deve ser observada a facilidade para a aplicação da estrutura no canteiro de acordo com as suas características de execução.

Compatibilidade com sistemas complementares: determinados sistemas complementares tem uma melhor interface ou afinidade com determinado tipo de

estrutura. Este fato pode contribuir para minimizar custos durante a execução de alvenarias, coberturas e instalações dentre outros itens.

Facilidade de adaptação diante de imprevistos ou incidentes durante o desenvolvimento do empreendimento: Como já foi citado, as possibilidades de intervenção diminuem à medida que o projeto passa a ser desenvolvido, tendendo a serem nulas na etapa da construção, e paralelamente os custos de tais intervenções evoluem em progressão aritmética com o passar das etapas de projeto e execução. Sendo assim o ideal é minimizar as adaptações diante dos imprevistos, mas sabemos que este fato é uma realidade em toda obra.

Facilidade de futuras expansões: em alguns tipos de empreendimentos, esta característica é de fundamental importância. Então deve-se identificar se a obra tem ou não possibilidade de ampliações. Existem alguns projetos que são concebidos já se pensando em expansões; nestes casos esta variável pode ter uma grande importância na definição do tipo de sistema estrutural a ser utilizado. Porém existem empreendimentos que não possuem nenhuma possibilidade de futuras expansões devido ao tipo de uso, tamanho de terreno reduzido, etc.

4.1.2 – Fatores Econômicos

A maioria dos projetos de edifícios estão condicionados aos fatores econômicos e podemos dizer que praticamente todos os empreendimentos se estabelecem com fortes premissas econômicas que, se não forem cumpridas, podem tornar o projeto inviável ou ruinoso.

Custo de incorporação: Esta é uma das principais variáveis que contribuem para a definição do sistema estrutural a ser utilizado, mas é importante que não se analise apenas o custo da estrutura, pois existem outros elementos que, de acordo com a estrutura escolhida, podem ter um maior ou menor custo. Por exemplo, uma alvenaria convencional de blocos cerâmicos possui custos diferenciados para ser aplicada em uma estrutura de concreto ou em uma estrutura metálica.

Custo de manutenção: Sabemos que não faz parte da nossa cultura, o hábito de realizar manutenções regulares nos nossos edifícios como é feito nos países desenvolvidos. E apesar de não fazer de fato, parte da execução da obra, é um item que merece atenção, pois pode repercutir na qualidade e na imagem do empreendimento no futuro e pode até mesmo afetar a sua vida útil. Existem determinados tipos de estruturas que necessitam de maior necessidade de manutenção e um fator que pode influir na maneira e frequência destas manutenções é o tipo de uso do edifício. Normalmente prédios públicos e residenciais não apresentam um nível de conservação satisfatório.

Custo da proteção contra incêndios: Normalmente, as estruturas metálicas são mais suscetíveis aos efeitos do fogo e por isso requerem uma atenção especial em se tratando de proteção contra incêndios, conseqüentemente levando a um maior custo. Este é um fato ao qual durante muito tempo não foi dada a devida importância e, em alguns casos, ainda é comum executar edifícios em estrutura metálica sem proteção contra incêndio. Mas em muitas cidades, as leis já exigem projetos específicos de mecanismos de segurança em situação de incêndio e, nos casos das construções metálicas, as exigências são consideravelmente maiores.

Prazo de execução em relação à disponibilidade de capital: a princípio, quanto menor o tempo de construção, melhor. Entretanto, esta situação se aplica bem se o empreendedor tiver uma disponibilidade de capital imediata, pois existem alguns tipos de obras, como por exemplo, nos condomínios residenciais, em que a disponibilidade de capital é de acordo com a capacidade de desembolso dos condôminos.

Antecipação do retorno do investimento: Em determinados tipos de empreendimento, este é o principal ponto que define a escolha do sistema estrutural a ser utilizado, como é o caso de algumas obras públicas e comerciais, pois adianta o período de retorno e reduz o tempo de amortização do investimento. Esta antecipação do retorno do investimento muitas vezes é mais relevante que eventuais aumentos de custo de execução que um sistema ou outro possam ter.

Disponibilidade de matéria prima: de acordo com a localização do empreendimento no território nacional, podemos ter um maior ou menor custo de

execução de acordo com os materiais a serem utilizados na estrutura. Em certos casos, o custo de transporte deste material pode até inviabilizar a obra.

4.1.3 – Fatores Estruturais

Todos os projetos de engenharia estão condicionados a fatores estruturais e estes fatores são de grande importância, pois afetam diretamente a edificação sob aspectos de custo, segurança, solução arquitetônica, uso e cálculo.

Durabilidade da estrutura (Vida útil): Além do material a ser utilizado, um dos pontos que definem a durabilidade da estrutura é o meio em que a obra está inserida. Podemos ter ambientes mais agressivos ou menos de acordo com suas características e existem estruturas mais ou menos suscetíveis aos efeitos destes ambientes. Existem locais de exposição altamente agressivos como é o caso de atmosferas industriais e litorâneas e ambientes com pouca agressividade como por exemplo, as regiões rurais. Este item é de grande importância, pois está diretamente ligado à segurança da edificação.

Vão livre: de acordo com o perfil da obra (tipo de uso, partido arquitetônico, etc.), pode se ter a necessidade de grandes vãos livre ou não, e existem tipos de estruturas mais indicados para satisfazer estas necessidades.

Fundações: o tipo de fundação a ser utilizada é definida principalmente por duas questões: primeiro pelo tipo de solo do terreno em que a obra será executada, que pode oferecer uma boa resistência ou não, além de poder haver a presença de água. O segundo fator que contribui para a escolha do tipo de fundação é o peso da estrutura e, em muitos casos, uma estrutura mais leve pode viabilizar o uso de um determinado tipo de fundação.

“A influência da redução das cargas devido ao menor peso de uma estrutura pequena em um solo muito resistente pode ser mínima, mas esta redução em uma grande estrutura em um solo pouco resistente pode viabilizar a construção. Portanto o custo das fundações em alguns casos

será um importante fator de decisão sobre o tipo de estrutura a ser usado em uma obra” (PINHO, 2005).

Cálculo: Normalmente este não é um ponto que chega a definir a escolha do sistema, mas merece atenção porque apesar de existirem inúmeros softwares de cálculo de estruturas que contemplam diversos sistemas, a melhor solução de cálculo depende principalmente do projetista. Em relação a este item pode-se dizer que estruturas isostáticas possuem cálculo mais simplificado e estruturas hiperestáticas necessitam de uma avaliação mais elaborada por parte do calculista.

4.1.4 – Fatores Ambientais

São cada vez maiores as preocupações com o meio ambiente em todos os aspectos da sociedade, e como não poderia deixar de ser, a construção civil também deve estar alinhada com os preceitos de conservação ambiental. Apesar das atividades de construção serem consideradas altamente impactantes sobre o meio ambiente, principalmente no que se refere à exploração da matéria-prima e na destinação dos resíduos provenientes da atividade, uma solução estrutural que minimize estes impactos sobre o meio pode contribuir para a escolha do tipo de sistema.

Impactos decorrentes da exploração da matéria prima: A produção de aço depende da exploração do minério de ferro que é uma atividade que gera grandes impactos ambientais, além de depender também da exploração do carvão vegetal, mas por outro lado a matéria-prima para a produção de concreto também vem de atividades que contribuem muito para a degradação do meio ambiente, seja nas pedreiras onde se explora a brita, na produção do cimento ou na retirada da areia do leito dos rios.

Geração de resíduos: Um sistema de construção industrializado tem a característica de produzir uma quantidade de resíduo infinitamente menor que em um sistema de construção tradicional. Neste último, o desperdício pode chegar à ordem de um terço do material empregado na construção. Além disso, os resíduos provenientes da

construção metálica são mais facilmente reciclados do que os derivados dos sistemas tradicionais de construção.

Impactos decorrentes da execução da obra: neste ponto, deve-se avaliar principalmente o contexto em que a obra vai estar inserida, pois qualquer tipo de empreendimento de construção civil irá gerar impactos decorrentes das atividades de construção. Existem os impactos no período da execução da obra e também aqueles devido à interferência na paisagem, seja urbana ou não.

4.1.5 – Fatores Arquitetônicos

Este grupo de variáveis possui uma alta carga de subjetividade, pois depende principalmente do perfil particular do projetista. Os dois sistemas aqui analisados possuem características muito específicas e completamente diferentes entre si, por isso, um profissional pode ter mais afinidade com um ou com outro sistema. O mais importante é que seja qual for o tipo de estrutura definido, o projeto deve ser desenvolvido baseado nas características e no comportamento específico de cada sistema.

Tipologia arquitetônica e identidade visual: As estruturas metálicas e as de concreto possuem expressões arquitetônicas completamente diferentes, e inevitavelmente esta linguagem própria de cada sistema, irá se mostrar na tipologia arquitetônica e na identidade visual do edifício. Estes fatores relacionados à estética, são de grande importância e tem um forte peso na tomada de decisão quanto ao tipo de sistema a ser adotado, principalmente em edifícios públicos e corporativos onde a imagem do usuário mantém uma forte relação com a identidade visual da edificação.

Facilidade de projeto em relação ao uso: Normalmente este aspecto depende principalmente do perfil do projetista, pois pode haver por parte dele uma maior familiarização com sistemas em aço ou em concreto. Mas, a princípio, podemos dizer que pelo fato de possuir uma execução artesanal, o concreto possui uma maior flexibilidade na configuração espacial da estrutura, o que pode dar ao projetista uma

maior liberdade durante o projeto. Já os sistemas industrializados em aço dependem de determinados parâmetros que devem ser seguidos durante a concepção do projeto, mas que não necessariamente irão diminuir a liberdade projetual do profissional.

4.1.6 – Fatores de Segurança

O tipo de execução da obra depende do tipo de sistema a ser utilizado e aqui não consideraremos a segurança estrutural, pois partimos do preceito que desde que o projeto seja bem desenvolvido, ele terá esta condição satisfeita independentemente da escolha do tipo de estrutura.

Segurança durante a execução da obra: De acordo com o tipo do sistema utilizado a execução da obra pode oferecer um nível maior ou menor de segurança. Normalmente os processos industrializados, por empregar um menor número de trabalhadores no canteiro e por estes trabalhadores possuírem um nível maior de especialização, oferecem melhores condições de segurança durante a fase de execução. Ao contrário, o fato da construção tradicional em concreto demandar um maior número de trabalhadores, e que normalmente possuem um nível de especialização menor, confere a este tipo de sistema piores condições de segurança na obra. Mas cabe ao empreendedor avaliar a importância deste item na escolha do sistema a ser adotado.

Segurança em relação a incêndios: Como já foi mencionado, as estruturas metálicas são mais suscetíveis aos efeitos do fogo, por isso requerem uma atenção especial se trata de proteção contra incêndios. Este é um fato ao qual durante muito tempo não foi dada a devida importância, e em alguns casos ainda é comum executar edifícios em estrutura metálica sem proteção contra incêndio. Mas em muitas cidades, as leis já exigem projetos específicos de mecanismos de segurança em situação de incêndio, e nos casos das construções metálicas, as exigências são consideravelmente maiores. Já nas estruturas de concreto, o nível de exigência, normalmente é menor devido à própria natureza do material que possui um melhor comportamento quando exposto a situações de fogo. Deve-se ter ainda mais cautela quando se trata de um edifício para abrigar algum serviço essencial às condições de segurança da sociedade,

tal como hospitais ou corpo de bombeiros, pois necessitam de um nível de segurança mais elevado.

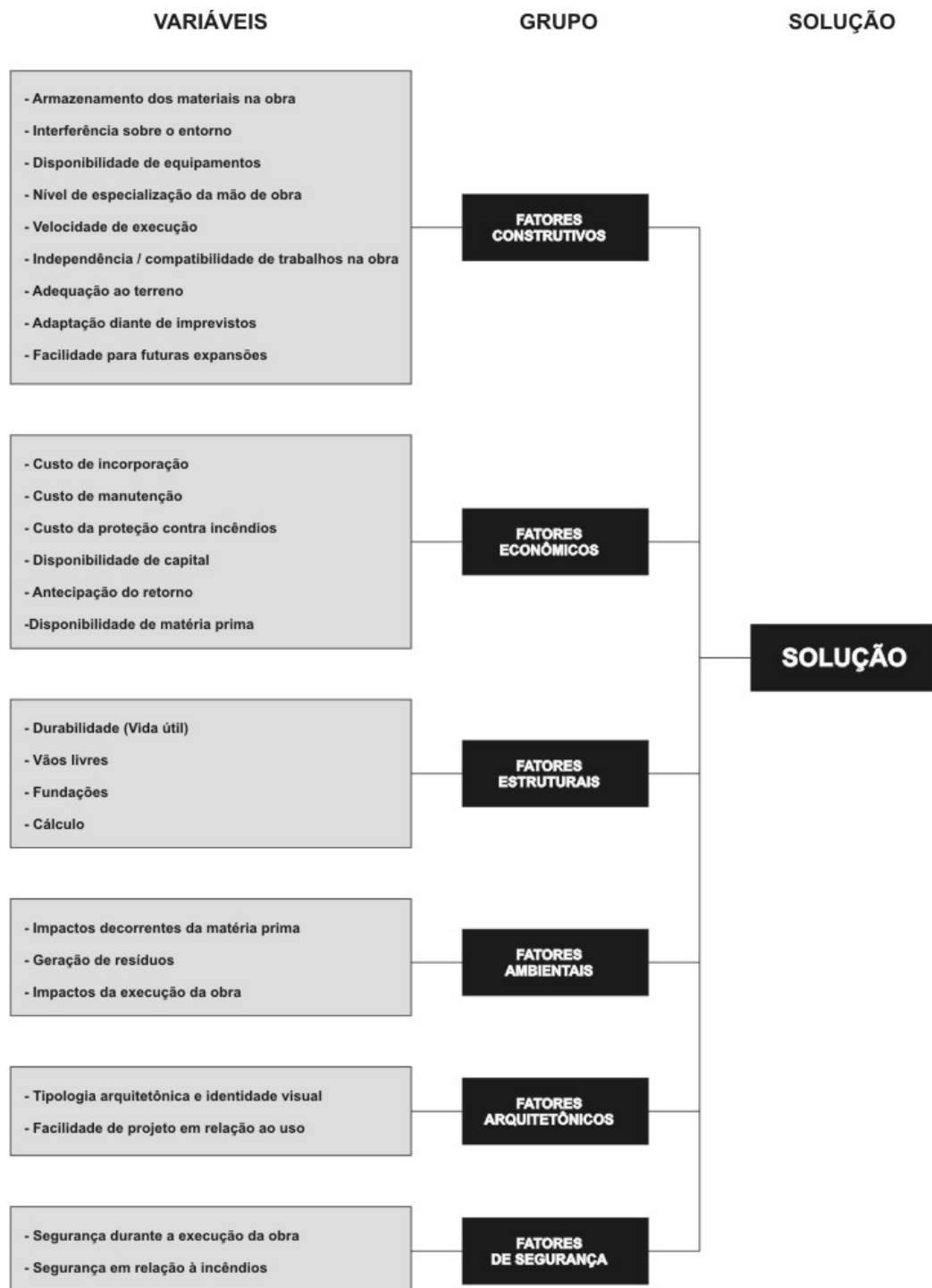


Figura 4.1 – Variáveis que influem de forma efetiva na tomada de decisão em relação à definição de sistemas estruturais de edifícios

CAPÍTULO 5

GERAÇÃO DA BASE DE DADOS E CONFIGURAÇÃO DO MODELO DIFUSO

5.1 – DEFINIÇÃO DA GERAÇÃO DE CONHECIMENTO E BASE DE DADOS

Para a obtenção dos dados necessários para o desenvolvimento deste trabalho, que servirão para constituir o modelo difuso, recorreu-se ao Método de Levantamento de Conhecimento Horizontal. Este método é baseado em informações obtidas com especialistas na área de estudo específica. Para um conjunto de valores os especialistas devem dizer se esses valores são ou não compatíveis com um termo. Esta opção foi feita por gerar uma base de dados confiável.

Para a obtenção das informações necessárias que darão origem aos dados de entrada do modelo, criou-se um questionário (anexo I) subdividido em duas partes acerca de sistemas estruturais que foi encaminhado a reconhecidos especialistas da área de construção civil, tanto da área acadêmica como da área de projeto e execução.

Através desta sondagem, os especialistas expressaram sua opinião e ponto de vista de acordo com sua experiência e com seus critérios, obtidos à partir de sua vivência pessoal ou com outros especialistas da área. De maneira introdutória, o questionário fornecia informações abreviadas sobre o estudo para o qual serviria de base, explicava os objetivos e dava instruções sobre a forma como se deveria responder as perguntas. Depois das questões objetivas a respeito da área de estudo, finalmente perguntava-se, se na opinião do especialista havia algum aspecto importante que não foi considerado e que deveria ser acrescentado e se ele conhecia alguma pessoa que teria interesse em responder ao questionário e cuja opinião sobre os aspectos tratados ele considerasse de grande importância.

A primeira parte deste questionário tinha como objetivo conhecer o grau de recomendação de cada especialista para cada uma das características eleitas neste estudo que podem influir de maneira consistente na definição do sistema estrutural de um edifício.

Para a elaboração do questionário, foi desenvolvida uma escala lingüística onde cada variável lingüística era atribuída a um valor numérico de modo que os especialistas pudessem expressar sua opinião e pensamentos, normalmente expressas em linguagem natural através de valores numéricos.

5	Absolutamente recomendável
4	Muito recomendável
3	Recomendável
2	Pouco recomendável
1	Nada recomendável

Quadro 5.1 – Escala lingüística adotada para a primeira parte do questionário

A segunda parte do questionário tinha o objetivo de conhecer a importância relativa de cada um destas variáveis em relação às características específicas que uma obra pode apresentar.

Para esta segunda parte do questionário foi desenvolvida uma outra escala lingüística de maneira que o especialista pudesse expressar sua idéia a respeito da importância relativa da variável em relação às características específicas da obra.

5	Importância absoluta
4	Grande importância
3	Importante
2	Pequena importância
1	Sem importância

Quadro 5.2 – Escala lingüística adotada para a segunda parte do questionário

5.1.1 – Base de Dados

A partir da sondagem realizada aos especialistas, obteve-se uma base de dados ampla e confiável que deu origem às funções de pertinência que foram submetidas ao processo de inferência, de maneira que se consiga chegar a uma solução que otimize os diversos aspectos que influem na tomada de decisão quanto à definição de sistemas estruturais baseada nas características específicas de um determinado empreendimento.

Os aspectos estabelecidos como variáveis que influem no processo decisório são tidos como objetivos que devem ser satisfeitos para se chegar à uma decisão ótima em relação ao sistema a ser utilizado. No ANEXO II de acordo com a sondagem feita aos especialistas, foram definidas as funções de pertinência referentes a cada um destes objetivos.

As funções de pertinência referentes à importância relativa de cada uma das variáveis consideradas neste estudo, estão definidas no ANEXO III, e servirão para ponderar estas variáveis de acordo com as características particulares de cada empreendimento.

5.2 – DEFINIÇÃO DA FORMA DE TOMADA DE DECISÃO E CONFIGURAÇÃO GERAL DO MODELO DIFUSO

De acordo com a proposta inicial deste estudo, precisava-se de um modelo de tomada de decisão que levasse em consideração pelo menos três tipos de variáveis para que o sistema tivesse uma resposta satisfatória. Ele necessariamente deveria contemplar:

- **O tipo de sistema a ser utilizado:** no caso da proposta deste estudo as variáveis são a **construção metálica industrializada** e a **construção tradicional em concreto**.

- **As características gerais dos empreendimentos de construção civil:** aqui consideram-se fatores que variam a partir da característica dos materiais empregados e das necessidades determinadas pelos empreendedores, tais como: custo, vãos, peso, tempo de execução, estética, etc.

- **As características específicas da obra:** são as condições da obra em particular, onde serão analisados entre outros fatores, os recursos da construtora, a capacidade de desembolso do agente financiador, a dimensão e topografia do terreno, a resistência do solo, o tipo de ocupação, o perfil do entorno do local da obra, etc.



Figura 5.1 – Modelo de tomada de decisão com três variáveis

Além destas variáveis, o modelo tinha que satisfazer vários objetivos dentro de cada variável.

“Muitos processos de tomada de decisão simples são baseados em um único objetivo como minimização de custo, maximização de lucro, minimização de tempo e assim sucessivamente. Porém, freqüentemente, devem ser tomadas decisões em um ambiente onde mais de um objetivo afetam o problema e o valor relativo de cada um destes objetivos é diferente.” (ROSS, 2004).

A partir das formas de tomada de decisão e diante da natureza dos parâmetros e dos objetivos a serem satisfeitos neste trabalho, optou-se por aplicar a Tomada de Decisão Multiobjetivo (MODM). Esta modalidade de tomada de decisão consiste em satisfazer um conjunto de objetivos conflitantes, que não podem ser alcançados simultaneamente.

A Tomada de Decisão Multiobjetivo é um processo em um ambiente onde mais de um objetivo afeta o problema (ex. custo, tempo, etc.) Necessita-se então, adquirir informação significativa relativa à satisfação dos objetivos pelas várias alternativas (escolhas); depois, precisa-se ordenar ou pesar a importância relativa de cada um dos objetivos.

Configuração geral do modelo:

Seleção de uma alternativa a_i , de um universo de alternativas A (ex. aço ou concreto) baseada na avaliação de um conjunto de critérios ou objetivos $\{O\}$ importantes para tomada de decisão (ex. custo, peso, tempo, manutenção, estética...).

Precisamos então avaliar como cada alternativa satisfaz cada objetivo e precisamos também combinar estes objetivos em uma função de decisão global. Esta função de decisão global representa um mapeamento das alternativas para um conjunto ordinal de graus. Este processo requer informação subjetiva, naturalmente, da autoridade de decisão relativa à importância de cada objetivo.

Assim:

- Precisa-se avaliar como cada alternativa satisfaz a cada objetivo;
- Precisa-se combinar os objetivos de ponderação em uma função de decisão global para satisfazer todos os objetivos de decisão.

Para desenvolver este modelo precisamos definir um universo de n alternativas:

$$\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

E também um conjunto de r objetivos:

$$\mathbf{O} = \{O_1, O_2, \dots, O_r\}$$

Então o grau de pertinência de uma alternativa a em \mathbf{O} é definida por:

$$\mu_{O_i}(a)$$

Este então, é o grau para o qual, a alternativa a satisfaz os critérios especificados para este objetivo. Como nós buscamos uma função de decisão que satisfaça simultaneamente todos os objetivos, estabelecemos uma função de decisão D , que será determinada pela intersecção dos conjuntos de objetivos.

$$D = O_1 \cap O_2 \cap \dots \cap O_r$$

Então, o grau de pertinência que a função de decisão D , tem para cada alternativa a , é determinado por:

$$\mu_D(a) = \min [\mu_{O_1}(a), \mu_{O_2}(a), \dots, \mu_{O_r}(a)]$$

E assim, a decisão ótima, será dada pela alternativa a^* que satisfaz:

$$\mu_D(a^*) = \max (\mu_D(a))$$

Agora precisamos determinar o conjunto de preferências $\{P\}$. Os elementos deste conjunto de preferências podem ser valores lingüísticos como alto, médio, nenhum, perfeito, etc.; ou eles podem ser valores no intervalo ordenado (0,1). Estas preferências são relacionadas a cada um dos objetivos e assim podem demonstrar o sentimento do tomador de decisão em relação à influência que cada objetivo tem no contexto da alternativa a ser definida. Então definimos que o parâmetro \mathbf{b} seja contido no conjunto de preferências $\{P\}$. Conseqüentemente, nós temos para cada objetivo, a medida de quão ele é importante para o tomador de decisões.

A função de decisão \mathbf{D} , assume agora, uma forma mais geral quando cada objetivo for associado à um peso que expressa a sua importância para a tomada de decisão. Esta função é determinada pela operação de interseção definida como uma medida para a decisão, $\mathbf{M}(\mathbf{O}_i, \mathbf{b}_i)$, envolvendo objetivos e preferências.

$$\mathbf{D} = \mathbf{M}(\mathbf{O}_1, \mathbf{b}_1) \cap \mathbf{M}(\mathbf{O}_2, \mathbf{b}_2) \cap \dots \cap \mathbf{M}(\mathbf{O}_r, \mathbf{b}_r)$$

A pergunta fundamental é que operação deveria relacionar cada objetivo, \mathbf{O}_i e sua importância \mathbf{b}_i , que preserve a ordenação linear e requeira o conjunto de preferência e ao mesmo tempo relacione os dois fatores de maneira lógica e onde a negação também é considerada. Segundo YAGER (1981) *apud* ROSS (2004) a operação de implicação clássica satisfaz todas estas exigências, conseqüentemente, a decisão para uma alternativa particular \mathbf{a} pode ser substituída como uma implicação clássica na forma:

$$\mathbf{M}(\mathbf{O}_i(\mathbf{a}), \mathbf{b}_i) = \mathbf{b}_i \rightarrow \mathbf{O}_i(\mathbf{a}) = \underline{\mathbf{b}_i} \vee \mathbf{O}_i(\mathbf{a})$$

E a solução ótima é a alternativa que maximiza \mathbf{D} , e expressa em forma de pertinência é dada por:

$$\mu \mathbf{D}(\mathbf{a}^*) = \max [\min \{ \mu \mathbf{C}_1(\mathbf{a}), \mu \mathbf{C}_2(\mathbf{a}), \dots, \mu \mathbf{C}_r(\mathbf{a}) \}]$$

$$\text{onde: } \mathbf{C}_1 = \mathbf{b}_i \cup \mathbf{O}_i$$

Mas existe a possibilidade de acontecer algum empate numérico no caso de se verificar o grau de pertinência para duas ou mais alternativas em relação aos objetivos.

Para estes casos, YAGER (1981) *apud* ROSS (2004) definiu um procedimento especial. Se há o empate entre duas alternativas **x** e **y**, os valores provenientes das suas respectivas funções de decisão são **D(x) = D(y) = max [D(a)]** onde **a = x = y**.

Então recorre-se à solução seguinte onde os objetivos que geraram a igualdade são retirados da função:

$$\mathbf{D' (x) = \min [C_i (x)] \quad \text{onde} \quad i \neq k}$$

$$\mathbf{D' (y) = \min [C_i (y)] \quad \text{onde} \quad i \neq g}$$

k e **g** são os objetivos que provocaram o empate.

Comparamos então a valor de **D'(x)** e de **D'(y)**, e seleccionamos como a alternativa que possuir um maior valor.

Contudo, se a igualdade persistir, continuando com **D'(x) = D'(y)**, repetimos o processo novamente com:

$$\mathbf{D'' (x) = \min [C_i (x)] \quad \text{onde} \quad i \neq k \text{ e } j}$$

$$\mathbf{D'' (y) = \min [C_i (y)] \quad \text{onde} \quad i \neq g \text{ e } h}$$

E depois comparamos novamente os resultados e seleccionamos a opção que possuir a resposta com um valor mais alto como a alternativa ótima. Este procedimento de desempate pode ocorrer sucessivamente até que consigamos a resposta final.

De acordo com o modelo genérico descrito acima, agora podemos aplicá-lo na proposta específica deste estudo de modo a conseguir relacionar as principais variáveis que influem no processo decisório quanto a sistemas estruturais de edifícios.

5.3 – CONFIGURAÇÃO DO MODELO PARA DEFINIÇÃO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS DE EDIFÍCIOS

De acordo com o modelo geral descrito no item anterior, para o caso específico objeto deste trabalho, temos como nosso universo de alternativas **A**:

$$\mathbf{A} = \{a_1, a_2\}$$

Onde:

a_1 = sistema de construção industrializado em aço

a_2 = sistema de construção tradicional em concreto

O conjunto de objetivos **O**, é definido por:

$$\mathbf{O} = \{O_1, O_2, \dots, O_{26}\}$$

Onde:

O_1 = armazenamento de materiais na obra

O_2 = interferência sobre o entorno

O_3 = disponibilidade de equipamentos

O_4 = nível de especialização e disponibilidade da mão de obra

O_5 = velocidade de execução

O_6 = independência / compatibilidade de distintos trabalhos na obra

O_7 = adequação ao terreno

O_8 = compatibilidade com sistemas complementares

O_9 = adaptação / modificação diante de imprevistos ou incidentes na obra

O_{10} = facilidade de futuras expansões

O_{11} = custo de incorporação

O_{12} = custo de manutenção

O_{13} = custo da proteção contra incêndios

O_{14} = disponibilidade de capital

O_{15} = antecipação do retorno

O_{16} = disponibilidade de matéria prima

O_{17} = durabilidade da estrutura (vida útil)

O_{18} = vãos

O_{19} = fundações

O_{20} = facilidade de cálculo

O_{21} = impactos decorrentes da execução da obra

O_{22} = impactos decorrentes da matéria prima / resíduos

O_{23} = tipologia arquitetônica e identidade visual

O_{24} = facilidade de projeto arquitetônico

O_{25} = segurança durante a execução da obra

O_{26} = segurança em relação a incêndios

Para cada objetivo **O** definido acima, há uma preferência **P** contendo os parâmetros **b** que determinam a importância relativa dos objetivos, assim o conjunto de preferências **P** é dado por:

$$\mathbf{P} = \{b_1, b_2, \dots, b_{26}\}$$

Onde:

b_1 = armazenamento de materiais na obra

b_2 = interferência sobre o entorno

e assim por diante, até chegarmos a

b_{26} = segurança em relação a incêndios.

Os valores de cada uma das variáveis e de cada um dos parâmetros dos conjuntos envolvidos no modelo foram obtidos pelo método horizontal de geração de conhecimento e foram extraídos das entrevistas com os especialistas como descrito em 5.1 e mostrado nos anexos II e III.

CAPÍTULO 6

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Neste capítulo serão realizados dois exemplos de aplicação com o objetivo de validar o modelo desenvolvido neste trabalho. Os exemplos foram criados a partir de situações hipotéticas, onde foram definidas as características específicas de cada empreendimento. Depois será feita a verificação das respostas fornecidas pelo modelo e realizada uma análise crítica em relação aos resultados obtidos.

De acordo com características definidas para o primeiro exemplo de aplicação, pode parecer óbvio que para este empreendimento o uso de um sistema industrializado em aço seja mais viável, mas a intenção era de que o resultado gerado pelo modelo confirmasse essa tendência, como de fato aconteceu. Já para o segundo exemplo, foram definidas características onde a viabilidade do uso de um sistema ou de outro não estava tão clara, e de fato, o modelo confirmou essa tendência quando a primeira resposta foi uma igualdade, e a definição da melhor alternativa só foi conseguida após ser realizado um procedimento para desfazer a igualdade.

6.1 – EXEMPLO 01

Deseja-se neste exemplo definir ainda na fase de estudo de viabilidade e estudo preliminar o melhor sistema estrutural para ser aplicado em um empreendimento conforme as características que se seguem:

Contexto:

- Localização: Região central de Belo Horizonte – MG
- Contexto: urbano
- Perfil de ocupação do entorno: predominantemente comercial
- Perfil de tráfego do entorno: região de tráfego intenso
- Terreno (topografia / dimensões): Terreno com área reduzida e com topografia plana
- Solo: Solo pouco resistente

- Perfil de ocupação do edifício (uso): edifício comercial

Características do empreendedor / construtor:

- Capacidade de desembolso: imediata
- Disponibilidade de equipamentos: alugados
- Disponibilidade de mão de obra: boa disponibilidade
- Nível de especialização da mão de obra: mão de obra especializada
- Prazos definidos para execução: prazo médio

Assim montamos o problema da seguinte maneira:

$$\mathbf{A} = \{\text{aço, concreto}\} = \{a_1, a_2\}$$

O conjunto de objetivos \mathbf{O} , é definido por:

$$\mathbf{O} = \{O_1, O_2, \dots, O_{26}\}$$

De acordo com os resultados obtidos a partir da opinião dos especialistas, é feita uma avaliação das alternativas de estrutura em relação aos objetivos. Estas avaliações são conjuntos difusos expressos na notação de Zadeh.

Onde:

O_1 = armazenamento de materiais na obra

$$O_1 = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.25}{\text{Conc}} \right\}$$

O_2 = interferência sobre o entorno

$$O_2 = \left\{ \frac{0.87}{\text{Aço}} + \frac{0.62}{\text{Conc}} \right\}$$

O_3 = disponibilidade de equipamentos

$$O_3 = \left\{ \frac{0.5}{\text{Aço}} + \frac{0.75}{\text{Conc}} \right\}$$

O_4 = nível de especialização e disponibilidade da mão de obra

$$O_4 = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.75}{\text{Conc}} \right\}$$

O_5 = velocidade de execução

$$O_5 = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{0.5}{\text{Conc}} \right\}$$

O_6 = independência / compatibilidade de distintos trabalhos na obra

$$O_6 = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.5}{\text{Conc}} \right\}$$

O_7 = adequação ao terreno

$$O_7 = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_8 = compatibilidade com sistemas complementares

$$O_8 = \left\{ \frac{0.83}{\text{Aço}} + \frac{0.58}{\text{Conc}} \right\}$$

O_9 = adaptação / modificação diante de imprevistos ou incidentes na obra

$$O_9 = \left\{ \frac{0.62}{\text{Aço}} + \frac{0.56}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{10} = facilidade de futuras expansões

$$O_{10} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.25}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{11} = custo de incorporação

$$O_{11} = \left\{ \frac{0.58}{\text{Aço}} + \frac{0.83}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{12} = custo de manutenção

$$O_{12} = \left\{ \frac{0.5}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{13} = custo da proteção contra incêndios

$$O_{13} = \left\{ \frac{0.25}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{14} = disponibilidade de capital

$$O_{14} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.5}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{15} = antecipação do retorno

$$O_{15} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.5}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{16} = disponibilidade de matéria prima

$$O_{16} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{17} = durabilidade da estrutura (vida útil)

$$O_{17} = \left\{ \frac{0.5}{\text{Aço}} + \frac{0.75}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{18} = vãos

$$O_{18} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.25}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{19} = fundações

$$O_{19} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.5}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{20} = facilidade de cálculo

$$O_{20} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.75}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{21} = impactos decorrentes da execução da obra

$$O_{21} = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{0.62}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{22} = impactos decorrentes da matéria prima / resíduos

$$O_{22} = \left\{ \frac{0.83}{\text{Aço}} + \frac{0.25}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{23} = tipologia arquitetônica e identidade visual

$$O_{23} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{24} = facilidade de projeto arquitetônico

$$O_{24} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{25} = segurança durante a execução da obra

$$O_{25} = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{0.25}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{26} = segurança em relação à incêndios

$$O_{26} = \left\{ \frac{0.5}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

As funções de pertinência para cada um dos objetivos relacionados às alternativas são mostrados no anexo II.

O conjunto de preferências \mathbf{P} é dado por:

$$\mathbf{P} = \{b_1, b_2, \dots, b_{26}\}$$

Onde:

b_1 = armazenamento de materiais na obra = 0.75 $\rightarrow \underline{b}_1 = 0.25$

b_2 = interferência sobre o entorno = 0.75 $\rightarrow \underline{b}_2 = 0.25$

b_3 = disponibilidade de equipamentos = 0.5 $\rightarrow \underline{b}_3 = 0.5$

b_4 = nível de especialização e disponibilidade da mão de obra = 0.5 $\rightarrow \underline{b}_4 = 0.5$

b_5 = velocidade de execução = 1.0 $\rightarrow \underline{b}_5 = 0.0$

b_6 = compatibilidade de distintos trabalhos na obra = 0.5 $\rightarrow \underline{b}_6 = 0.5$

b_7 = adequação ao terreno = 0.0 $\rightarrow \underline{b}_7 = 1.0$

b_8 = compatibilidade com sistemas complementares = 0.75 $\rightarrow \underline{b}_8 = 0.25$

b_9 = adaptação diante de imprevistos ou incidentes na obra = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_9 = 0.75$

b_{10} = facilidade de futuras expansões = 0.0 $\rightarrow \underline{b}_{10} = 1.0$

b_{11} = custo de incorporação = 1.0 $\rightarrow \underline{b}_{11} = 0.0$

b_{12} = custo de manutenção = 0.5 $\rightarrow \underline{b}_{12} = 0.5$

b_{13} = custo da proteção contra incêndios = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_{13} = 0.75$

b_{14} = disponibilidade de capital = 0.75 $\rightarrow \underline{b}_{14} = 0.25$

b_{15} = antecipação do retorno = 1.0 $\rightarrow \underline{b}_{15} = 0.0$

b_{16} = disponibilidade de matéria prima = 0.0 $\rightarrow \underline{b}_{16} = 1.0$

b_{17} = durabilidade da estrutura (vida útil) = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_{17} = 0.75$

b_{18} = vãos = 1.0 $\rightarrow \underline{b}_{18} = 0.0$

b_{19} = fundações = 0.5 $\rightarrow \underline{b}_{19} = 0.5$

b_{20} = facilidade de cálculo = 0.0 $\rightarrow \underline{b}_{20} = 1.0$

b_{21} = impactos decorrentes da execução da obra = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_{21} = 0.75$

b_{22} = impactos decorrentes da matéria prima / resíduos = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_{22} = 0.75$

b_{23} = tipologia arquitetônica e identidade visual = 0.75 $\rightarrow \underline{b}_{23} = 0.25$

b_{24} = facilidade de projeto arquitetônico = 0.0 $\rightarrow \underline{b}_{24} = 1.0$

b_{25} = segurança durante a execução da obra = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_{25} = 0.75$

b_{26} = segurança em relação à incêndios = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_{26} = 0.75$

Com estes valores de preferências, os cálculos serão:

Primeiro para sistema industrializado em aço:

$$\begin{aligned} D(a_1) = D(aço) = & (\underline{b}_1 \cup O_1) \cap (\underline{b}_2 \cup O_2) \cap (\underline{b}_3 \cup O_3) \cap (\underline{b}_4 \cup O_4) \cap (\underline{b}_5 \cup O_5) \cap \\ & (\underline{b}_6 \cup O_6) \cap (\underline{b}_7 \cup O_7) \cap (\underline{b}_8 \cup O_8) \cap (\underline{b}_9 \cup O_9) \cap (\underline{b}_{10} \cup O_{10}) \cap (\underline{b}_{11} \cup O_{11}) \cap (\underline{b}_{12} \cup O_{12}) \\ & \cap (\underline{b}_{13} \cup O_{13}) \cap (\underline{b}_{14} \cup O_{14}) \cap (\underline{b}_{15} \cup O_{15}) \cap (\underline{b}_{16} \cup O_{16}) \cap (\underline{b}_{17} \cup O_{17}) \cap (\underline{b}_{18} \cup O_{18}) \cap \\ & (\underline{b}_{19} \cup O_{19}) \cap (\underline{b}_{20} \cup O_{20}) \cap (\underline{b}_{21} \cup O_{21}) \cap (\underline{b}_{22} \cup O_{22}) \cap (\underline{b}_{23} \cup O_{23}) \cap (\underline{b}_{24} \cup O_{24}) \\ & \cap (\underline{b}_{25} \cup O_{25}) \cap (\underline{b}_{26} \cup O_{26}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D(a_1) = D(aço) = & (0.25 \vee 1.0) \wedge (0.25 \vee 0.87) \wedge (0.5 \vee 0.5) \wedge (0.5 \vee 1.0) \wedge \\ & (0.0 \vee 0.75) \wedge (0.5 \vee 1.0) \wedge (1.0 \vee 0.75) \wedge (0.25 \vee 0.83) \wedge (0.75 \vee 0.62) \wedge \\ & (1.0 \vee 1.0) \wedge (0.0 \vee 0.58) \wedge (0.5 \vee 0.5) \wedge (0.75 \vee 0.25) \wedge (0.25 \vee 1.0) \wedge \\ & (0.0 \vee 1.0) \wedge (1.0 \vee 1.0) \wedge (0.75 \vee 0.5) \wedge (0.0 \vee 1.0) \wedge (0.5 \vee 1.0) \wedge (1.0 \vee 1.0) \\ & \wedge (0.75 \vee 0.75) \wedge (0.75 \vee 0.83) \wedge (0.25 \vee 1.0) \wedge (1.0 \vee 1.0) \wedge (0.75 \vee 0.75) \\ & \wedge (0.75 \vee 0.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D(a_1) = D(aço) = & 1.0 \wedge 0.87 \wedge 0.5 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.83 \wedge 0.75 \\ & \wedge 1.0 \wedge 0.58 \wedge 0.5 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \\ & \wedge 0.83 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \end{aligned}$$

$$D(a_1) = D(aço) = 0.5$$

Agora os cálculos para sistema tradicional em concreto:

$$\begin{aligned} D(a_2) = D(conc) = & (\underline{b}_1 \cup O_1) \cap (\underline{b}_2 \cup O_2) \cap (\underline{b}_3 \cup O_3) \cap (\underline{b}_4 \cup O_4) \cap (\underline{b}_5 \cup O_5) \cap \\ & (\underline{b}_6 \cup O_6) \cap (\underline{b}_7 \cup O_7) \cap (\underline{b}_8 \cup O_8) \cap (\underline{b}_9 \cup O_9) \cap (\underline{b}_{10} \cup O_{10}) \cap (\underline{b}_{11} \cup O_{11}) \cap (\underline{b}_{12} \cup O_{12}) \\ & \cap (\underline{b}_{13} \cup O_{13}) \cap (\underline{b}_{14} \cup O_{14}) \cap (\underline{b}_{15} \cup O_{15}) \cap (\underline{b}_{16} \cup O_{16}) \cap (\underline{b}_{17} \cup O_{17}) \cap (\underline{b}_{18} \cup O_{18}) \cap \\ & (\underline{b}_{19} \cup O_{19}) \cap (\underline{b}_{20} \cup O_{20}) \cap (\underline{b}_{21} \cup O_{21}) \cap (\underline{b}_{22} \cup O_{22}) \cap (\underline{b}_{23} \cup O_{23}) \cap (\underline{b}_{24} \cup O_{24}) \\ & \cap (\underline{b}_{25} \cup O_{25}) \cap (\underline{b}_{26} \cup O_{26}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D(a_2) = D(\text{conc}) = & (0.25 \vee 0.25) \wedge (0.25 \vee 0.62) \wedge (0.5 \vee 0.75) \wedge (0.55 \vee 0.75) \wedge \\
& (0.0 \vee 0.5) \wedge (0.5 \vee 0.5) \wedge (1.0 \vee 1.0) \wedge (0.25 \vee 0.58) \wedge (0.75 \vee 0.56) \wedge (1.0 \vee 0.25) \\
& \wedge (0.0 \vee 0.83) \wedge (0.5 \vee 1.0) \wedge (0.75 \vee 1.0) \wedge (0.25 \vee 0.5) \wedge (0.0 \vee 0.5) \wedge (1.0 \vee 1.0) \\
& \wedge (0.75 \vee 0.75) \wedge (0.0 \vee 0.25) \wedge (0.5 \vee 0.5) \wedge (1.0 \vee 0.75) \wedge (0.75 \vee 0.62) \wedge \\
& (0.75 \vee 0.25) \wedge (0.25 \vee 1.0) \wedge (1.0 \vee 1.0) \wedge (0.75 \vee 0.25) \wedge (0.75 \vee 1.0)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D(a_2) = D(\text{conc}) = & 0.25 \wedge 0.62 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \wedge 0.5 \wedge 0.5 \wedge 1.0 \wedge 0.58 \wedge 0.75 \\
& \wedge 1.0 \wedge 0.83 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.5 \wedge 0.5 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 0.25 \wedge 0.5 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \\
& \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0
\end{aligned}$$

$$D(a_2) = D(\text{conc}) = 0.25$$

Como:

$$D(a_1) = D(\text{aço}) = 0.5 > D(a_2) = D(\text{conc}) = 0.25$$

Conclui-se que a partir do cenário mostrado no exemplo 01 e diante da recomendação e das importâncias relativas extraídas dos questionários contendo a opinião dos especialistas, constatou-se que o grau com o qual a alternativa **do sistema industrializado em aço** (0,5) satisfaz os critérios especificados para este empreendimento específico é superior ao grau de satisfação da alternativa **do sistema tradicional em concreto** (0,25). Neste caso a alternativa ótima seria o **SISTEMA INDUSTRIALIZADO EM AÇO**.

6.2 – EXEMPLO 02

Conforme exemplo 01, deseja-se definir o sistema estrutural que dará a melhor resposta para o empreendimento conforme as características que se seguem:

Contexto:

- Localização: Região central de Montes Claros – MG
- Contexto: urbano
- Perfil de ocupação do entorno: predominantemente comercial
- Perfil de tráfego do entorno: região de tráfego intenso
- Terreno (topografia / dimensões): Terreno com amplo e com topografia plana
- Solo: Solo pouco resistente
- Perfil de ocupação do edifício (uso): edifício residencial

Características do empreendedor / construtor:

- Capacidade de desembolso: prestações
- Disponibilidade de equipamentos: alugados
- Disponibilidade de mão de obra: boa disponibilidade
- Nível de especialização da mão de obra: mão de obra especializada
- Prazos definidos para execução: prazo longo

Novamente montamos o problema:

$$\mathbf{A} = \{\text{aço, concreto}\} = \{a_1, a_2\}$$

Com o conjunto de objetivos \mathbf{O} :

$$\mathbf{O} = \{O_1, O_2, \dots, O_{26}\}$$

De acordo com os resultados obtidos à partir da opinião dos especialistas, é feita uma avaliação das alternativas de estrutura em relação aos objetivos. Estas avaliações são conjuntos difusos expressos na notação de Zadeh.

Onde:

O_1 = armazenamento de materiais na obra

$$O_1 = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{0.75}{\text{Conc}} \right\}$$

O_2 = interferência sobre o entorno

$$O_2 = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{0.62}{\text{Conc}} \right\}$$

O_3 = disponibilidade de equipamentos

$$O_3 = \left\{ \frac{0.5}{\text{Aço}} + \frac{0.75}{\text{Conc}} \right\}$$

O_4 = nível de especialização e disponibilidade da mão de obra

$$O_4 = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.75}{\text{Conc}} \right\}$$

O_5 = velocidade de execução

$$O_5 = \left\{ \frac{0.25}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_6 = independência / compatibilidade de distintos trabalhos na obra

$$O_6 = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.75}{\text{Conc}} \right\}$$

O_7 = adequação ao terreno

$$O_7 = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_8 = compatibilidade com sistemas complementares

$$O_8 = \left\{ \frac{0.83}{\text{Aço}} + \frac{0.58}{\text{Conc}} \right\}$$

O_9 = adaptação / modificação diante de imprevistos ou incidentes na obra

$$O_9 = \left\{ \frac{0.62}{\text{Aço}} + \frac{0.56}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{10} = facilidade de futuras expansões

$$O_{10} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.25}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{11} = custo de incorporação

$$O_{11} = \left\{ \frac{0.58}{\text{Aço}} + \frac{0.83}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{12} = custo de manutenção

$$O_{12} = \left\{ \frac{0.5}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{13} = custo da proteção contra incêndios

$$O_{13} = \left\{ \frac{0.25}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{14} = disponibilidade de capital

$$O_{14} = \left\{ \frac{0.25}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{15} = antecipação do retorno

$$O_{15} = \left\{ \frac{0.5}{\text{Aço}} + \frac{0.75}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{16} = disponibilidade de matéria prima

$$O_{16} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{17} = durabilidade da estrutura (vida útil)

$$O_{17} = \left\{ \frac{0.5}{\text{Aço}} + \frac{0.75}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{18} = vãos

$$O_{18} = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{19} = fundações

$$O_{19} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.5}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{20} = facilidade de cálculo

$$O_{20} = \left\{ \frac{1.0}{\text{Aço}} + \frac{0.75}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{21} = impactos decorrentes da execução da obra

$$O_{21} = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{0.62}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{22} = impactos decorrentes da matéria prima / resíduos

$$O_{22} = \left\{ \frac{0.83}{\text{Aço}} + \frac{0.25}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{23} = tipologia arquitetônica e identidade visual

$$O_{23} = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{24} = facilidade de projeto arquitetônico

$$O_{24} = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{25} = segurança durante a execução da obra

$$O_{25} = \left\{ \frac{0.75}{\text{Aço}} + \frac{0.25}{\text{Conc}} \right\}$$

O_{26} = segurança em relação à incêndios

$$O_{26} = \left\{ \frac{0.5}{\text{Aço}} + \frac{1.0}{\text{Conc}} \right\}$$

As funções de pertinência para cada um dos objetivos relacionados às alternativas são mostrados no anexo II.

O conjunto de preferências \mathbf{P} é dado por:

$$\mathbf{P} = \{b_1, b_2, \dots, b_{26}\}$$

Onde:

b_1 = armazenamento de materiais na obra = 0.0 $\rightarrow \underline{b}_1 = 1.0$

b_2 = interferência sobre o entorno = 0.75 $\rightarrow \underline{b}_2 = 0.25$

b_3 = disponibilidade de equipamentos = 0.5 $\rightarrow \underline{b}_3 = 0.5$

b_4 = nível de especialização e disponibilidade da mão de obra = 0.5 $\rightarrow \underline{b}_4 = 0.5$

b_5 = velocidade de execução = 0.0 $\rightarrow \underline{b}_5 = 1.0$

b_6 = compatibilidade de distintos trabalhos na obra = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_6 = 0.75$

b_7 = adequação ao terreno = 0.0 $\rightarrow \underline{b}_7 = 1.0$

b_8 = compatibilidade com sistemas complementares = 0.75 $\rightarrow \underline{b}_8 = 0.25$

b_9 = adaptação diante de imprevistos ou incidentes na obra = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_9 = 0.75$

b_{10} = facilidade de futuras expansões = 0.5 $\rightarrow \underline{b}_{10} = 0.5$

b_{11} = custo de incorporação = 1.0 $\rightarrow \underline{b}_{11} = 0.0$

b_{12} = custo de manutenção = 0.75 $\rightarrow \underline{b}_{12} = 0.25$

b_{13} = custo da proteção contra incêndios = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_{13} = 0.75$

b_{14} = disponibilidade de capital = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_{14} = 0.75$

b_{15} = antecipação do retorno = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_{15} = 0.75$

b_{16} = disponibilidade de matéria prima = 0.0 $\rightarrow \underline{b}_{16} = 1.0$

b_{17} = durabilidade da estrutura (vida útil) = 0.25 $\rightarrow \underline{b}_{17} = 0.75$

b_{18} = vãos = 0.0 $\rightarrow \underline{b}_{18} = 1.0$

$$b_{19} = \text{fundações} = 0.5 \rightarrow \underline{b}_{19} = 0.5$$

$$b_{20} = \text{facilidade de cálculo} = 0.0 \rightarrow \underline{b}_{20} = 1.0$$

$$b_{21} = \text{impactos decorrentes da execução da obra} = 0.25 \rightarrow \underline{b}_{21} = 0.75$$

$$b_{22} = \text{impactos decorrentes da matéria prima / resíduos} = 0.25 \rightarrow \underline{b}_{22} = 0.75$$

$$b_{23} = \text{tipologia arquitetônica e identidade visual} = 0.25 \rightarrow \underline{b}_{23} = 0.75$$

$$b_{24} = \text{facilidade de projeto arquitetônico} = 0.0 \rightarrow \underline{b}_{24} = 1.0$$

$$b_{25} = \text{segurança durante a execução da obra} = 0.25 \rightarrow \underline{b}_{25} = 0.75$$

$$b_{26} = \text{segurança em relação à incêndios} = 0.25 \rightarrow \underline{b}_{26} = 0.75$$

Com estes valores de preferências, os cálculos serão:

Primeiro para sistema industrializado em aço:

$$\begin{aligned} D(a_1) = D(\text{aço}) = & (\underline{b}_1 \cup O_1) \cap (\underline{b}_2 \cup O_2) \cap (\underline{b}_3 \cup O_3) \cap (\underline{b}_4 \cup O_4) \cap (\underline{b}_5 \cup O_5) \cap \\ & (\underline{b}_6 \cup O_6) \cap (\underline{b}_7 \cup O_7) \cap (\underline{b}_8 \cup O_8) \cap (\underline{b}_9 \cup O_9) \cap (\underline{b}_{10} \cup O_{10}) \cap (\underline{b}_{11} \cup O_{11}) \cap (\underline{b}_{12} \cup O_{12}) \\ & \cap (\underline{b}_{13} \cup O_{13}) \cap (\underline{b}_{14} \cup O_{14}) \cap (\underline{b}_{15} \cup O_{15}) \cap (\underline{b}_{16} \cup O_{16}) \cap (\underline{b}_{17} \cup O_{17}) \cap (\underline{b}_{18} \cup O_{18}) \cap \\ & (\underline{b}_{19} \cup O_{19}) \cap (\underline{b}_{20} \cup O_{20}) \cap (\underline{b}_{21} \cup O_{21}) \cap (\underline{b}_{22} \cup O_{22}) \cap (\underline{b}_{23} \cup O_{23}) \cap (\underline{b}_{24} \cup O_{24}) \\ & \cap (\underline{b}_{25} \cup O_{25}) \cap (\underline{b}_{26} \cup O_{26}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D(a_1) = D(\text{aço}) = & (1.0 \vee 0.75) \wedge (0.25 \vee 0.75) \wedge (0.5 \vee 0.5) \wedge (0.5 \vee 1.0) \wedge \\ & (1.0 \vee 0.25) \wedge (0.75 \vee 1.0) \wedge (1.0 \vee 0.75) \wedge (0.25 \vee 0.62) \wedge (0.75 \vee 0.62) \wedge \\ & (0.5 \vee 1.0) \wedge (0.0 \vee 0.58) \wedge (0.25 \vee 0.5) \wedge (0.75 \vee 0.25) \wedge (0.75 \vee 0.25) \wedge \\ & (0.75 \vee 0.5) \wedge (1.0 \vee 1.0) \wedge (0.75 \vee 0.5) \wedge (1.0 \vee 0.75) \wedge (0.5 \vee 1.0) \wedge (1.0 \vee 1.0) \\ & \wedge (0.75 \vee 0.75) \wedge (0.75 \vee 0.83) \wedge (0.75 \vee 0.75) \wedge (1.0 \vee 0.75) \wedge (0.75 \vee 0.75) \\ & \wedge (0.75 \vee 0.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D(a_1) = D(\text{aço}) = & 1.0 \wedge 0.75 \wedge 0.5 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.62 \wedge 0.75 \\ & \wedge 1.0 \wedge 0.58 \wedge 0.5 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \\ & \wedge 0.75 \wedge 0.83 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \end{aligned}$$

$$D(a_1) = D(aço) = 0.5$$

Agora os cálculos para sistema tradicional em concreto:

$$\begin{aligned} D(a_2) = D(\text{conc}) = & (\underline{b}_1 \cup O_1) \cap (\underline{b}_2 \cup O_2) \cap (\underline{b}_3 \cup O_3) \cap (\underline{b}_4 \cup O_4) \cap (\underline{b}_5 \cup O_5) \cap \\ & (\underline{b}_6 \cup O_6) \cap (\underline{b}_7 \cup O_7) \cap (\underline{b}_8 \cup O_8) \cap (\underline{b}_9 \cup O_9) \cap (\underline{b}_{10} \cup O_{10}) \cap (\underline{b}_{11} \cup O_{11}) \cap (\underline{b}_{12} \cup O_{12}) \\ & \cap (\underline{b}_{13} \cup O_{13}) \cap (\underline{b}_{14} \cup O_{14}) \cap (\underline{b}_{15} \cup O_{15}) \cap (\underline{b}_{16} \cup O_{16}) \cap (\underline{b}_{17} \cup O_{17}) \cap (\underline{b}_{18} \cup O_{18}) \cap \\ & (\underline{b}_{19} \cup O_{19}) \cap (\underline{b}_{20} \cup O_{20}) \cap (\underline{b}_{21} \cup O_{21}) \cap (\underline{b}_{22} \cup O_{22}) \cap (\underline{b}_{23} \cup O_{23}) \cap (\underline{b}_{24} \cup O_{24}) \\ & \cap (\underline{b}_{25} \cup O_{25}) \cap (\underline{b}_{26} \cup O_{26}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D(a_2) = D(\text{conc}) = & (1.0 \vee 0.75) \wedge (0.25 \vee 0.62) \wedge (0.5 \vee 0.75) \wedge (0.5 \vee 0.75) \wedge \\ & (1.0 \vee 1.0) \wedge (0.75 \vee 0.75) \wedge (1.0 \vee 0.1.0) \wedge (0.25 \vee 0.58) \wedge (0.75 \vee 0.56) \wedge \\ & (0.5 \vee 0.25) \wedge (0.0 \vee 0.83) \wedge (0.25 \vee 1.0) \wedge (0.75 \vee 1.0) \wedge (0.75 \vee 1.0) \wedge \\ & (0.75 \vee 0.75) \wedge (1.0 \vee 1.0) \wedge (0.75 \vee 0.75) \wedge (1.0 \vee 1.0) \wedge (0.5 \vee 0.5) \wedge (1.0 \vee 0.75) \\ & \wedge (0.75 \vee 0.62) \wedge (0.75 \vee 0.25) \wedge (0.75 \vee 1.0) \wedge (1.0 \vee 1.0) \wedge (0.75 \vee 0.25) \\ & \wedge (0.75 \vee 1.0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D(a_2) = D(\text{conc}) = & 1.0 \wedge 0.62 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.58 \wedge 0.75 \\ & \wedge 0.5 \wedge 0.83 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \\ & \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \end{aligned}$$

$$D(a_2) = D(\text{conc}) = 0.5$$

Como:

$$D(a_1) = D(aço) = 0.5 \quad = \quad D(a_2) = D(\text{conc}) = 0.5$$

No cenário relativo ao exemplo 02, a partir das funções de decisão D para as duas alternativas, chegou-se ao resultado que tanto o **sistema industrializado em aço** quanto o **sistema tradicional em concreto**, obtiveram o mesmo grau de satisfação para os critérios especificados para este edifício.

Para desfazer a igualdade gerada, aplicamos o procedimento, já descrito anteriormente e definido por YAGER (1981) da seguinte forma:

- Sistema industrializado em aço:

$$D(a_1) = D(\text{aço}) = 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.62 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.58 \wedge 0.5 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 0.83 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 0.75$$

$$D(a_1) = D(\text{aço}) = 0.5$$

- Sistema tradicional em concreto:

$$D(a_2) = D(\text{conc}) = 1.0 \wedge 0.62 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.58 \wedge 0.75 \wedge 0.83 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \wedge 0.75 \wedge 1.0 \wedge 1.0 \wedge 0.75 \wedge 1.0$$

$$D(a_2) = D(\text{conc}) = 0.58$$

Finalmente:

$$D(a_2) = D(\text{conc}) = 0.58 > D(a_1) = D(\text{aço}) = 0.5$$

Então, conclui-se que a partir do cenário mostrado no exemplo 02, que o grau com o qual a alternativa **do sistema tradicional em concreto** (0,58) satisfaz os critérios especificados para este empreendimento específico é superior ao grau de satisfação da alternativa **do sistema industrializado em aço** (0,5). Neste caso a alternativa otimizada, seria o **SISTEMA TRADICIONAL EM CONCRETO**.

CAPÍTULO 07

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo desenvolvido para tomada de decisões em relação à definição de sistemas estruturais de edifícios baseado na Teoria da Lógica Difusa poderá ter grande utilidade no auxílio e orientação aos profissionais da construção civil principalmente nas etapas de estudo de viabilidade da obra e de estudo preliminar. Atualmente estes profissionais contam somente com a sua própria experiência e com alguns manuais comparativos de vantagens de cada sistema que não fornecem informações suficientes para uma avaliação correta de cada uma delas. Este modelo se faz necessário porque estas escolhas são de fundamental importância e podem determinar a eficiência da obra e o sucesso do empreendimento, pois a escolha correta do sistema estrutural e do sistema construtivo pode reduzir substancialmente o custo de um empreendimento e até mesmo determinar se o investimento é viável ou não.

Com a realização deste modelo, podemos dizer que ele se aplica de maneira mais satisfatória nas fases iniciais do projeto de um empreendimento (estudo de viabilidade e de estudo preliminar), mas é importante salientar que a definição em relação ao tipo de sistema a ser utilizado deve ser feita antes do projeto arquitetônico, visto que um bom projeto de arquitetura deve ter sua concepção baseada nos princípios e peculiaridades de cada sistema, e que uma vez tomada a decisão, qualquer modificação implica em mais gastos. Dentro destas fases, o modelo contribui fundamentalmente na avaliação e definição das possíveis alternativas, assim como da sua viabilidade construtiva, e ainda nestas fases, o projetista tem uma visão mais geral do projeto, onde se realizam análises para conhecer com mais exatidão o sistema pretendido e assim poder determinar a conveniência de sua aplicação. Com o desenvolvimento deste modelo, o projetista tem a possibilidade de definir com mais embasamento o sistema a ser utilizado e evita exaustivos estudos de projeto.

De acordo com a proposta inicial deste trabalho que era de desenvolver o primeiro estágio de um modelo para definição de sistemas estruturais de edifícios, pôde-se chegar à conclusão que o modelo gerado obteve sucesso no seu objetivo. A partir da análise de fatores construtivos, econômicos, estruturais, arquitetônicos, ambientais e de segurança as respostas do modelo foram pertinentes às situações às quais foi submetido.

Como os fatores que influem de maneira efetiva na decisão do tipo de sistema a ser utilizado são muitos (fatores técnicos, econômicos, construtivos, ambientais e estéticos), e se levarmos em consideração que cada obra possui características bastante específicas, a principal dificuldade encontrada no desenvolvimento deste trabalho era encontrar uma forma com a qual o modelo conseguisse trabalhar com pelo menos três variáveis distintas:

- O tipo de sistema a ser utilizado (aço, concreto);
- As características específicas de cada obra (dimensão do terreno, perfil do entorno, tipo de ocupação, recursos do construtor, ...)
- As características gerais das obras (custo, vãos, peso, ...).

Com estas variáveis embutidas no modelo, pode-se realizar a verificação e definição dos sistemas da maioria dos empreendimentos construtivos relacionados à edifícios.

Como normalmente o problema objeto deste estudo permite mais de uma solução, o modelo não descarta nenhuma das alternativas, mas apenas indica qual seria a solução ótima para a situação em questão atribuindo valores às alternativas disponíveis de maneira que os parâmetros que em um primeiro momento se apresentavam com uma alta carga de incertezas, fossem transformados em valores numéricos de modo que pudessem ser mais facilmente interpretados.

A base de dados foi obtida a partir da entrevista realizada com especialistas reconhecidos da área de construção civil e a partir das suas opiniões conseguiu-se informações sobre a recomendação de cada sistema em relação a um determinado parâmetro (objetivo) que influi na decisão do sistema e também sobre a sua importância

relativa (peso) em relação ao empreendimento. Desta forma o modelo pode fornecer uma resposta bastante aproximada da opinião dos especialistas.

Uma melhor base de dados que pode ser conseguida através de uma evolução da forma e modelagem do questionário submetido aos especialistas, pode contribuir muito para o aperfeiçoamento do modelo, podendo gerar valores de pertinência de recomendação e importância das variáveis mais ricos. Precisa-se ainda incluir no modelo, outros tipos de sistemas estruturais de maneira que a aplicação do modelo seja mais útil aos profissionais da construção.

A validação do trabalho desenvolvido deu-se a partir de dois exemplos hipotéticos aos quais o modelo foi submetido. De acordo com características definidas para o primeiro exemplo de aplicação, pode parecer óbvio que para este empreendimento o uso de um sistema industrializado em aço seja mais viável, mas a intenção era de que o resultado gerado pelo modelo confirmasse essa tendência, como de fato aconteceu. Já para o segundo exemplo, foram definidas características onde a viabilidade do uso de um sistema ou de outro não estava tão clara, e de fato, o modelo confirmou essa tendência quando a primeira resposta foi uma igualdade, e a definição da melhor alternativa só foi conseguida após o procedimento de desempate.

7.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do trabalho desenvolvido, um segundo estágio dentro desta mesma linha de pesquisa pode ser o aperfeiçoamento do modelo, que como já foi dito, pelo fato de ser uma primeira experiência, levou em consideração apenas dois tipos bastante distintos de sistemas estruturais: a estrutura de concreto tradicional e moldada *in loco* e a estrutura metálica industrializada. Poderia-se então, incluir outros tipos de estrutura como as de concreto protendido, estruturas mistas, lajes nervuradas, concreto pré-moldado, estruturas metálicas com perfis leves entre muitas outras. Um próximo estágio para este trabalho seria desenvolver uma programação de modo que, a partir do modelo desenvolvido fosse criado um software que forneceria os resultados através valores de pertinência da viabilidade de cada sistema analisado diante de situações onde o usuário entraria com os dados e características específicas da obra.

Também pode ser feita a inclusão neste modelo de um processo mais eficiente para se verificar a importância ou a intensidade com que cada um dos parâmetros eleitos influem na tomada de decisão. Para isto, sugere-se fazer uso do “Processo Hierárquico Analítico” que pode determinar a importância relativa de cada um dos diversos critérios que são considerados no processo. Assim se poderá analisar dentro do empreendimento qual variável apresenta maior peso na decisão, ou ordená-las de acordo com sua importância.

Uma evolução deste trabalho que traria mais eficiência ao modelo, seria tratar do edifício não “como um todo”, mas por partes, podendo se avaliar cada elemento constituinte do edifício separadamente. Por exemplo, nas lajes poderíamos avaliar a viabilidade de uma laje de concreto moldada *in loco*, uma laje de concreto pré-moldada ou uma laje com forma metálica incorporada, dentre várias outras possibilidades. Paralelamente também poderíamos verificar os pilares, as vigas, fundações, sistemas de estabilização de edifícios (contraventamentos) e sistemas de fechamento.

A aplicação dos métodos da Lógica Difusa em engenharia de incêndio também pode trazer grande contribuição para a área, visto que os parâmetros que norteiam os

fenômenos de incêndio muitas vezes são difíceis de serem mapeados e contam com uma alta carga de incertezas.

BIBLIOGRAFIA:

AÇOMINAS. **Análise Comparativa do Custo da Estrutura Metálica com a Estrutura de Concreto**. Disponível em < www.metalica.com.br > acesso em 18 out. 2005.

BARBALHO, Valéria M. de S. **Sistemas Baseados em Conhecimento e Lógica Difusa para Simulação do Processo Chuva-Vazão**. Rio de Janeiro: COPPE – UFRJ, 2001. 77 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

BAUERMANN, Maristela. **Uma Investigação Sobre o Processo de Projeto em Edifícios de Andares Múltiplos em Aço**. Ouro Preto: UFOP, 2002. 254 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2002.

BELCHIOR, Arnaldo D. ROCHA, Ana Regina C. da. XEXÉO, Geraldo B. **Enfoques Sobre a Teoria dos Conjuntos Fuzzy**. Rio de Janeiro: UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CAMPO, Cecília Martín del. FRANÇOIS, Juan Luis. **Desarrollo de una Metodología Basada en Lógica Difusa para Evaluar la Sustentabilidad de Tecnologías de Generación Eléctrica**. In: LATIN AMERICAN SECTION OF THE AMERICAN NUCLEAR SOCIETY 2005 ANNUAL SYMPOSIUM. Rio de Janeiro, Brazil, 2005.

Conjuntos Nebulosos. Universidade estadual de Maringá. Disponível em: < www.din.uem.br/ia/control/fuz_prin.htm > Acesso em 05 mar 2006.

CORZO, Yuliana. **La Lógica**. Disponível em < www.monografias.com >. Acesso em 29 mar. 2006.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem**. São Paulo: Ziguarte, 1997.

DUBOIS, Didier. PRADE, Henri. **Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications**. New York: Academic Press, 1980. 392 p.

FIALHO, Antônio de Pádua F. **Passarelas Urbanas em Estruturas de Aço**. Ouro Preto: UFOP, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

FIALHO, Antônio de Pádua F. RIBEIRO, Luís Fernando Loureiro. Matriz Multicriterial para Escolha de Sistema Estrutural na Concepção de Passarela Urbanas em Aço. **Construção Metálica**, São Paulo, p. 29-32, edição 77. 2006.

Filosofia e Idéias – Interfilosofia – Lógica Difusa. Disponível em: geocities.com/interfilosofia.fuzzy.html >. Acesso em 29 mar. 2003.

JANÉ, Dario de Almeida. **Uma Introdução ao Estudo da Lógica Fuzzy**. Hórus – Revista de Humanidades e Ciências Sociais Aplicadas, Ourinhos, n. 02, 2004.

JUNIOR, Kléos Magalhães L. C., MOREIRA, Márcio Sampaio S., PAES, José Luiz Rangel, SILVA, Reginaldo Carneiro da S., VERÍSSIMO, Gustavo de Souza. **Sistemas Estruturais**. Viçosa: UFV – DEC, 1998.

LEMOS, Francisco Luiz de. **Uso da Lógica Difusa na Análise de Segurança de Repositórios de Rejeitos Nucleares**. Ouro Preto: UFOP, 2003. 115 p. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2003.

LIMA, Cláudio José Teixeira de. **Processo de Tomada de Decisão em Projetos de Exploração e Produção de Petróleo no Brasil: Uma Abordagem Utilizando Conjuntos Nebulosos**. Rio de Janeiro: UFRJ – COPPE, 2003. 141 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

MÁRQUEZ, Moisés Ramírez. **Aplicación de los Métodos de la Lógica Difusa al Proyecto y Construcción de Puentes**. Barcelona: UPC, 2000. 273 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidad Politécnica de Cataluña, 2000.

MELO, André Luis Oliveira de. **Avaliação e Seleção de Áreas para Implantação de Aterro Sanitário Utilizando Lógica Fuzzy e Análise Multi-Critério: Uma Proposta Metodológica. Aplicação ao Município de Cachoeiro de Itapemerim – ES.** Viçosa: UFV, 2001. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 2001.

MORAES, Flavia Rosindo de. **Uma contribuição ao estudo do processo de projeto de empreendimentos em construção metálica – uma visão segundo a nova filosofia de produção.** Vitória: UFES, 2000. 220 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2000.

ANDRADE, Paulo Alcides. **Porque Construir com Estruturas Metálicas.** Disponível em < www.pauloandradeengenharia.com.br >. Acesso em 14 nov. 2005.

PERSONA, Mario. **Fuzzylando a Qualidade Total.** Disponível em < www.ieqp.com.br/revista_pesquisamais/artigomario.htm >. Acesso em 05 mar. 2005.

PINHO, Fernando Ottoboni. **Quando Construir em Aço?** São Paulo: Açominas, 2005.

RALESCU, Anca L. **Applied Research in Fuzzy Technology: Three Years of Research at the Laboratory for International Fuzzy Engineering (LIFE), Yokohama, Japan.** Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994. 458 p.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **A Concepção Estrutural e a Arquitetura.** São Paulo: Zigurate, 2000. 271 p.

ROSS, Timothy J. **Fuzzy Logic with Enginnering Aplications.** 2 ed. London: John Wiley & Sons Ltd. 2004. 628 p.

SOUSA, Armando José. **Fuzzy Logic – Lógica Difusa - Introdução Muito Rápida.** 2005. Disponível em: < >. Acesso em: 26 mar. 2006.

Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP – DECIV, **Sistemas Estruturais.** Ouro Preto: UFOP – DECIV.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Biblioteca Central. **Guia para Normalização de Referências: NBR 6023: 2002**. 2 ed. – Vitória: Biblioteca UFES, 2002. 51 p.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Biblioteca Central. **Normalização e Apresentação de Trabalhos Científicos e Acadêmicos: Guia para Alunos, Professores e Pesquisadores da UFES**. 6 ed. – Vitória: Biblioteca UFES, 2002. 60 p.

XEXÉO, Geraldo Bonorino. **Sistemas Difusos**. Rio de Janeiro: COPPE – UFRJ, 2002. Palestra. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

ZIMMERMANN, Hans-Jurgen. **Fuzzy Set Theory – and its Applications**. 3 ed. Massachusetts: Kluwer Academic Press. 1996. 435 p.

ANEXO I

MODELO DO QUESTIONÁRIO ENVIADO AOS ESPECIALISTAS



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Pós Graduação em Engenharia Civil



Introdução:

Atualmente, em meio à grande variedade de processos e sistemas construtivos disponíveis no mercado, o profissional da construção civil frequentemente se depara com várias questões do tipo: Qual sistema estrutural é o mais eficiente para o meu empreendimento? Deve ser em aço ou em concreto? Deve ser industrializado ou artesanal, ou deve ser ainda uma combinação de mais de um sistema?

Essas escolhas são de fundamental importância para a eficiência da obra e para o sucesso do empreendimento, pois a escolha correta do sistema estrutural e do sistema construtivo pode reduzir substancialmente o custo de um empreendimento pode até mesmo determinar se o investimento é viável ou não. É importante salientar que tais definições devem ser feitas antes mesmo do projeto arquitetônico, visto que um bom projeto de arquitetura deve ter sua concepção baseada nos princípios e peculiaridades de cada sistema, e que uma vez tomada a decisão, qualquer modificação implica em mais gastos.

Porém normalmente as respostas para estas perguntas estão apoiadas apenas na própria experiência do profissional ou em simples listas comparativas com vantagens de cada sistema estrutural, que não fornecem informações suficientes para uma avaliação correta de cada uma delas.

Objetivo:

Atualmente o Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de ouro Preto vem desenvolvendo o primeiro estágio de um modelo para a tomada de decisão em relação à definição de sistemas estruturais de edifícios. Este modelo poderá orientar o profissional da construção civil a avaliar os diversos parâmetros que influem na concepção e projeto de edifícios e eleger o sistema estrutural mais eficiente para seu empreendimento.

Como um primeiro estágio do desenvolvimento deste modelo, que no futuro será aperfeiçoado, levaremos em consideração apenas dois casos bastante característicos e distintos entre si, neste primeiro momento serão

analisados apenas o sistema típico de estrutura de concreto moldada “*in loco*” da maneira tradicional e artesanal e o sistema industrializado com estrutura metálica.

Para este estudo, se tomará como referência, a experiência de especialistas reconhecidos em matéria de projetos e/ou execução de edifícios através das suas respostas neste questionário.

1 – PRIMEIRA PARTE

Objetivo:

De acordo com a experiência do especialista, se deseja conhecer a recomendação que ele daria referente ao uso de determinado sistema para cada situação que pode acontecer na obra ou projeto.

Instruções para preenchimento:

Em cada um dos espaços nos quadros, se deverá avaliar com uma escala de 5 a 1, cada um dos casos.

Escala de recomendação:

5 – absolutamente recomendável

4 – muito recomendável

3 – recomendável

2 – pouco recomendável

1 – nada recomendável

Exemplo de preenchimento:

Armazenamento dos materiais na obra

	Terreno amplo	Terreno reduzido
Aço	3	5
Concreto	3	2

Como se mostra nesta tabela, de acordo com a opinião deste especialista, quando a questão é o armazenamento de materiais na obra, um

sistema estrutural em aço e industrializado é “absolutamente recomendável (5)” quando o terreno da obra possui dimensões reduzidas ao passo que um sistema em estrutura tradicional de concreto é “pouco recomendável (2)” para este mesmo terreno. Podemos ver também que para este mesmo especialista, se o terreno é amplo, os dois sistemas são “recomendáveis (3)”.

1.1 – FATORES CONSTRUTIVOS

1.1.1 – Armazenamento dos materiais na obra

Avaliar esta característica em relação à dimensão do terreno da obra.

	Terreno amplo	Terreno reduzido
Aço		
Concreto		

1.1.2 – Interferência sobre o entorno

Avaliar esta característica em relação à intensidade do tráfego e em relação ao tipo de uso predominante do entorno.

	Tráfego intenso	Tráfego reduzido	Uso predominante residencial	Uso predominante comercial
Aço				
Concreto				

1.1.3– Disponibilidade de equipamentos

	Próprio	Alugado	Não tem acesso
Aço			
Concreto			

1.1.4 – Nível de Especialização da mão de obra / disponibilidade de mão de obra especializada

Avaliar esta característica sobre sua recomendação em relação ao nível da mão de obra e em relação à sua disponibilidade.

	Especializada	Não especializada	Boa disponibilidade de mão de obra especializada	Pouca disponibilidade de mão de obra especializada
Aço				
Concreto				

1.1.5 – Velocidade de execução em relação ao prazo

	Prazo curto	Prazo médio	Prazo longo
Aço			
Concreto			

1.1.6 – Independência / compatibilidade de distintos trabalhos na obra

Entendendo-se como independência / compatibilidade a capacidade de que se execute diferentes partes da obra sem que uma interfira em outra. Avaliar a importância desta característica em relação aos prazos para a obra.

	Prazo curto	Prazo médio	Prazo longo
Aço			
Concreto			

1.1.7 – Adequação ao terreno

	Plano e firme	Acidentado	Encharcado
Aço			
Concreto			

1.1.8 – Compatibilidade com sistemas complementares

Entendendo-se como a compatibilidade, a capacidade do tipo de estrutura interagir de modo mais prático e eficiente com diferentes tipos de sistemas complementares.

	Alvenarias	Instalações	Coberturas
Aço			
Concreto			

1.1.9 – Adaptação diante de imprevistos ou incidentes em relação à fase

	Fase de planejamento	Fase de projeto	Fase de execução	Depois da estrutura finalizada
Aço				
Concreto				

1.1.10 – Facilidade de expansões futuras

Aço	
Concreto	

1.2 – FATORES ECONÔMICOS

Avaliar este tópico observando-se a recomendação do sistema tendo em vista a minimização dos custos.

1.2.1 – Custo de incorporação

	Estrutura	Alvenarias	Instalações
Aço			
Concreto			

1.2.2 – Custo de manutenção em relação ao tipo de uso

	Uso residencial	Uso comercial	Uso corporativo	Uso público
Aço				
Concreto				

1.2.3 – Custo da proteção contra incêndios

Aço	
Concreto	

1.2.4 – Prazo de execução em relação à disponibilidade de capital

Avaliar esta característica em relação à capacidade de desembolso do empreendedor.

	Disponibilidade imediata	Disponibilidade com prestações
Aço		
Concreto		

1.2.5 – Antecipação do retorno do investimento em relação ao uso

	Uso residencial	Uso comercial	Uso corporativo	Uso público
Aço				
Concreto				

1.2.6 – Disponibilidade de matéria prima

Avaliar esta característica em relação à localização do empreendimento dentro do território nacional.

	Região Sul	Região Sudeste	Região Centro-Oeste	Região Nordeste	Região Norte
Aço					
Concreto					

1.3 – FATORES ESTRUTURAIS

1.3.1 – Durabilidade da estrutura (Vida útil)

Avaliar esta característica em relação ao meio em que a edificação está inserida

	Urbano	Marinha	Rural	Industrial
Aço				
Concreto				

1.3.2 – Vãos

	Necessidade de grandes vãos	Sem necessidade de grandes vãos
Aço		
Concreto		

1.3.3 – Fundações

Avaliar esta característica em relação à resistência do solo em que a edificação está inserida

	Solo pouco resistente	Solo muito resistente
Aço		
Concreto		

1.3.4 – Facilidade / simplicidade de cálculo

Aço	
Concreto	

1.4 – FATORES AMBIENTAIS

Avaliar este tópico em relação à recomendação do sistema diante da questão da preservação ambiental. Considerando-se mais recomendável o sistema que gera um menor impacto no meio ambiente.

1.4.1 – Impactos decorrentes da execução da obra

	Impactos durante a execução da obra	Interferência na Paisagem
Aço		
Concreto		

1.4.2 – Impacto decorrente da matéria prima / resíduos

	Impacto da matéria prima sobre o meio ambiente	Geração de resíduos	Possibilidade de reciclagem / reutilização dos materiais
Aço			
Concreto			

1.5 – FATORES ARQUITETÔNICOS

1.5.1 – Tipologia arquitetônica e identidade visual em relação ao uso

	Uso residencial	Uso comercial	Uso corporativo	Uso público
Aço				
Concreto				

1.5.2 – Facilidade de projeto em relação ao uso

	Uso residencial	Uso comercial	Uso corporativo	Uso público
Aço				
Concreto				

1.6 – FATORES DE SEGURANÇA

Avaliar este tópico indicando como mais recomendável o sistema que leve à uma melhor condição de segurança.

1.6.1 – Segurança durante a execução da obra

Avaliar este tópico segundo as características típicas de execução de uma obra com estrutura de concreto de modo tradicional / artesanal e de uma obra com estrutura metálica pelo processo industrializado.

Aço	
Concreto	

1.6.2 – Segurança em relação a incêndios

Aço	
Concreto	

2 – SEGUNDA PARTE

Objetivo:

De acordo com a experiência do especialista, se deseja saber qual a importância relativa de cada um dos aspectos que podem interferir na obra em relação cada uma das características específicas que uma obra pode ter.

Instruções para preenchimento:

Relacionar cada uma das variáveis, em relação à uma característica específica que uma obra pode ter atribuindo um valor de importância de acordo com a escala de avaliação indicada:

	B ↑
A →	

Avaliar “A” em relação a “B”

Escala de importância:

5 – importância absoluta

4 – grande importância

3 – importante

2 – pequena importância

1 – sem importância

	B ↑
A →	5

A variável “A” tem importância absoluta quando é considerada em relação à característica “B” específica de uma obra.

Exemplo de preenchimento:

Tipo de uso do edifício

	Comercial	Residencial	Público
Custo de manutenção	2	3	5
Antecipação do retorno do investimento	5	2	2
Tipologia arquitetônica e identidade visual	4	2	5
Facilidade de projeto	2	2	2

Como se mostra nesta tabela, de acordo com a opinião deste especialista, a antecipação do retorno do investimento tem importância absoluta (5) quando é considerada em relação a um edifício com um uso comercial.

A tipologia arquitetônica e a identidade visual do edifício têm pequena importância (2) quando considerada em relação a um edifício com uso residencial.

2.1 – Tipo de uso do edifício

	Comercial	Residencial	Público
Custo de manutenção			
Antecipação do retorno do investimento			
Tipologia arquitetônica e identidade visual			
Facilidade de projeto			
Compatibilidade com sistemas complementares			
Facilidade de expansões futuras			

2.2 – Tráfego do entorno

	Intenso	Reduzido
Interferência sobre o entorno		

2.3 – Perfil de Ocupação do Entorno

	Comercial	Residencial
Interferência sobre o entorno		

2.4 – Mão de obra

	Especializada	Não especializada
Nível de especialização da mão de obra		

2.5 – Disponibilidade de Equipamentos

	Próprios	Alugados	Não tem acesso
Disponibilidade de equipamentos			

2.6 – Prazos

	Curto	Médio	Longo
Velocidade de execução			
Independência / compatibilidade dos trabalhos			

2.7 – Terreno

	Plano e firme	Acidentado	Encharcado
Adequação ao terreno			

	Pouco resistente	Muito resistente
Fundação		

2.8 – Dimensão do terreno

	Amplo	Reduzido
Armazenamento dos materiais na obra		

2.9 – Disponibilidade de Capital

	Imediata	Parcelamento
Velocidade de execução		

2.10 – Matéria Prima

	Região sul	Região sudeste	Região centro-oeste	Região nordeste	Região norte
Disponibilidade de matéria prima					

2.11 – Agressividade do entorno

	Urbano	Marinho	Rural	Industrial
Vida útil da estrutura				

2.12 – Vãos Livres

	Grandes vãos	Pequenos vãos
Facilidade de vencer vãos		

* Para as questões de 2.11 a 2.14 considerar apenas o grau de importância da variável em relação à obra de maneira global.

2.11 – Custo de Incorporação

Custo de incorporação	
-----------------------	--

2.12 – Impactos Ambientais Decorrentes da Execução da Obra

Impactos Ambientais	
---------------------	--

2.13 – Segurança Durante a Execução da Obra

Segurança na execução	
-----------------------	--

2.14 – Segurança em Relação a Incêndios

Segurança em incêndios	
------------------------	--

2.15 – Facilidade de Cálculo Estrutural

Facilidade de cálculo	
-----------------------	--

Na sua opinião, se deveria acrescentar algum aspecto que não foi considerado neste questionário? Em caso afirmativo, indique quais.

Indique se conhece alguma pessoa que possa estar interessada em responder este questionário e cuja opinião sobre os aspectos tratados você considere de grande importância?

Deseja continuar recebendo mais informações sobre os resultados obtidos ao longo deste trabalho?

Sim ()

Não ()

Dados do Colaborador

Nome:

Especialidade / ofício:

Contato

e-mail:

telefone:

Pesquisador: Paulo André Rabelo Alkmim

Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas
Departamento de Engenharia Civil

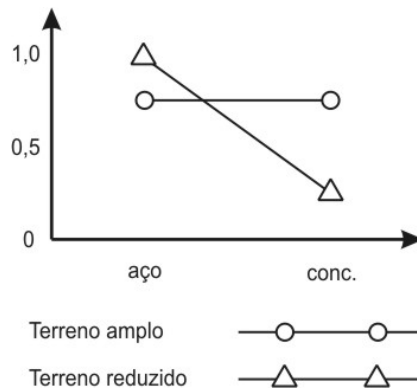
e-mail: contatopauloandre@yahoo.com.br
telefone: (31) 9757 – 2849

ANEXO II

FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DAS VARIÁVEIS RELATIVAS À PRIMEIRA PARTE DO QUESTIONÁRIO - OBJETIVOS -

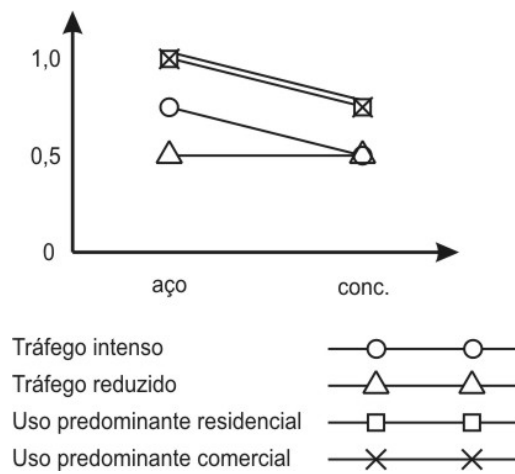
Objetivo 1 (O₁): Armazenamento dos materiais na obra

	Função de pertinência	
	Terreno amplo	Terreno reduzido
Aço	0.75	1.0
Concreto	0.75	0.25



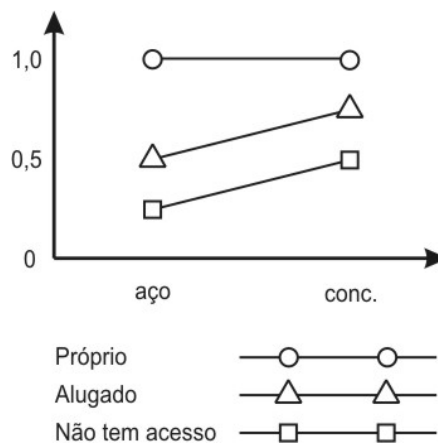
Objetivo 2 (O₂): Interferência sobre o entorno

	Função de pertinência			
	Tráfego intenso	Tráfego reduzido	Uso predominante residencial	Uso predominante comercial
Aço	0.75	0.5	1.0	1.0
Concreto	0.5	0.5	0.75	0.75



Objetivo 3 (O₃): Disponibilidade de equipamentos

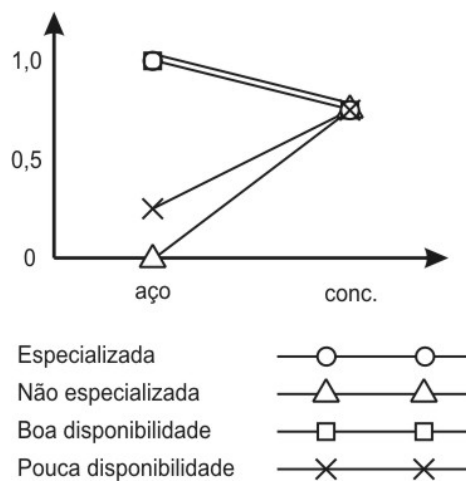
	Função de pertinência		
	Próprio	Alugado	Não tem acesso
Aço	1.0	0.5	0.25
Concreto	1.0	0.75	0.5



Objetivo 4 (O₄): Nível de especialização da mão de obra

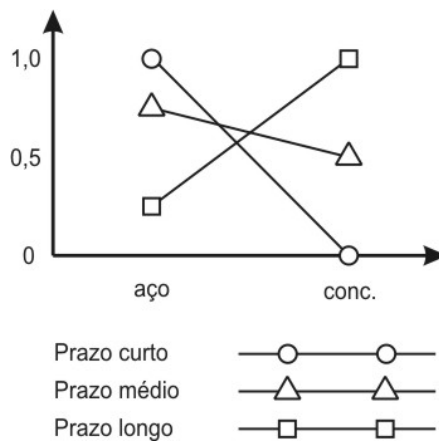
Disponibilidade de mão de obra especializada

	Função de pertinência			
	Especializada	Não especializada	Boa disponibilidade	Pouca disponibilidade
Aço	1.0	0.0	1.0	0.25
Concreto	0.75	0.75	0.75	0.75



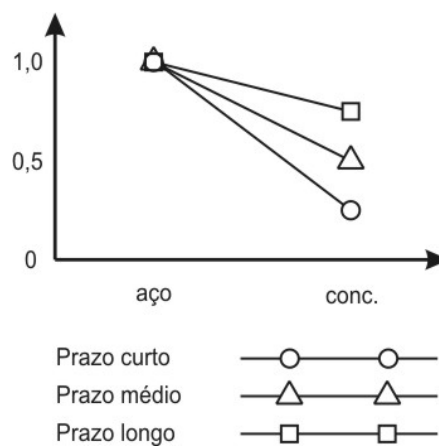
Objetivo 5 (O₅): Velocidade de execução em relação aos prazos

	Função de pertinência		
	Prazo curto	Prazo médio	Prazo longo
Aço	1.0	0.75	0.25
Concreto	0.0	0.5	1.0



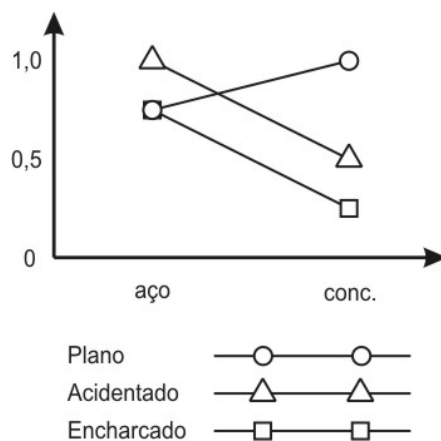
Objetivo 6 (O₆): Independência / compatibilidade de distintos trabalhos na obra

	Função de pertinência		
	Prazo curto	Prazo médio	Prazo longo
Aço	1.0	1.0	1.0
Concreto	0.25	0.5	0.75



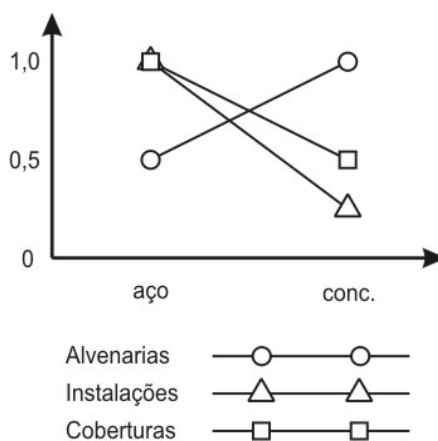
Objetivo 7 (O₇): Adequação ao terreno

	Função de pertinência		
	Plano	Acidentado	Encharcado
Aço	0.75	1.0	0.75
Concreto	1.0	0.5	0.25



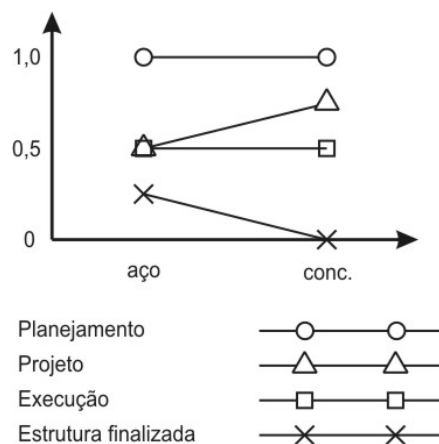
Objetivo 8 (O₈): Compatibilidade com sistemas complementares

	Função de pertinência		
	Alvenarias	Instalações	Coberturas
Aço	0.5	1.0	1.0
Concreto	1.0	0.25	0.5



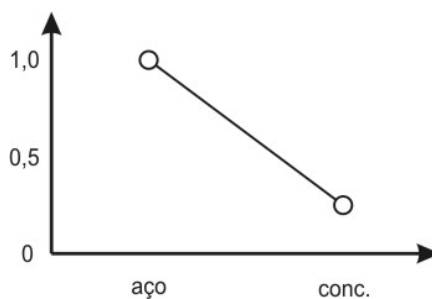
Objetivo 9 (O₉): Adaptação diante de imprevistos ou incidentes

	Função de pertinência			
	Fase de planejamento	Fase de projeto	Fase de execução	Depois da estrutura finalizada
Aço	1.0	0.5	0.75	0.25
Concreto	1.0	0.75	0.5	0.0



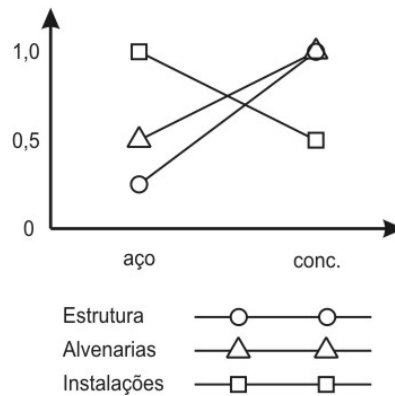
Objetivo 10 (O₁₀): Facilidade de expansões futuras

	Função de pertinência
Aço	1.0
Concreto	0.25



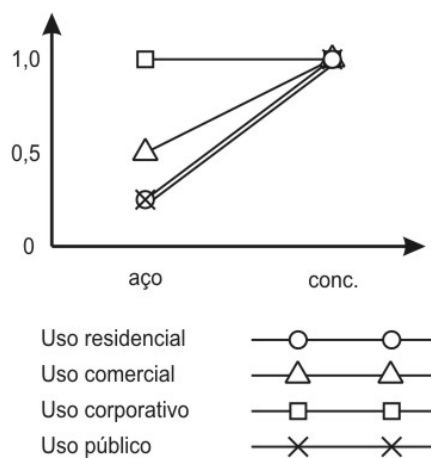
Objetivo 11 (O₁₁): Custo de incorporação

	Função de pertinência		
	Estrutura	Alvenarias	Instalações
Aço	0.25	0.5	1.0
Concreto	1.0	1.0	0.5



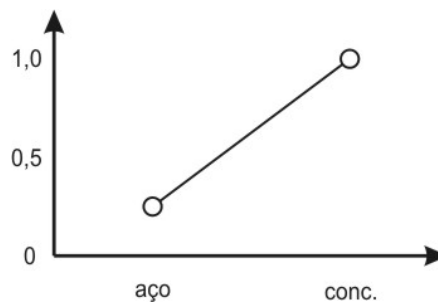
Objetivo 12 (O₁₂): Custo de manutenção em relação ao tipo de uso

	Função de pertinência			
	Uso residencial	Uso comercial	Uso corporativo	Uso público
Aço	0.25	0.5	1.0	0.25
Concreto	1.0	1.0	1.0	1.0



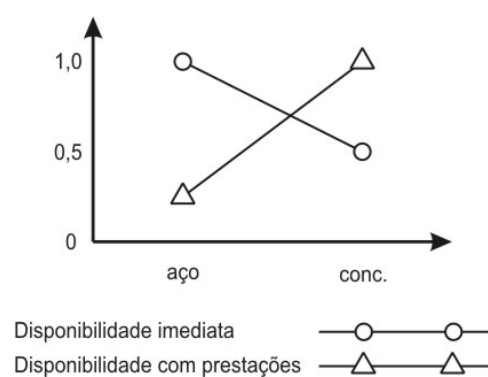
Objetivo 13 (O₁₃): Custo da proteção contra incêndios

	Função de pertinência
Aço	0.25
Concreto	1.0



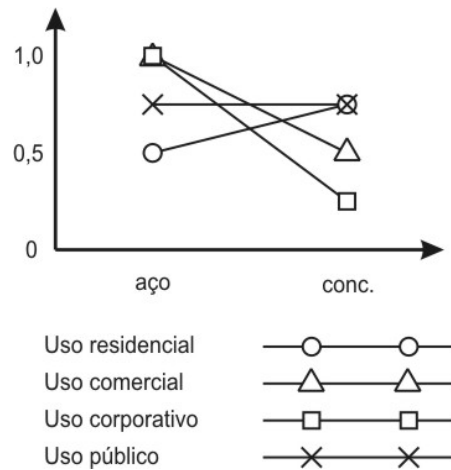
Objetivo 14 (O₁₄): Prazo de execução em relação à disponibilidade de capital

	Função de pertinência	
	Imediata	À base de prestações
Aço	1.0	0.25
Concreto	0.5	1.0



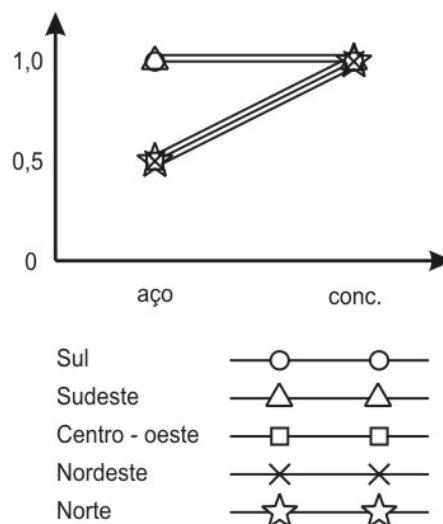
Objetivo 15 (O₁₅): Antecipação do retorno do investimento em relação ao uso

	Função de pertinência			
	Uso residencial	Uso comercial	Uso corporativo	Uso público
Aço	0.5	1.0	1.0	0.75
Concreto	0.75	0.5	0.2	0.75



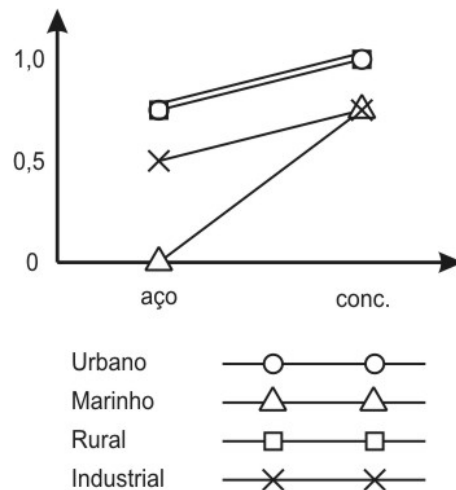
Objetivo 16 (O₁₆): Disponibilidade de matéria prima

	Função de pertinência				
	Sul	Sudeste	Centro oeste	Nordeste	Norte
Aço	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5
Concreto	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0



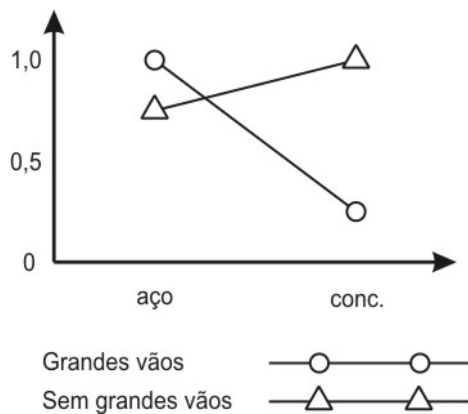
Objetivo 17 (O₁₇): Durabilidade da estrutura (vida útil)

	Função de pertinência			
	Ambiente urbano	Ambiente marinho	Ambiente rural	Ambiente industrial
Aço	0.5	0.0	0.75	0.5
Concreto	0.75	0.75	1.0	0.75



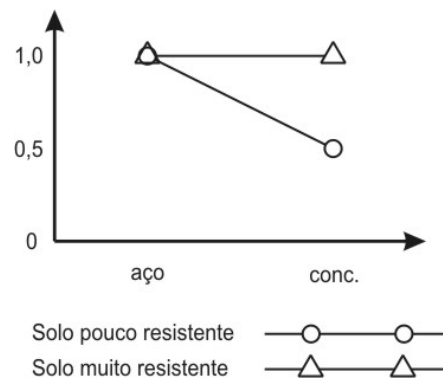
Objetivo 18 (O₁₈): Vãos

	Função de pertinência	
	Necessidade de grandes vãos	Sem necessidade de grandes vãos
Aço	1.0	0.75
Concreto	0.25	1.0



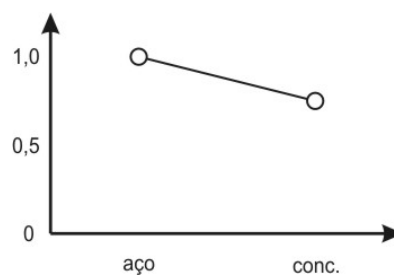
Objetivo 19 (O₁₉): Fundações

	Função de pertinência	
	Solo pouco resistente	Solo muito resistente
Aço	1.0	1.0
Concreto	0.5	1.0



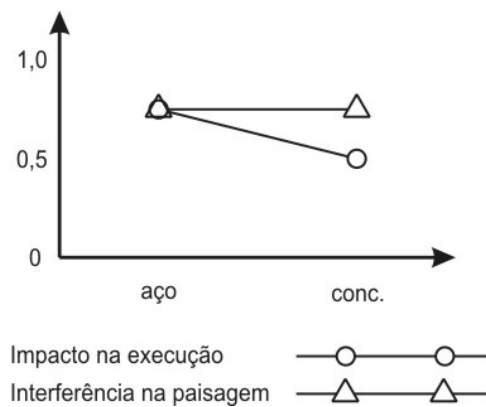
Objetivo 20 (O₂₀): Facilidade de cálculo

	Função de pertinência
Aço	1.0
Concreto	0.75



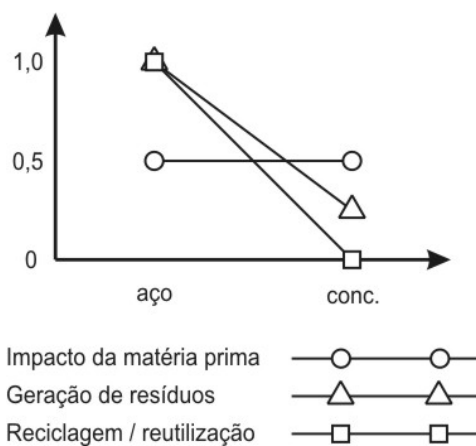
Objetivo 21 (O₂₁): Impactos ambientais decorrentes da execução da obra

	Função de pertinência	
	Impactos durante a execução da obra	Interferência na paisagem
Aço	0.75	0.75
Concreto	0.5	0.75



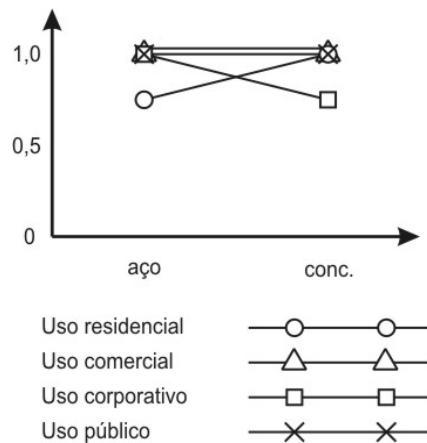
Objetivo 22 (O₂₂): Impacto decorrente da matéria prima / resíduos

	Função de pertinência		
	Impacto da matéria prima	Geração de resíduos	Reciclagem e reutilização
Aço	0.5	1.0	1.0
Concreto	0.5	0.0	0.25



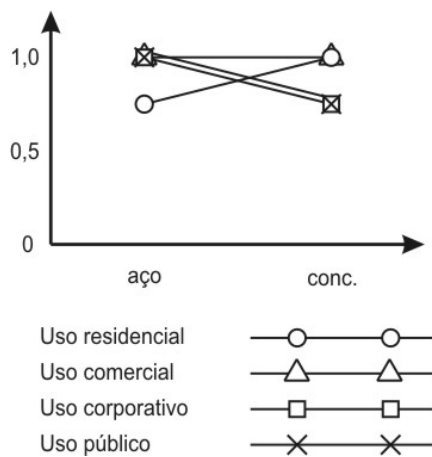
Objetivo 23 (O₂₃): Tipologia arquitetônica e identidade visual em relação ao uso

	Função de pertinência			
	Uso residencial	Uso comercial	Uso corporativo	Uso público
Aço	0.75	1.0	1.0	1.0
Concreto	1.0	1.0	0.75	1.0



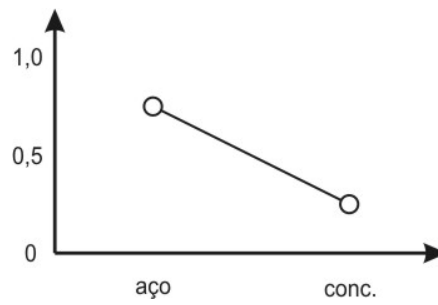
Objetivo 24 (O₂₄): Facilidade de projeto em relação ao uso

	Função de pertinência			
	Uso residencial	Uso comercial	Uso corporativo	Uso público
Aço	0.75	1.0	1.0	1.0
Concreto	1.0	1.0	0.75	0.75



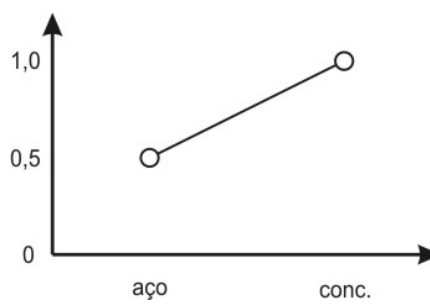
Objetivo 25 (O₂₅): Segurança durante a execução da obra

	Função de pertinência
Aço	0.75
Concreto	0.25



Objetivo 26 (O₂₆): Segurança em relação à incêndios

	Função de pertinência
Aço	0.5
Concreto	1.0

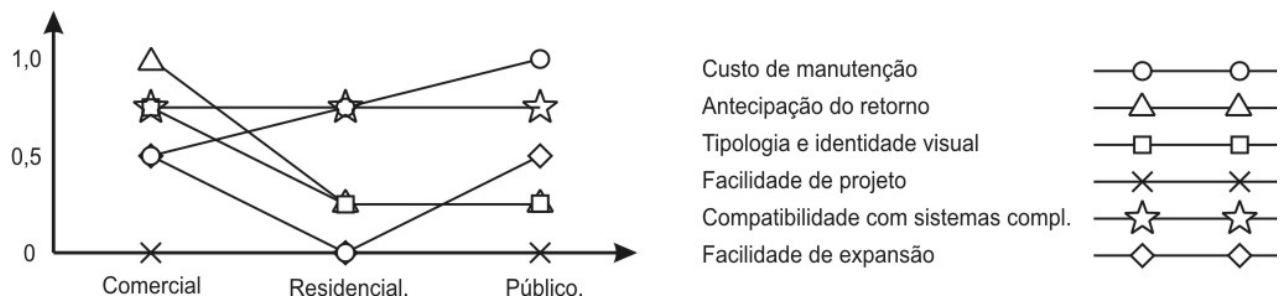


ANEXO III

**FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DA IMPORTÂNCIA RELATIVA
DAS VARIÁVEIS EM RELAÇÃO ÀS CARACTERÍSTICAS
ESPECÍFICAS DO EMPREENDIMENTO REFERENTES
À SEGUNDA PARTE DO QUESTIONÁRIO
- PREFERÊNCIAS -**

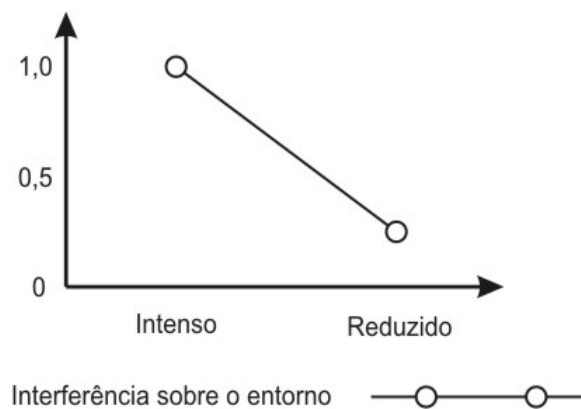
Importância relativa: Tipo de uso do edifício

	Função de pertinência		
	Comercial	Residencial	Público
Custo de manutenção	0.5	0.75	1.0
Antecipação do retorno do investimento	1.0	0.25	0.25
Tipologia arquitetônica e identidade visual	0.75	0.25	0.75
Facilidade de projeto	0.0	0.0	0.0
Compatibilidade com sistemas complementares	0.75	0.75	0.75
Facilidade de expansões futuras	0.5	0.0	0.5



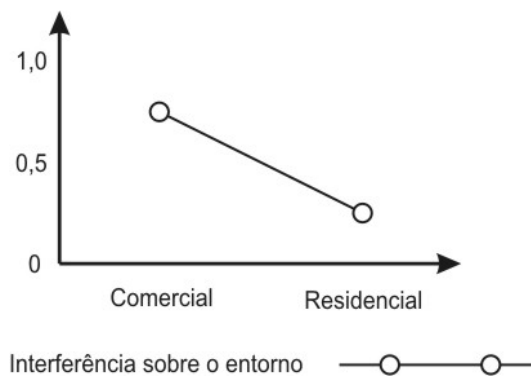
Importância relativa: Tráfego do entorno

	Função de pertinência	
	Intenso	Reduzido
Interferência sobre o entorno	1.0	0.25



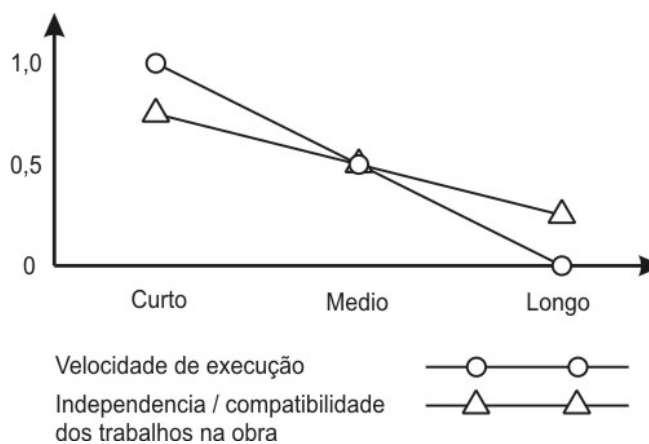
Importância relativa: Perfil de ocupação do entorno

	Função de pertinência	
	Comercial	Residencial
Interferência sobre o entorno	0.5	0.75



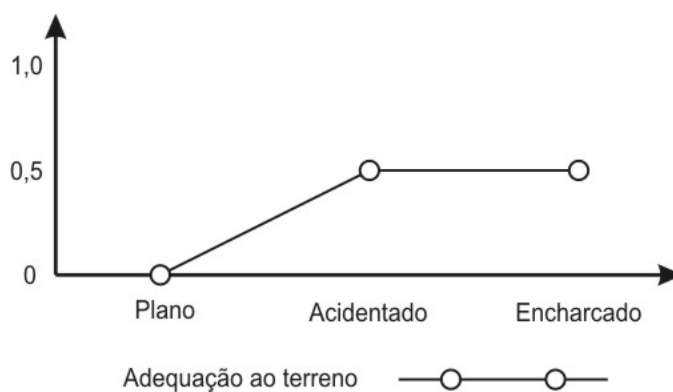
Importância relativa: Prazos

	Função de pertinência		
	Curto	Médio	Longo
Velocidade de execução	1.0	0.5	0.0
Independência / compatibilidade dos trabalhos	0.75	0.5	0.25



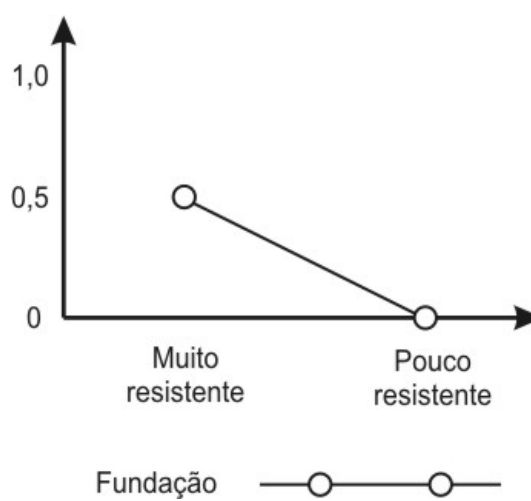
Importância relativa: Terreno

	Função de pertinência		
	Plano e firme	Acidentado	Encharcado
Adequação ao terreno	0.0	0.5	0.5



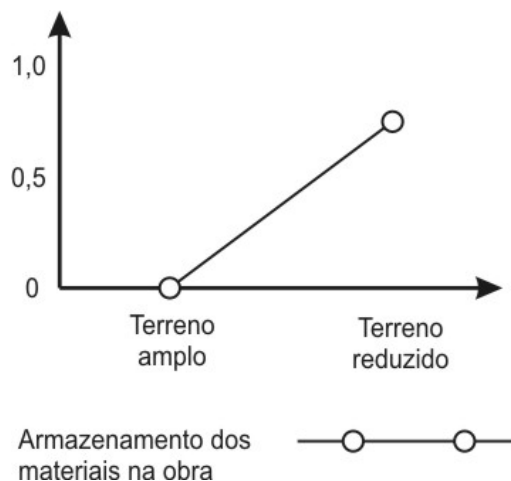
Importância relativa: Solo

	Função de pertinência	
	Pouco resistente	Muito resistente
Fundação	0.5	0.0



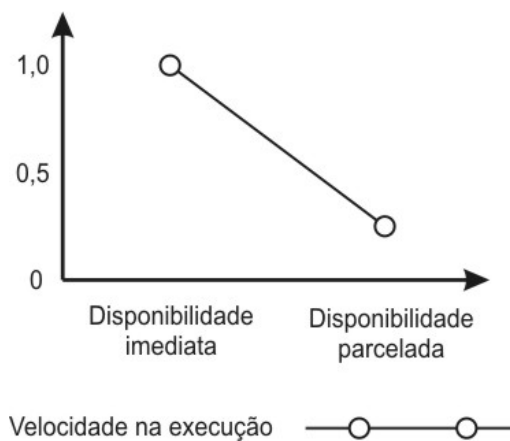
Importância relativa: Armazenamento dos materiais

	Função de pertinência	
	Terreno amplo	Terreno reduzido
Armazenamento dos materiais na obra	0.0	0.75



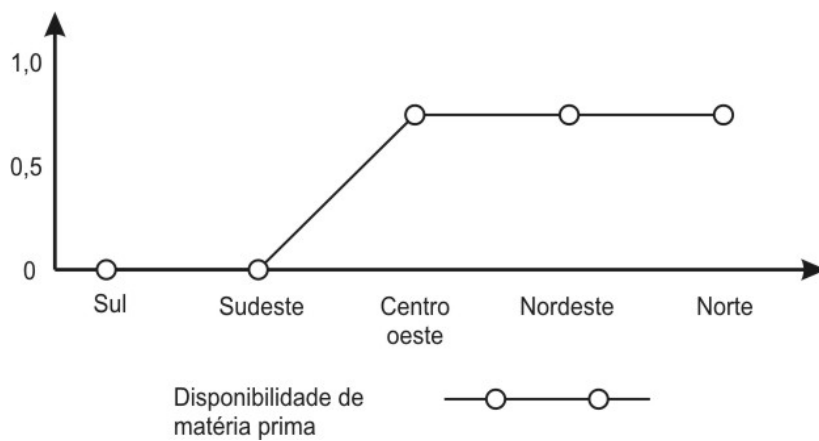
Importância relativa: Velocidade de execução

	Função de pertinência	
	Disponibilidade de capital imediata	Disponibilidade de capital parcelada
Velocidade de execução	1.0	0.25



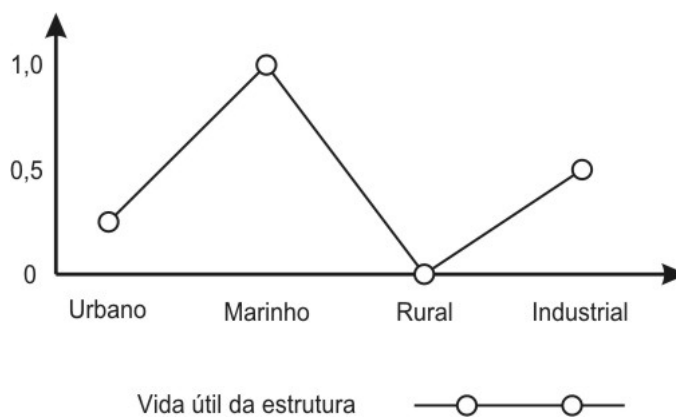
Importância relativa: Matéria prima

	Função de pertinência				
	Sul	Sudeste	Centro-oeste	Nordeste	Norte
Disponibilidade de matéria prima	0.0	0.0	0.75	0.75	0.75



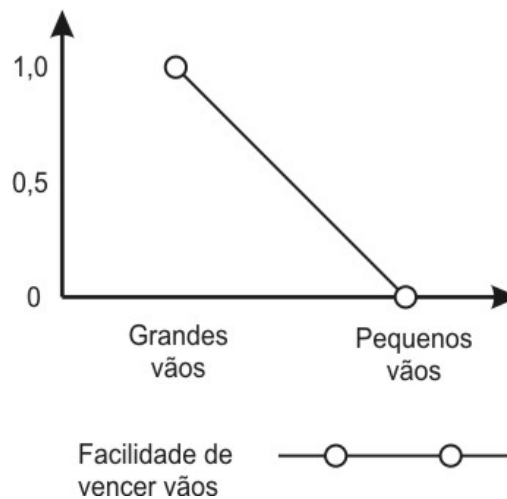
Importância relativa: Agressividade do entorno

	Função de pertinência			
	Urbano	Marinho	Rural	Industrial
Vida útil da estrutura	0.25	1.0	0.0	0.5



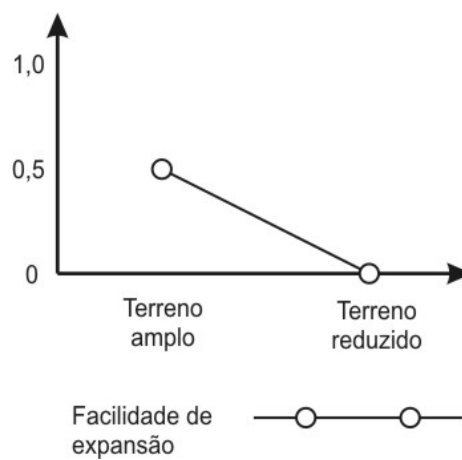
Importância relativa: Vãos livres

	Função de pertinência	
	Grandes vãos	Pequenos vãos
Facilidade para vencer vãos	1.0	0.0



Importância relativa: Facilidade para futuras expansões

	Função de pertinência	
	Terreno amplo	Terreno reduzido
Facilidade para expansões	0.5	0.0



Importância relativa: Custo de incorporação

	Função de pertinência
Custo de incorporação	1.0

Importância relativa: Disponibilidade de equipamentos

	Função de pertinência
Disponibilidade de equipamentos	0.5

Importância relativa: Adaptação diante de imprevistos ou acidentes

	Função de pertinência
Adaptação diante de incidentes	0.25

Importância relativa: Disponibilidade e nível da mão de obra

	Função de pertinência
Mão de obra	0.5

Importância relativa: Impactos decorrentes da execução da obra

	Função de pertinência
Impactos da execução da obra	0.25

Importância relativa: Impactos decorrentes da matéria prima e resíduos

	Função de pertinência
Impactos da matéria prima e resíduos	0.25

Importância relativa: Segurança do edifício em relação à incêndios

	Função de pertinência
Segurança em relação à incêndios	0.5

Importância relativa: Segurança durante a execução da obra

	Função de pertinência
Segurança durante a execução	0.25