

Universidade Federal Fluminense

ADRIANO RICARDO BORGES COSTA

Uso de Redes Neurais Artificiais e AHP no
Dimensionamento e Seleção de Estruturas
de Edifícios em Concreto Armado

VOLTA REDONDA

2024

ADRIANO RICARDO BORGES COSTA

Uso de Redes Neurais Artificiais e AHP no Dimensionamento e Seleção de Estruturas de Edifícios em Concreto Armado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Métodos Matemáticos e Computacionais Aplicados à Engenharia e Ciência.

Orientador:

Eliane da Silva Christo
Thiago Araújo Neves

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

VOLTA REDONDA

2024

Ficha catalográfica automática - SDC/BEM
Gerada com informações fornecidas pelo autor

C837u Costa, Adriano Ricardo Borges
Uso de redes neurais artificiais e AHP no dimensionamento e
seleção de estruturas de edifícios em concreto armado /
Adriano Ricardo Borges Costa. - 2024.
163 f.: il.

Orientador: Eliane da Silva Christo.
Coorientador: Thiago Araújo Neves.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta
Redonda, Volta Redonda, 2024.

1. Redes Neurais Artificiais e AHP. 2. Dimensionamento e
Seleção. 3. Estruturas de Edifícios. 4. Lajes de Concreto
Armado. 5. Produção intelectual. I. Christo, Eliane da
Silva, orientador. II. Neves, Thiago Araújo, coorientador.
III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia
Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda. IV. Título.

CDD - XXX

Uso de Redes Neurais Artificiais e AHP no
Dimensionamento e Seleção de Estruturas
de Edifícios em Concreto Armado

Adriano Ricardo Borges Costa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Métodos Matemáticos e Computacionais Aplicados à Engenharia e Ciência.

Aprovada por:



Prof. Eliane da Silva Christo, D.Sc./ MCCT-UFF
(Orientador)



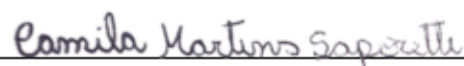
Prof. Tiago Araújo Neves, D.Sc./ MCCT-UFF



Prof. Kelly Alonso Costa, D.Sc. / VEP-UFF



Prof. Leonardo Goliatt, / MAC-UFJF



Prof. Camila Martins Saporetti, / Inst.Politécnico-UERJ

Volta Redonda, 19 de Fevereiro de 2024.

*"A maravilhosa disposição e harmonia do Universo só pode ter tido origem segundo um plano de um Ser que tudo sabe e tudo pode. Isso fica sendo minha última e mais elevada descoberta."
(Isaac Newton)*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por emanar sabedoria, força e persistência para que eu pudesse concluir este desafiante e relevante trabalho.

Agradeço à minha orientadora, Prof^a Eliane da Silva Christo, pela paciência, incentivo, municiamento de bases de conhecimento, orientação das pesquisas a estudar, e o norte do caminho mais assertivo para este projeto.

Ao meu co-orientador, Prof. Thiago das Silva Neves, pelos materiais de estudo, pelo apoio, e ajuda no direcionamento de rumos deste trabalho.

Agradeço à minha querida esposa, pela paciência e compreensão sobre as minhas ausências em vários momentos e também pelas sugestões e contribuições nos "outside tests" do projeto, uma vez que ela também é uma profissional da área de TI.

Agradeço aos Autores das Referências Bibliográficas, pois seus trabalhos me mostraram muitas ideias que ajudaram a melhorar este projeto, além de o convalidarem.

Aos meus amigos de mestrado, Érika, Thiago, Isabela, Rayla, Caio, Fernando, e aos demais, pelas trocas de conhecimento e experiência, além da ajuda mútua nos trabalhos em equipe, durante este mestrado.

Agradeço aos Professores do programa MCCT, André, Benitez, Cecília, Cleyton, Lobão (em memória), Wellington e Tiago, pelas disciplinas ministradas, as quais contribuíram para este projeto.

Agradeço à Camila, da Secretaria do MCCT, pela grande ajuda nos procedimentos, documentação, prazos das disciplinas e deste projeto.

Agradeço a todos que, direta e indiretamente, participaram da jornada deste projeto, a todos o meu muito obrigado!

Resumo

Dimensionar, orçar e classificar projetos de edifício de concreto armado e seus elementos estruturais é complexo e árduo, e sabendo-se das características das redes neurais artificiais (RNA) em resolver problemas complexos, e da técnica ADMC-AHP (Analytic Hierarchy Process) em agilizar a classificação para tomada de decisão, a construção de edifícios torna-se uma área ideal para aplicação dessas duas técnicas combinadas. A Engenharia Civil vem evoluindo desde o advento e parceria com a Computação e dentro desta, a disciplina de aprendizado de máquina (ML) vem gerando muitos algoritmos e sendo muito utilizada por empresas. Os algoritmos de RNA estão dentro da ML, e vêm agregando mais "inteligência" aos softwares, sendo um novo caminho para a solução de problemas de média à grande complexidade e grande volume de dados. Para se chegar aos melhores projetos a se investir, usando métodos computacionais convencionais, são necessárias muitas horas de cálculos, análises e revisões. Desenvolvidos os projetos buscando estruturas ótimas focando "resistência x suficiência", o engenheiro também precisa selecionar os de melhor "eficiência x custo mínimo", envolvendo muito trabalho até chegar ao melhor projeto, antes da aprovação, contrato e a construção efetiva do eleito. Surgiu então essa ideia objetivando gerar um protótipo computacional visando confirmar a possibilidade do uso de RNAs para dimensionar armaduras das lajes de projetos, e logo em seguida, gerar o orçamento e a classificação destes via a técnica AHP. Adotada esta proposta, foi gerado o cronograma e desenvolveu-se este sistema protótipo em 3 fases. Na 1^a, foram criados 6 conjuntos com 5 a 10 projetos e as rotinas de mapeamento e dimensionamento das lajes dos mesmos. Na 2^a, desenvolvidos os dimensionamentos por RNA e na 3^a, as rotinas para classificação dos projetos via AHP. O sistema desenvolvido possui um banco de dados padrão MySQL e as rotinas para cadastro dos elementos dos edifícios, mapeamento e dimensionamento convencional das lajes dos projetos, bem como seus dimensionamentos por RNA e orçamentação / classificação por AHP. Também possui rotinas de carga das tabelas de engenharia para os cálculos das lajes e dos datasets das lajes para processamento pela RNA. Também permite configurar os parâmetros de topologias com 3 camadas. Além disso, foram implementadas rotinas mais avançadas nos algoritmos de RNA tais como, o método triplo de parada por convergência e a automação da prospecção de busca pelos melhores aceleradores de aprendizado e avanço. Foram efetuadas mais de 40 prospecções de treinamento dos 6 conjuntos com 10 projetos, 70% destes com 402 a 465 lajes para atingir as topologias ótimas, onde se observou que a evolução da convergência das topologias das RNAs obteve média final de 98% nas armaduras (+) e 79% nas (-). As classificações registradas via AHP atingiram a precisão média final de 98%. Observando os resultados obtidos, e mesmo não sendo os máximos possíveis, os objetivos específicos foram atendidos e o protótipo obteve altas convergências, confirmando que os algoritmos de RNA e AHP estão no rumo certo e que o combinado "engenharia + RNA + AHP" tem alto potencial na construção de edifícios.

Abstract

Scaling, budgeting, and classifying reinforced concrete building projects and their structural elements is complex and arduous. Knowing the characteristics of artificial neural networks (ANNs) in solving complex problems, and the ADMC-AHP (Analytic Hierarchy Process) technique in streamlining classification for decision-making, the construction of buildings becomes an ideal area for the application of these two combined techniques. Civil engineering has evolved since the advent and partnership with computing, and within this, the discipline of machine learning (ML) has generated many algorithms and has been widely used by companies. ANN algorithms are within ML and have been bringing more "intelligence" to software, offering a new path for solving problems of medium to high complexity and large volumes of data. To reach the best projects to invest in using conventional computational methods, many hours of calculations, analyses, and revisions are required. Developing projects aiming for optimal structures focusing on "strength vs. sufficiency," engineers also need to select those with the best "efficiency vs. minimum cost," involving a lot of work until reaching the best project, before approval, contract, and actual construction of the chosen one. This idea emerged aiming to generate a computational prototype to confirm the possibility of using ANNs to scale reinforcements for project slabs, and shortly thereafter, generate the budget and classification via the AHP technique. With this proposal adopted, a schedule was created and this prototype system was developed in 3 phases. In the 1st phase, 6 sets of projects were created, along with routines for mapping and sizing their slabs. In the 2nd phase, sizing was developed using ANNs, and in the 3rd phase, routines for project classification via AHP were developed. The developed system has a standard MySQL database and routines for registering building elements, mapping, and conventional sizing of their slabs, as well as sizing by ANNs and budgeting/classification by AHP. It also includes routines for loading engineering tables for slab calculations and slab datasets for processing by ANNs. It also allows configuring topology parameters with 3 layers. Additionally, more advanced routines were implemented in the ANN algorithms such as the triple convergence stop method and automation of the search for the best learning and advancement accelerators. Over 40 training prospecting sessions were conducted for the 6 sets with 10 projects, 70% of which had 402 to 465 slabs to achieve optimal topologies. It was observed that the convergence evolution of the ANN topologies obtained a final average of 98% in positive reinforcements and 79% in negative ones. The classifications recorded via AHP reached a final average accuracy of 98%. Observing the obtained results, although not the maximum possible, the specific objectives were met, and the prototype achieved high convergences, confirming that the developed ANN algorithms and AHP technique are on the right track and that the combined "engineering + ANN + AHP" has high potential in building construction.

Palavras-chave

1. Redes Neurais Artificiais e AHP
2. Dimensionamento e Seleção
3. Estruturas de Edifícios
4. Lajes de Concreto Armado

Lista de Símbolos, Siglas e Abreviaturas

- ABNT - *Associação Brasileira de Normas Técnicas.*
- ADMC - Apoio a Decisão por Multicritério (Metodologia para profissional que ajuda na tomada de decisão).
- AOO - Análise Orientada a Objetos.
- AHP - Analytic Hierarchy Process (Uma das técnicas variantes das Metodologias de Apoio Multicritério a Decisão).
- BD - Banco de Dados (Depósito de dados em meio digital).
- BIM - Building Information Modeling (Modelagem vetorial de Estruturas).
- Bitola - Raio da seção transversal de uma barra de aço. Mesmo que diâmetro da barra.
- CAD - Computer Aided Designing (Modelagem de Desenho Técnico auxiliada por Computador).
- CO_2 - Gás Carbônico. Molécula química composta por 1 átomo de Carbono e 2 de Oxigênio.
- Czerny - Método Bares-Czerny para cálculo de lajes maciças que utiliza tabelas de parâmetros para as equações de momento fletor.
- Dataset - Conjunto de amostras em forma de tabela onde as linhas são as amostras e as colunas, atributos comuns a estas.
- Fck - Resistência característica do Concreto (ABNT).
- Fyd - Resistência característica do Aço (ABNT).
- IDE - Integrated Development Environment (Ambiente integrado para Desenvolvimento de Programas).
- GUI - Graphic Use Interface (Funcionalidade de alguns em permitir telas Fixas com objetos que possam interagir com o usuário).
- kNm - Quilo Newton metro (Unidade de medida de peso por metro linear).

kN/m ²	- Quilo Newton p/ m ² (Unidade de medida de Força / Tração).
MEF	- Método dos Elementos Finitos. Técnica de cálculo dos esforços em estruturas como lajes, vigas e pilares.
MF	- Momento Fletor. Força de flexão que atua no centro e nas extremidades de estruturas como: lajes, vigas e pilares.
ML	- Machine Learning (Área da Tecnologia da Informação, que trata de algoritmos para o "aprendizado" de máquina).
MLP	- Multi Layer Perceptron (RNA tipo PMC, Perceptron Multicamada em português).
NBR	- Norma Brasileira (Sigla inicial das Normas da ABNT)
Outsider	- Elemento fora do padrão ou afastado do padrão.
PCS	- RNA de Camada Simples (1 Entrada e 1 de Saída).
PMC	- RNA Multi-Camada (1 Entrada, n Intermediárias e 1 de Saída).
q	- Simbologia da Carga. Carga atuante sobre estruturas: vigas, lajes, pilares.
Ratings	- Variante da técnica AHP. Valora os Critérios das alternativas com mais de 9 níveis de relevância.
RNA	- Sigla de Rede Neural Artificial. É um modelo de algoritmo híbrido. Malha de funções interconectadas, que assimila a sistemática de um problema via treinamentos.
ROI	- Return of investment. Percentual de remuneração que uma determinada aplicação monetária irá retorna ao investidor.
Rush	- Efeito de estresse e fadiga que pode afetar armaduras de aço.
RWH	- Rainwater Harvesting - Controle de escoamento de chuvas
SGBD	- Sigla de Sistema Gerenciador de Banco de Dados (Software de interface e gerenciamento de um Banco de Dados).
SOM	- Self Organized Maps. RNAs com pesos auto-organizáveis.
TI	- Tecnologia da Informação. Englobando (computação, sistemas, suporte, telecomunicações, segurança da informação).
Steel Deck	- Tipo de Laje maciça montada com placas de aço justapostas lado a lado que dispensa formas para sua concretagem.

Lista de Figuras

2.1	Direção Armaduras e Sentido Momentos Fletores nas Lajes	27
2.2	Exemplo de Gráfico de Função com Máximos e Mínimos	32
2.3	Conceitos Neurônio Biológico x Artificial	40
2.4	Funções de Ativação Degrau, Bipolar, Simétrica	40
2.5	Funções Logística e Tangente Hiperbólica	41
2.6	Arquitetura PCS Feedforward Simples	43
2.7	Exemplos de RNA PCS com 1 e 2 Neurônios	44
2.8	Arquitetura PMC Multicamada Feedforward	45
2.9	PMCs - Regiões Separação de Classes (Convexas, Não Convexas, Disjuntas)	46
2.10	2 dos Tipos Arquitetura de RNA	47
2.11	RNA PMC - Etapa Freeforward	49
2.12	RNA PMC - Etapa Back Propagation	50
2.13	Fluxograma Pseudo-Código de Treinamento RNA	56
2.14	Fluxograma Pseudo-Código de Teste RNA	56
2.15	Arvore Principal (Alternativas x Critérios)	63
2.16	Funções (+/-) Normalização do Peso dos Critérios (Valores Reais)	65
4.1	Ex. Planta Baixa do Projeto 1 do Conjunto 4	92
4.2	Diagrama de Entidade e Relacionamentos (Básico)	94
4.3	Simbologia do Diagrama de Fluxo de Dados	95
4.4	DFD 1 - Cadastro das Tabelas Auxiliares de Engenharia	96
4.5	DFD Cadastro e Mapeamento e geração dos Elementos Estruturais	97
4.6	DFD Dimensionamento de Lajes - Convencional e por RNA	98

4.7	DFD Geração dos Orçamentos e Classificações dos Projetos	99
4.8	DFD Administração de Usuários do Sistema	99
4.9	Exs. Plantas Baixas - Conjs Projs. para Dimensionamento	101
4.10	Pseudo-Código de Treinamento (aperfeiçoado) usado nas Rotinas de RNA	105
4.11	Pseudo-Código de Teste (aperfeiçoado) usado nas Rotinas de RNA	105
4.12	Gráficos Classificação de Projetos por Ganho Agregado	109
5.1	Telas do Sistema: Principal e Módulos 2.1 a 3.1	111
5.2	Telas do Sistema: Módulo 3.2 a 3.3	112
5.3	Dimens. Arms.(+/-) via RNA - Treino 2 - Cj.02 - Pjs.1 a 4	113
5.4	Dimens. Arms. via RNA - Treino 2 - Cj.02 - Pjs.1-4 / Testes Proj.6	114
5.5	Gráfs. <i>Orange</i> TM - Compara Dispersão Erros Cj.2 x Cj.5 (RNA e SVM)	115
5.6	Dimens. Arms.(+/-) via RNA - Treino 3 - Cj.3 - Pjs.1 a 7	116
5.7	Dimens. Arms. via RNA - Treino 3 - Cj.3 - Testes Projs. 8 a 10	117
5.8	Gráfs. Comparativo <i>Orange DataMining</i> TM - Cj.3	118
5.9	Dimens. Arms.(+/-) via RNA - Treino 4 - Cj.4 - Pjs.1 a 7	119
5.10	Dimens. Arms. via RNA - Treino 4 - Cj.4 - Testes Projs. 8 a 10	120
5.11	Gráfs. Comparativo <i>Orange DataMining</i> TM - Cj.4	121
5.12	Dimens. Arms.(+/-) via RNA - Treino 5 - Cj.5 - Pjs.1 a 7	122
5.13	Dimens. Arms. via RNA - Treino 5 - Cj.5 - Testes Projs.8 a 10	123
5.14	Gráfs. Comparativos obtidos via <i>Orange DataMining</i> TM - Cj.5	124
5.15	Dimens. Arms.(+/-) via RNA - Treino 6 - Cj.6 - Pjs.1-7	125
5.16	Dimens. Arms. via RNA - Treino 6 - Cj.6 - Pjs.1-7 / Testes Projs.8-10	126
5.17	Gráfs. Comparativos obtidos via <i>Orange DataMining</i> TM - Cj.6	127
5.18	Evol. Prospects. Converg. Cjs.2 a 6 Melhores Topologs. e Parâmetros	128
5.19	Evolução do % e Velocs. Médias de Convergência, Arms. Cjs.3 a 6	129
5.20	Gráficos Class.1 - Melhor Ganho (Conv. e RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3	132

5.21	Gráficos Class.2 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3	Fonte: Autor	133
5.22	Gráficos Class.3 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3	Fonte: Autor	133
5.23	Gráficos Class.1 - Melhor Ganho (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4		135
5.24	Gráficos Class.2 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4	Fonte: Autor	136
5.25	Gráficos Class.3 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4	Fonte: Autor	136
5.26	Gráficos Class.1 - Melhor Ganho (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5		138
5.27	Gráficos Class.2 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5	Fonte: Autor	139
5.28	Gráficos Class.3 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5	Fonte: Autor	139
5.29	Gráficos Class.1 - Melhor Ganho (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6		141
5.30	Gráficos Class.2 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6	Fonte: Autor	142
5.31	Gráficos Class.3 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6	Fonte: Autor	142
5.32	Grafs.Evolução da Precisão (R\$ / %) Orçamentos Cjs.3 a 6 - Projs.8 a 10		144
A.1	Cronograma do Projeto		158
B.1	Plantas Baixas - Cj.2 - Pjs.Treino 1 a 4 - Teste 6		159
B.2	Plantas Baixas - Cj.3 - Pjs.Treino 1 a 7 - Teste 8 a 10		160
B.3	Plantas Baixas - Cj.4 - Pjs.Treino 1 a 7 - Teste 8 a 10		161
B.4	Plantas Baixas - Cjs.5 e 6 - Pjs.Treino 1 a 7 - Teste 8 a 10		162

Lista de Tabelas

2.1	Matriz Principal Alternativas x Critérios	64
2.2	Apoio Cálculo Pesos x Pesos individualizados	64
2.3	Escala Razão de Saaty	64
2.4	Matriz Alternativas x Critérios - Ganho Agregado Final	66
3.1	Refs. Literaturas - Estruturas de Concreto Armado - Literaturas	68
3.2	Refs. Trabalhos Acadêmicos - Estruturas de Concreto Armado	69
3.3	Refs. Literaturas - Redes Neurais Artificiais	73
3.4	Refs. Trabalhos Acadêmicos - Rede Neurais Artificiais	75
3.5	Refs. Trabalhos Acadêmicos - Apoio Decisão por AHP	78
3.6	Refs. Trabalhos Acadêmicos - Concreto, RNA e AHP	80
4.1	Hardware utilizado no Desenvolvimento	83
4.2	Softwares utilizados no Desenvolvimento	84
4.3	Ex. Coeficientes da Tabela Czerny p/ Cálculo Lajes 2 dirs.	88
4.4	Conjs. Projetos Treino/Teste x Quant.de Lajes	101
4.5	Conjuntos Projs. vs Topologias Prospectadas vs Adotadas	106
4.6	Lista de Atributos das Amostras Entrada - Conjuntos de Projetos	106
4.7	Matrizes Principais e Cruzadas de Pesos/Pesos	109
5.1	Comparativo de Algumas Funções - Protótipo x TQS^{TM}	112
5.2	Evolução da Topologia e Aceleradores Prospectados - Cjs.1 a 6	128
5.3	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.1 (Conv./RNA) Pjs.8 a 10 - Teste 3 Cj.3	132
5.4	Tabelas Cruzadas P x P (Conv. e RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3	132
5.5	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.2 - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3 Fonte: Autor	133

5.6	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.3 - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3	Fonte: Autor	133
5.7	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.1 (Conv./RNA) Pjs.8 a 10 - Teste 4 Cj.4 . .		135
5.8	Classif. 1 - Matrizes Cruzadas (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4 . .		135
5.9	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.2 - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4	Fonte: Autor	136
5.10	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.3 - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4	Fonte: Autor	136
5.11	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.1 (Conv./RNA) Pjs.8 a 10 - Teste 5 Cj.5 . .		138
5.12	Classif. 1 - Tabelas Cruzadas (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5 . . .		138
5.13	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.2 - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5	Fonte: Autor	139
5.14	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.3 - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5	Fonte: Autor	139
5.15	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.1 (Conv./RNA) Pjs.8 a 10 - Teste 6 Cj.6 . .		141
5.16	Classif. 1 - Matrizes Cruzadas (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6 . .		141
5.17	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.2 - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6	Fonte: Autor	142
5.18	Mtzs.Princs. Orçamento/Class.3 - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6	Fonte: Autor	142
5.19	Tab.Evolução da Diferença Custos Lajes (R\$ / %) Cjs.3 a 6 Projs.8 a 10 .		144
C.1	Tabelas Bares-Czerny - Engastamento x Índices p/ Lajes Maciças 2 Dirs. .		163
C.2	Tabelas para Cálculo dos Diâmetros e Espaçamentos da Armaduras e Lajes		163

Sumário

1	Introdução	20
1.1	Objetivo Geral e Específicos	21
1.2	Justificativa	22
1.3	Estrutura do Trabalho, Cenário e Fronteiras do Projeto	22
1.3.1	Delimitação das Fronteiras do Projeto	23
1.4	Contribuições deste Trabalho e Diferencial	24
2	Fundamentação Teórica	25
2.1	Engenharia Convencional no Cálculo de Obras	25
2.1.1	Engenharia de Estruturas de Edifício	25
2.1.1.1	Concepção e Levantamento dos Parâmetros de uma Obra	26
2.1.2	Cálculo do Dimensionamento (Resumido) de Lajes	27
2.1.2.1	Dimensionamento das Lajes Armadas - 1 Direção:	27
2.1.2.2	Dimensionamento (Resumido) Lajes Armadas em 2 Direções:	27
2.2	Engenharia Convencional c/ Apoio Computacional	31
2.3	Importância da Otimização via Computação	31
2.4	Algoritmos na Resolução de Problemas Complexos	32
2.5	Modelando a Matemática do Problema Numérico	33
2.5.1	Detalhando os 4 Grupos Estratégicos de Algoritmos	35
2.6	Rede Neural Artificial - RNA	36
2.6.1	Características Principais de uma RNA	37

2.6.2	Tipos de Problema Candidatos à Aplicação de RNAs	38
2.6.3	Áreas da Engenharias com Aplicabilidade de RNAs	39
2.7	Estudo Resumido da Sistemática das RNAs	39
2.7.1	Origem do Conceito RNA e o Neurônio Artificial	40
2.7.2	Funções de Ativação	40
2.7.3	Arquiteturas de uma RNA	42
2.7.4	Arquitetura Perceptron de Camada Simples (PCS):	43
2.7.5	Arquitetura Perceptron Multicamadas (PMC):	45
2.7.6	Outras Arquiteturas muito usadas de RNA:	46
2.7.7	Funcionamento Matemático - RNA PMC	47
2.7.8	A Parametrização é Fundamental na Eficiência da RNA	52
2.7.9	A Lógica Assimiladora e Complexa das RNAs:	54
2.7.10	Treinamento e Teste da RNA PMC	54
2.7.10.1	Fase 1 - Treinamentos e Testes em Prospecção:	55
2.7.10.2	Fase 2 - Treinamento e Teste Finais da RNA:	57
2.7.11	Armadilhas Lógicas e Solução de Problemas com RNA	57
2.7.12	Métodos de Injeção e Amostragem no Treinamento:	59
2.7.13	Definição da Abordagem Estratégica da RNA no Protótipo	60
2.7.13.1	Abordagem Classificação de Padrões	61
2.7.13.2	Abordagem Aproximação de Função	61
2.7.13.3	Estratégia RNA PMC Adotada no Protótipo	61
2.8	Análise Multicritério e a Técnica AHP	62
2.8.1	AHP - Analytic Hierarchy Process	62
2.8.1.1	Etapa 1 - Formulação do Cenário e Estruturação do Problema	63
2.8.1.2	Etapa 2 - Modelagem do Método de Tomada de Decisão	63

3	Revisão Bibliográfica	67
3.1	Cálculo de Estruturas de Concreto Armado	67
3.1.1	Estruturas de Concreto Armado - Literaturas	67
3.1.2	Estruturas em Concreto Armado - Trabalhos Acadêmicos	68
3.2	RNA - Estado da Arte	72
3.2.1	RNAs - Literaturas	72
3.2.2	RNAs - Trabalhos Acadêmicos	74
3.3	Apoio Multicritério a Decisão com AHP	78
3.3.1	AHP - Literaturas Pesquisadas e Trabalhos Acadêmicos	78
3.3.2	Engenharia, RNA e AHP - Trabalhos Acadêmicos	79
4	Metodologia	83
4.1	Infraestrutura de Hardware e Software do Projeto	83
4.1.1	Hardware	83
4.1.2	Software	83
4.2	Projeto Lógico do Sistema	85
4.2.1	Análise e Levantamentos Preliminares	85
4.2.2	Tarefas Resumidas do Projeto	85
4.2.3	Metodologias utilizadas no Desenvolvimento	86
4.2.4	Lajes Maciças - Dimensionamento Convencional:	87
4.2.5	Levantamento dos Requisitos p/ o Sistema	91
4.2.6	Modelo Lógico de Dados do Sistema	93
4.2.7	Modelo Lógico de Fluxo de Dados do Sistema	95
4.3	Projeto Físico do Sistema	100
4.3.1	Desenvolvimento do Sistema Protótipo	100
4.3.2	Módulos do Sistema Protótipo - Fase 1 - Básicos	100
4.3.2.1	Módulo 2.1 Cadastro Básico de Projetos	100

4.3.2.2	Módulo 2.2 Mapeamento das Plantas dos Projetos	100
4.3.2.3	Módulo 3.1 Dimensionamento Convencional das Lajes . .	102
4.3.3	Módulos do Sistema Protótipo - Fase 2 - RNA	103
4.3.3.1	O Desenvolvimento do Módulo 3.2	104
4.3.3.2	Etapa de Prospecção de Treinos e Testes	106
4.3.3.3	Fase de Consolidação das Melhores Topologia e Parâmetros	107
4.3.4	Módulo 3.3 - Orçamento e Classificação via AHP	108
4.3.4.1	Proced.1 - Orçamento dos Projetos de Teste	108
4.3.4.2	Proced.2 - Classificação Projetos de Teste - Melhor Ganho Agregado:	108
5	Resultados e Discussões	110
5.1	Estrutura dos Resultados Obtidos	110
5.2	Módulos Desenvolvidos do Protótipo RNAhpLajes	110
5.2.1	Comparativos Protótipo x Software <i>TQS</i>	112
5.3	Resultados do Dimensionamento via RNA	113
5.3.1	Treinamento 2 - Cj. 2 - 13 Atributos - Projetos (1 a 4)	113
5.3.2	Teste Operacional 2 - Cj.2 - 13 Atributos - Projeto (6)	114
5.3.3	Treinamento 3 - Cj.3 - 14 Atributos - Projetos (1 a 7)	116
5.3.4	Teste Operacional 3 - Cj.3 - 14 Atributos - Projs.(8 a 10)	116
5.3.5	Treinamento 4 - Cj.4 - 14 Atributos - Projetos (1 a 7)	119
5.3.6	Teste Operacional 4 - Cj.4 - Projs.(8 a 10)	119
5.3.7	Treinamento 5 - Cj.5 - 15 Atributos - Projetos (1 a 7)	122
5.3.8	Teste Operacional 5 - Cj.5 - 15 Atributos - Projs.(8 a 10)	122
5.3.9	Treinamento 6 - Cj.6 - 15 Atributos - Projetos (1 a 7)	125
5.3.10	Teste Operacional 6 - Cj.6 - Projs.(8 a 10)	125
5.3.11	Resultados das Prospecções - Melhores Topologias	128

5.3.12	Evolução da Convergência dos Conjs.3 a 6 de Projetos	129
5.3.13	Algumas Pesquisas com Resultados Semelhantes:	130
5.4	Resultados Módulo 3.3 - Orçamento/Classif. AHP	131
5.4.1	Orçamentações e Classificações - Conj.3 - Teste 3	131
5.4.2	Orçamentações e Classificações - Conj. 4 - Teste 4	135
5.4.3	Orçamentações e Classificações - Conj.5 - Teste 5	138
5.4.4	Orçamentações e Classificações - Conj. 6 - Teste 6	141
5.4.5	Resumo Evolutivo da Precisão da Classificação AHP (Convencional x RNA) dos Conjuntos de 3 a 6	144
5.4.6	Algumas Pesquisas Comparativas dos Resultados com AHP:	145
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	146
6.1	Conclusões sobre a Aplicação RNA no Dimensionamento de Lajes:	146
6.2	Conclusões sobre os Orçamentos e Classificações AHP:	149
6.3	Conclusões sobre o Software Protótipo:	150
6.4	Conclusões Finais	151
6.5	Trabalhos Futuros	153
	Referências	154
	Apêndice A – Cronograma	158
	Apêndice B – Plantas Baixas	159
B.1	Plantas Baixas Cj.2 - Pjs.1 a 6	159
B.2	Plantas Baixas Cj.3 - Pjs.1 a 10	160
B.3	Plantas Baixas Cj.4 - Pjs.1 a 10	161
B.4	Plantas Baixas Cj.5 e 6 - Pjs.1 a 10	162
	Apêndice C – Tabelas Auxiliares - Lajes	163

Capítulo 1

Introdução

A Engenharia Civil é a ciência que rege a construção das obras civis prediais de baixo, médio e de grande porte, sendo estas duas últimas, as de maior complexidade e custo, demandando muitas horas de trabalho dos engenheiros, nos cálculos, análises e conferências, [41]. Este esforço é feito até que se chegue às várias opções do projeto, todas tentando otimizar "eficiência x confiabilidade x economia",[29]. Com o advento da Computação, a Engenharia evoluiu tanto que, muitas das construções atuais seriam inviáveis sem essa parceria.

Com os projetos feitos com auxílio computacional, logo surgiram programas com técnicas de otimização dos cálculos e geração da plantas. Atualmente, novos algoritmos, dentre eles os de Redes Neurais Artificiais (RNA), estão entre os que visam à classificação de padrões por aprendizado, permitindo agilizar os cálculos em cenários complexos [17]. É importante o uso de algoritmos de otimização "projeto x orçamento" em obras complexas, pois o emprego desses softwares levam a processos de construção mais rápidos, seguros e mais econômicos, que interferem diretamente no sucesso do empreendimento [41].

Segundo Braga [12], a **Machine Learning - ML** (aprendizado de máquina) ficou estagnada após 1969, mas voltou a se popularizar após a retomada nos anos 80, com uma de suas vertentes, a *rede neural artificial* (RNA) que começou a ter aplicabilidade prática e **ROI** às empresas. Com muitas variações em conceito, matemática e construção, das simples às complexas, requerendo muita informação e estratégias de implementação para chegarem à arquitetura e topologia de melhor aproximação com a solução, [44], [20].

Conforme os motivos citados nos parágrafos 2 a 4, e as pesquisas que foram efetuadas para este trabalho até o momento, não foram encontradas propostas da utilização conjunta das técnicas RNA e AHP juntas, que dimensionem as lajes na "resistência x

suficiência" e também efetue o orçamento e classificação das alternativas de projeto por melhor ganho/vantagem, utilizando a técnica **ADMC-AHP**. Cita-se aqui, o pesquisador Fernandes [21], talvez o único cujo trabalho localizado, utilizou o combinado RNA e AHP, mas de forma invertida e aplicando na análise pluviométrica de regiões para gerações informações para engenharia de barragens dessas águas de chuvas. Assim, surgiu a possibilidade deste projeto ser uma nova abordagem para a aplicação do combinado RNA + AHP, nos cálculos de elementos de edifícios de concreto armado, como as lajes.

1.1 Objetivo Geral e Específicos

Este trabalho visou gerar um protótipo de aplicação computacional com algoritmos para testar o dimensionamento de Lajes de projetos utilizando Redes Neurais Artificiais combinadas com a orçamentação e classificação desses, por melhor ganho agregado via a técnica **AHP**, sendo assim, mais uma nova abordagem para o dimensionamento e a seleção de melhores projetos de edifício.

Objetivos Específicos:

1. Desenvolver um Sistema Protótipo com os módulos: Cadastro e Mapeamento de Projetos; Dimensionamentos das Lajes (via Computação Procedural Convencional e via RNA); Orçamento e Classificação dos Custos das Lajes dos Projetos por melhor ganho agregado. Capítulo 4 (Metodologia).
2. Permitir dimensionar (Convencional e por RNA) as Lajes dos Conjuntos de projetos via Treinos e Testes, gerando de forma flexível e ágil, as máximas convergências possíveis e as melhores topologias e parâmetros de configuração de execução da RNA, capítulos 4 e 5 (Resultados).
3. Classificar os conjuntos de projetos, de forma flexível e ágil, pelos Critérios de Custos e Lucro das lajes, via algoritmos da AHP e ordenando-os por Melhor Ganho.
4. Apresentar os Resultados e a Evolução das Convergências obtidas nos Dimensionamentos (convencional e RNA) e as respectivas Classificações via AHP.
5. Avaliar no final, o potencial do combinado RNA + AHP, no capítulo 5, com base no atendimento dos 4 itens anteriores.

1.2 Justificativa

A forma e a qualidade do orçamento de uma obra (Materiais e Mão de Obra) podem resultar no lucro ou prejuízo da mesma, tendo maior importância tanto maior e mais complexa for a obra. Além do orçamento, as normas e as exigências regulatórias atuais requerem precisão e documentação das estruturas.

Devido à imprecisão da homogeneidade construtiva, o "concreto" (compósito de areia, pedra e cimento) tem o maior índice de incerteza mecânica que o 4^o componente, o "aço", requerendo várias opções de cálculos estruturais dos elementos e às várias abordagens orçamentárias dos projetos [9]. Atualmente, as construtoras utilizam softwares para obter projetos mais precisos a menores custos e lucro maximizado, possíveis.

O uso de novas técnicas computacionais tenta chegar a novos aplicativos que otimizem "eficiência x confiabilidade x custos". Os cálculos e a análise estrutural envolvem muitas etapas tomando o maior tempo do engenheiro. Como o dimensionamento e a classificação de projetos de edifício são tarefas complexas, a aplicação de algoritmos com RNA no programas que as resolvem (seção 5.3, cap.5) pode reduzir muito o trabalho do engenheiro e é onde entra a utilização combinada das técnicas RNA + AHP, praticamente ainda não encontrada noutras pesquisas (seções 4.3.5 e 5.4 dos capítulos 4 e 5) [39].

Conforme exposto anteriormente, justifica-se a experimentação conjunta do *Cálculo de Edifícios + RNA + AHP* neste trabalho, que se confirmado o potencial, será mais um caminho computacional para o dimensionamento e classificação de projetos.

1.3 Estrutura do Trabalho, Cenário e Fronteiras do Projeto

A Estrutura deste projeto segue o padrão de dissertação orientado pela Universidade Federal Fluminense, os capítulos são: 1-Fundamentação; 2-Revisão Bibliográfica; 3-Metodologia; 4-Resultados e Discussões; 5-Conclusões; 6-Trabalhos Futuros.

Cenário: Devido ao Cronograma disponível (Apêndice a) para o desenvolvimento da infraestrutura e programas do protótipo (seção 4.2, cap.4) e para que fosse exequível, este trabalho foi limitado ao *dimensionamento e classificação de lajes maciças de conjuntos de edifícios fictícios*, com plantas baixas desde as mais heterogêneas até àquelas de menor variação dimensional e arranjo de lajes, mais próximos da realidade das construtoras.

1.3.1 Delimitação das Fronteiras do Projeto

Conforme o cenário anterior, segue o detalhamento das fronteiras deste projeto:

- **Abrangência dos Cálculos das Peças:** Devido à grande quantidade de cálculos dos muitos elementos de um projeto de edifício, o foco deste projeto foi nas lajes maciças de edifícios residenciais / comerciais (até 10 pavimentos) com cargas padrão NBR6118 [7], não incluindo fundações, vigas, pilares, caixas d'água, escadas, subsolos, pois estes elementos poderão ser acrescentados em trabalhos futuros.
- **Abrangência dos Cálculos das Lajes:** Segundo Uberaba [48] há lajes de vários tipos construtivos no mercado (maciças, cogumelo, steel deck) e as nervuradas / pré-moldadas (EPS ou Lajota). Este trabalho focou apenas em lajes maciças para simplificação do volume de cálculos e aderência ao prazo do cronograma. [48].
- **Quanto à Base de Dados (BD) para Treino/Teste:** Foi desenvolvido um BD para armazenar: Dados das plantas baixas (térreo, garagem tipo, pavimento tipo) de no mínimo 5 conjuntos de projetos de edifício; Dimensões e nº de Pavimentos; Tabelas de construção; Parâmetros de execução dos Treinos/Testes das RNAs; Dados e parâmetros dos orçamentações e classificações dos projetos via AHP.
- **Quanto às Arquiteturas de RNA a desenvolver:** A previsão inicial era desenvolver os dimensionamentos via RNA tipo PMC (Perceptron Multicamadas) e havendo tempo, desenvolver as rotinas das redes Kohonem e RBF, mas pela complexidade dos 3 tipos e o cronograma, as duas últimas não foram desenvolvidas.
- **Nível Lógico de Programação no Protótipo:** Não foram utilizadas linguagens como *PythonTM* ou *MatlabTM*, pois estas já possuem macro-funções nativas de RNA, sem ganho de aprendizado para o autor. Foi utilizada apenas programação procedural com instruções e lógica padrão da linguagem, com funções científicas básicas, tendo sido geradas rotinas quase do zero com base inicial nos pseudo-códigos das literaturas estudadas em Silva [44], Ludwig [31] e Braga [12].
- **Metodologia ADMC-AHP utilizada no Projeto:** Para otimizar os orçamentos e classificação focando a *resistência x custos* foi utilizada a técnica AHP, mais simples sem Ratings, para não extrapolar a quantidade de cálculos e rotinas a serem gerados, o que demandaria maior tempo de cronograma que o previsto.

1.4 Contribuições deste Trabalho e Diferencial

A seguir são detalhadas as contribuições e o diferencial resultantes deste trabalho:

- **Aplicação de RNA + AHP no Dimensionamento e Classificação de Lajes:**
Utilização da abordagem conjunta de *Dimensionamento de Lajes via RNA + Orçamento e Classificação por AHP* se configurando como mais um caminho na predição rápida dos Custos dos projetos de melhor ganho para as construtoras e investidores.
- **Aplicativo p/ Dimensionamento, Classificação de Projeto de Edifício:**
A construção do aplicativo protótipo de software *RnAHPLajes* com telas de interfaces GUI iterativas com o usuário, que fossem compactas, flexíveis e contendo os seguintes módulos: Cadastro dos Projetos; Carga de tabelas de engenharia; Mapeamento dos projetos; Dimensionamento das lajes dos projetos pelos métodos computacionais *convencional* e via *RNA*; Orçamentação e classificação dos projetos com custos e lucros por ordem de melhor ganho agregado.
- **Algoritmos de RNA e AHP Aperfeiçoados:**
Algoritmos de RNA e AHP receberam melhoramentos além dos cálculos e funções básicas da literatura: 1) Rotina de parada do processamento de convergência via 3 métodos, o 1º por exatidão das saídas das amostras, o 2º por máxima convergência em função monótona e o 3º, pelo erro médio quadrático clássico (EQM); 2) Rotina com automação para atingir dinamicamente os melhores aceleradores de aprendizado e avanço; 3) Rotinas rápidas de AHP que orçam com utilidades e critérios configuráveis e classificam os melhores custos das lajes dos projetos por ordem de melhor vantagem econômica.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Engenharia Convencional no Cálculo de Obras

A Engenharia até os anos 80, antes dos primeiros microcomputadores comerciais se popularizarem, era feita maciçamente nas pranchetas de desenho equipadas com régua paralela, tecnígrafo e muitas horas de cálculo em papel. Somente obras com elevado orçamento e risco, necessitando de maior precisão e análise de estabilidade, podiam contar com o apoio alugado de computadores (na época de grande porte - famosos e caros mainframes). Estando fora do orçamento dos engenheiros autônomos e de muitas construtoras, até o meio da década de 80 a maioria dos projetos (desenho e orçamento) eram feitos manualmente com auxílio apenas de calculadora [1]. Segundo Kimura [29], ignorar os benefícios da computação nos Projetos de Edifício na atualidade é regredir a Engenharia. A Construção Civil é importante para o desenvolvimento da sociedade, e sendo área das mais relevantes das ciências exatas, não transparece a parafernália de cálculos e dias tomados dos engenheiros, e que crescem muito conforme o porte da obra, [7]. Na atualidade, obras complexas precisam do apoio computacional para serem seguras e economicamente viáveis [1]. Tanto isso é razoável que, se listados os processos para projetar e calcular edificações, serão necessárias dezenas de atividades itemizadas de a até z , com subitens, [7] e [5]. Faz-se necessária então, a utilização e geração de programas computacionais com algoritmos especializados, para agilizar todo o processo, [29].

2.1.1 Engenharia de Estruturas de Edifício

Um edifício é composto por vários elementos estruturais (Exs.: fundações, pilares, vigas, lajes, escadas, caixas d'água), [11], e para serem dimensionados envolvem muitas

etapas como, concepção, análise estrutural, dimensionamento e detalhamento, plantas do projeto, sendo a 2ª e a 3ª, as que mais exigem cálculos e revisões antes da seleção e execução, [29]. Requerem proficiência técnica multidisciplinar dos engenheiros, que ainda precisam obedecer às normas vigentes [7], [29].

2.1.1.1 Concepção e Levantamento dos Parâmetros de uma Obra

O dimensionamento estrutural do edifício precisa do levantamento dos parâmetros da construção junto ao local. A construtora e os investidores farão muitas reuniões para a geração das informações do empreendimento que podem ser resumidas em:

1. **Reuniões Iniciais** A construtora se reunirá com os investidores da obra predial para levantar: Orçamento disponível do empreendimento; Tipo ou finalidade da obra (Comercial ou Residencial), que influencia nos cálculos das cargas e esforços da estrutura; Normas a serem obedecidas, [7].
2. **Sondagens:** Reconhecimento da topografia do local da obra; Coleta e análise da sondagem do terreno, que influencia no cálculo das fundações da obra, [48].
3. **Tipo Construtivo:** Definição das classes dos materiais construtivos requeridos para o tipo (item 1 e 2) da estrutura do edifício (Concreto Armado ou Estrutura Metálica), [48] e [11]. A escolha do tipo influencia nos cálculos do dimensionamento.
4. **Cartas Ambientais Locais da Obra:** Determinarão as cargas dos ventos (influencia nos cálculos das armaduras) e a agressividade química (influencia na adição de produtos de proteção do concreto e das armaduras, [11], [48] e [7].
5. **Plantas do Projeto:** Plantas Baixas dos pavimentos; Plantas estruturais e de arquitetura da obra (edifício ou galpão) para determinar: N^o de Pavimentos; Dimensões das peças estruturais que comporão a estrutura.
6. **Acabamento:** Segundo Uberaba [48] e NBR6118 [7], os Tipos de acabamentos influenciam nas cargas do *Peso Próprio* (item 4) e do Revestimento (item 4).
7. **Reuniões para Definição do Projeto Final:** Estas consolidarão o projeto de melhor vantagem *estrutura x custo* para contratação da execução da obra.

2.1.2 Cálculo do Dimensionamento (Resumido) de Lajes

O dimensionamento das *lajes maciças* dos pavimentos característicos (térreo, garagem, pavimento tipo) de cada projeto de edifício é feito via cálculo computacional convencional de Engenharia seguindo um procedimento sistemático com etapas bem definidas.

2.1.2.1 Dimensionamento das Lajes Armadas - 1 Direção:

O dimensionamento de lajes armadas em 1 direção é feito como se estas fossem formadas por *várias vigas estreitas e justapostas paralelamente*, calculando-se a área de armadura por m^2 de laje, [47]. O método *Bares-Czerny* não é próprio para este tipo de laje [11]. Os sentidos dos *momentos fletores* atuantes em lajes armadas em 1 direção são indicados a seguir (Fig.2.1a):

Obs.: Os cálculos da laje armadas em 1 direção são semelhantes aos da armada em 2, e o item a seguir para 2 direções seve para o cálculo dos 2 tipos. A diferença entre esses tipos é que em 1 direção, a laje terá armadura principal calculada e na outra será calculada como secundária (armadura mínima construtiva) [11].

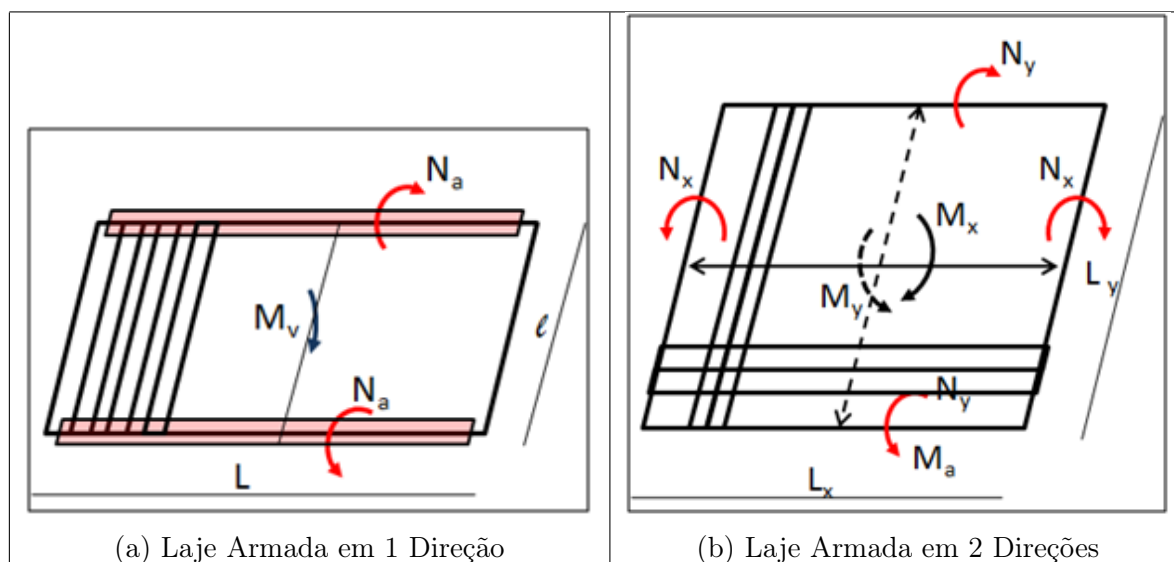


Figura 2.1: Direção Armaduras e Sentido Momentos Fletores nas Lajes

Fonte: Autor

2.1.2.2 Dimensionamento (Resumido) Lajes Armadas em 2 Direções:

O Cálculo das lajes armadas em 2 direções (em cruz) também é feito como se fossem vigas estreitas paralelas umas as outras, nas 2 direções, [47], formando um quadro

reticulado e calculadas suas armaduras com ajuda das tabelas *Bares-Czerny* (Figs.C.1a à d, apêndice c). Os momentos fletores atuantes são vistos na Fig.2.1b [11].

Segundo Hilário [27] e Botelho [11], o método-tabela *Bares-Czerny* de 1976 (Figs.C.1a à d, apêndice c) dos casos de vínculos 2 a 6 de engastes vizinhos, retorna os respectivos coeficientes para as equações do cálculo da bitola das armaduras da laje.

Importante: Levantar a sistemática das literaturas de dimensionamento de lajes e as tabelas auxiliares do processo, Botelho [11], Uberaba [48] e norma NBR6118 [7].

Procedimento A seguir são descritas, resumidamente, as etapas do procedimento.

- 1. Geração das Plantas Baixas:** Em cada *Planta Baixa* de cada *Pavimento Tipo* é feito o mapeamento geométrico e a distribuição das lajes, identificando o lado x e o y e obtendo que tipo de cômodo cada laje será, [11].
- 2. Nomenclatura de Identificação das Lajes:** A norma NBR6118 [7] orienta que a sistemática de numeração seja a seguinte:
 - Numera-se de cima p/ baixo e da esquerda p/ a direita, na planta baixa.
 - Cada laje recebe o rótulo Ln , onde L = refere-se à Laje, e n =número será o inteiro serial da Laje $n = (1, 2, 3...)$. Ex.: L1 , L2, ... L12.
- 3. Identificação dos Vínculos Vizinhos:** Com as plantas baixas, classificar os tipos de *vínculo* (engaste) com suas lajes vizinhas, da seguinte forma, [48] [11] [7]:
 - Determinar se a armadura da laje será em 1 (Fig.2.1a) ou 2 (Fig.2.1b) direções.
 - Identificar o tipo de vínculo entre a laje e sua vizinhança em cada tipo de pavimento (térreo, garagem, pavimento tipo) de cada projeto de edifício.
- 4. Parâmetros dos Materiais Principais e Tabelas:** Obter o Concreto (F_{ck}), Aço (F_{yd}) a ser utilizado e as tabelas ABNT auxiliares de engenharia, NBR6118 [7].
- 5. Espessura Individual:** Cada Laje tem a espessura (ou altura h) calculada com a equação prática $h = \frac{L_{Mnr}}{40}$, [11]. Onde: L_{Mnr} = Lado de menor dimensão da laje.
- 6. Espessura Mínima Geral das Lajes do Pavimento:**

Na prática, a espessura h de todas as lajes é unificada, substituindo-se as individuais pela de "maior h " de todas. Esta unificação é por pavimento e visa economia, pois

reduz erros, o custo do desperdício com formas e mão de obra, [48]. Essa espessura pode ser aumentada se ficar abaixo da mínima estabelecida pela Norma ABNT (Espessuras Mínimas de Lajes [6]) conforme as exigências de cobrimento, [47].

7. Determinar a Direção da Laje - Índice de Proporcionalidade:

Para saber se a laje será armada em 1 ou 2 direções, calcula-se o *índice de proporcionalidade* pela equação $\epsilon = \text{lado}_{Mor} / \text{lado}_{Mnr}$. Caso ($0.5 \leq \epsilon \leq 2$) a laje é considerada armada em 2 direções, e $\epsilon > 2$ é armada em 1, [11].

8. Determinar as Cargas sobre a Laje:

São 3 os tipos de cargas consideradas no cálculo dos momentos fletores (MF) e cargas lineares (R) sobre as vigas vizinhas à laje, segundo NBR6120 [7], [47] e Botelho [11]:

- q_{pp} = Carga do Peso Próprio (concreto + armaduras).
- q_{rev} = Carga do Revestimento utilizado para acabamento da laje.
- q_{ac} = Cargas Acidentais, há tabela na NBR6118 [7], que indica os valores médios de carga/ m^2 acidental conforme o tipo de cômodo que a laje será.
- $q = q_{pp} + q_{rev} + q_{ac}$ sobre lajes.

9. Determinar os Engastes com as Vizinhas:

Cada laje se enquadra num *Caso de Vínculo*, que é o tipo de engaste da mesma com suas vizinhas. A sistemática das tabelas *Bares-Czerny* (Tabs.4.3 apêndice c) indica o conjunto de *coeficientes de esforços* para um dos 6 casos em que a lajes se enquadra. Estes coeficientes são minoradores nas equações dos momentos fletores (+ / -) em função da distribuição das cargas na laje, [11], [7]).

10. Calcular os Momentos Fletores:

Conforme o *Caso de Vínculo* da Laje são calculados os momentos fletores positivos (MF+) no meio de vão, e os negativos (-) nas extremidades da laje sobre as vigas, onde a laje se engasta com as vizinhas e apoiam, variando apenas o valor dos coeficientes conforme a direção da armadura e *caso do engastamento*, [11] e [7].

11. Calcular o fator K6 e obtendo o fator K3:

Com os *MFs* e a altura h da laje obtida no item 6, é calculado o *K6* (Eq.4.5, cap.4). Com este fator, o F_{cd} do concreto e o F_{yd} do Aço adotado, entra-se na tabela de *Dimensionamentos de Lajes Maciças em Cruz* (Tab.C.2a apêndice c) e obtém-se o *K3*. Esta tabela já considera os fatores de minoração da resistência do concreto

($Fcd = \frac{Fck}{1,4}$) e do aço ($Fyd = \frac{Fyk}{1,15}$) e do *efeito Rush* nas cargas sobre as armaduras ($Cgd = Cg \cdot 0,85$), [6] e B[11].

12. Obtenção da Área de Aço Total:

Com o fator $K3$, o MF calculado (item 6) e a altura d ($d = h - c$, onde c é a espessura de cobertura inferior da laje) calcula-se a área de aço A_s necessária das armaduras principais (+ / -) na direção x e depois na y , [6] e [11].

Obs.: É necessário que $A_s \geq A_{Min}$, que é 15% da altura h da laje. Logo, se $A_s < A_{sMin}$ adota-se $A_s = A_{sMin}$ [6].

13. Obter Diâmetro x Espaçamento com a Área de Aço:

Para qualquer armadura principal em qualquer direção, com a A_s obtida (item 12), varre-se a tabela de *Área de Armadura para Lajes* (Tab.C.2b, apêndice c), verificam-se as colunas de diâmetro (5mm a 16mm) disponíveis. Corre-se verticalmente pelos valores de área de aço nessas colunas de diâmetro para encontrar uma área de aço $A \geq A_s$. Com a área A encontrada, corre-se para a esquerda na mesma linha até a 1ª coluna do *espaçamento* para obtê-lo.

Importante: Pode ocorrer de mais de 1 par "diâmetro x espaçamento" atenda, mas para decidir qual adotar, leva-se em conta o equilíbrio destes critérios: Quantidade de metros que serão consumidos; Espaçamento ideal para montagem e concretagem; Bitolas com menor custo, [6] e [11].

14. Dimensionamento das Armaduras de Todas as Lajes:

Este processo de 1 a 13 deve ser repetido para todas as armaduras principais das lajes por pavimento do edifício, [6] e [11]. [6], [10].

Observações Finais:

- Para lajes armadas em 1 direção (na realidade não há armadas em apenas 1 direção por questões construtivas e de fissuramento da laje) o dimensionamento será o mesmo, com a única diferença de que numa das direções haverá o cálculo dos MFs e obtenção da A_s (itens 10 a 13) e na outra será preciso apenas armaduras secundárias mínimas A_{sMin} , [11].
- Nos encontros entre lajes e suas vigas de apoio, também se colocam barras anti-trincas,[47], para evitá-las. Neste trabalho, por simplificação e cronograma, não foram consideradas, podendo ser implementadas em trabalhos futuros.

2.2 Engenharia Convencional c/ Apoio Computacional

Observando-se a complexa e extensa sistemática do cálculo de edifícios no item anterior, [41], a Engenharia formou parceria com a computação assim que pode. O aluguel caro dos Mainframes foram viáveis em grandes obras, mas a partir de meados destes, os microcomputadores e softwares com custos mais baratos foram se tornando acessíveis e populares o suficiente para que construtoras e engenheiros autônomos também pudessem adquiri-los, melhorando seus serviços. Segundo o site Alcance JR [1], nos anos 80 popularizam-se softwares especialistas em CAD (Computer Aided Design) como o *AUTOCADTM* em 1982, permitindo projetos em 2D e aposentando as pranchetas de desenho, substituídas por plotadoras. A partir dos 2000, surgiu a tecnologia CAD 3D, sendo o *SolidWorksTM* (1995) o mais conhecido, depois o *RevitTM*, trazendo acesso aos elementos da estrutura via banco de dados do projeto e permitir planejar o ciclo de vida do edifício, do conceito à construção. Os softwares CAD 3D, além das plantas do projeto, oferecerem memorial de cálculos e até modelagem 3D ativa. Nos últimos 30 anos surgiram softwares usando o novo conceito de "tecnologia BIM" (Building Information Modeling) de 1974, como o *EberickTM*, *TQSTM*, *CypeCadTM*, que só ganharam o mercado a partir de 2000 para cá. A BIM ampliou a capacidade dos engenheiros tratarem obras mais complexas, dinamizando todas as etapas da obra (projeto, cálculos, análises estruturais, execução), [1], [41], [28].

2.3 Importância da Otimização via Computação

Em geral, os problemas existentes no mundo podem ser representados por sistemas matemáticos, como uma combinação de parâmetros (variáveis) abrangendo um determinado domínio de dados e com determinada lógica intrínseca. A solução do *sistema problema* pode ser aproximada por função(ões), dentro de cenários e regras (critérios) que regem o *sistema problema*. Estes problemas seguem a sistemática $E - P - S$, onde estimulados com dados de entrada (E), os processam (P) utilizando funções e regras pré-definidas, atingindo saídas solução (S) esperadas.

Muitos *sistemas naturais* seguem essa sistemática. A chuva ocorre quando certo volume de vapor de água (E) se choca com uma massa fria de ar (E) e se os critérios que geram a condensação do vapor forem atingidos (gradiente de temperatura e % de umidade) a condensação da água (propriedade natural de equilíbrio energético) ocorrendo a chuva (P), e a saída (S) é a deposição de água.

Segundo Haykin[26], muitos problemas (naturais e humanos) são tão complexos que *métodos aritméticos Exatos* não são suficientes. Nestes, o n^o de variáveis envolvidas e/ou volume de entradas crescem tanto, que tornam inviável a solução. Muitos problemas de *otimização* são complexos e nas áreas de Engenharia, Comércio e Economia, a solução requer atingir *máximos* ou *mínimos* de função(ões) do problema, [35]. o Tema *máximos* e *mínimos* do cálculo diferencial e integral (*Newton, 1653* e *Leibniz, 1657*) aplicam-se à otimização. Ex. à máxima resistência ou o custo mínimo de um edifício completo, [35].

Munem [35] orienta que a análise prévia e estruturação de um problema encontrarão o(s) equacionamento(s) correto(s) para representá-lo, normalmente sob a forma de funções a serem resolvidas, visando a solução ótima. Várias técnicas usam funções cartesianas (Fig.2.2) para representar o problema onde o ponto de *mínimo* ou *máximo* representa a solução visada (Ex.: Custo mínimo do edifício). Podem também apresentar mínimos (ou máximos) *relativos* que não são "o menor" ou "o maior" da função, chamados de *absolutos*. Se a(s) função(ões) $f(x)$ que rege(m) um problema de máximo (ou mínimo) for(em) diferenciável(eis) ($f'(x) \neq \infty$) em todos os pontos do(s) domínio(s) ($(I = a \leq x \leq b)$) desta(s), o ponto de máximo (ou mínimo) absoluto (x, y) da função, apontará a solução ótima da problema (Fig.2.2), [35]:

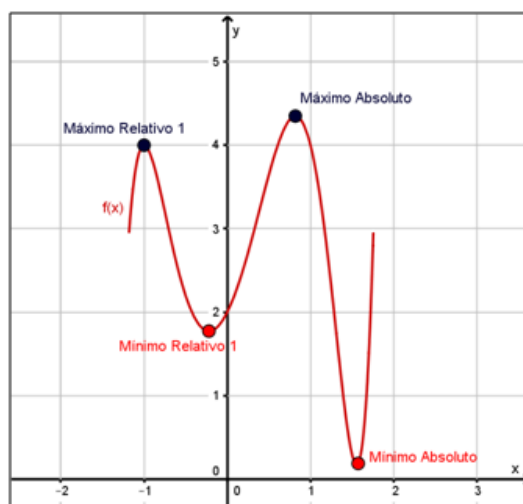


Figura 2.2: Exemplo de Gráfico de Função com Máximos e Mínimos

Fonte: Munem-Foulis [35].

2.4 Algoritmos na Resolução de Problemas Complexos

Há muitas definições do que seja um algoritmo, e ao longo de décadas da Computação, muitos da vanguarda da TI tentaram defini-lo. A seguir, 2 delas:

"Algoritmo é a descrição de um conjunto de comandos com padrão de comportamento e norma de execução, que obedecidos, resultam numa sucessão finita de ações.", Farrer [18], p.17.

"Um procedimento para resolver um problema em termos das ações a executar e da ordem em que essas executam é chamado de algoritmo.", Deitel [15], p.87.

Algoritmos são técnicas de escrita de programas criadas para resolver desde cálculos aritméticos simples a sistemas complexos e se dividem em 4, *Exatos*, *Heurísticos*, *Meta-heurísticos* e *Híbridos*, [49]. Atualmente, a maioria dos algoritmos é executada em computadores, a principal ferramenta de processamento de dados dos últimos 70 anos.

A disciplina de *Inteligência Computacional Aplicada* (ICA), pertencente à área de *Modelagem Computacional*, dedica-se a desenvolver, melhorar e ampliar a capacidade dos algoritmos em otimizar soluções, conhecidas ou não, de problemas de média à alta complexidade. O estudo das técnicas de soluções dos problemas já usam algoritmos de abordagem *Exata* desde o surgimento do computador e, nos últimos 30 ou 40 anos, surgiram algoritmos excêntricos, os *Heurísticos*, para tratarem problemas específicos, e depois os *Meta-heurísticos* mais gerais melhorando o desempenho dos *Heurísticos*, [49].

Os *Meta-Heurísticos* vão além nas estratégias dos *Exatos* e *Heurísticos*, [49] e [22], extrapolando a lógica computacional para estruturas conceituais de outras áreas científicas (ex.: física, biologia, logística) e que vêm se mostrando muito eficientes. A mais recente delas é a 4^a técnica, chamada *Híbrida*, que utiliza uma combinação das 3 primeiras técnicas anteriores. As 3 últimas estratégias são tentativas de algoritmos além da lógica dos *Exatos* que, ou não resolvem o problema, ou o resolvem à custa de esforço quase inviável.

A construção civil é uma área complexa por natureza, que utiliza combinações de várias proficiências (*Física*, *Matemática*, *Logística*, *Estatística*, *Química*, *Mecânica*) desde de seus primórdios, visando maximizar o trinômio "resistência x segurança x economia" dos projetos. A computação com algoritmos convencionais *Exatos* vem atendendo há muitas décadas, mas com a alta concorrência atual do mercado, a otimização do trinômio vem requerendo softwares mais avançados que tragam mais vantagem competitiva às construtoras, [41].

2.5 Modelando a Matemática do Problema Numérico

Segundo Sperandio [46], qualquer processo aproximativo é classificado como *Método Iterativo*, que pertence aos estudo dos *Métodos Numéricos*, e é muito importante a escolha

do método mais apropriado que convirja para uma solução de um problema. E se converge, como converge? E neste caso, requer ao pesquisador definir as seguintes premissas: 1) A Precisão desejada das Saídas; 2) Nível de eficácia do método em levar ao resultado previsto; 3) Qual a velocidade requerida para concluir a solução; 4) Esforço computacional (tempo de CPU e quantidade de memória ocupada).

A otimização da solução de um problema via algoritmos Meta-heurísticos pode ser conseguida com o seguinte equacionamento matemático (resumido): "*Existindo um conjunto de variáveis $V = (x_1, x_2, \dots, x_n | n \in N)$, onde n é o tamanho do conjunto V , é preciso encontrar os valores das variáveis x_i tais que, dada uma função-objetivo $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, esta seja otimizada no seu máximo (ou mínimo) absoluto*".

O equacionamento do problema P via função(ões) segue as premissas:

- **$f(x)$:** Função-objetivo a x_n variáveis, que equaciona e rege o problema P .
- **Objetivo:** Adotar a lógica para *Minimização*, se a solução estiver no mínimo absoluto da $f(x)$, ou *Maximização*, se essa estiver no máximo absoluto da $f(x)$.
- **Restrições:** São as regras que restringem o domínio D dos dados que equacionam e regem o problema. Poderão ser fortes (obrigatórias) ou fracas (atendê-las dentro do possível).
- **Instâncias:** Conjuntos distintos de valores possíveis $P = (I_1, \dots, I_n)$ de Entradas no problema P a serem obtidas as respectivas soluções.
- **Soluções:** $S_1 = (x_1, x_2, \dots, x_n) \dots S_n = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, são as n soluções possíveis para as instâncias do problema, onde das várias soluções, $P_1(S_1, S_2^*, \dots)$, $P_2(S_1^*, S_2, \dots)$ uma é a mais próxima da solução ótima*.

Exemplo:

- Problema P (cenário): Problema de Logística de Transporte de Volumes.
- Função objetivo ($f(x)$): Acomodar a maior quantidade de volumes x_i ocupando o máximo do Volume V do transporte.
- Instância: uma I de volumes de carga, $x_I = [1, 4, 3, 5, 2] | I = 1, 5]$
- Restrições: Limite do Volume $|V| = 10m^3$

- Soluções Possíveis: $S_1 = (3, 5, 3)$; $S_2 = (1, 4, 3, 2)$; $S_3 = (4, 3, 2)$; ...; $S_n = (1, 2)$
- Melhor Solução: $S_2^*(1, 4, 3, 2)$

Para otimizar a solução (saída) da *função-objetivo* anterior, há vários algoritmos que a resolvem, mas ao longo do tempo, pesquisadores foram consolidando algoritmos clássicos que melhor resolvem cada tipo de problema. Alguns foram batizados com os nomes dos próprios autores, outros pelo tipo do problema. Exs.: **Algoritmos Genéticos**, [22]; **Simulate Annealing**, [22]; **Regra Delta de Widrow-Hoff**, [8].

Os problemas podem diferir no cenário e/ou domínio de dados, mas podem ter um mesmo algoritmo de resolução. O algoritmo **VND** pode resolver os Problema do "Caixeiro Viajante", "Logística de Transporte" e o "Problema da Mochila" e até outros solucionáveis pelo mesmo **VND**, pois possuem lógica de solução semelhante, [49].

2.5.1 Detalhando os 4 Grupos Estratégicos de Algoritmos

Os algoritmos atuais de solução otimizada da *funções-objetivo* estão classificados em 4 técnicas segundo a *forma de abstração* e a *estratégia para otimização*, [49].

1. **Exatos:** São formados por linhas de instruções sequenciais e equações aritméticas, dentro de laços de iteração e/ou de decisão combinados, formando blocos encadeados numa estrutura lógica que tenta chegar à *função-solução* do problema. **Uso:** Quando é requerida alta precisão e o problema é determinístico. **Performance:** São os mais rápidos se o problema tem solução *procedural linear exata e provada*, mas medianamente rápidos ou lentos, quando a solução exigir muito esforço computacional. **Complexidade de Construção:** Baixa à Alta. **Eficácia na Solução:** Alta. **Exs.:** Método Bolha de Classificação; Classificação Recursiva.
2. **Heurísticos:** São algoritmos construídos com base em "insights" ou *estratégias engenhosas*, não *Exatos*, mas tentam se aproximar o possível da solução mais rapidamente do que os *Exatos*. **Uso:** Quando a precisão pode ser próxima da exata. **Performance:** Podem ser mais lentos que os exatos se a solução for procedural, mas são mais rápidos se esta não for. **Complexidade de Construção:** Baixa. **Eficácia na Solução:** Convergem mais ou menos para a solução que os *Exatos*, ou divergem muito, pois não garantem a solução. **Exs.:** VNS (Busca pelo vizinho mais próximo), VND (Busca pelo vizinho mais próximo na descendente).

3. **Meta-Heurísticos:** São Algoritmos cujas abstrações levam à estratégias de estruturação sofisticada, utilizando métodos heurísticos de outras áreas que não àquela diretamente ligada ao problema, mas que conseguem resolver-lo. **Uso:** Quando a precisão pode ser próxima da exata. **Performance:** Podem ser mais rápidos que os *Exatos* e *Heurísticos*, se a solução não for procedural, mas mais lentos se a mesma for. **Complexidade de Construção:** Media à Alta. **Eficácia na Solução:** Convergem mais que os *Heurísticos* e mais ou menos que os *Exatos*, ou divergem pois não garantem a solução. **Ex.:** Colônia de Formigas.
4. **Híbridos:** Combinam conceitos das 3 estratégias anteriores (*Exatos* e *Heurísticos* e *Meta-Heurísticos*) não pertencendo a uma única classe específica de Algoritmos, [49]. **Uso:** Quando a precisão pode ser próxima da exata. **Performance:** Podem ser mais rápidos que as outras 3. **Complexidade de Construção:** Altíssima. **Eficácia na Solução:** Pode convergir mais rápido que as outras 3, ou divergir sem garantia da solução. **Ex.:** Redes Neurais Artificiais.

Analisando a estratégia dos algoritmos, as 3 últimas não garantem a solução exata, mas podem ser mais eficientes e rápidos, tentando a máxima aproximação da precisão dos *Exatos*, [49]. Muitos algoritmos de **Machine Learning** (ML) vêm sendo usados em diversas áreas, ex.: Os de busca de conteúdo na internet, onde o desempenho no retorno dos links sobre o assunto é prioridade 1, para o provedor fidelizar o usuário. A **ML** possui diversos algoritmos *Híbridos* como por exemplo o (*Algoritmo Genético + RNAs*), [8], além disso, essas estratégias também vêm sendo utilizadas em muitas pesquisas para cálculo de estruturas, [9], [23], [20] e [49].

2.6 Rede Neural Artificial - RNA

O **Machine Learning** (ML) ou aprendizado de máquina é uma área da Inteligência Computacional, que vem crescendo muito nas 2 últimas décadas, mas seu conceito não é novo, surgido em 1943 com os estudos iniciais de McCulloch-Pitts sobre *neuro-computação*. Um grupo de algoritmos de destaque é a família das Redes Neurais Artificiais (RNA) de estratégia Híbrida, retomadas a partir de 1986, [26] e [30].

Segundo Haykin [26], Kovács [30] e Silva [44], as RNAs ganharam atenção a partir do artigo de Rummerhart e McClelland de 1986, intitulado **Parallel Distributing Processing**, como a grande retomada das RNAs com uma aplicação prática empresarial real. Desde então, as RNAs vêm sendo aplicadas nas áreas: Reconhecimento Gráfico

(escrita, imagens); Apoio a Exames e Reconhecimento de Doenças (tomografias); Controle de Transportes; Controle de Vibrações em Máquinas; Controle de Fornecimento de Energia; Predições em mercado de Investimento.

De acordo com Kovács [30] as RNAs estão dentro da disciplina de *inteligência artificial* (IA), outras vezes dentro da *teoria conexionista ou de cognição*, mas certamente dentro dos estudos dos *fenômenos complexos*. Ludwig [31] ainda infere que as RNAs são uma técnica *Híbrida* com abordagem de aprendizado *simbólica e conexionista* ao mesmo tempo. Elas são aplicáveis a problemas como o mapeamento e classificação de comportamentos a partir de informações inseridas e o treinamento da sua estrutura de dados, [26].

Nas RNAs, os neurônios formam fronteiras separatórias de dados em classes (grupos) *linearmente separáveis*. Em muitos casos, essas fronteiras podem ser bem complexas, exigindo muitos neurônios, ou até mesmo várias RNAs combinadas, para se obter uma classificação satisfatória, [26] e [44]. O Interessante é que, segundo Haykin [26] e Ludwig [44], as RNAs não são próprias para resolver todo um problema complexo, mas sim, partes menores deste, tendo ainda que serem estrategicamente orquestradas por algoritmos *Exatos*, fragmentando e distribuindo as partes menores do problema para as rotinas de RNA e depois reunindo os fragmentos de solução, numa única final.

Algumas Definições de RNA:

"Uma rede neural é um processador maciçamente paralelamente distribuída constituída de unidades de processamento simples, com a propensão natural de armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível ao uso.", Haykin [26], p.28.

"São modelos computacionais inspirados no sistema nervoso de seres vivos, com capacidade de aquisição e memorização do conhecimento (baseado em informação), sendo um conjunto de unidades de processamento de neurônios artificiais interligados por grande número de interconexões (sinapses) representadas por matrizes de pesos sinápticos", Silva [44], p.24

"É uma estrutura maciçamente paralela permitindo a generalização de saídas adequadas às entradas não presentes durante a fase de treinamento da RNA", Ludwig [31], p.7.

2.6.1 Características Principais de uma RNA

Vários pesquisadores tais como Silva [44], Haykin [26] e Ludwig [31] elencam características e comportamentos notáveis das RNAs, a seguir:

- a. **Adaptabilidade:** "Aprender" por experimentação.
- b. **Capacidade de Aprendizado:** Relacionar dados com resultados prováveis, via um método de treinamento.
- c. **Generalização de Conhecimento:** RNAs alimentadas com dados e devidamente "treinadas" podem gerar respostas sucessivamente próximas das esperadas e até algumas não previstas.
- d. **Organização de Dados:** Auto-ajuste dos dados de entrada em conjuntos de dados padronizados por características semelhantes.
- e. **Tolerância à Falhas:** Mesmo que alguns de seus dados sejam perdidos, sua estrutura interconectada ainda pode gerar respostas razoavelmente válidas.
- f. **Armazenamento Distribuído:** O conhecimento armazenado está distribuído intrinsecamente às conexões dos neurônios, podendo aumentar o "aprendizado" à medida que a RNA cresce.
- g. **Prototipação:** O aprendizado torna-se uma estrutura organizada e sintonizada de funções e dados, podendo ser construída na forma de programas ou hardwares computacionais.

2.6.2 Tipos de Problema Candidatos à Aplicação de RNAs

Os trabalhos de Silva [44], Ludwig [31], Braga [45] e Diniz [17] listam 7 grandes grupos de problemas solucionáveis via RNAs, sendo os 2 primeiros os mais tratados:

1. Reconhecimento e Classificação de Padrões;
2. Problemas de Aproximação de Funções;
3. Controle de Processos;
4. Agrupamento de dados (Clusterização);
5. Sistemas de Previsão;
6. Otimização de Sistemas;
7. Problemas com Memórias Associativas.

2.6.3 Áreas da Engenharias com Aplicabilidade de RNAs

Além dessa combinação *RNA + AHP* no dimensionamento e orçamento predial, pôde-se encontrar trabalhos de Engenharia utilizando RNAs ou a técnica AHP, tais como:

2. Reconhecimento de distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica utilizando redes PMC, [44];
3. Análise de Confiabilidade Estrutural utilizando o Método de Monte Carlo e Redes Neurais, [9];
5. Desenvolvimento de Software para a Estimativa da Profundidade de Carbonatação, Vida Útil e Captura de CO_2 de Estruturas de Concreto empregando RNAs, [20];
6. Otimização de Estruturas Treliçadas Planas sob Carregamentos Estáticos e Dinâmicos, usando Algoritmos Genéticos e Redes Neurais, [23].
7. Estudo da configuração de Diferentes Arquiteturas de Redes Neurais Artificiais MLP para Classificação de Imagens Óticas, [4]
8. Otimização de Estruturas Treliçadas de Elementos em Compósitos usando Redes Neurais Artificiais, [17]
9. O Uso do Método AHP na Tomada de Decisão para Seleção de Sistemas de Lajes de Edifícios Comerciais, [43]
10. Utilização de Redes Neurais Artificiais Aplicadas na Discriminação de Padrões de Doenças Florestais, [19]
11. Aplicação do Método AHP na Escolha do Tipo de Concreto a ser utilizado na Construção Civil, [39]

2.7 Estudo Resumido da Sistemática das RNAs

Os subitens dessa seção condensam um estudo muito resumido sobre a sistemática das RNAs, mas permite ao leitor ter um conhecimento básico sobre o assunto.

2.7.1 Origem do Conceito RNA e o Neurônio Artificial

Conforme a definição anterior sobre RNA, modelos computacionais baseados no *neurônio biológico* (Fig. 2.3a), tem uma arquitetura cujas unidades, (*neurônio artificial*, Fig.2.3b) são conceitualmente semelhantes, [26],[44] e [17].

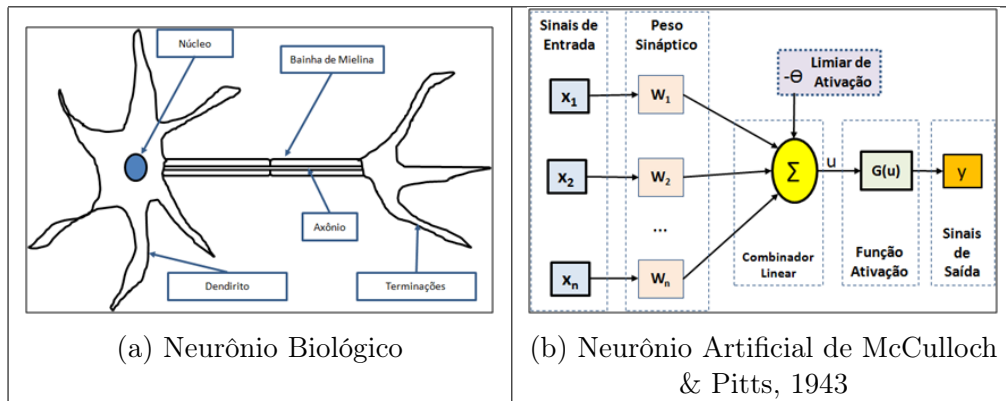


Figura 2.3: Conceitos Neurônio Biológico x Artificial

Design: Autor - Fonte: Silva [44]

2.7.2 Funções de Ativação

Determinados os valores tanto das saídas (Imagem) y das variáveis do conjunto de entradas x_i (Domínio), as funções que regem o problema estão em dois grupos de equações, as *parcialmente* e as *totalmente diferenciáveis* [44]:

a) Funções de Ativação Parcialmente Diferenciáveis: Alguns pontos da função apresentam derivadas de 1ª ordem inexistentes, (Figs.2.4a até 2.4b), [26], [44] e [45]:

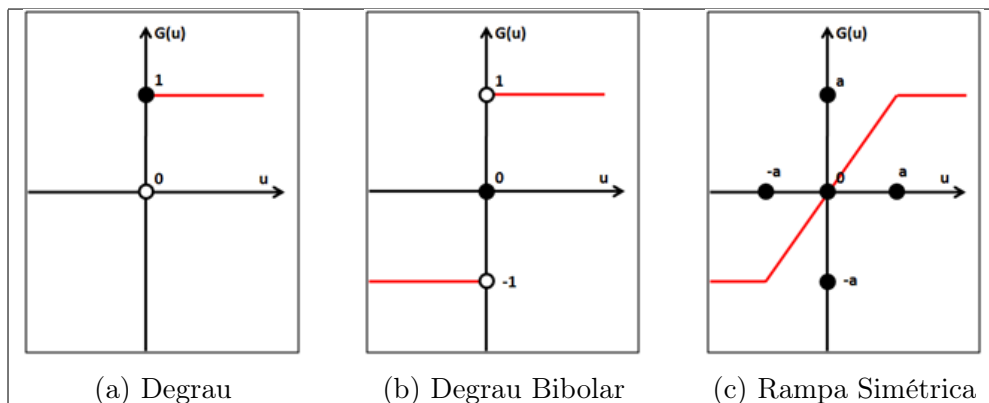


Figura 2.4: Funções de Ativação Degrau, Bipolar, Simétrica

Design: Autor - Fonte: Silva (2010) [44]

Onde os Domínios das funções Degrau (Fig.2.4a), Degrau Bipolar (Fig.2.4b) e Rampa Simétrica (Fig.2.4c) estão discriminados nas Equações 2.1 à 2.3, respectivamente:

$$\text{Degrau} : G(u) \begin{cases} 1, \forall u \geq 0 \\ 0, \forall u < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\text{Bipolar} : G(u) \begin{cases} 1, \forall u \geq 0 \\ 0, \forall u = 0 \\ -1, \forall u < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\text{Rampa Simétrica} : G(u) \begin{cases} a, \forall u = a \\ u, \forall -a \leq u \leq a \\ -a, \forall u = -a \end{cases} \quad (2.3)$$

b) Funções de Ativação Totalmente Diferenciáveis

Produzem pontos cujas derivadas de 1ª ordem existem e são conhecidas em todas os pontos do respectivo Domínio. A seguir, 2 gráficos (Figs. 2.5a e 2.5b) deste tipo de função, [17] e [44]:

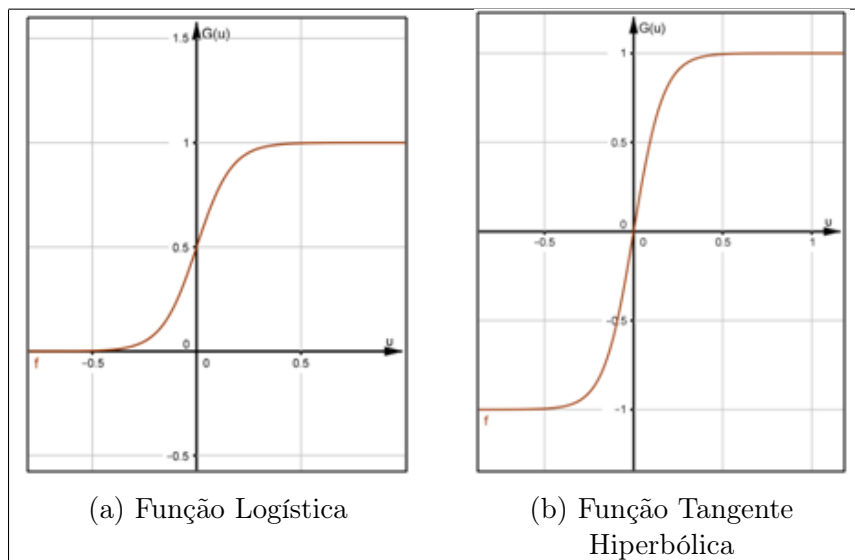


Figura 2.5: Funções Logística e Tangente Hiperbólica

Design: Autor - Fonte: Silva [44]

Onde os domínios das funções de ativação são regidos pelas Equações 2.4 e 2.5, [33]:

$$G(u) = \frac{1}{1 + e^{(-\beta u)}} \quad , \text{onde } 0 \leq G(u) \leq 1, \quad \beta = \text{Inclinacao} \quad (2.4)$$

$$G(u) = \frac{1 - e^{(-\beta u)}}{1 + e^{(-\beta u)}} \quad , \text{onde} \quad -1 \leq G(u) \leq 1, \quad \beta = \text{Inclinacao} \quad (2.5)$$

2.7.3 Arquiteturas de uma RNA

Segundo Haykin [26] e Ludwig [31], individualmente, os neurônios artificiais funcionar como uma RNA básica que trata problemas mais simples de classificação e aproximação, mas quando estes se tornam complexos é necessário ampliar sua Topologia com mais camadas e/ou neurônios. O *tipo de arranjo lógico da RNA* é chamado de *Arquitetura* e a quantidade de camadas e n^o de neurônios é chamada *Topologia*, Silva [44] e [20].

a) Camadas da Arquitetura

Segundo Silva [44], Haykin [26] e [16], geralmente na *Arquitetura* da RNA, os neurônios estão dispostos em alas chamadas de *Camadas*, sendo de até 3 tipos:

- **Camada de Entrada:** Inserem os dados de entrada normalizados (x_i), na RNA.
- **Camada(s) Intermediária(s):** São as alas intermediárias de neurônios interconectados, via vetores de pesos (w_{ji}), aos da camada de entrada e aos neurônios da próxima intermediária ou aos da camada de saída. São responsáveis por assimilar a sistemática do problema, e executam a maior parte do processamento da RNA.
- **Camada de Saída:** É a ala final de neurônio(s), com as saídas (y_j) da RNA, resultantes do processamento de todas as camadas precedentes.

b) Arquiteturas de RNA

- Mesmo havendo diversas estruturas lógicas de RNA (Arquiteturas), as literaturas destacam 5 delas com nomenclatura conforme o algoritmo desenvolvido e/ou o autor, como pode ser observado a seguir, [44], [17] e [26]:

1. Perceptron de Camada Simples (PCS ou SLP)
2. Perceptron Multicamadas (PMC ou MLP)
3. PMC Re-alimentada de Holpfield
4. RNA auto-organizável de Kohonen (Self Organized Maps)
5. RNAs de Base Radial (RBF)

2.7.4 Arquitetura Perceptron de Camada Simples (PCS):

É uma arquitetura de RNA onde há apenas 1 camada de atributos (x) de entrada e 1 de saída(s) (y). Esta, geralmente tem 1 neurônio (Fig.2.6). O Neurônio possui 2 processadores, a função combinadora linear $u = \sum(x.w)$ e a função de ativação y que filtra a u , gerando a saída final, Haykin [26], Silva [44], Diniz [17] e Félix [20].

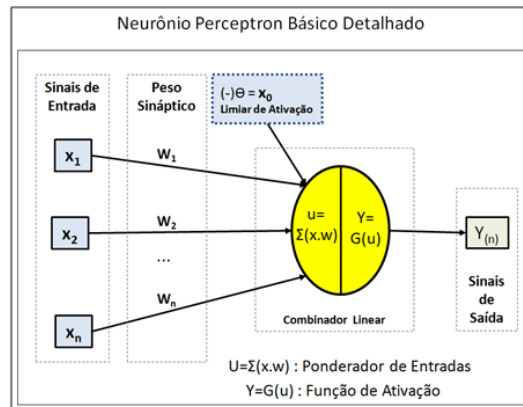


Figura 2.6: Arquitetura PCS Feedforward Simples

Design: Autor - Fonte: Silva [44]

a) Funcionamento Matemático da RNA PCS:

Seus elementos (Fig.2.6) operam como a seguir, Félix [20], Haykin [26] e Silva [44]:

- x_i = **Sinais de Entrada:** Grupo de atributos que regem o problema. A cada grupo injetado, mais a rede assimila nos pesos w_{ji} , a sistemática da *função-solução*.
- w_{ji} = **Pesos Sinápticos:** É o Vetor de pesos w que conecta as entradas x_i aos neurônios, ajustando o % de relevância dos x_i da camada de entrada.
- u = **Combinador Linear:** Função $u = \sum(x_i \cdot w_i)$, que faz o somatório dos produtos gerando um valor de *Potencial de Ativação*.
- Θ = **Limiar de Ativação:** também conhecido com "Bias", ajusta os limites adequados do resultado da função u para um valor de disparo em direção à saída.
- **Potencial de Ativação:** É a diferença $(\sum - \Theta)$. Se $u \geq 0$ ocorre a ativação da função $G(u)$, caso contrario não há ativação.
- y = **Função de Ativação:** Condiciona o valor de u para uma saída dentro do Domínio da função de ativação y . Os y_j são as saídas finais da PCS.

Silva [44] e Haykin [26] resumem a matemática do "neurônio simples" (Fig.2.6) à execução de 2 processadores. O 1º, o *Combinador* (Eq.2.6) a soma dos produtos de entradas e pesos ($u_j = \sum(x_i \cdot w_{ji})$). E o 2º, o *Limiar de Ativação* (Fig.2.7) que aplica uma função G de ativação $y_j = G(u)$ sobre a *função soma ponderada* u em cada neurônio das camadas. Este modelo foi proposto por McCulloch-Pitts em 1943, [19] e [33]:

$$u = \sum_{i=1}^n (w_i - x_i) - \Theta \quad , \text{onde } u \in \mathbb{R} \quad (2.6)$$

$$y = g(u) \quad , \text{onde } -1 \leq y \leq 1 \quad (2.7)$$

b) Características da RNA PCS:

- **Par Entradas (x_i) e Saída(s) Esperada(s) (y_j):** Conjunto de *características* (*propriedades*) e respostas prováveis, quantificadas e relevantes à sistemática da função, que se injetados repetidamente na RNA, estimulam os neurônios a ajustarem os pesos w_{ji} à sistemática de separação das entradas em classes.
- **Situação de Uso:** Quando os alvos de classificação construídos pelas Entradas x_i (características do alvo) estão justapostas em áreas cartesianas distintas e separáveis por um hiperplano contínuo de domínio ($-\infty < I < +\infty$) (Fig.2.7a).
- **Algoritmo de aprendizado:** Freeforward.
- **Aplicações:** Classificação de Padrão de Classes (até 2) separáveis.

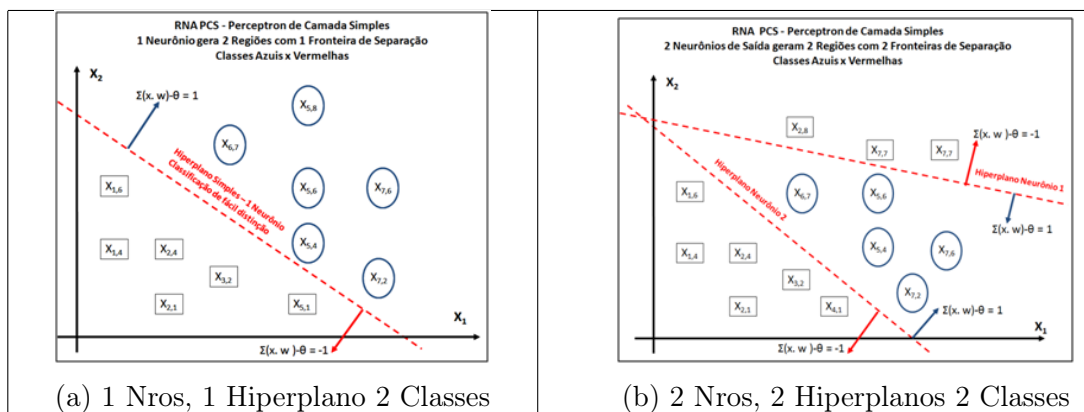


Figura 2.7: Exemplos de RNA PCS com 1 e 2 Neurônios

Design: Autor - Fonte: Silva [44]

A RNA PCS de 1 neurônio (Fig.2.6a) gera fronteira(s) classificadora(s) (*hiperplano(s)*) separando 2 classes de padrões, desde que estes grupos sejam *linearmente separáveis*

(Fig.2.7a), [30] e Silva [44]. A PCS ainda pode separar as 2 classes, mesmo 1 delas estando numa região inclusa, aberta contínua ou convexa à outra (Fig.2.7b), mas ainda separável por 2 hiperplanos contínuos, utilizando-se 2 neurônios na camada de saída, [33].

2.7.5 Arquitetura Perceptron Multicamadas (PMC):

Segundo Silva [44], Haykin [26] e [9], uma RNA com *Arquitetura Perceptron Multicamadas* possui uma *Topologia* com m camadas intermediárias e j neurônios por camada (Fig.2.8). É aplicada em problemas mais complexos onde é preciso separar 2 ou mais classes com ou sem fronteiras multiformes.

Nas RNAs PCS, 1 neurônio separa 2 classes de padrões, dispostos em regiões separáveis por 1 ou mais hiperplanos, desde que as fronteiras sejam contínuas ou convexas, [44] e [26], mas as PMCs geram n hiperplanos, que combinados, formam j fronteiras *poligonais convexas* com k hiperplanos (Figs.2.7a) e também fronteiras não convexas complexas (Figs.2.9b) acrescentando-se tantas camadas quantas regiões a distinguir.

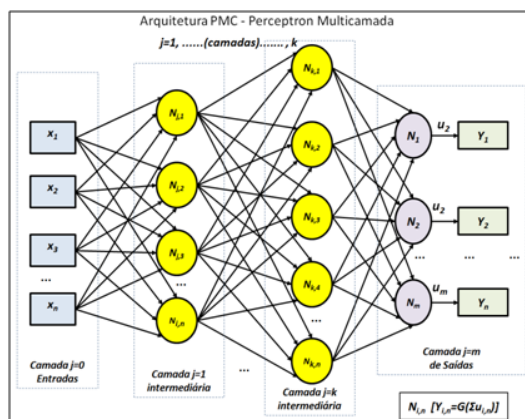


Figura 2.8: Arquitetura PMC Multicamada Feedforward

Design: Autor - Fonte: Silva [44]

Clareando mais, as PMCs (Fig.2.8) com topologia de 1 ou mais camadas intermediárias ampliam geometricamente sua capacidade de absorverem as sistemáticas de problemas mais complexos, formando mais regiões de classificação, com os neurônios gerando os hiperplanos, e suas camadas distinguindo as regiões. Através das k camadas de j neurônios, os hiperplanos (Fig. 2.9a) formam subdomínios, que combinados, separam os grupos de classes em regiões (Fig.2.9b) geometricamente complexas (convexas, não convexas e/ou disjuntas), Braga [12] e Silva [44].

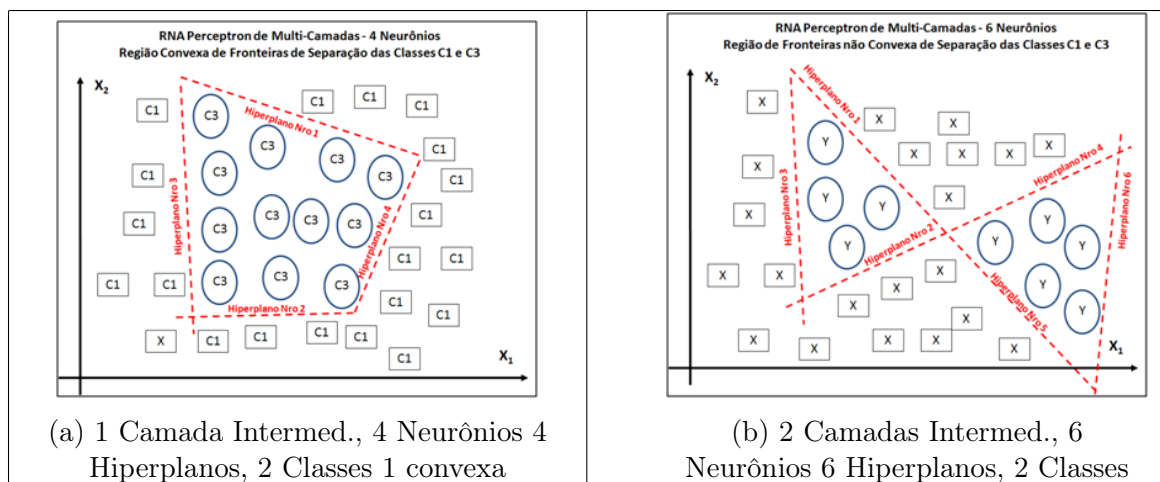


Figura 2.9: PMC's - Regiões Separação de Classes (Convexas, Não Convexas, Disjuntas)

Design: Autor - Fonte: Silva [44]

- **Situação de Uso, [31]:** Quando as classes são distinguíveis (separáveis) mas estão justapostas em áreas geométricas complexas.
- **Algoritmos de Aprendizado, [12]:** Adelaine com Gradiente Descendente, Quick Propagation, Resilient Propagation.
- **Aplicações, [44]:** Classificação de Padrões; Aproximação de Funções; Identificação de Sistemas; Otimização; Robótica; Controle de Processos.

2.7.6 Outras Arquiteturas muito usadas de RNA:

a) **RNA Auto-Organizável Kohonen:** Esta arquitetura de RNA leva o nome do autor (Fig.2.10a), e baseia-se num mapa de neurônios dispostos em forma de grade, onde competem entre si para determinar qual destes está na menor distância das entradas inseridas. Todos os neurônios estão conectados a todas as entradas, [31] e [19]. Essa RNA pode ter uma estrutura bi ou tridimensional (Fig.2.10a) com mapas geométricos circulares, retangulares ou esféricos, [44]. Seu treinamento é *não-supervisionado*, não havendo saídas *ye* esperadas pré-definidas. A RNA deve determinar quais neurônios estão mais próximos de qual entrada [31]. A reajuste da proximidade dos pesos w é baseada na equação de *distância Euclidiana*. **Resumindo o Treinamento:** Insere-se as entradas à certa posição da grade, aleatoriamente em relação à posição de cada neurônio. Numa 1^a iteração, o neurônio com a menor distância até às entradas vence e tem seus pesos w reajustados para uma distância mais próxima ainda. O mapa de neurônios é reajustado a cada iteração

até que o erro limite de classificar das entradas seja mínimo, formando sub-mapas de neurônios, os grupos de classes dessas entradas por proximidade, [31] e [26].

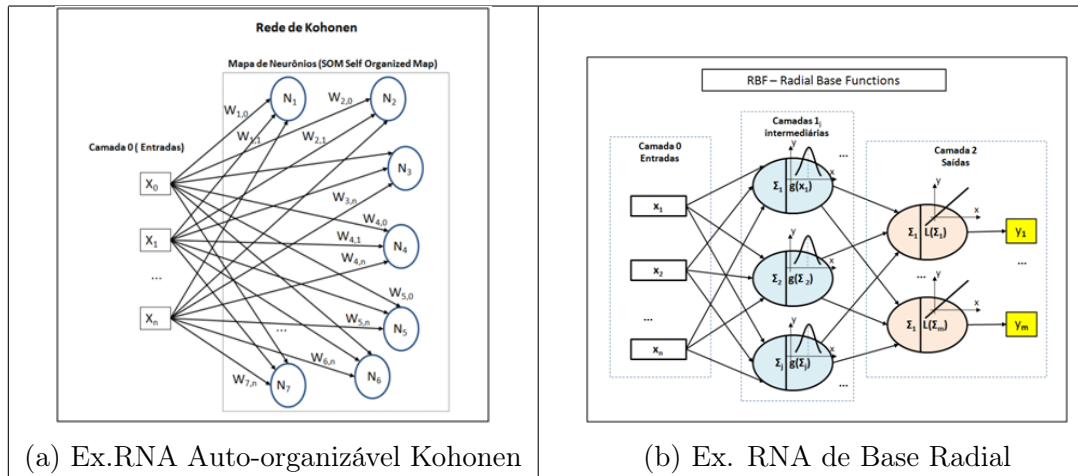


Figura 2.10: 2 dos Tipos Arquitetura de RNA

Design: Autor - Fonte: Silva [44]

b) Redes RBF - RNA de Base Radial:

A arquitetura **RBF** pertence à categoria de **redes Perceptron** (Fig.2.10b) e possuem topologia onde há 1 camada de entrada, 1 camada intermediária e 1 de saída, [44] e [26]. É apropriada para aplicações de *classificação de padrões* e *aproximação de função* e caracteriza-se por ter 1 camada intermediária com funções de ativação do tipo *Gaussiana* [8]. Seu treinamento pode ser supervisionado ou em 2 etapas, ou não supervisionado + supervisionado, conforme explicado em Abdalla [4].

2.7.7 Funcionamento Matemático - RNA PMC

A RNA PCS não resolve problemas mais complexos, [31], mas as PMCs, iniciando com 3 camadas (1 Entrada, $k=1$ Intermediária, 1 Saída), tem Arquitetura sofisticada, podendo escalar sua Topologia em k camadas intermediárias e j neurônios, conforme a complexidade do problema, [12] e [19]. A seguir, sua construção e processamento:

a) Etapa 0 do Treinamento - Carga e Pré-Processamento

1. **Atributos e Amostras:** Faz-se uma análise e localização prévias, por atributos com alta correlação com a(s) equação(ões) do problema, para que a RNA tenha a maior capacidade de generalizar a *função-objetivo* que resolve o problema. Define-se o nº de amostras a treinar. O padrão de 60% a 80% para os treinamentos e 40% a 20% para o teste operacional da RNA, [44].

2. **Pré-processamento das Amostras:** Levantam-se os grupos de atributos (i entradas $x_{\alpha,i}^{(k=0)}$) com sua(s) respectiva(s) saída(s) esperada(s) $ye_{\alpha,j}$, que formarão as amostras " α_p ", passando também por um *pré-processamento* que remove inconsistências, redundâncias e traduz as entradas x_i para dentro do domínio da função de ativação, [19], [26] e [44]. Ex.: $D_R = (5, \dots, 55, 55, \dots, 105) \rightarrow D_{R'} = (5, \dots, 55, \dots, 105) \rightarrow D_{TanH} = (-1, \dots, 0, \dots, 1)$, [12] e [44].
3. **Configuração dos Parâmetros de Execução:** O operador deve configurar os parâmetros de execução da RNA (N° iterações, Topologia, Aceleradores η e μ , EQM Admissível, n° Amostras, n° Entradas x_i p/ amostra), [12] e [44].
4. **Enfileiramento das Amostras:** As amostras $\alpha = x_{\alpha,i}^{(k=0)}$ de entradas i (onde $\{ i = (1, n | n \in \mathbb{R}) \}$), e suas respectivas saídas esperadas ye_j (onde $\{ j = (1, m | m \in \mathbb{R}) \}$) são embaralhadas e armazenadas como matrizes, [32] e [19]. **Obs.:** Por experiência, o método *sequencial de amostras* α faz a RNA ser tendenciosa e divergir da *função-objetivo*. Há vários métodos: (aleatório, particionado, k-means), sendo o aleatório o menos tendencioso, [32] e [44].
5. **Geração os Pesos w :** O Algoritmo gerar uma matriz de pesos $w_{l,c}^{(k)}$, onde $l = (1, j)$ são os j neurônios e $c = (1, i)$ são as $i = \epsilon$ entradas. Os vetores $w_{j,i}^{(k)}$ são gerados por camada e conectam todas as entradas $x_{\alpha,i}^{(k-1)}$ da 1ª camada a todos os j neurônios da 1ª intermediária $k = 1$, e estes aos das próximas camadas até à última. Os valores dos w são gerados aleatórios ($w < 0,5$) e apenas antes da 1ª iteração ($t = 0$), dentro do domínio da função de ativação da(s) intermediária(s), [19], [32] e [44].

Processamento em 2 Etapas:

Ambas as etapas, Freeforward (itens 6 a 8) e Back Propagation (itens 9 a 13) são encapsuladas, nessa ordem, dentro de um *Laço de Repetição* principal, que se repetirá até que um ou mais métodos de parada o interrompa.

b) **1ª Etapa de Treinamento - Freeforward (Fig.2.11)** Os itens de 6 e 7 explicam a 1ª etapa de *Freeforward*. Nesta, cada neurônio executa 2 processadores *Freeforward*, [44] e [16].

6. **O 1º - Combinador u** (Fig.2.11): Calcula a função $u = \sum_{i=1}^n (w_i - x_i) - \Theta$ dos produtos das entradas x_i com os pesos w_{ji} (Eq.2.8) em cada neurônio j , [44] e [26].

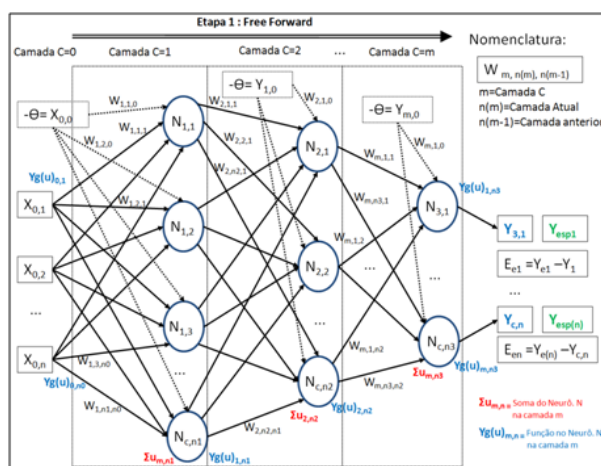


Figura 2.11: RNA PMC - Etapa Freeforward

Design: Autor - Fonte: Silva [44]

$$u_{\alpha,i}^{(k)} = \sum_{i=1}^n (w_{j,i}^{(k)} \cdot x_{\alpha,i}^{(k-1)} - \theta) \quad , \text{onde } u \in \mathbb{R} \quad (2.8)$$

$$y_{\alpha,j}^{(m)} = g(u_{\alpha,j}^{(k)}) \quad , \text{onde } y_{c,n} \in \mathbb{R} \quad (2.9)$$

Onde: $w_{j,i}^{(k)}$ = Peso do neurônio j da camada k conectado na entrada i da camada $k - 1$; $x_{\alpha,i}^{(k-1)}$ = Entrada i na camada $k - 1$ da amostra α ; $u_{\alpha,i}^{(k)}$ = Função Somador dos $x \cdot w$; $y_{\alpha,j}^{(m)}$ = Saída calculada do neurônio j na última camada $k = m$; $g(u_{\alpha,j}^{(k)})$ = função de ativação;

Obs.: θ (*Bias*) é o termo de translação da função objetivo, mas pode ser omitido se englobado dentro do vetor de entradas como $x_{\alpha,0}^{(k-1)}$, [44] e [19].

7. **O 2º Processador Limiar de Ativação y :** Logo em seguida, o 2º processador aplica a função de ativação sobre a função $u_{\alpha,j}^{(k)}$ gerando saídas $y_{\alpha,j}^{(k)}$ em cada neurônio da camada k (Eq.2.9) (Fig.2.11).

Importante: As $y_j^{(k)}$ se tornam as entradas ($x_{j^{(k)},j^{(k-1)}}$) para os neurônios j da camada $(k + 1)$, aos quais estão interconectados, até que na última camada de saída n , sejam geradas as saídas calculadas $y_{\alpha,j}^{(k=n)}$ finais, [44], [31] [26].

b) 2ª Etapa de Treinamento - Back Propagation (Fig.2.12): Após a etapa *Freeforward* é naturalmente lógico que as saídas calculadas $y_{\alpha,j}^{(k=n)}$ da camada $k = m$ não coincidam com as saídas esperadas $y_{\alpha,j}^{(k=n)}$, demandando-se aproximá-las. Logo, o algoritmo passa para a 2ª parte, *Back Propagation* (Fig.2.12) o *reverso da Freeforward*, [44], [26], [16], [4] e [19]. Os itens 8 a 11 tratam esta etapa.

8. O **3º Processador Avaliador de Erro**: Este 3º Processador do neurônio j , da última camada ($k = m$), calcula o *Gradiente de Erro* $\sigma_j^{(k)}$ (Eq.2.10) entre a(s) saída(s) esperada(s) $ye_{\alpha,j}$ e as calculada(s) $yc_{\alpha,j}^{(m)}$.

9. **4º Processador Difusor de Erros**:

O último processador reajusta os pesos $w_{j,i}^{(k)}$ (Eq.2.12) neurônio / neurônio j , de camada k em camada $(k - 1)$ (Eqs.2.10 à 2.12) somando aos $w_{j,i}^{(k)}$ as parcelas $(\mu \cdot \Delta w)$ e η do *gradiente* $(\sigma_{\alpha_j}^{(k)} \cdot yc_{\alpha,j}^{(k)})$. Os pesos $w_{j,i}^{(k)}$ são proporcionalmente reajustados de $(\Delta w = w_{j,i}^{(k)}(t + 1) - w_{j,i}^{(k)}(t))$ de 2 iterações sucessivas (Eq.2.12), [44]. Quando os reajustes forem nos $w_{j,i}^{(k)}$ da última camada ($k = m$), os gradientes serão calculados pela equação 2.10 e quando nas intermediárias, os reajustes serão pela 2.11.

$$\sigma_{\alpha,j}^{(m)} = (ye_{\alpha,j}^{(m)} - yc_{\alpha,j}^{(m)}) \cdot g'(l_{\alpha,j}^{(m)}) \quad (2.10)$$

$$\sigma_{\alpha,i}^{(k)} = \left[\sum_{k,i=1,1}^{m,n} \sigma_{\alpha,i}^{(k+1)} \cdot w_{j,i}^{(k+1)} \right] \cdot g'(l_{\alpha,j}^{(k)}) \quad , \text{onde } \sigma_{\alpha,i}^{(k)} \in \mathbb{R} \quad (2.11)$$

$$w_{j,i}^{(k)}(t + 1) = w_{j,i}^{(k)}(t) + \mu \cdot \Delta w + \eta \cdot \sigma_{\alpha,j}^{(k)} \cdot y_{\alpha,j}^{(k-1)} \quad (2.12)$$

Onde: $w_{j,i}^{(k)}(t + 1)$ = vetor de peso; t = iteração; $(t + 1)$ = próxima iteração; $\sigma_{\alpha,j}^{(k)}$ = gradiente do erro da camada k ; $g'(l_{\alpha,j}^{(k)})$ = Derivada parcial de $yc_{\alpha,j}^{(k)}$ em relação à $u_{\alpha,j}^{(k)}$; η = parâmetro de aprendizado; μ = parâmetro de avanço da convergência.

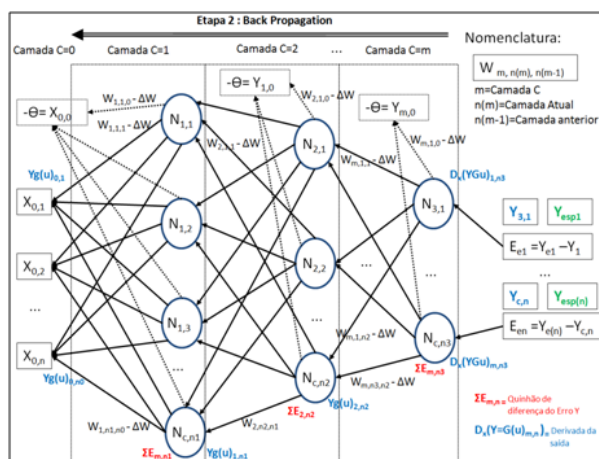


Figura 2.12: RNA PMC - Etapa Back Propagation

Design: Autor - Fonte: Silva [44]

Segundo Silva [44] e Haykin [26], a parcela % da diferença (gradiente) $\sigma_{\alpha,j}^{(k)}$ calculada na última camada (Eq.2.10) é repassada aos pesos w dos neurônios da última

camada $k = m$ (Eq.2.12), mas ainda resta um resíduo do erro, que é repassado para os pesos w das camadas anteriores $k(m - 1)$, sucessivamente até os neurônios da $k = 1$. Logo, é necessário recalculer o $\sigma_{\alpha,j}^{(k)}$ das camadas k anteriores, e considerando o que já foi descontado nas posteriores com recursividade (Eq.2.11). O Back Propagation é a etapa de maior complexidade e consumo do processamento, por isso, não adianta extrapolar o n^o de neurônios para ganhar convergência, pois além de mais tempo computacional, também pode gerar o problema da pulverização infinitesimal do gradiente, podendo levar a RNA a não convergir, [12].

c) 3^a Etapa Treinamento - Verificação de Parada

Há ainda uma 3^a rotina que ocorre a cada final de iteração t e que é o método de parada. Os itens de 10 a 13 explica o métodos mais comum nas PMCs.

10. **Gerando o Erro Médio EQM:** A cada iteração t , o *erro amostral* E_{α} é reduzido (Eqs.2.13) desde as saídas $yc_{\alpha,j}^{(k)}$ dos neurônios j da última camada $k = m$ para cada conjunto de amostra α , até à última amostra $\alpha = p$, [33], sendo acumulados no *erro quadrático médio* (EQM) do conjunto de amostras p , $E_{\alpha}^{(t)}$ (Eq.2.13), e posteriormente acumulado no *EQM Geral* de todas as iterações $\alpha = p$, em $E_{(M)}(t)$ (Eq.2.14), [19] e [44].
11. **Parada do Treinamento por EQM:** A cada final de iteração, o *EQM Geral*, $E_{(M)}(t)$ da iteração t , é reduzido do erro da iteração anterior $(t - 1)$, de um $\Delta E_M^{(k)}$ (Eq.2.15). O Treinamento para, quando o ΔE_M (Eq.2.15) entre 2 iterações sucessivas atinge o $\Delta E_{(adm)}$ admissível adotado na etapa 0, podendo significar que todas as saídas $yc_{\alpha,j}^{(k)}$ das amostras convergiram próximas dos valores de $ye_{\alpha,j}^{(k)}$.

$$E_{(\alpha)}(t) = \frac{1}{2} \sum_{\alpha,1}^{\alpha,k} [ye_{\alpha,j}^{(k)} - yc_{\alpha,j}^{(k)}]^2 \quad (2.13)$$

$$E_M(t) = \frac{1}{p} \sum_{\alpha=1}^p [E_{(\alpha)}(t)] \quad (2.14)$$

$$\Delta E_M(t) = E_M(t) - E_M(t - 1) \quad (2.15)$$

Sendo: $E_{(\alpha)}(t)$ = Erro de uma amostra α na iteração t ; $E_M^{(t)}$ = EQM_{medio} da soma das amostras $E_{(\alpha)}(t)$ numa iteração t ; $\Delta E_M(t)$ = Delta de Erro médio; $E_M^{(t)}$ *Geral* de todas iterações executadas; p = Total de amostras α da iteração t .

c) 4ª Etapa - Finalização do Treinamento

12. **Pós-Processamento das Saídas:** As saídas calculadas $yc_{\alpha,j}^{(m)}$, já foram convertidas de valores binários para reais.
13. **Armazenamento das Matrizes de Pesos e Parâmetros** A matriz de vetores com os valores dos pesos w_{ji} finais é armazenada. Os w e *parâmetros de execução* da RNA devem ser mantidos, pois após o Treinamento virá a fase de Teste Operacional, e a RNA será posta à prova [44], [19] e [4].

d) 5ª Etapa - Teste Operacional da RNA

Os itens de 14 a 15 colocam a RNA à Prova.

14. **A Sistemática Assimilada e Armazenada:** O algoritmo de Teste Operacional deve ser acionado logo após o de Treinamento e executará apenas o bloco de repetição com a fase Freeforward, para cada amostra de Teste. Espera-se que toda sistemática acumulada na matriz w_{ji} + *parâmetros de execução* façam as previsões de saídas $yc_{\alpha,j}^{(m)}$ corretamente, [44] e [31].
15. **Entendendo a Convergência Ótima do Teste:** Espera-se que a malha treinada da matriz w_{ji} , que formam os coeficientes da *função-solução*, consiga convergir corretamente as saídas $yc_{\alpha,j}^{(k)}$ dos conjuntos de amostras separadas para teste. A RNA deve aproximar as saídas $yc_{\alpha,j}^{(k)}$ o melhor possível das $ye_{\alpha,j}$ previstas, [4], [19], [45]. Se a função foi bem generalizada, as previsões serão bem sucedidas, [44] e [9].

Documentação da RNA: Toda a estatística dos Treinos e Testes deva ser armazenada para análise do desempenho. Sugere-se efetuar prospecções com muitos Treinos e Testes para encontrar as topologias e parâmetros ótimos, com o menor EQM possível, e só depois, rodar os Treinos e Testes com os melhores obtidos, [44], [12] e [23].

2.7.8 A Parametrização é Fundamental na Eficiência da RNA

Segundo pesquisadores, Silva [44], Ludwig [31], Braga [12], Manzan [32], e comprovado na prática, para se obter as melhores configurações de parâmetros, são necessários muitas prospecções de treino, pois os parâmetros afetam diretamente o % de convergência e a velocidade de execução da RNA. A seguir, os 5 parâmetros mais relevantes:

- 1º) **Nº Atributos (significativos) de Entrada:** RNAs exigem atributos do domínio em quantidade e com alto índice de correlação com o problema, [32].

- 2º) **Função de Ativação:** Funções adequadas geram melhor convergência, Haykin [26] e [32]. Testes no programa *OrangeDataMining*^(TM) comprovaram que a função de ativação *Tangente Hiperbólica* gera convergência mais alta que a Logística.
- 3º) **Nº de Neurônios na(s) Camada(s) Intermediária(s):** O nº de neurônios/camada é empírico e as respectivas quantidades vão da experiência do pesquisador e das prospecções,[32] e [31]. Em Silva [44] há 3 técnicas para estimá-los: Witten-Flank (Eq.2.16), Fletcher-Gloss (Eq.2.17) e Kolmogorov (Eq.2.18).

$$n_i = \frac{n_e + n_{Cl}}{2} \quad (2.16)$$

$$2 \cdot \sqrt{n_e} + n_s \leq n_i \leq 2 \cdot (n_e + 1) \quad (2.17)$$

$$n_i = 2 \cdot n_e \quad (2.18)$$

Onde: n_i = Nº de Neurônios na camada intermediária; n_e = Nº Neurônios da camada de entrada; n_{Cl} = Nº de classes; n_s = Nº Neurônios camada de saída;

- 4º) **Faixa dos Aceleradores:** Os aceleradores de aprendizado (η) e de avanço (*momentum* μ) são importantíssimos, [26], [32] e [16]. O acelerador η atua no gradiente ($\eta \cdot \sigma_j^{(k)} \cdot y c_j^{(k-1)}$) como bussola, levando a convergência na direção oposta ao sinal do gradiente, para atingir o erro mínimo, [44]. A 2ª parcela ($\mu \cdot \Delta w$) acelera o passo da convergência, [32] e [16]. Esta é proporcional ao $\Delta w_{ji}^{(k)}$ que também é proporcional aos $w_{ji}^{(k)}$ de épocas sucessivas. O $\Delta w_{ji}^{(k)}$ é repassado aos pesos $w_{ji}^{(k)}$ das camadas k , a cada *Back Propagation*, [31]. Essas parcelas levam o EQM ($E_{(m)}$) entre saídas (Eq.2.14) para o mínimo de sua variação $\Delta E_{(m)}$ (Eq.2.15) entre iterações, [44].
- 5º) **Convergência Mínima x Nº de Iterações:** Na prática há um mínimo de iterações para atingir altas convergências, evitando o **underfitting** (baixa convergência por parada antecipada), ou o **overfitting** (excesso de iterações degradam a convergência) causando o *esquecimento catastrófico*, segundo Braga [12] e Silva [44]. A convergência ótima estará num ponto entre esses dois momentos, [26].
- 6º) **Métodos de Parada e Descartes de LOSTS:** O EQM é apenas uma das técnicas de parada do treinamento, podendo ser encontrados outros nas literaturas de Haykin [26] e Braga [12]. Os muitos Treinos são necessários, pois que vários destes são descartados (LOSTS) quando divergem totalmente da solução, pois algoritmos híbridos não garantem atingir a solução, Manzan [32] e Haykin [26].

Concluindo: Um problema solucionável pode ter um domínio I com muitas combinações de *entradas* x *saídas*, e é certo que o pesquisador precisará rodar todo o algoritmo, testando combinações de parâmetros de estrutura e execução da RNA, até obter aquelas que melhor generalizam as *mini-funções* peso $w_{ji}^{(k)}$ e formar a *função-solução final* do problema, [17] e [44].

2.7.9 A Lógica Assimiladora e Complexa das RNAs:

Estudando as literaturas sobre RNA, como as de Haykin [26], Kovács [30] e Silva [44], entre outras, concluir-se que, uma RNA parece assimilar em sua malha (camadas e neurônios) de forma intrínseca e consequente, a sistemática das equações do sistema problema. Ludwig [31] cita que após o treinamento é complicadíssimo tentar discretizar a lógica e a resultância da RNA num ponto específico, quiçá em toda malha:

"Uma das desvantagens das redes neurais é o fato delas, normalmente, serem uma caixa-preta. É impossível saber por que uma rede chegou a um resultado ou no caso de uma PMC, saber qual a relevância de um peso sináptico para um determinado resultado ..., Ludwig [31], p.7.

A citação anterior de Ludwig [31] parece indicar que, nas RNAs PMC com muitas camadas e neurônios, é difícil, ou virtualmente impossível, mesmo com engenharia reversa, e a partir das saídas $yc_j^{(m)}$, pesos $w_{ji}^{(k)}$ e as entradas x_i , construir equações que explicitem a lógica do porquê a RNA obter aquelas pesagens e resultâncias.

Importância do Cálculo Numérico nas RNAs: A base matemática das RNAs não é nova, e graças aos grandes matemáticos da história, Euclides, Newton, Gauss, Raphson, Jacobi, Bernuoli, Lagrange, e tantos outros, pelo diversos métodos matemáticos produzidos, hoje consolidados na disciplina de *Cálculo Numérico*. Estes métodos vêm sendo usados na ML, inclusive em RNAs PMCs, cujas funções na fase *Back Propagation* executam a aproximação da convergência utilizando um algoritmo com o *Método do Gradiente Descendente* (MGD), o qual tem origem no *Métodos dos Gradientes Puros* (MGP), conforme estudos dos métodos iterativos em Sperandio [46] e Haykin [26].

2.7.10 Treinamento e Teste da RNA PMC

Objetivando fazer a RNA gerar a *função-solução*, vários tipos de algoritmos de *aprendizagem* foram produzidos por pesquisadores, conforme o tipo de problema a ser resolvido, [26] e [31]. A seguir alguns:

- PMC Perceptron Multicamadas: Correção de Erros Sinápticos, [44].
- SOM Mapas Auto-organizáveis: Aprendizagem Competitiva, [8].
- Modelo Não linear Willshaw: Memórias associativas óticas de Gabor, [12].
- Aprendizagem Regra de Boltzmann, [26].

No caso da PMC, segundo Ludwig [31] e Silva [44], "treinar uma RNA" na verdade são 2 etapas, *Treinamento* e *Teste Operacional*. Em cada etapa serão executados 2 algoritmos. O Treinamento utiliza o algoritmo completo (Pré-processamento + Freeforward \leftrightarrow Back Propagation + Verifica Parada + Pós-processamento). Mas o *Teste Operacional* tem rotina menor (Pré-processamento + Freeforward + Pós-processamento) apresentando-se cada amostra de teste 1 única vez e predizendo os resultados esperados.

2.7.10.1 Fase 1 - Treinamentos e Testes em Prospecção:

É uma etapa preliminar e empírica para chegar às arquiteturas e topologias para encontrar a *função-solução*. Silva [44] e Ludwig [31] sugerem a sistemática a seguir:

1. Estudar o *problema* equacionamento matematicamente, e criar a estratégia adequada para solução do problema;
3. Escolher da *Arquitetura* e *Topologia* que melhor se adéqua à estratégia adotada;
4. Pesquisar grupos de atributos correlatos à sistemática do problema, formando **datasets** de entradas e respectivas saídas esperadas das amostras, em quantidade suficiente, separando de 60% ou 80% para os Treinos e a restante para os Testes;
5. Pesquisar valores práticos iniciais para configurar os parâmetros de execução do programa de RNA: n^o de iterações, n^o de camadas, n^o de neurônios por camada, erro quadrático médio (EQM) admissível de parada, n^o de execuções por treino;
6. Testar *variações* de *Topologias candidatas* com apoio de métodos como os de Witten-Flank, Flecher-Gloss ou Kolmogorov;
7. Efetuar muitos Treinamentos (Prospecções) até atingir médias altas de convergência estabelecidas como aceitáveis para geram a *função-solução* desejada e guardando suas estatísticas.
8. A cada término de Treino, executar o programa de Teste Operacional (Fig.2.14) com 40% a 20% das amostras de teste, guardando também as estatísticas.

Pseudo-Código Básico inicial de Treinamento:

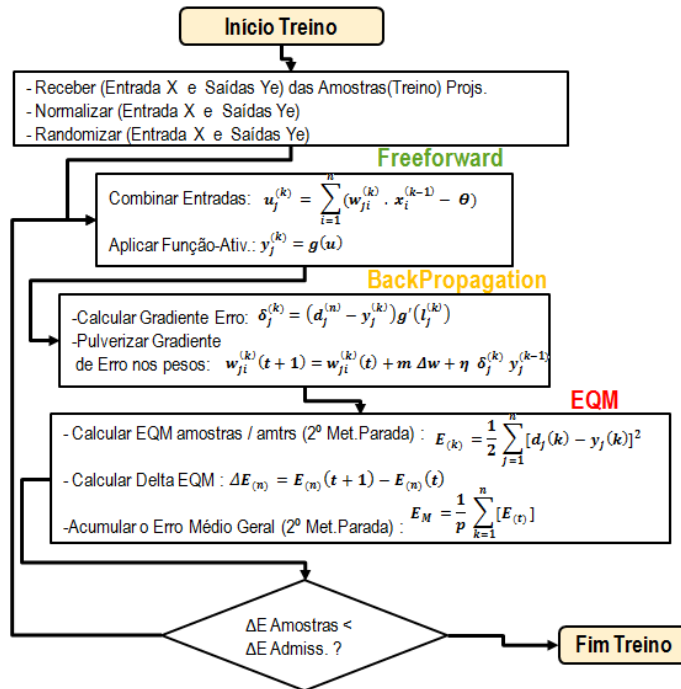


Figura 2.13: Fluxograma Pseudo-Código de Treinamento RNA

Design: Autor - Fonte: Silva [44]

Pseudo-Código Básico Inicial de Testes Operacional:

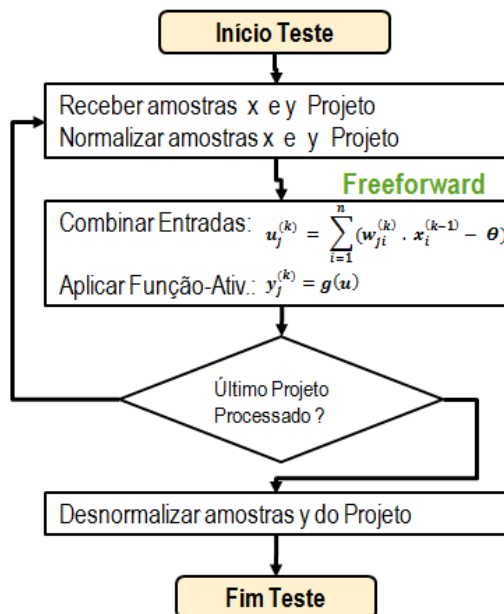


Figura 2.14: Fluxograma Pseudo-Código de Teste RNA

Design: Autor - Fonte: Silva [44]

Na etapa de *Teste Operacional*, espera-se que durante o *Treinamento*, a matriz de pesos tenha assimilado (aprendido) o suficiente sobre a sistemática do problema, e a RNA possa prever corretamente as saídas y_c dos **datasets** não treinados.

Recomendações Prospectivas - Topologia e Parametrizações:

Silva [44], Braga [12] e Souza [45] sugerem as ações a seguir, para obter às melhores Topologias e Parametrizações:

- Nos Treinos, usar os métodos do item 6 anterior mas variando para menos e para mais o n^o de Neurônios.
- Aumentar o % de amostras de Treinamento, limitando-o até o máximo de 80% do total de amostras do dataset completo;
- Verificar se existe mais algum Atributo com alta correlação com o sistema problema e inclui-lo nos datasets. Cuidado: Atributos com baixa correlação com o problema podem reduzir a convergência ou até impedi-la, e devem ser excluídos dos datasets.
- Atributos com valores *Constantes* devem ser zerados ou excluídos dos datasets.
- A cada Treino, variar os aceleradores de aprendizado (η) e de avanço (*momento* μ), diminuindo o η ou o μ ou ambos.
- Treinar números de iterações variando o EQM Admissível (0.01, 0.001, ...).

2.7.10.2 Fase 2 - Treinamento e Teste Finais da RNA:

Uma vez que, na fase 1 de prospecção foram encontradas as melhores topologias, parâmetros e pesos w (*função-objetivo*) com as maiores convergências, pode-se fazer Treinos e Testes finais definitivos da RNA, [44] e [31]:

- Com as topologias e parâmetros de melhores convergências, executa-se o *Treinamento* com os mesmos datasets e pesos w da melhor prospecção obtida.
- Concluído o *Treino*, executa-se o *Teste Operacional* com os datasets, para cada conjunto de amostras de Teste, e espera-se que sejam as melhores previsões possíveis.

2.7.11 Armadilhas Lógicas e Solução de Problemas com RNA

Trabalhar com RNAs não é tarefa tranquila e pode ser um **tour** num labirinto de dificuldades. O principal no Treino é: Qual o melhor ponto de parada com a convergência

Ótima? As literaturas estudadas não cravam uma resposta final por esta não existir, mas indicam as melhores práticas que levam à altas convergências, além de apontarem os principais problemas da baixa convergência e contorná-los, [44], [12], [30] e [26].

1. **Underfitting:** É a parada muito cedo, num n^o de iterações insuficiente. E quando o operador força a parada manual antes do ponto ótimo, antes que as convergências despenquem (pode ocorrer na prática). **Remediação:** Estabelecer um n^o de iterações ou convergência mínima no algoritmo, via testes preliminares; Evitar atributos com baixa correlação com o sistema problema.
2. **Overfitting** Parada tardia, passando do n^o de iterações da convergência considera ótima, o operador estende o processo imaginando existir outra maior, mais adiante. A consequência disso pode ser a divergência ou pior, a RNA decorar os resultados e não generalizar. **Remediação:** Evitar n^o excessivo de iterações estabelecendo um limite máximo; Usar a poda de neurônios com pesos estagnados durante o treino.
Sugestão Geral nos problemas 1 e 2: Criar uma fase de prospecção, anotando as estatísticas e descobrir o n^o de iterações de maior convergência, [12], [31] e [44].
3. **Estagnação da Convergência** A *Estagnação* é um problema sério e ocorre quando a convergência se torna uma *função monótona* e as iterações seguem indefinidamente. Alguns dos motivos que levam à este efeito são:

a. **Calha Infinita - Matriz Singular e Não Singular:**

Kovács [30] mostra em sua literatura que, a aproximação linear é clássica da função EQM em relação aos pesos w e é dada por $\nabla E_{(w)} = \frac{\partial E}{\partial w}$ se for convexa, e espera-se que esta contenha um mínimo absoluto em seu domínio, caso o gradiente de $\nabla E_{(w)}$ e a matriz $M[x_i]$ de entrada admitam inversa (Singular). Mas a inversibilidade só acontece se um dos vetores da matriz M for linearmente independente ($\alpha \in \mathbb{R}$ e $\alpha \neq 0 \mid M\alpha = 0$). Caso a matriz M não seja singular (não admite inversa) pode-se cair no caso da *Calha Infinita* no panorama da função $\nabla E_{(w)}$ e num caso extremo, a cilíndrica, onde há infinitos pontos de mínimo desta função. **Remediação:** Analisar a matriz $M[x_i]$ de amostras e aplicar as recomendações do item 2.7.10.1.

b. **Aceleradores - Pequenos, Elevados ou Incompatíveis:**

Segundo Silva [44] e Kovács [30], com valores inadequados dos aceleradores de aprendizado (η) e de avanço (μ), a RNA pode não convergir. Na prática o

η ($0.8 \leq \eta \leq 0.9$) pode gerar instabilidade na convergência (efeito montanha russa) elevando muito as iterações. Um alto μ ($0.6 \leq \eta \leq 0.9$) gera quiques de convergência e com η e μ mais infinitesimais (≤ 0.02 ou ≤ 0.005) o avanço exigirá esforço computacional enorme, até o mínimo da função $\nabla E(w)$, se conseguir. E Kovács [30] lembra que, caso ($\eta \geq 1.0$), a função irá divergir.
Remediação: Treinos preliminares p/ obter valores adequados.

c. Baixa Correlação Atributos x Sistema Problema

A escolha correta de atributos da matriz de vetores de entrada $M(x_{\alpha i})$ deve conter somente os de alta correlação com a sistemática do problema, [12].

Remediação: Analisar o sistema de equações e seu domínio; Fazer testes empíricos com grupos de atributos ou todos estes, e/ou utilizar técnicas estatísticas de análise algébrica para encontrar aqueles com alto CR . Atributos com $CR \leq 20\%$, ou nem afetam a convergência ou a impedem.

d. Nº Alto (ou Baixo demais) de Neurônios

Segundo Braga ([12] e Silva [44], uma PMC precisa ter uma quantidade adequada de neurônios nas camadas intermediárias, suficientes para que a *função-objetivo* consiga a melhor generalização e predição de resultados precisos nos testes. Um nº muito alto pulveriza demais o EQM, exigindo esforço inviável da RNA para atingir a convergência. Baixo demais, a RNA não consegue assimilar a sistemática do problema e não convergirá.

Obs.: Existem vários outros problemas e soluções inerentes às RNAs, mas devido à sua extensão, não serão abordados aqui, [44].

Nota: Vários dos problemas relatados acima ocorreram durante o desenvolvimento do módulo 3.2 e várias das remediações realmente funcionaram na prática.

2.7.12 Métodos de Injeção e Amostragem no Treinamento:

Mesmo este trabalho utilizando o mais popular dos 3 (RSC), são 3 os métodos de injeção de amostras dos Datasets no treinamento, [4], Haykin [26] e [44], [19]:

- **Random Subsampling Cross-Validation (RSC):** Separa-se 60% a 80% das amostras randomicamente para Treino e o de 40% a 20% para Testes.
- **k-Partitions Cross-Validation (KPC):** O total α de amostras, $\alpha = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)$, é dividido em $k = \alpha/5$ partições iguais, $k1 = (1, 2) \dots k5 =$

(9, 10). Treina-se as k partições excluindo-se 1 por vez e sequencialmente, por exemplo, Treinar $\alpha = (k_3, \dots, k_{10})$ e Testar k_1, k_2 , depois Treinar $\alpha = (k_1, k_2, k_5, \dots, k_{10})$ e Teste k_3, k_4 , e assim por diante, para todas partições, a cada iteração t .

- **Leave-One-Out Cross-Validation (LOC):** Sendo apenas um caso particular do método *KPC*, não há mais partições de amostras, mas apenas cada amostra α sendo testada a cada treino. Logo, num conjunto de $\alpha = 50$ amostras, haverá 50 Treinos com 49 amostras a cada vez, evitando uma do conjunto $\alpha = (1, \dots, n)$, sequencialmente a cada iteração t .

Recomendações sobre Amostragens na Prospecção:

- Adotar um dos tipos de amostragem de treinamento.
- O % ideal só será conhecido após várias rodadas de treinamento. Pode-se treinar com 60% a 80% do total de amostras (60% para treinos iniciais), [44] e [19].
- Conferir se todas as amostras estão dentro do domínio da *função-solução*, para que não ocorram amostras "outsiders" (distante do domínio), pois podem gerar distorções e muito tempo para a convergência ou até impedi-la, [44].
- É necessário ter o *Conjunto Classificação Esperada* para comparação a cada rodada de Treino, verificando se os dados de saída convergiram corretamente, [19] e [17].
- Após os Treinos com cada tipo de amostragem, aferir se as saídas convergiram para a classificação esperada, armazenando os resultados, [17] e [49].

2.7.13 Definição da Abordagem Estratégica da RNA no Protótipo

O objetivo geral mencionado do projeto é dimensionar as lajes dos pavimentos via RNA, sendo os alvos possíveis da RNA: Diâmetros e Espaçamento das barras de aço das armaduras positivas e negativas; Volume de concreto das lajes; Metragem quadrada das formas das lajes. Restringindo-se as armaduras, das arquiteturas de RNA PMC na literatura e trabalhos, e sabendo-se que será necessário encontrar como saída, os diâmetros e espaçamentos das barras das armaduras principais, simulando o dimensionamento das Lajes, a estratégia será a *classificação dos diâmetros e espaçamentos* ou a *aproximação da função destes*. Uma das abordagens, utilizando 1 ou mais funções, revelará a melhor combinação "resistência x suficiência de material", optando-se pela mais adequada, *Classificação de Padrões* ou *Aproximação de Função*.

2.7.13.1 Abordagem Classificação de Padrões

A Abordagem *Classificação de Padrões* numa RNA visa distinguir categorias (grupos) de padrões, que no caso seriam os *diâmetros x espaçamentos* das armaduras das lajes. Estudando as orientações nas literaturas de Silva [44], Ludwig [31], Braga [12] e optando-se pela abordagem da *Classificação de Padrões*, as arquiteturas de RNAs mais apropriadas para esta abordagem seriam os tipos: *PMC padrão*, *RBF* e *Kohonen*

Estratégia Possível: Dentro da *Classificação de Padrões*, como o treinamento tem por objetivo ajustar os coeficientes (w) da *função-objetivo* até que sejam geradas saídas y_c , estas podem estar em notação *real* ou *binária*, sendo esta última mais fácil de trabalhar, requerendo apenas construir um conjunto de bits para converter o valor real em binário, com tantos bits quanto o n^o de neurônios da camada de saída, [44] e [12].

2.7.13.2 Abordagem Aproximação de Função

Caso se opte por um algoritmo com abordagem de *aproximação de função*, a ideia é simular a curva da função que rege o problema objetivo. No caso de lajes seria produzir uma simulação do comportamento da função de dimensionamento destas (contínua ou não) durante o treinamento. Os tipos de RNAs nessa abordagem são, [44]: *PMC* e *RBF*

Estratégia Possível: Dentro da *Aproximação de Função*, como o treinamento requer aproximar os coeficientes (w) da *função-objetivo* até que se obtenham as saídas y_c que formando corretamente a curva de simulação que rege o problema, podendo as entradas x e a saída y_c serem reais ou binárias.

2.7.13.3 Estratégia RNA PMC Adotada no Protótipo

Estudando as informações sobre as duas abordagens, testadas em prospecções preliminares, a *Classificação de Padrões* foi a mais indicada e adotada neste projeto, pois com a estratégia binária encontrou os diâmetros com resultados promissores. Mas outros testes preliminares com as rotinas configuradas para a *Aproximação de Função* não obtiveram sucesso, pois geraram o problema "*esquecimento catastrófico*" citado em Braga [12] e [26], onde a maior parte do treinamento se perdeu, permanecendo nos pesos w finais, apenas a memória da última amostra.

2.8 Análise Multicritério e a Técnica AHP

Tomadas de decisão ocorrem desde os primórdios da humanidade. Avaliar uma área de extração de alimentos, as chances de obtê-los, os perigos, a melhor época, todas influenciavam as decisões na pré-história. Com o passar dos séculos a necessidade de decidir não mudou, mas foi sendo aprimorada. Segundo os estudos de Gomes [25], o processo de decisão está na fronteira entre, se decidir pela melhor solução, ou o que normalmente ocorre, a melhor decisão que for possível.

As decisões podem ser *simples* ou *complexas*, *específicas* ou *estratégicas* e suas consequências podem ser *imediatas*, *de curto e longo prazo*, ou uma combinação destas, [25]. Para decidir racional e equilibradamente é comum levantar os seguintes informações:

1. Entender o *cenário do problema* a ser resolvido;
2. Levantar as *Alternativas de Solução disponíveis*;
3. Levantar as informações sobre o *Cenário de Alternativas* baseadas em fatos confirmados e especialistas, evitando-se opiniões pessoais ou populares.
4. Analisar as informações e *listar os prós e contras e necessidades*, formando *critérios* e quantificando-os quanto à importância sobre às alternativas;
5. Levantar os *riscos possíveis* inerentes à escolha de cada alternativa e quantificá-los;
6. Listar as *oportunidades de ganho* ou vantagem na escolha de cada alternativa.

Com o aperfeiçoamento da civilização, novas técnicas decisórias foram surgindo e sendo aperfeiçoadas, até que século XX, surgiram várias metodologias como a *Apoio à Decisão por Multicritério* (ADMC). Aperfeiçoamentos dentro desta também foram aparecendo, como a popular *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

2.8.1 AHP - Analytic Hierarchy Process

Sendo uma das técnicas de apoio a decisão, acrescentou interessantes recursos à ADMC, ajudando os administradores e economistas na previsibilidade dos negócios. Criada por Saaty nos anos 90, popularizou-se como técnica profissional de gestão, muito utilizada nas empresas[39]. A Sistemática de uso da técnica AHP é descrita nos itens a seguir, [43].

2.8.1.1 Etapa 1 - Formulação do Cenário e Estruturação do Problema

Esta etapa é subdividida nas seguintes tarefas, [43], [25] e [39]:

1. **Levantar o Cenário do problema e o Objetivo:** Nesta etapa há um problema decisório e é preciso definir, de forma clara, qual o objetivo principal a ser resolvido.
2. **Estudo e Coleta de Dados do Problema:** Levantar as informações sobre o objetivo, estruturando-as como alternativas filtradas por critérios, das quais se poderão fazer classificações e julgamentos.

2.8.1.2 Etapa 2 - Modelagem do Método de Tomada de Decisão

Nesta etapa, deve-se definir o tipo de técnica decisória que pode ser aplicada às *Alternativas* e *Critérios* obtidos na etapa 1. A ideia é utilizar a técnica AHP, que orienta as seguintes ações, [25], [43] e [39]:

3. Levantar as Alternativas que concorrem para o objetivo de solução do problema.
4. **Estudar os Critérios aplicáveis às Alternativas:** Encontrar *Critérios Isonômicos* (comuns a todas *Alternativas*) e montar uma árvore de *Critérios x Alternativas* (Fig.2.15), conforme o problema e avaliação dos experts.
5. **Construção da Tabela Matriz Principal Hierarquizada:**
Da árvore, cria-se uma Tabela Hierárquica (Tabela 2.1) com as *Alternativas* (linhas) vs seus *Critérios* (colunas). Permite simplificar a visão do cenário, [25] e [43].

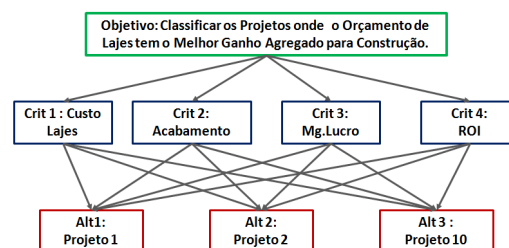


Figura 2.15: Árvore Principal (Alternativas x Critérios)

Design: Autor - Fonte: Pamplona [39]

6. **Calcular os Pesos Relativos dos Critérios:** Uma *Tabela Cruzada de Pesos x Pesos* também é construída (Tabela 2.2) para se fazer o julgamento (verbalmente

por especialistas) quanto à importância relativa dos critérios. Estes valores são racionalizados, $vCr = \text{Critério} / \text{Critério}$ nas colunas das tabelas para cada critério, arbitrando valores no domínio de 0 a 1 (ou 0% a 100%).

Matriz Alternativas x Critérios				
Alternativa	Critério1	Critério2	...	Critério n
1	$vA1C1$	$vA1C2$...	$vA1Cn$
2	$vA2C1$	$vA2C2$...	$vA2Cn$
...
m	$vAmC1$	$vAmC2$...	$vAmCn$

Tabela 2.1: Matriz Principal Alternativas x Critérios
Fonte: Autor

Tabela Cruzada de Julgamentos (Peso x Peso)						
	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Méd.Geom.	$P_{Cr} (Nrm)$
Critério 1	1	0,5	2	3	1,32	0,18
Critério 2	2	1	4	5	2,51	0,35
Critério 3	1/2	1/4	1	6	2,45	0,34
Critério 4	1/3	1/5	1/6	1	1,00	0,14
$\Sigma \rightarrow$					7,28	

Tabela 2.2: Apoio Cálculo Pesos x Pesos individualizados
Design: Autor - Fonte: Santos [43]

Após gerar os valores paritários dos pesos, calcula-se por média geométrica, os *valores finais* dos pesos e a coluna final de pesos normalizados ($P_{cr}Nrm$) (Tabela 2.2).

Os *Pesos* podem ser gerados via 2 técnicas descritas a seguir, [37], [43], [25]:

1ª Escala da Razão de Saaty:

Utilizando uma escala com valores inteiros de 1 a 9 (Tabela 2.3) o peso é calculado pela equação 2.19

Valor	Definição	Explicação
1	Igual importância	Contribuição idêntica
3	Fraca importância	Julgamento levemente superior
5	Forte importância	Julgamento fortemente a favor
7	Muito forte importância	Dominância reconhecida
9	Importância absoluta	Dominância comprovada
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Dúvida

Tabela 2.3: Escala Razão de Saaty
Fonte: Santos [42]

$$P_{ac \rightarrow U_{a,c}} = \frac{Cr_{a,c}}{\sum_{a,c}^{m,n} (Cr_{a,c})} \quad (2.19)$$

Onde: P = Peso do Critério c de dada alternativa a ; U = Peso mensurado como Utilidade; Cr_{ac} = Critério c da alternativa a .

2ª Escala Verbal/Cardinal:

Os Critérios que já possuem um valor quantitativo próprio (ex. Custo, Lucro, ...) geram pesos reais diretos (*direct rating*) e podem ser normalizados para o domínio (0,1) de 2 formas proporcionais possíveis, quanto ao sinal da derivada da *função de ganho*, baseadas na *Regra de Tales* (Figs.2.16a e b):

a) **Se (+), Quanto Maior o valor \rightarrow Melhor o Ganho/Vantagem:** O valor % do Peso dentro do somatório dos valores (Eq.2.20). Ex.: Se o critério for autonomia de um veículo, quanto maior a km/litro, maior o ganho.

$$PCr_{Ai} = \frac{VCr_{Ai}}{\sum_{i=1}^n (VCr_{Ai})} \quad (2.20)$$

Onde: PCr_{Ai} = Peso do Critério da Alternativa da linha i ; VCr_{Ai} = Valor quantitativo do Critério da Alternativa linha i ; n = Quantidade de Critérios.

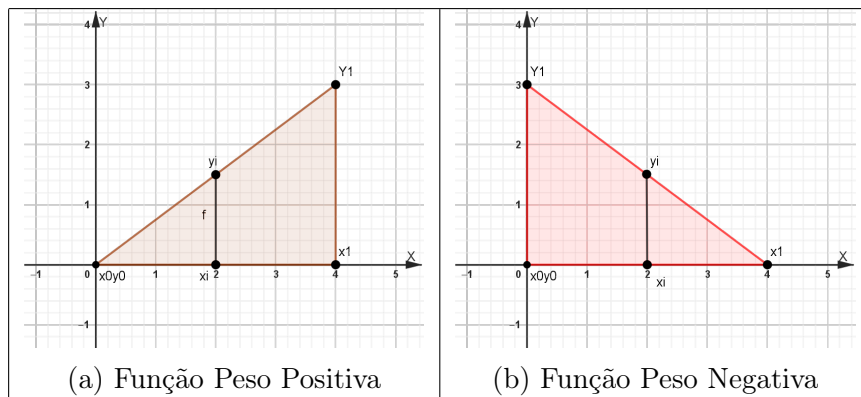


Figura 2.16: Funções (+/-) Normalização do Peso dos Critérios (Valores Reais)

Fonte: Autor

b) **Se (-): Quanto Menor o valor \rightarrow Melhor o Ganho/Vantagem:**

Ex.: O preço de compra uma casa, quanto menor o preço, melhor (Eq.2.21).

$$PCr_{Ai} = \frac{\sum_{i=1}^n (VCr_{Ai})}{VCr_{Ai}} \quad (2.21)$$

Onde: PCr_{Ai} = Peso do Critério da Alternativa da linha i ; VCr_{Ai} = Peso

do Critério Alternativa linha i ; $n =$ Quantidade de Critérios.

Nessa 2ª forma é necessário aplicar a 1ª forma de cálculo, mas sobre os pesos normalizados ($PCrNm_{Ai}$) após os cálculos dos pesos por alternativa (PCr_{Ai}), para que possam ser normalizados, (Eq.2.22)

$$PCrNm_{Ai} = \frac{PCr_{Ai}}{\sum_{i=1}^n(PCr_{Ai})} \tag{2.22}$$

Onde: $PCrNm =$ Peso do Critério Normalizado da Alternativa i ; $PCr_{Ai} =$ Peso do Critério da Alternativa i ; $n =$ Quantidade de Critérios.

7. **Transportar os Pesos da Tabela Cruzada p/ a Matriz Principal:** Calculados os *Pesos Normalizados dos Critérios*, de relevância ou prioridade, transportam-se estes para as linhas de critérios de cada *Alternativa* na *Matriz Principal*, [43] e [25].
8. **Calcular a Classificação Final das Alternativa na Matriz Principal:** Após o transporte dos pesos normalizados por *Alternativa*, é feito o somatório final dos produtos entre os *Pesos Relativos* (Utilidades, UCr_{ji}) e os *Pesos por Alternativa* ($PCrNm_{ji}$), (Eq.2.23), onde o total é o *Ganho Agregado* de cada *Alternativa*, na última coluna à direita da Tabela 2.4, [13], [25] e [43]:

$$G_{Aj} = \sum_{i=1}^n(UCr_{Aji} \cdot PCrNm_{Aji}) \tag{2.23}$$

Onde: $G_{Aj} =$ Ganho da Alternativa i ; $UCr_{Aji} =$ Utilidade (Peso Relativo) do Critério i de cada *Alternativa* j ; $PCrNm_{Aji} =$ (Peso Normalizado) do *Critério* i por *Alternativa* j ; $n =$ Quant. de *Critério*; $m =$ Quant. de *Alternativa*.

Matriz Principal de Alternativas x Critérios (com Valores Quantitativos)											
Alternativa	VCrit.1	UCrit.1	PCrit.1	VCrit.2	UCrit.2	PCrit.2	...	VCrit.1	UCrit.n	PCrit.n	Ganho
1	vA1Cr1	uA1Cr1	pA1Cr1	vA1Cr2	uA1Cr2	pA1Cr2	...	vA1Cr1	uA1Cr n	pA1Cr n	gA1
2	vA2Cr1	uA2Cr1	pA2Cr1	vA2Cr2	uA2Cr2	pA2Cr2	...	vA2Cr1	uA2Cr n	pA2Cr n	gA2
...
m	vAmCr1	uAmCr1	pAmCr1	vAmCr2	uAmCr2	pAmCr2	...	vAmCrn	uAmCr n	pAmCr n	gA m
	$\Sigma(vCr1)$		pCr1	$\Sigma(vCr2)$		pCr2		$\Sigma(vCr n)$		pCr n	

Tabela 2.4: Matriz Alternativas x Critérios - Ganho Agregado Final
Fonte: Autor

Importante: Com os cálculos dos *Ganhos Finais* é possível observar a classificação das alternativas por ganho agregado, onde o gestor terá as opções para a tomada de decisão sobre o problema objetivo em questão, [25], [13], [43] e [38].

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Este capítulo lista as pesquisas sobre o tema desenvolvido nesta dissertação, com as referências bibliográficas correlatas selecionadas no *GoogleTM* e *Google AcadêmicoTM*. As literaturas fundamentam o conteúdo técnico e os procedimentos além dos trabalhos acadêmicos convalidarem os experimentos e resultados semelhantes. No total, 11 literaturas e 23 trabalhos acadêmicos. Destes, 14 correlatos à Engenharia de Estruturas, 16 correlatos à Redes Neurais Artificiais, além de 7 trabalhos acadêmicos sobre Analytic Hierarchy Process. Essas literaturas e trabalhos são listados e analisados nas seções a seguir.

3.1 Cálculo de Estruturas de Concreto Armado

3.1.1 Estruturas de Concreto Armado - Literaturas

Sendo a Engenharia de Estruturas um tema há muito consagrado, com vasta literatura nacional e internacional sobre o assunto, foram escolhidas 4 delas (Tabela 3.1) com conteúdo suficiente sobre estruturais de edifícios, a seguir:

A literatura *Curso de Concreto I* de Sussekind [47] é uma das clássicas para o estudo dos cálculos dos elementos estruturais de edifícios, sendo de uma época ainda antes do uso maciço de computação no cálculo de estruturas, os assuntos são mais densos, focado mais no cálculo geral de lajes, vigas e pilares. Ajudou a embasar alguns pontos deste trabalho, complementando as demais literaturas.

A literatura *Informática aplicada em Estruturas de Concreto Armado* de Kimura [29] é conhecida e focada no design, dimensionamento e detalhamento (vigas, lajes, pilares,

estrutura) através de demonstrações via software TQS^{TM} . Ajudou a esclarecer alguns temas e pontos para comparação das funções do TQS^{TM} com o protótipo.

A Literatura de Botelho [11], *Concreto eu ti Amo Vol.I*, é muito conhecida como referência em diversos trabalhos acadêmicos. Explica de forma bastante didática e tutorial, a construção predial detalhadamente, dando ênfase às lajes maciças, mesmo não sendo o tipo construtivo mais usual no mercado. Passando pelo design, dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais do edifício, lista as etapas de forma simples e direta e apontando as normas ABNT que as regulam. Sobre as lajes maciças, ensina o uso dos parâmetros de ambiente, o aço empregado, equações para calcular a espessura das lajes do pavimento, momentos fletores e cortantes atuantes e o uso das tabelas de dimensionamento das armaduras conforme o concreto e aço utilizados. Trabalho abrangente e ajudou bastante o embasamento deste.

Na literatura *Projeto de Estruturas de Concreto* de Uberaba [48] além dos cálculos dos elementos, apresenta os assuntos separados por capítulos específicos, inclui outros tipos de laje (pré-moldadas com lajotas ou EPS, treliçadas, nervuradas, cogumelo, steel deck) além das lajes maciças. Também inclui os cálculos dos elementos (vigas, pilares e fundações) e ajudou bastante a embasar este trabalho, complementando as demais literaturas.

Ano	Tema	Autores
1987	Curso de Concreto I Concreto Armado	José Carlos Sussekind [47]
2007	Informática aplicada em Estruturas de Concreto Armado	Alio Kimura [29]
2009	Projeto de Estruturas de Concreto à Luz da Informática	Lauro R. Henrique de Uberaba [48]
2013	Concreto Eu ti Amo Volume 1	Manoel Henrique Campos Botelho [11]; Osvaldemar Marchetti.

Tabela 3.1: Refs. Literaturas - Estruturas de Concreto Armado - Literaturas

3.1.2 Estruturas em Concreto Armado - Trabalhos Acadêmicos

Pesquisado no $Google^{TM}$ e $Google^{TM}$ Acadêmico, pelo tema "*artigo dimensionamento lajes maciças concreto armado*", retornaram respectivamente 34.900 e 2.010 resultados, reduzindo para 10 e 47 ao especificar "*artigo dimensionamento lajes maciças com RNA*". Destes, 6 foram selecionados (Tab.3.2) com as análises comparativas com este trabalho a

seguir:

Ano	Tema	Autores
2004	Análise de Confiabilidade Estrutural utilizando o Método de Monte Carlo e Redes Neurais	Anderson Henrique Barbosa [9]
2015	Automatização do dimensionamento de pavimentos de edifício em concreto armado segundo o método das charneiras plásticas	Luttgardes de Oliveira Neto [36]; , Fabricio Fogolin Prado.
2016	Estudo do Dimensionamento de Lajes Maciças para Análise de Custo x Benefício para fins de Utilização em Habitação Residencial – Estudo de Caso	Eduardo Leffa Cardoso [14]; Daiane dos Santos S. Godinho.
2017	Estudo Comparativo no Dimensionamento de um Edifício utilizando o Cálculo Manual e Softwares Estruturais	Otávio dos Santos K. Ribeiro [41]; Leonardo Carvalho Mesquita.
2019	Análise Comparativa entre Diferentes Tipos de Lajes quanto às Cargas Geradas e Consumo de Materiais	Laércio Guesser Júnior [28]; Marcelo Debortoli Filho
2019	Implementação Computacional de Rotinas para Dimensionamento de Lajes Maciças	Bruna Aparecida Hilário [27]; Antoniél Silva Oliveira Júnior.

Tabela 3.2: Refs. Trabalhos Acadêmicos - Estruturas de Concreto Armado

Barbosa [9], em sua Dissertação de *análise de confiabilidade estrutural com a utilização RNAs*, apresentou os vários métodos de confiabilidade utilizando RNAs. **Semelhanças:** *Utilizou RNAs PMC com o algoritmo **Back Propagation** e Gradiente Descendente e acelerador **Momentum**; Também percebeu nos resultados, o alto potencial de viabilidade das RNAs aplicado em estruturas com baixo custo computacional; Utilizou 2 algoritmos, 1 com o Gradiente Descendente; Concluiu que, para aplicar RNAs, também deve-se fazer muitos treinos prospectivos para encontrar os melhores aceleradores (aprendizado e avanço) p/ obter as topologias de maior convergência.* **Diferenças:** *Utilizou outro algoritmo de RNA de Levenberg-Maquardt, que foi o mais veloz; Utilizou a ferramenta de modelagem computacional MatlabTM, que contém a macro-função nativa do algoritmo pronto de RNA PMC; Utilizou mais 2 aplicativos, FERUMTM (análise de confiabilidade)*

e *FTOOLsTM* (análise estrutural); Utilizou *EQM* de $x10e^{-10}$ e Limite de iterações=1.000; Treinou RNAs para 7 aplicações diferentes.

Júnior [28], com o *Comparativo dos Tipos de Lajes*, comenta o sobrepeso e o maior consumo de formas na construção comparando tipos construtivos como as *Lajes Maciças*, usadas em obras maiores, mas são melhores no aumento da rigidez estrutural comparado aos outros. **Semelhanças:** Observou a variação da espessura das maciças conforme o tipo de pavimento e a forma de calcular as espessuras mínimas aderente a norma; Gerou o memorial de dimensionamento das lajes; Apresentou resumos da quantidade de barras dos vários diâmetros, mas por kg ao invés de metragem (m); Também utilizou as cargas (peso próprio, acidentais, revestimento) e aço CA50; Listou as tabelas dos custos das lajes por pavimento num resumo gráfico final, comparando os 3 tipos (Nervurada, treliçada e maciça) sendo o 1º e 3º com totais próximos, calculados via convencional; Gerou o volume de concreto (m^3), e a quantidade de formas em m^2 ao invés do nº de folhas. **Diferenças:** Nos cálculos das lajes não desenvolveu aplicação mas utilizou o software *EberickTM*, conhecido das construtoras; Gerou via *EberickTM* o memorial de dimensionamento das lajes, o detalhamento das plantas de formas e a lista de materiais.

Cardoso [14], em sua tese, fez o *Estudo Econômico de Lajes Maciças*, comparando o dimensionamento de 40 combinações de espessura x resistência do concreto, obtendo o total de armadura e concreto mais econômico. **Semelhanças:** Também utilizou nos cálculos das lajes os parâmetros: Dimensões, F_{ck} do Concreto, F_{yd} do Aço, Cargas distribuídas nas lajes; Utilizou a equação de proporcionalidade para definir o nº de direções das armaduras das lajes; Utilizou as tabelas Bares-Czerny para classificar os engastamentos com as lajes vizinhas, obtendo os parâmetros para o cálculo dos momentos fletores centrais (MF+) e de borda (MF-); Concluiu que, aumentando o F_{ck} , também aumenta o custo do concreto, mesmo reduzindo a área de aço, pois uma troca compensa a outra; Neste protótipo, a redução do custo de concreto requer diâmetros maiores aumentando o espaçamento e reduzindo a metragem de aço, onde a economia com lajes aparece, confirmado também por Cardoso [14]. **Diferenças:** Observou que a maioria das construtoras fazem o dimensionamento via softwares especializados; Considerou as lajes de maior dimensão como somente apoiadas e as demais engastadas, já neste protótipo considerou-se a vantagem de todas engastadas, pois os (MF-) reduzem os (MF+) diminuindo a área de armadura; Na orçamento, utilizou o software on-line *SINAPITM*, da Caixa Econômica Federal, como fonte de preços dos materiais de construção e gerou 3 resumos gráficos. Um deles, Custos x Espessura x F_{ck} com a evolução do orçamento em relação ao aumento da resistência do concreto nas 40 combinações.

Ribeiro [41] em seu artigo, comparou o dimensionamento em 3 softwares de mercado e 1 por método manual com resultados semelhantes nos 4, quanto às fundações, mas comparando o dimensionamento manual das lajes com os demais, somente o *CypeCadTM* teve áreas de aço próximas ao manual. Nos outros 2 até as vigas e pilares ficaram superdimensionados em relação ao manual. Isso mostra que mesmo softwares de mercado não são unânimes, podendo gerar dimensionamentos diferentes, mesmo dentro das normas.

Semelhanças: *Comenta que criar projetos e dimensioná-los é tarefa complexa; Utilizou concreto com F_{ck} de 25kN/cm^2 , aço CA50 para as armaduras principais, e CA60 nos estribos e armaduras secundárias; Efetuou comparativo resumido gráfico das áreas de aço dimensionadas das lajes, classificando o valor destas por ordem de resultado dos softwares.*

Diferenças: *Para o cálculo manual, utilizou 2 softwares para o projeto dos edifícios e 2 acadêmicos para dimensionar estes projetos; Fez o dimensionamento via 3 softwares, *TQSTM*, *EberickTM* e *CypeCadTM*, este último o mais rápido.*

Hilário [27], em seu trabalho criou o Aplicativo acadêmico *Calc Lajes* para o Dimensionamento de *Lajes Maciças*, muito interessante. **Semelhanças:** *Enaltece a importância do uso da Computação conjugado à Engenharia de estruturas, permitindo ao engenheiro focar nos processos mais importantes como a modelagem e análise estrutural e nas decisões técnicas e orçamentárias, deixando os computadores com a geração dos modelos e diversos cálculos, que são as partes trabalhosas e demoradas; Também gerou um protótipo (*Calc Lajes*) para dimensionar *Lajes Maciças*, mas via algoritmos Exatos com computação convencional. Também utilizou a Linguagem **Visual Basic .Net** para o desenvolvimento do aplicativo, devido a sua facilidade de aprendizado e aplicabilidades das básicas às avançadas; Considerou também que, as lajes podem ser armadas em 1 ou 2 direções, com base na relação $\frac{L_{maior}}{L_{menor}}$ detalhada na seção do capítulo 2, deste. **Diferenças:** *Criou comparativo do dimensionamento das *Lajes Maciças* com métodos Manual e Computacional via programa desenvolvido; No programa desenvolvido, substituiu uma possível rotina para interpolação de cada um dos 6 casos de laje da sistemática das tabelas Bases-Czerny (complicada e comprovado na prática neste protótipo) por outra de dimensionamento por tendência, via 2 equações de MF e de flecha.**

Neto [36], em seu artigo sobre *Automatização do Dimensionamento de Lajes de Edifícios pelo método das Charneiras Plásticas*, produziu o aplicativo acadêmico *C-Laje* para modelagem e dimensionamento de *Lajes Maciças*. **Semelhanças:** *Também desenvolveu utilizando a linguagem Visual Basic .Net para construir o sistema aplicativo C-Laje; Incluiu nos algoritmos as fórmulas das Tabelas Bares-Czerny; O C-Laje também possui interface GUI com telas iterativas com o operador, para geração dos dados das*

lajes e o cálculo convencional dos esforços; Também utilizou as fórmulas clássicas de engenharia no cálculo dos MFs (+/-) e Reações nas Vigas de apoio das lajes, e as Flechas admissíveis no centro das lajes; Também utilizou o aço CA50A. Diferenças: Utilizou a linguagem Visual Lisp como apoio à VB.Net para integração do software com o software AutoCadTM; Carregou as coordenadas das lajes via dados da modelagem das plantas de formas no software AutoCadTM; Utilizou concreto Fck20; No C-Laje, o operador ainda precisa definir qual o vínculo da laje com suas vizinhas, já no protótipo RNAhpLajes deste trabalho, essa parte é automática. No Protótipo RNAhpLajes o memorial está em formato listagem, e no C-Laje formato tela.

3.2 RNA - Estado da Arte

3.2.1 RNAs - Literaturas

Foram obtidas 7 literaturas sobre RNAs, sendo 6 as de maior abrangência do assunto, que embasaram boa parte teórica e prática deste protótipo. Contêm as arquiteturas, topologias, funcionamento matemático, as técnicas consagradas de treinamento, pseudocódigos básicos sugeridos, as aplicações e estratégias de solução de problemas, via RNA. Seis dessas foram estudadas e são listadas a seguir (Tab.3.3).

Ano	Tema	Autores
1996	Redes Neurais Artificiais Fundamentos e Aplicações	Zsolt L. Kovacs [30]
2000	Rede Neurais Artificiais com Aplicações em Controle e em Sistemas Especialistas	Fernando Mendes de Azevedo [8]; Lourdes Mattos Brasil; Roberto Célio Limão Oliveira.
2000	Redes Neurais Artificiais Teoria e Aplicações	Antônio de Pádua Braga [12]; Tereza Bernarda Ludermir; André Carlos P. L. F. Carvalho.
2001	Redes Neurais Princípios e Prática	Simon Haykin [26]
2007	Redes Neurais Artificiais Fundamentos e Aplicações com Programas em C	Oswaldo Ludwig Jr. [31]; Eduard Montgomery

2010	Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas	Ivan Nunes da Silva [44]; Danilo Rogério Spatti; Rogério Andrade Flauzino.
------	---	--

Tabela 3.3: Refs. Literaturas - Redes Neurais Artificiais

Silva [44], sua literatura de 2010 foi a 1^a mais estudada, referenciada em diversos trabalhos acadêmicos, foi a espinha dorsal e base de estudos deste trabalho, com conteúdo detalhado, direto e didático, sem ser absoluta, apresenta a história das RNAs, dos tipos básicos aos avançados (Exs.: PCS, PMC, RBF, SOM, Temporais). Suas orientações e sugestões nortearam os algoritmos **PMC** implementados. Suas orientações ajudaram a contornar várias das dificuldades com RNAs, que surgiram muitas vezes na prática neste projeto. É literatura para quem deseja aprender aprendizado de máquina.

Ludwig [31], sua literatura de 2007 foi a 2^a mais consultada, focada em RNAs PMCs e Kohonem. Contém sugestões de algoritmos e elucidou muitas dúvidas sobre o funcionamento prático do algoritmo RNA, com exemplos gráficos das etapas **Freeforward** e **Back Propagation**, onde as demais literaturas não cobriam.

Haykin, [26], sua literatura de 2001 foi a 3^a mais estudada. Sendo referência acadêmica sobre RNAs, com teórica e matematicamente densa, esclareceu vários pontos não tratados nas outras literaturas. Detalha a História, a sistemática, os problemas, os tipos de RNA, a lógica matemática por trás das RNAs inclusive utilizando grafos, os tipos de treinamento, as arquiteturas (Exs.: *PMC, RBF, SOM, Temporais, Recorrentes, Redes Dinâmicas*), a construção das topologias, como os aceleradores de aprendizado e avanço funcionam.

Braga [12], sua literatura de 2000 foi a 4^a mais estudada, contribuiu com ótimas orientações que resolveram pontos não cobertos pelas demais. Mostra que não há só 1 método de parada da RNA, mas 3, (*Parada Após n Ciclos, Por Erro Quadrático Médio, Por % de Saídas Coincidentes, Combinação dos 3*), estando uma versão combinada dos 3, incluída nos algoritmos do protótipo. Sugestões sobre o uso de aceleradores variáveis e o acréscimo de índice infinitesimal ao gradiente, também foram adotadas e aperfeiçoadas no algoritmo de RNA, evitando parada por erro 0/0, entre outras.

Kovács [30], literatura de 1996 foi a 5^a contribuição estudada, resolveu dúvidas da implementação do *Gradiente Descendente*, que na prática não é trivial implementar. Mostra as armadilhas nas quais as RNAs podem cair (Ex. *Calha Infinita*) e como tratá-las e evitá-las. Orienta as faixas de valores dos aceleradores aprendizado η e μ , as que

convergem e as que não convergem para a solução.

Azevedo [8], literatura de 2000 foi a 6^a, abrangendo muitos tipos de RNA, e muitos exemplos de aplicações, a lógica e a matemática envolvida sem muitos detalhes, mais resumida.

3.2.2 RNAs - Trabalhos Acadêmicos

Pesquisado no *GoogleTM* e *GoogleTM Acadêmico* o tema "*artigos redes neurais artificiais RNA*", retornaram 134.000 e 9.280 resultados, sofrendo redução significativa para 3.020 e 32, quando especificado "*artigos redes neurais artificiais RNA lajes maciças*". Destes, 8 foram selecionados para análises comparativas com esta dissertação (Tab.3.4) a seguir:

Ano	Tema	Autores
2007	Otimização e Estruturas Treliçadas Planas e Espaciais sob Carregamentos Estáticos e Dinâmicos, usando Algoritmos Genéticos e Redes Neurais	Marcelo da Fonseca [23]
2009	Um Estudo Abrangente sobre Meta-heurística, incluindo um Histórico	Christiane Zim Zapelini [49]
2010	Reconhecimento de Padrões e Redes Neurais Artificiais em Predição de Estruturas Secundárias de Proteínas	Emerson Cordeiro Moraes [33]
2013	Estudo da Configuração de Diferentes Arquiteturas de Redes Neurais Artificiais MLP para Classificação de Imagens Ópticas	Lívia dos Santos Abdalla [4]; Carlos Frederico de Sá Volotão.
2015	Utilização de Redes Neurais Artificiais Aplicadas na Discriminação de Padrões de Doenças Florestais	João Ricardo Favan [19]
2016	Modelagem de Otimização aplicada à Topologia de Sensores para Identificação e Localização de Danos em Placa Compósita	Adriana Amaro Diacenco [16]

2017	Análise de Desempenho de Redes Neurais Artificiais do Tipo Multilayer Perceptron por Meio do Distanciamento dos Pontos do Espaço de Saída	José Ricardo G. Manzan [32]
2019	Uso de Redes Neurais Multicamadas para Classificação de Perfis de Solos	Kleber Xavier S. Souza [45]; João Camargo Neto.

Tabela 3.4: Refs. Trabalhos Acadêmicos - Rede Neurais Artificiais

Fonseca [23] trabalhou com *Simulação dos Dimensionamentos de Projetos de Torres de Transmissão* utilizando cálculos dos esforços via técnica de *Elementos Finitos*, muito técnico, obtendo soluções via combinado *AG + RNA*. Mencionou que, mesmo obtendo resultados variados, quando os aferiu pelo normas, o domínio de soluções ficou muito restrito, o que até poderia reduzir a viabilidade da proposta *AG + RNA*. **Semelhanças:** *Também utilizou um combinado de 2 técnicas de ML; Focou na otimização do diâmetro x espaçamento conseguindo simular as estruturas e otimizar o "Peso Estrutural x Seções Transversais das Barras"; Também precisou fazer muitas prospecções, obtendo piores e melhores rodadas, incluindo a estatística de ambas via gráficos e comprovando que métodos meta-heurísticos não garantem o resultado esperado; Também utilizou como alvo, as saídas $yc_{\alpha,j}$ das áreas de aço das barras das treliças das torres, classificando estatisticamente os % dos padrões de redução do peso das torres; Também focou em criar algoritmos rápidos de RNA, com tempos curtos de iteração (velocidade de convergência), que se altos, inviabilizariam a utilização do programa desenvolvido. Diferenças:* *Utilizou um combinado de 2 técnicas de ML, o *AG + RNA*; Nos dimensionamentos e fez simulações por 3 parâmetros (dimensão, forma e ambas) e não utilizou a AHP para o orçamento.*

Moraes [33] no seu trabalho *Reconhecimento de Padrões com RNAs para Predição de Estruturas de Proteínas*, comenta os Estudos de Holley e Karplus utilizando um dataset de entrada com 48 amostras para treino e 14 para teste. As melhores RNAs, das diversas que prospectou, variaram de 2 a 20 neurônios nas camadas intermediárias. **Semelhanças:** *Tal qual uma exceção ocorrida neste trabalho, a melhor Topologia não foi a construída com 20 neurônios, mesmo essa tendo a maior convergência % nos treinos, mas sim, outra com 2 neurônios, tendo convergido menos (68,5%) que a 1a, mas gerou a maior convergência no teste (63,2%). Isso comprovou, tal qual no Conjunto 6 de projetos do protótipo, que não se deve subestimar topologias menores de RNA. Diferenças:* *Aplicou RNA na classificação de padrões, mas para a predição de Estruturas de Proteínas.*

Abdalla [4] apresenta um *Estudo de RNAs para Classificação de Imagens Óticas*. Seguindo a literatura de construção e treino de RNAs, executou alguns processos e parâmetros semelhantes a este trabalho. **Semelhanças:** *Treinou e testou várias topologias e parâmetros das RNAs, e resumiu as prospecções numa tabela evolutiva (p.8204); Também utilizou RNA padrão Perceptron Multicamadas PMC; As classes de saída que adotou também foram 5, classificadas visualmente pelo tipo e uso da área; Nas conclusões, para encontrar os melhores aceleradores de aprendizado e avanço, a melhor convergência usou $\eta=0,02$ e $\mu=0,53$, este último parecido com o utilizado nos conjuntos 1 a 3 do protótipo. Diferenças:* *Os atributos de entrada utilizados, foram calculados como 5 geométricos por classe de saída (5 x 5) perfazendo 25 atributos. Os atributos do dataset foram gerados por um programa de satélite e um de análise; Obteve à melhor Topologia (25-15-5), mas precisou de 10.000 iterações para obter altas convergências.*

Favan [19] trabalhou RNAs para *Aferição de Doenças Florestais através de Imagens*. **Semelhanças:** *Também adotou a arquitetura PMC com 1 camada de entrada, 1 intermediária e 1 saída; Também utilizou o sistema binário para as classes de saída; Também estudou literaturas seguindo as recomendações de Silva[44] no cálculo do n^o de neurônios utilizando as equações de 3 métodos (Flether-Gloss, Witten-Frank e Kolmogorov); Também prospectou 5 Topologias, variando o n^o de neurônios, mas em maior quantidade (128 , 256 e 384) em grupos de topologias. Também utilizou injeção aleatória das amostras de entrada, e também efetuou 10 treinos para cada Topologia; Também comprovou que é necessária muita prospecção para chegar à altas convergências (Convergência 95,45%); Conseguiu resultados evolutivos promissores quanto ao n^o de neurônios nas topologias . Diferenças:* *Nos treinos, utilizou até 147 amostras, sendo 60% para treino e 40% para testes; O DataSet de entrada contém os tons de cinza (255) da quantidade de pixels das imagens das amostras digitalizadas de florestas; Também utilizou o EQM (erro quadrático médio) como lógica de parada das iterações da RNA, mas como o único método de parada, com convergência menos precisa (62%) do que a deste trabalho; Na estratégia binária de saídas utilizou 2 classes ao invés de 5, para representar os 2 tipos de doenças que acometem às florestas (tipo 1-> 01 e tipo 2 -> 10); Resultados: 34 Neurônios (Convergência 91,75%, Iterações médias 1.280) até 384 Nros (convergência 95,45%, iterações médias 800).*

Diacenco [16] tratou a *Otimização de Sensores para verificar Falhas em Elementos Compósitos via RNA*, e com vários procedimentos bastante parecidos com este trabalho. **Semelhanças:** *Também adotou a arquitetura PMC padrão, com 1 camada de entrada, 1 intermediária com neurônios processando funções de ativação tangente hiperbólica, e 1*

de saída com função linear. O algoritmo também efetuou as etapas: pré-processamento, treinamento em 2 etapas (Freeforward e Back Propagation) e pós-processamento; Também utilizou o Gradiente Descendente como kernel do algoritmo de convergência e aceleradores η de aprendizado e μ de avanço; Expôs a capacidade da RNA PMC em resolver problemas não-lineares; Também efetuou uma fase de pré-análise do problema, para estruturá-lo de forma a encontrar a estratégia RNA para chegar à solução. **Diferenças:** Para o desenvolvimento dos algoritmos utilizou o software MatlabTM para tratar funções de ativação com a função de Backpropagation nativa do framework da software.

Manzan [32] produziu a tese sobre *Análise de Desempenho de RNAs por Distanciamento de Pontos no espaço de Saída*. **Semelhanças:** Também explicou o reconhecimento de padrões por zonas de separabilidade criadas pela RNAs PMC e a utilização de algoritmo com aceleradores de aprendizado η e μ de avanço; Também consolidou resumo das prospecções dos treinos em tabelas estatísticas das topologias, testando vários n^o de neurônios e taxas de aprendizagem, com 500 simulações com pesos w variando de $-0,5$ a $0,5$ (este protótipo fez 400 treinos e $w \leq 0,4$). **Diferenças:** Experimentou o η entre 0.001 a 0.4 (neste protótipo o η foi de 0.15 a 0.02) e n^o de neurônios entre 25 a 1000, tendo simulado 100 vezes para cada combinação de topologia.

O trabalho de Souza [45], sobre *Classificação de Perfis de Solo* foi considerado bem estruturado e de alta relevância quanto à estratégia RNA utilizada para classificar tipos de solo. **Semelhanças:** Também precisou efetuar muitas prospecções de Topologias (8-6-4-2, 4-6-4-2, ... , 4-2) para atingir a melhor (4-2-1); Também conseguiu altas convergências nos (Treinos $\geq 90\%$) e nos Testes $\geq 80\%$); O sistema equacional que utilizou também atingiu altas convergências nas 1as iterações, com velocidades semelhantes às deste trabalho; Treinou com iterações ≤ 20 , mas em certos casos, deixou até 100 iterações, arriscando o overfitting; Comentou nos resultados que, as convergências ficaram na faixa dos 80% na validação e 63% na fase de teste, mesmo os treinos convergindo 100% e com 90 iterações; Também constatou não ser trivial, uma RNA atingir altas convergências dependendo da complexidade da função-objetivo; Também constatou, por matriz confusão, que houve um desbalanceamento nas classes, gerando redução do aprendizado. **Diferenças:** Adotou uma solução avançada, ampliando a topologia para um conjunto de RNAs em cascata, para classificar os subtipos de solo.

Zapellini [49]), no seu trabalho de *Análise dos tipos de Algoritmo*, abordou as principais classes de algoritmos e exemplos de aplicação das mesmas, onde as RNAs estão dentro da classe dos *Híbridos*, e que decompõem um problema em partes, resolvem através de

algoritmos específicos (até de outras classes) e depois as reúne numa única solução final, com a finalidade de otimização.

3.3 Apoio Multicritério a Decisão com AHP

3.3.1 AHP - Literaturas Pesquisadas e Trabalhos Acadêmicos

Além da Literatura de Gomes [25] sobre a técnica de Apoio a decisão por Multicritério ADMC, foram levantados mais 3 trabalhos relacionados com o uso dessa técnica com AHP. Pesquisando no *Google™* e *Google™ Acadêmico* pelo tema "*artigo Orçamento Construção de Edifícios com AHP*" foram retornados respectivamente 77.800 e 2.640 resultados, mas quando da especificação "*artigo Orçamento de Lajes maciças com AHP*" reduziram-se para 22.800 e 134. A seguir, os 3 selecionados (Tab.3.5) para comparativo com este trabalho.

Ano	Tema	Autores
2017	O Impacto do Programa Inovar-Auto na Indústria Automotiva Brasileira	Nivaldo Luiz Palmeri [38]
2018	Avaliação do Desempenho de Vedações Verticais utilizando o Processo de Análise Hierárquica na Tomada de Decisão	Lucas Rosse Caldas [13]; Michele Tereza M. Carvalho.
2019	Priorização das Atividades de Projeto na Construção Civil através da Abordagem Multicritério	Danielle Freitas Santos[42]; Emerson Santos Aguiar.

Tabela 3.5: Refs. Trabalhos Acadêmicos - Apoio Decisão por AHP

Caldas [13] avaliou a *Performance de Vedações Verticais de edificações quanto à acústica e isolamento térmico* de tipos construtivos. **Semelhanças:** *Também utilizou a AHP para gerar comparativos entre os sistemas construtivos; Também construiu a Matriz de Decisão com Alternativas x Critérios com as opções construtivas, mas com 5 critérios; Construiu as tabelas de decisão de Cruzada de Pesos Par a Par, dos 5 critérios separadamente, e analisou os % das alternativas individualmente para cada critério; Concluiu que a técnica AHP se presta bem para a seleção e classificação de elementos construtivos por critérios de desempenho específicos; Efetuou as classificações via gráficos.* **Diferenças:** *As alternativas construtivas avaliadas foram as paredes, por ordem de melhor performance geral, com o tipo steel framing o de melhor ganho agregado,*

com 68%, seguido pelo bloco de concreto com 58%. Processou a orçamentação de forma diferente deste.

Palmeri [38] utilizou a Técnica AHP para tratar os *Reflexos do Programa Inovar-Auto na indústria de automóveis*. Como resultado, gerou 6 estudos de critérios utilizando as tabelas *Cruzadas de Pesos Par a Par* de alternativas. **Semelhanças:** *Utilizou a técnica AHP para construir a Árvore de Alternativas e Critérios, gerando depois a tabela Hierárquica de Alternativas x Critérios e as Tabelas Cruzadas de Pesos par a par; Consolidou todas as alternativas e sua respectiva classificação, mediante critérios, na tabela Hierárquica de Alternativas x Critérios.* **Diferenças:** *Os fatores de competitividade geral da indústria nacional de automóveis foram os critérios que analisou via ótica Multicritério, medidos pela escala nominal de intensidade Saaty, e utilizou o programa computacional Expert ChoiceTM para esta tarefa; Classificou utilizando 6 critérios e a alternativa de maior vantagem do Programa Inovar foi a "Globalização" com 22%; Gerou uma análise final comparativa dos critérios competitivos, entre a indústria nacional e a coreana, via gráfico de radar de homogeneidade, para medir as proximidades e coincidências dos critérios de ambas indústrias, encontrando 4 critérios coincidentes e 3 próximos.*

3.3.2 Engenharia, RNA e AHP - Trabalhos Acadêmicos

Pesquisado no GoogleTM e GoogleTM Acadêmico, pelo tema "artigo Estruturas de Concreto Armado com RNA", retornaram respectivamente 78.400 e 2.250 resultados, e especificando "artigo Lajes Maciças com RNA" reduziram para 8 e 52. Pesquisando também "artigo Orçamento de Lajes com AHP", retornaram 22.800 e 2.250 resultados, e especificando "artigo dimensionamento de lajes maciças por RNA e Orçamento de Lajes maciças com AHP" reduziram para 8 e 0. dentro dos resultados reduzidos (RNA e AHP simultaneamente) foram selecionados 6 dos trabalhos, listados a seguir (Tab.3.6).

Pamplona [39] produziu artigo sobre *Selecionar o melhor Método de Produção do Concreto para a Obra* utilizando a técnica AHP. **Semelhanças:** *Também utilizou o procedimento decisório da AHP de Saaty, levantou os critérios do problema e construiu as tabelas Hierárquica de Alternativas x Critérios na forma de organograma e a Cruzada de Critérios Peso a Peso; Também classificou os resultados da melhor alternativa de fabricação de concreto; Concluiu que a árvore Hierárquica de Alternativas x Critérios é crucial para o entender o cenário do problema; Classificou as alternativas mais vantajosas de produção do concreto, via gráficos; Também teve e mencionou uma*

significativa dificuldade de encontrar na internet, pesquisas sobre AHP relacionadas a avaliar orçamento na construção civil. Diferenças: As Alternativas utilizadas foram: Betonado, Usinado, À mão; Os Critérios adotados foram: Custo, Tempo, Equipamento usado, Quantidade de MO e Tipo de Cimento; Alternativas mais vantajosas: 1^a) Produzida com betoneira na obra, 36%; 2^a) Usinado, 32,6%

Ano	Tema	Autores
2012	Aplicação do Método AHP na Escolha do Tipo de Concreto a ser utilizado na Construção Civil	Bruno Lima Pamplona [39]; Felipe Fonseca Tavares de Freitas.
2013	Uso do Método AHP na Tomada de Decisão para Seleção de Sistemas de Lajes de Edifícios Comerciais	Luciano Ferreira dos Santos [43]; Rafael Barreto C. da Cruz.
2015	Desenvolvimento de Software para Estimativa da Profundidade de Carbonatação, Vida Útil e Captura de CO ₂ de Estruturas de Concreto empregando RNA's	Emerson Felipe Félix [20]
2017	Otimização de Estruturas Treliçadas de Elementos em Compósitos usando Redes Neurais Artificiais	Camila Aparecida Diniz [17]
2018	Proposta de Modelo Multicritério para Escolha de Sistema de Lajes em Obras Civis	Rayara Oliveira [37]; Joás Aquino; Anielli Rangel.
2020	Uso de Redes Neurais Artificiais e AHP na Redução da Subjetividade na Seleção de Área com Potencial para Coleta de Água da Chuva	Januário C. Fernandes [21]

Tabela 3.6: Refs. Trabalhos Acadêmicos - Concreto, RNA e AHP

Santos [43] tratou da *Tomada de Decisão na Seleção de Sistemas de Lajes via AHP Semelhanças: Criou um organograma para Arvore de Alternativas x Critérios, explicando que dessa forma, entende-se melhor a lógica do cenário decisório; Convalidou os resultados deste trabalho, sobre o procedimento de cálculo e tabelas aplicadas no apoio Multicritério com AHP, gerando também a tabela Principal e as Tabelas Cruzadas de*

Critérios Peso \times Peso para os decisores analisarem as alternativas via cada critério em separado. Diferenças: Focou o orçamento em laje pré-fabricada, incluindo 4 alternativas construtivas: Treliça + EPS, Painel e Steel-Deck; Os critérios foram as características comuns às lajes (consumo de concreto, taxa de armadura, taxa de formas, MO); O tipo mais vantajoso de laje foi o **Steel Deck** com 46% de ganho agregado.

Félix [20], analisou a *Estimativa de Vida Útil de Estruturas via RNA*. **Semelhanças:** Foi um dos poucos a gerar um aplicativo Feedforward- Back Propagation com base em pseudocódigos simplificados. Também implementou um BD para armazenar os projetos e datasets dos treinamentos e as saídas obtidas. Trabalhou com RNAs PMC com 4, 5 e 7 n^o de atributos de entradas nos datasets e variou o n^o de neurônios de 0 a 9 na camada intermediária, treinando com essas combinações as topologias possíveis. Também efetuou muitas prospecções por topologia, chegando ao total de 1.200; Também gerou um programa protótipo para análise do efeito da carbonatação em peças em concreto armado; Também construiu a aplicação com **GUI**, explicando que interfaces gráficas oferecem usabilidade ao usuário. **Diferenças:** Utilizou o acelerador de aprendizado η em faixa mais limitada e fixa (0,1; 0,2; 0,3; 0,4).; Utilizou a linguagem C++ para desenvolvimento do programa CARBEM e depois o migrou para a JAVATM via IDE NetBeansTM 8.1.

Diniz [17] trabalhou a *Otimização de Estruturas Treliçadas com Elementos Compósitos via RNA*. **Semelhanças:** Adotou o uso da Arquitetura PMC para a RNA; Também efetuou várias prospecções até atingir as melhores topologias. Também usou a função Tangente Hiperbólica nos neurônios das camadas intermediárias, e a Linear na de saída. Adotou limites de EQM entre $x10^{-2}$ e $x10^{-6}$. **Diferenças:** Aplicou o método de convergência de Levenberg-Marquardt no algoritmo PMC ao invés do Gradiente Descendente. Utilizou aceleradores η entre 0.02 a 0.001; Utilizou 2 camadas intermediárias ao invés de 1, com o n^o de neurônios de 8/23 até 56/95, e iterações de 7.000 a 20.000, mas esta escolha tornou pesado o processamento e precisou de muito tempo para as convergências [17]. É sabido que o 3^o método que usou é lento, e isso reforça que algoritmos de RNA precisam ser rápidos.

Oliveira [37] trabalhou a *Proposta de Modelo Multicritério para Escolha de Sistema de Laje em Obras Civas utilizando a Técnica AHP*. **Semelhanças:** Explica o modelo decisório Multicritério com a variante AHP de Saaty, para construir tabelas de Critérios através da Matriz de Critérios de Pesos Par a Par; Também considera que obra civis são complexas e a ajuda computacional é fundamental; Também entendeu que, deve-se pesquisar por novas técnicas de algoritmo que tragam competitividade às construtoras.

Fernandes [21], mesmo não tratando de cálculo de estruturas, seu trabalho é importante e o mais próximo deste, pois também utilizou a combinação *RNA + AHP*, mas na *Redução da Subjetividade e Seleção de Área com Potencial de Coleta de Chuva*. **Semelhanças:** *Foi talvez, o único encontrado, a usar o combinado RNA + AHP, mesmo que para outro objetivo; Mencionou que teve problemas com o índice de correlação, que não ficou dentro do ideal, mas as RNAs atingiram o objetivo da redução da subjetividade da avaliação dos experts; Com a técnica AHP, gerou as tabelas Hierárquica Principal de Alternativas x Critérios e Cruzada de Pesos dos Critérios para a par; Também via gráficos, os resultados atingiram alta convergência com os do Critérios que utilizou; Também comparou os resultados calculados via convencional e RNA, subcritérios "Alto" e "Muito Alto" e alguma diferença maior nos demais subcritérios; Efetuou 112 Treinos com as funções Logística e Tangente Hiperbólica, também constatando que esta 2ª atingiu maior convergência que a 1ª; Também concluiu que o combinado RNA + AHP tem alto potencial na Engenharia.* **Diferenças:** Especificamente, usou RNAs na ponderação das faixas dos critérios dos especialistas, ponto que vem sendo questionado no método AHP. Depois, utilizou a AHP para tratar a redução da subjetividade na seleção de áreas potenciais para RWHs de coleta e desvio de chuvas e dos critérios reconicionados pela RNA; Utilizou Topologias com 1 a 4 camadas intermediárias. Critérios utilizados: Topográficas da região, Densidade de drenagem, Coeficiente de escoamento das bacias, Pluviosidade regional; Utilizou os critérios acima, mas em 2 níveis com sub-critérios; Desenvolveu um programa mais simples, com rotinas de RNA na linguagem *R* com a função *neuronet* do framework nativo.

Capítulo 4

Metodologia

Este capítulo trata das etapas e processos utilizados na construção deste projeto, com base nas técnicas do capítulo 2 de Fundamentação Teórica, literaturas e trabalhos pesquisados no capítulo 3 de Revisão Bibliográfica.

4.1 Infraestrutura de Hardware e Software do Projeto

4.1.1 Hardware

Para este projeto foram providenciadas as configurações de ambiente de hardware a seguir (Tabela 4.1) com uma instalação a mais padronizada de mercado possível:

Hardware	Descrição
Microcomputador	I5 2.8GHz 8GB RAM
Disco Rígido	500GB - <i>Western</i>
Monitor	UVGA 17' - <i>PC – BrazilTM</i>
Teclado	ABNT2 - <i>UTechTM</i>
Mouse	Ótico de 440DPI - <i>LogitecTM1</i>
Estabilizador	1 KVa com 6 Tomadas - <i>SMSTM</i>

Tabela 4.1: Hardware utilizado no Desenvolvimento
Fonte: Autor

4.1.2 Software

Neste item são listados os softwares básicos e de apoio (Tabela 4.2) utilizados no desenvolvimento deste aplicativo protótipo acadêmico.

1. O Sistema Operacional utilizado foi o *Microsoft WindowsTM 8*.

Software	Descrição
Sistema Operacional	<i>Microsoft WindowsTM 8</i>
SGBD	<i>MySQLTM v6.5 Community</i>
IDE de desenvolvimento	<i>VB.Net v2015 Community</i>
Geometria	<i>GeoGebraTM 6.0</i>
Mineração de Dados e ETL	<i>OrangeDataMinigTM v3.36.1</i>
Editor LateX On-Line	<i>OverleafTM</i>

Tabela 4.2: Softwares utilizados no Desenvolvimento
Fonte: Autor

2. Tal qual em Hilário [27] e Neto [36], este protótipo foi desenvolvido na linguagem VB.Net, conhecida do autor e com os recursos de programação necessários como, gerar interface **GUI** permitindo a condensação do design das informações em telas gráficas fixas, ganhando usabilidade, agilidade e iteração facilitada com o usuário. Já Félix [20], optou pela linguagem *JavaTM*.
3. Os softwares de apoio foram pesquisados na internet focando as necessidades do projeto. Era preciso software para tratamento de datasets e para processamento de RNAs PMC, bem como geração de gráficos e recursos de programação:
 - 3.1 No 1º caso, foi localizado o software *Orange Data MiningTM* [3], que permite: Mineração e análises de dados com ETL; Vários modelos e processadores de **Machine Learning** (RNA, SVM, SOM, SQL, Gráficos, ...).
 - 3.2 No 2º caso, foi encontrado o *GeogebraTM* [2] que permite: Gerar gráficos 2D e 3D sofisticados a partir de planilhas de coordenadas; Grande gama de funções matemáticas, das básicas às de cálculo diferencial e integral.

O software aplicativo de apoio *GeogebraTM* [2] foi utilizado para confecção de vários dos modelos cartesianos de amostragem no R^2 . O aplicativo *OrangeDataMiningTM* [3] foi utilizado para testar os datasets das RNAs, para comparar e convalidar a verossimilidade dos resultados obtidos pelas rotinas deste protótipo tais como: Nº de iterações, nº de neurônios, % de convergência. Por efetuar mineração de dados e ter recursos de ML, o *OrangeTM* atendeu plenamente. Obs.: Só não foi encontrada a opção que desenha a topologia da RNA;

Tentando encontrar editores de texto padrão **LateX** na internet, os instaláveis não eram compatíveis com os modelos de dissertação da UFF ou tinham bibliotecas incompletas, então foi localizado o editor de *Latex* on-line, *OverleafTM*, no site de mesmo nome, com utilização via conta padrão sem custos, para fins acadêmicos.

4.2 Projeto Lógico do Sistema

4.2.1 Análise e Levantamentos Preliminares

Devido às muitas etapas da construção de edifícios, várias delas com muitos cálculos chegando até a parte de estabilidade predial, atualmente encontram-se programas para projetos de edifício bem completos no mercado, que efetuam a modelagem das plantas baixas e também dimensionam os elementos da estrutura predial (Pilares, Vigas, Lajes, e Fundações) permitindo agilidade no design do projeto, facilidade de análise da segurança estrutural e otimização dos custos dos materiais e mão de obra [48].

Atualmente há softwares permitindo tratar todas as etapas da obra (modelagem de projetos, acompanhamento da execução) tais como o *TQSTM* e *EBERICTM*, mas não foi possível saber se utilizam algoritmos de RNAs em sua codificação para alguma comparação. Além disso, estes também apresentam diferenças de dimensionamentos, não sendo unânimes quanto a resultados, mas todos atendem às normas da ABNT, [41].

Em muitos trabalhos acadêmicos, e devido ao n^o reduzido tratando sobre lajes maciças, vários não tratam propriamente da obtenção das armaduras dos pavimentos usando RNAs, sendo mais generalistas (ex.: cálculos de vigas e pilares). Outros focam no cálculo de esforços em peças ou pórticos isolados ou nas armaduras principais ou na química do concreto, [9], [23], [20]. E vários não tratam de concreto armado, mas de vigas de aço isoladas.

Obs.: Diferente de vários trabalhos, neste não foram utilizadas macro-funções de processamento de RNA, nativas de seu **framework** como nas linguagens *MatlabTM* e *PythonTM*, bastando inserir o **dataset** e poucas linhas de programação, para gerar resultados. Semelhante a Hilário [27] e Neto [36], os algoritmos deste trabalho foram programados do quase zero, focando no aprendizado sobre RNAs.

4.2.2 Tarefas Resumidas do Projeto

1. Reciclar a sistemática de Engenharia Civil de projeto e dimensionamento de edifícios. Estudar e assimilar a sistemática de RNAs, especialmente do tipo PMC, sua construção e treinamento, [4], [17], [32], [45] e [19].
2. Encontrar as estratégias mais adequadas para, adaptar a sistemática do dimensionamento de lajes às RNAs, e a orçamentação e classificação via AHP.

3. Gerar e consolidar via programação, o dimensionamento convencional de lajes de edifício num sistema protótipo, cujas rotinas sejam desenvolvidas com base nas metodologias e orientações das literaturas consagradas desses assuntos, [11] e [48].
4. Gerar programas preliminares para assimilação da lógica das RNAs, e depois, consolidar a melhor versão destes, dentro do protótipo final *RNAhpLajes*. As rotinas desenvolvidas serão baseadas nos estudos e nos pseudocódigos básicos das literaturas dos pesquisadores Silva [44], Ludwig [31], Haykin [26], e incluindo as orientações de Braga[12] e Kovács [30], suficientes para que se possa projetar, ajustar e aperfeiçoar o se faça necessário, [4], [17], [45] e [19].
5. Construir também, dentro do sistema protótipo, as rotinas ADMC com a técnica AHP, para geração do orçamento e a classificação dos projetos por melhor valor agregado das lajes, dimensionadas convencionalmente e via RNA, [21], [39] e [43].
6. Efetuar vários treinamentos e testes operacionais no protótipo, com os datasets dos projetos mapeados, documentando as devidas estatísticas para aferição, geração dos resultados e conclusões sobre o combinado *RNA + AHP*, [21], [23] e [43].

4.2.3 Metodologias utilizadas no Desenvolvimento

- Os processos de dimensionamento convencional de projetos de edifícios foram embasados em literaturas consagradas de Engenharia como, ABNT [7], Botelho [11], Sussekind [47] e Uberaba[48]. O Protótipo visou o *Dimensionamento das Lajes do Tipo Maciça*, de projetos de edifícios, para testar o potencial do combinado RNAs (dimensionamento) + AHP (orçamento e classificação).
- Para o desenvolvimento do sistema protótipo foi seguida a metodologia de análise e projetos de sistemas chamada *Análise Rápida de Sistemas* de Gane [24], e consultado também o trabalho de *Análise Essencial* de Portilho [40], como apoio. A *Análise Rápida de Sistemas* é uma vertente um pouco mais moderna que a *Análise Estruturada* porem menos atual que a *Análise Orientada a Objetos*, mas foi escolhida por ser uma metodologia mais rápida, gerando menos desenvolvimento e documentação, adequada ao cronograma disponível.

4.2.4 Lajes Maciças - Dimensionamento Convencional:

1. Determinação Prática da *Espessura Mínima da Laje*:

Calcular a altura h (cm) de cada laje do pavimento pela equação prática (Eq.4.1), sendo aproximada sempre para o inteiro logo acima do calculado. Após obter a altura das lajes do pavimento, adota-se aquela com a maior h , [41], ou a espessura mínima indicada pela a Norma [7] se necessário, como orienta Cardoso [14]:

$$h = \left(\frac{L_x}{40} \right) \quad (4.1)$$

Obs.: Também deve-se documentar qual o lado menor, se L_x ou L_y de cada laje.

2. Calcular o Índice de Proporcionalidade:

Obtém-se o Índice de Proporcionalidade (IP) de cada laje pela Equação 4.2. O IP define se a laje terá 1 ou 2 armaduras principais (armada em 1 ($\epsilon > 2.5$) ou 2 ($\epsilon \leq 2.5$) direções), [11]:

$$\epsilon = \left(\frac{L_x}{L_y} \right) \quad , \text{ onde } L_x < L_y \quad (4.2)$$

3. Determinar o "*Caso de Vínculo*" da Laje com suas Vizinhas:

Caso uma laje seja armada em 2 direções, o item 4 será obrigatório para calcular as armaduras principais na direção x e y da mesma, através do método **Bares-Czerny**, [11], [36].

4. Obter os Coeficientes de Esforços na Tabela Bares-Czerny:

Entrando nas tabelas *Bares-Czerny* (Figs.C.1 Apêndice C) com o IP (ϵ) e o *Caso de Vínculo da Laje* definido no item 3, obtêm-se os coeficientes de minoração para os cálculos dos *momentos fletores*, $MF(+)$ $MF(-)$ e *cortantes* (R) de cada laje, através das equações 4.3 e 4.4 no item 6. Essas tabelas podem ser encontradas na norma ABNT NBR6118 [7] segundo [41] e [14]. Um pequeno exemplo dos índices de esforços que podem ser obtidos na tabela *Czerny* (Tab.4.3) é apresentado a seguir:

Coeficiente %	Tipo Esforço x Coeficiente	Direção
m_x	Momento Fletor (+) meio do vão	x
m_y	Momento Fletor (+) meio do vão	y
n_x	Momento Fletor (-) sobre viga de apoio	x
n_y	Momento Fletor (-) sobre viga de apoio	y
v_1	Carga linear R_1 na viga 1	-
v_2	Carga linear R_2 na viga 2	-
v_3	Carga linear R_3 na viga 3	-
v_4	Carga linear R_4 na viga 4	-

Tabela 4.3: Ex. Coeficientes da Tabela Czerny p/ Cálculo Lajes 2 dirs.
Design: Autor - Fonte: Botelho [11]

Obs.: As tabelas *Bares-Czerny* podem ser encontradas na íntegra na norma da ABNT [7], e listadas neste trabalho apenas as utilizadas (Tabs.4.3, apêndice C).

5. Determinar as Cargas sobre a Laje:

Selecionam-se as *cargas distribuídas* sobre cada laje, as *acidentais* (q_a), a de *peso próprio* (q_p) e de *acabamento* (q_a), conforme o tipo de cômodo que a laje será, NBR6120 [6], [11], [14] e [36].

6. Calcular dos Momentos Fletores das Armaduras nas 2 Direções:

Com os coeficientes na tabela *Czerny* (Tabs.4.3 Apêndice C), itens 3 e 4, são calculados os *Momentos Fletores* $MF_x(+)$ e $MF_y(+)$ dos centros dos vãos, e os $MF_x(-)$ e $MF_y(-)$ nas bordas das vigas, através das Eqs.4.3 e 4.4, [5], [11], [36] e [41]:

$MF(+)$ calculado em cada centro de vão, x e y , da laje (Eq.4.3):

$$M_d = \left(\frac{q_d \cdot l^2}{m_c} \right) \quad (4.3)$$

$MF(-)$ em cada extremo engastado dos vãos x e y , sobre as vigas (Eq.4.4):

$$N_d = \left(\frac{-q_d \cdot l^2}{m_c} \right) \quad (4.4)$$

Onde: q = Carga distribuída por metro linear; d = Índice identificador da direção (x ou y) da carga q ; l = Comprimento (metros) do menor vão da Laje; m_e = Variável minoradora por tipo de vínculo (m_x ou m_y da tabela *Czerny*).

7. Calcular e Obter os Parâmetros $K6$ e $K3$:

Com os MFs , a distância d de trabalho da armadura, o **Parâmetro $K6$** pode ser calculado através da Eq.4.5, [11], [41]:

$$K6 = 10^5 \cdot \frac{(b \cdot d^2)}{M} \quad (4.5)$$

Onde: $K6$ = Parâmetro de obtenção do Parâmetro $K3$; b = Constante (1m) pois o calculo é por metro; d = Distância da topo superior até o centro da barra inferior (+) da Laje; M = Momento Fletor (kNm) obtido na Tabela *Czerny*.

Obtenção do Parâmetro $K3$:

Com o $K6$ calculado e o Fck do concreto (Ex.: 25MPa) entra-se na mesma tabela *Dimensionamento de Lajes maciças Armadas em Cruz* (Tab.C.2a Apêndice C), na coluna dos $K6$, sub-coluna 25MPa, desliza-se sobre os valores abaixo até localizar um $K6_t \geq K6$ calculado. Na mesma linha do $K6$ localizado, desliza-se sobre as colunas dos $K3$ à direita e na coluna do aço utilizado (Ex.: $Fyd = CA50$) coleta-se o parâmetro $K3$, (Eq.4.5), [41] e [14].

8. Cálculo da Área Total de Aço da Armadura na Direção:

Com o parâmetro $K3$, calcula-se a área total de aço preliminar A_s das armaduras principais, (PPX) positiva (+) na direção x , (PPY)(+) na direção y , (PNX) negativa (-) na direção x e (PNY) (-) na direção y (Eq.4.6), [41] e [14].

$$A_s = \frac{K3 \cdot M}{10 \cdot d} \quad (4.6)$$

Onde: A_s = Área de Aço em cm^2 ; M = Momento Fletor (kNm); d = Distância da borda superior até o centro da barra de aço positiva da Laje.

Observações:

- A Armadura dependerá de qual *Momento Fletor* foi utilizado para obter o $K6$ e $K3$, e sua nomenclatura indicará se é uma armadura inferior (+) ou superior (-).

- * $M_x \rightarrow$ MF(+) meio do vão na direção x
- * $M_y \rightarrow$ MF(+) meio do vão na direção y
- * $N_x \rightarrow$ MF(-) sobre a viga na direção x
- * $N_y \rightarrow$ MF(-) sobre a viga na direção y

- A Tabela Czerny (Figs.C.1 Apêndice C) retorna os coeficientes de minoração de quantos e quais MFs incidem sobre a laje (M_x , M_y , N_x , N_y) dependendo do tipo de engastamento com as lajes vizinhas.

9. Determinar o Diâmetro e Espaçamento da Barra de Aço:

Com a Área de aço A_s , entra-se na tabela *Áreas de Aços para Armaduras* (Fig.C.2b Apêndice C) e localiza-se um valor $A_{sT} \geq A_s$ (imediatamente acima de A_s) numa das colunas de diâmetro @ $_{mm}$, e deslizando-se para a esquerda do valor de A_s até a coluna mais à esquerda da tabela, encontra-se o espaçamento E_{A_s} (cm), se optar por este diâmetro, [48], [41], [14] e [36].

- **Dúvida:** A Questão é que várias combinações @ $_{mm}$ x E_{A_s} podem estar próximos da área de aço A_s , indicando que 1, 2, ou 3 *diâmetros x espaçamentos* podem atender. Qual deles deve-se utilizar ?

Resposta: Diâmetros menores são mais baratos, mas exigem maior metragem de aço, a montagem e o preenchimento do concreto na laje são mais difíceis. O maiores exigem menor metragem, mas facilitam o transito sobre a laje e o preenchimento do concreto, mas são mais caros e podem pedir armadura de composição.

- **Importante:** A ideia é sempre calcular visando segurança e economia. Muitas vezes dimensionam-se as armaduras unificando os diâmetros das lajes, onde é possível, para evitar enganos na montagem. Caso haja troca do diâmetro e/ou espaçamento por engano, colocando a armadura de uma laje menor numa laje maior, pode gerar prejuízo como selagem e trincas ou até ruptura. É preciso sempre fazer o "menor super-dimensionamento" que terá o "menor custo seguro viável", garantindo resistência e segurança. É claro que a unificação tem a penalidade da perda de certa economia com aço, e em obras onde há muitas lajes por pavimento, pode-se manter as armaduras diferenciadas entres as lajes, mas é preciso um controle rígido sobre a montagem, e neste caso a economia com aço é certa.

Escolha do Diâmetro x Espaçamento neste Trabalho:

A rotina de dimensionamento convencional foi programada para escolher diâmetros dentro do padrão disponível (5, 6.3, 8, 10, 12, 16mm), [7], e a de dimensionamento via RNA foi deixado a cargo desta, tentar se aproximar o possível do convencional, ou sugerir outro par de sua própria autoria, tendendo à bitolas maiores (teste da aptidão da RNA), um dos objetivos para as rotinas do protótipo.

10. Cálculo do Diâmetro Final da Barra de Aço:

Por fim, uma área de aço pode ficar abaixo do diâmetro mínimo estabelecido pela norma ABNT, que regula e fiscaliza a construção civil no Brasil. Neste caso, substitui-se a A_{sT} total pela mínima $A_{s_{min}}$ da Norma (Eq.4.7), [7], [36].

$$A_{s_{min}} = 0,15 \cdot h \quad (4.7)$$

Onde: $A_{s_{min}}$ = Área mínima de Aço em cm^2 ; h = Altura da Laje.

Resumindo: Se $A_{sT} \geq$ que $A_{s_{min}}$, mantém-se a área A_{sT} e mesmo espaçamento obtido. Se $A_{sT} <$ que $A_{s_{min}}$, adota-se a $A_{s_{min}}$ e mesmo espaçamento obtido.

11. Repete-se as etapas de 1 a 10 para todas as armaduras principais de cada laje, de cada pavimento distinto (Térreo, Garagem, Pavimento Tipo). Ainda há as armaduras *secundárias*, mas estas podem ser calculadas pela armadura mínima $A_{s_{min}}$, e não foram inclusas nos treinos e testes por este motivo.

4.2.5 Levantamento dos Requisitos p/ o Sistema

Utilizando a metodologia de Análise Rápida de Sistemas, consagrada na literatura de Gane [24], neste item foram levantados os **Requisitos de Função** que o protótipo terá, obtidos nas entrevistas com os funcionais. Obs.: Neste trabalho, o próprio autor sendo engenheiro civil, forneceu as informações sobre os requisitos necessários a seguir:

1. Permitir cadastrar ou carregar as tabelas de dados de engenharia, que auxiliam nos diversos cálculos dos dimensionamentos dos elementos estruturais, dos projetos de edifício, armazenando-os numa base de dados;
2. Permitir cadastrar os dados básicos dos projetos de edifício e armazená-los numa base de dados:
 - Dados do Lote de Terra da obra (Nome da obra, Endereço, Medidas do Lote).
 - Dados do Proprietário (Nome, Endereço, telefone)
 - Dados do Engenheiro responsável técnico (Nome, Endereço, telefone, CREA).
 - Dados da Construtora (CNPJ, Nome, Endereço, telefone)

3. Permitir armazenar num banco de dados (BD), os pavimentos das plantas baixas dos edifícios, subordinados aos projetos cadastrados;
4. Permitir cadastrar e armazenar num BD, as coordenadas das colunas locadas nas plantas baixas dos pavimentos (Fig.4.1) e a pedido do operador, gerar automaticamente os elementos estruturais (lajes, vigas e pilares) com essas coordenadas e os dados carregados nos requisitos anteriores;

Planta Baixa do Projeto 4										
	1.5	6.5	9.5	14.7	17.7	22.7				
1.5	5.0x4.0 Quarto1	Swite	3.0x4.0 Elevador / Hall	5.2x4.0 Swite	Quarto1	3.0x4.0 Elevador / Hall	5.0x4.0 Quarto1	Swite		
5.5	WC 5.5x4.4 Copa	Sala	3.0x4.4 Escada / Hall	5.2x4.4 Sala	Copa	WCs 3.0x4.4 Escada / Hall	5.0x4.4 Sala	Copa	WC	
9.9	5.0x3.5 Coz	A.Serv	3.0x3.5 Hall	5.2x3.5 Coz	A.Serv	3.0x3.5 Hall	5.0x3.5 A.Serv	Coz		
	Coz	A.Serv			WC		A.Serv	Coz		
13.4	5.0x4.4 Copa	Sala	3.0x4.4 Vent/llu	5.2x4.4 Sala	Copa	3.0x4.4 Vent/llu	5.0x4.4 Sala	Copa		
17.8	5.0x3.6 Quarto1	Swite	3.0x3.6 WCs WCs	5.2x3.6 Swite	Quarto1	3.0x3.6 WCs WCs	5.0x3.6 Quarto1	Swite		
21.4										

Figura 4.1: Ex. Planta Baixa do Projeto 1 do Conjunto 4

Fonte: Autor

5. Permitir armazenar os dimensionamentos das lajes num BD;
6. Permitir armazenar em BD, os dados de construção das RNAs (topologias, Camadas, Neurônios) seguindo a metodologia das literaturas sobre RNAs tipo perceptron multicamada;
7. Permitir armazenar em BD, os dados de parametrização da e configuração da execução dos treinamentos e testes da Rede neural artificial;
8. Permitir ao Operador, reconfigurar os parâmetros de estrutura da RNA e também os de configuração de execução da RNA;
9. Permitir armazenar em BD e em arquivos no formato "txt" em disco, os resultados dos treinamentos e dos dimensionamentos gerados pela RNA;
10. Permitir que Operador execute e/ou pare, sequencial ou aleatoriamente, um treinamento e/ou teste operacional, com os conjuntos de atributos de saída;

11. Incluir uma rotina para gerar automaticamente o dimensionamento convencional das lajes de cada conjunto de projetos, a pedido do Operador;
12. Permitir ao Operador, inserir e alterar a parametrização de execução da RNA;
13. Permitir escolher quais dados, da sistemática de cálculo de lajes, serão atributos de entrada e saída, gerando automaticamente as amostras com estes dados;
14. Permitir gerar e armazenar em BD, a partir dos dados dos dimensionamentos convencional e via RNA, os cálculos dos orçamentos das alternativas de projeto, com classificação por maior ganho agregado via técnica AHP de decisão Multicritério;
15. Permitir gerar os orçamentos dos projetos dimensionados convencionalmente e por RNA e também configurar as utilidades e os pesos dos critérios na tela, via operador;
16. Permitir exibir na tela, a sistemática dos cálculos das alternativas dos projetos testados (convencional e RNA) e a classificação numérica e gráfica por ordem de maior ganho agregado, via técnica AHP;
17. Permitir gerenciar (incluir, alterar, excluir) em BD, os usuários do programa.

4.2.6 Modelo Lógico de Dados do Sistema

Utilizando os requisitos obtidos no item 4.2.4 anterior, e aplicando-se a metodologia de *Análise Rápida de Sistemas*, Gane [24] orienta 1º, efetuar a modelagem do diagrama de *entidades x relacionamentos* (DER) do projeto. Morelli [34] aponta que o DER será necessário para a construção do BD físico em disco, armazenando e provendo os dados para o sistema (Fig.4.2).

Este modelo de *Banco de Dados* segue os padrões já consagrados em várias literaturas e foi gerado através do software gerenciador de banco de dados (SGBD) *MySQL™*. O significado e uso dos objetos dentro do DER (Fig.4.2) são descritos a seguir:

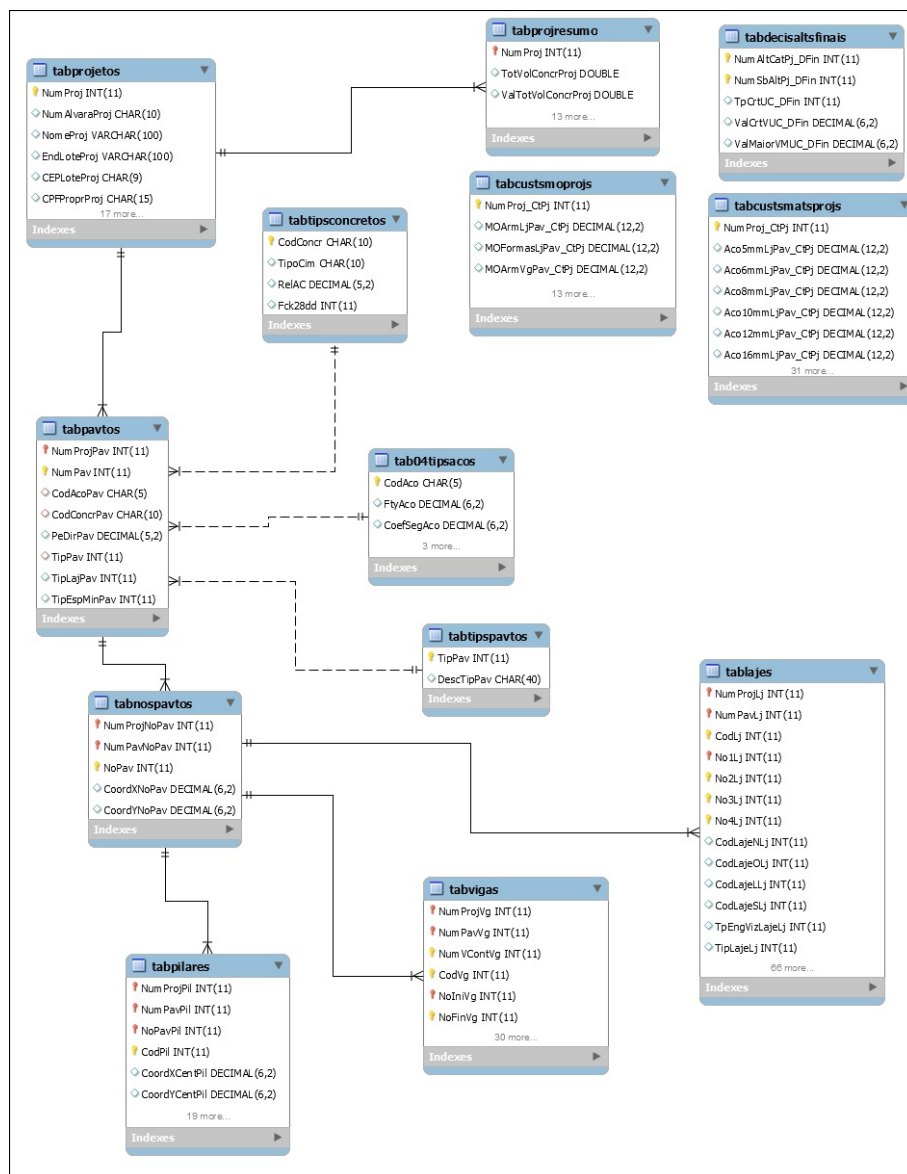


Figura 4.2: Diagrama de Entidade e Relacionamentos (Básico)

Fonte: Autor

- **Caixas Retangulares:** Representam as entidades externas (reais ou abstratas) com seus atributos. São os objetos cujos atributos, o sistema manterá n filas de dados.
- **Linhas com Conectores de Extremidade:** Representam a conexão entre as entidades e sua subordinação. 1 traço indica que esta é mandatória e que 1 registro desta, pode estar em n registros da subordinada. 2 traços indicam que é uma entidade subordinada à outra, e que 1 registro desta, esta ligado à somente 1 da mandatória.

Ex.: $\boxed{Projeto} > | - - - - | < \boxed{Pavimento}$, lê-se que, 1 projeto contém de 1 a n

pavimentos e 1 pavimento pertence a somente 1 projeto, [34].

Obs.: O DER completo do sistema pode ser encontrado na *Documentação do Projeto do Sistema* no link: projeto.rnahplajes@gmail.com

4.2.7 Modelo Lógico de Fluxo de Dados do Sistema

Seguindo a metodologia, vários dos requisitos levantados se relacionam a uma mesma macro-tarefa, podendo ser reunidos num mesmo contexto e em forma de *Diagramas de Fluxos de Dados* (DFD). Os DFDs são representações gráficas condensadas e simplificadas, que permitem a visão dos cenários, agrupando um ou mais requisitos do sistema, [40]. Os DFDs ajudam a enxergar as entidades, os processos (ações), os Depósitos de Dados envolvidos e os Fluxos dos Dados (setas), [24] e [40]. São infográficos simples, sem muitos detalhes, para contextualizar a lógica do processamento e fluxos dos dados transacionados, [24]. Nos próximos itens, os requisitos do sistema serão agrupados em transações comuns em DFDs de nível 1, em macro-funções que serão os módulos do sistema (Fig.4.4 à Fig.4.7). A seguir, sua simbologia resumida (Fig.4.3):

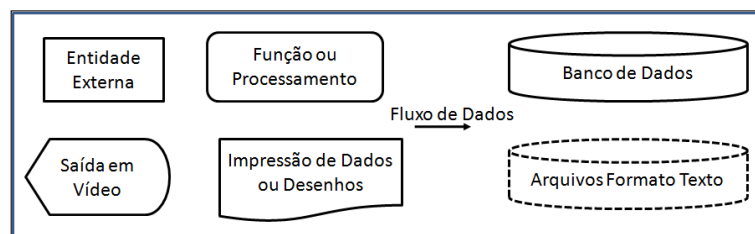


Figura 4.3: Simbologia do Diagrama de Fluxo de Dados

Design: Autor - Fonte: Gane [24]

Obs.: Nesta dissertação, o projeto físico está resumido nas partes essenciais para não estende-la. O projeto completo encontra-se no link: projeto.rnahplajes@gmail.com

DFD 1 - Cadastro das Tabelas Auxiliares de Engenharia

- Cadastrar ou carregar as tabelas de dados de engenharia, para auxiliar na construção dos mapas das plantas baixas e cálculos dos dimensionamentos dos elementos estruturais dos projetos do edifício armazenando-os no BD (Fig.4.4) [24].

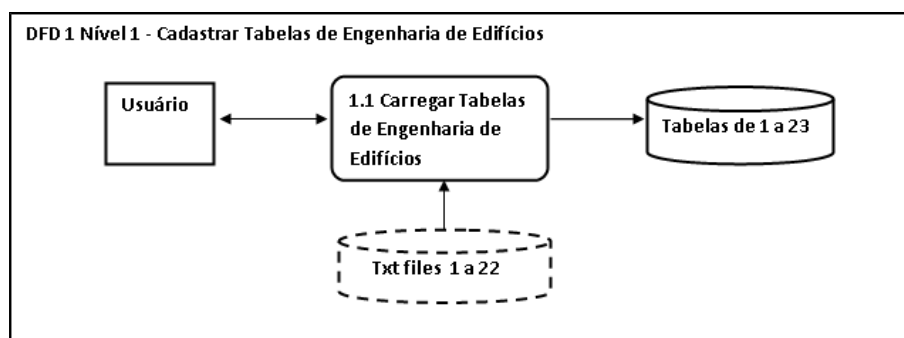


Figura 4.4: DFD 1 - Cadastro das Tabelas Auxiliares de Engenharia

Fonte: Autor

DFD 2 - Cadastro, Mapeamento e Geração dos Elementos de Projeto

- Permitir cadastrar no BD, os dados básicos dos projetos de edifício (Fig.4.5):
 - Dados do Lote de Terra da obra (Nome empreendimento, Endereço, Medidas do Lote);
 - Dados do Proprietário (CPF, Nome, Endereço, telefone);
 - Dados do Responsável Técnico (CPF, CREA, Nome, Endereço, telefone);
 - Dados da Construtora (CNPJ, Nome, Endereço, telefone).
- Permitir armazenar no BD, o pavimentos do edifício das plantas baixas, subordinados aos projetos cadastrados, (Fig.4.5):
 - Coordenadas dos nós dos pilares dos pavimentos (Térreo Garagem, Pavimento Tipo);
 - Nomenclatura, Coordenadas, Dimensões, Aço e Concreto dos Pilares;
 - Nomenclatura, Coordenadas, Dimensões, Aço e Concreto das Vigas;
 - Nomenclatura, Coordenadas, Dimensões, Aço e Concreto dos lajes;
- A pedido do operador, gerar automaticamente os elementos da estrutura (lajes, vigas, pilares) com o dados armazenados.

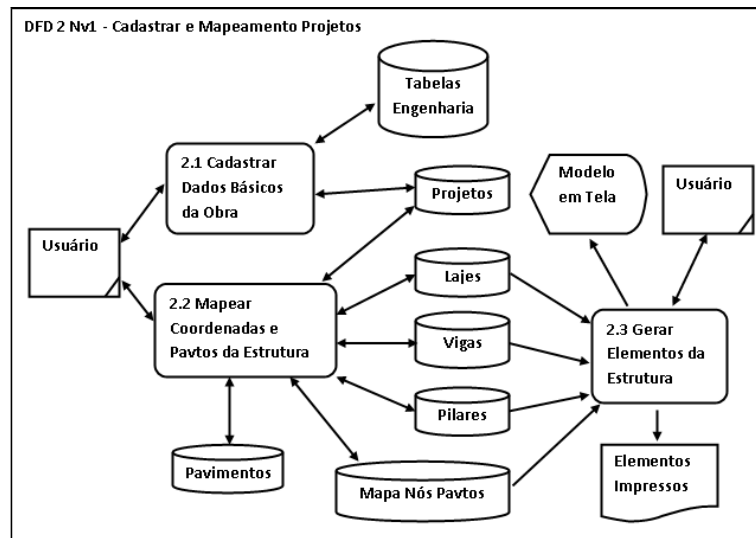


Figura 4.5: DFD Cadastro e Mapeamento e geração dos Elementos Estruturais

Fonte: Autor

DFD 3 - Dimensionamento Convencional e via RNA

- Construir uma GUI para o operador selecionar o projeto e gerar o dimensionamento convencional de elementos estruturais do mesmo (Fig.4.6).
- Calcular automaticamente os dimensionamentos (armaduras, concreto e formas) das lajes, via programação procedural, seguindo a metodologia de engenharia (Fig.4.6);
- Armazenar as tabelas do DER em BD e em arquivos formato texto, os dimensionamentos convencional e via RNA das lajes (Fig.4.6);
- Construir uma GUI para o operador selecionar os atributos de entrada e saída esperados das lajes, bem como selecionar os grupos de projetos para os treinamentos e testes (Fig.4.6);
- Construir uma GUI para o operador reconfigurar os parâmetros de estrutura da RNA e também os de configuração da execução da mesma (Fig.4.6);
- Armazenar as topologias, parâmetros para configuração e execução de todos os treinamentos e testes das RNAs (Fig.4.6);
- Permitir ao operador via GUI, executar e/ou parar, sequencial / aleatoriamente, um treino e teste (Fig.4.6);

- Construir rotinas para gerar automaticamente o dimensionamento dos elementos estruturais através dos resultados de treinamentos e testes dos Projetos selecionados pelo operador (Fig.4.6);
- Permitir armazenar no BD, e em arquivos no formato "txt" em disco, os resultados dos dimensionamentos nos treinamentos (armaduras, concreto e formas) das lajes, gerados via convencional e por RNA (Fig.4.6);

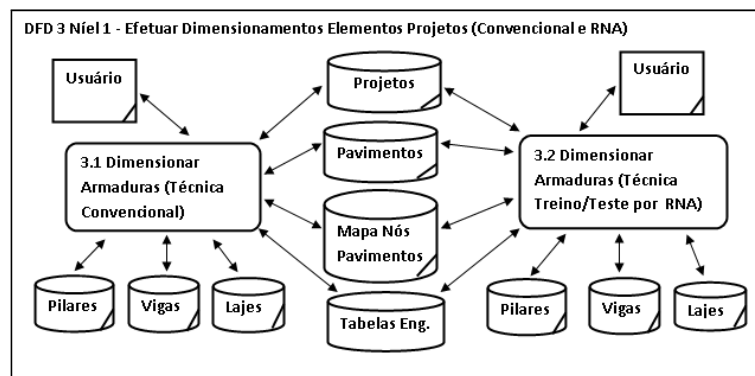


Figura 4.6: DFD Dimensionamento de Lajes - Convencional e por RNA

Fonte: Autor

DFD 4 - Orçamento e Classificação dos Projetos via AHP

- Construir uma GUI para permitir o operador configurar as utilidades, os % dos pesos dos critérios;
- Permitir ao operador gerar e armazenar no BD, a partir dos dimensionamentos convencional e via RNA, os orçamentos, a tabela *Hierárquica de Alternativas x Critérios* e a tabela *Cruzada de Pesos Par a Par* (Fig.4.7);
- A *Tabela Hierárquica de Alternativas x Critérios* deve ter uma coluna indicando o *ganho agregado* final dos projetos (Fig.4.7).
- Gerar os gráficos de barras das classificações (convencional e RNA) por ordem do % de ganho agregado, dos respectivos projetos preditos por RNA, (Fig.4.7);

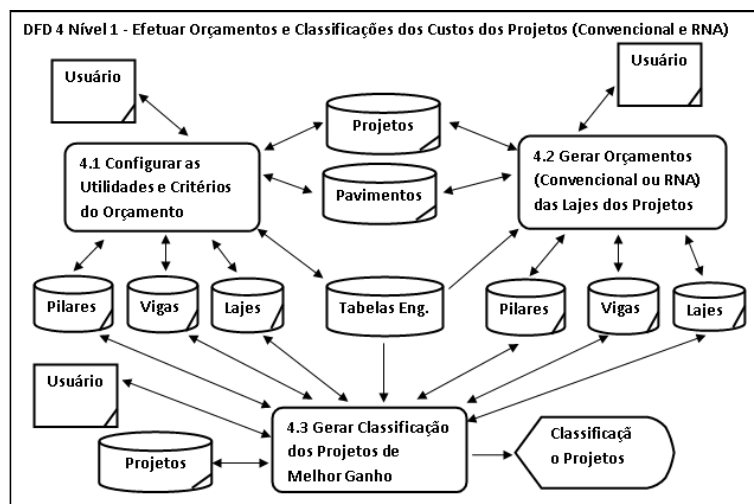


Figura 4.7: DFD Geração dos Orçamentos e Classificações dos Projetos

Fonte: Autor

DFD 5 - Impressão das Plantas dos Projetos e Memorial de Cálculo

Este módulo 5 não será implementado devido às limitações de tempo do cronograma.

DFD 6 - Gerenciamento e Manutenção dos Usuários do Sistema

- Construir uma GUI para o operador cadastrar e armazenar no BD, os dados dos usuários do sistema (Fig.4.8);
- Permitir ao operador via GUI, efetuar manutenção nos dados dos usuários do sistema (Fig.4.8).
- Permitir ao operador via GUI, alterar o perfil dos usuários do sistema (Fig.4.8).

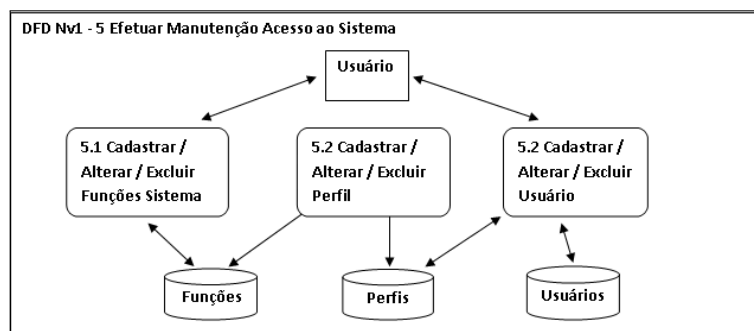


Figura 4.8: DFD Administração de Usuários do Sistema

Fonte: Autor

4.3 Projeto Físico do Sistema

4.3.1 Desenvolvimento do Sistema Protótipo

O desenvolvimento do protótipo RNAhpLajes foi dividido em 3 fases. A 1ª fase foi a construção dos módulos básicos de engenharia do sistema: a) 2.1 (Fig.5.1b), 2.2 (Fig.5.1c), 3.1 (Fig.5.1d). Foram desenvolvidos antes de o autor poder partir para os módulos com algoritmos de RNA e foram fundamentais criando os alicerces do sistema e a preparação dos Datasets dos dimensionamentos das lajes, a serem utilizados na fase 2 de construção do sistema.

Na 2ª fase, foram desenvolvidos programas experimentais para assimilação e aperfeiçoamento do algoritmo de RNA. Com o algoritmo, foi criado o módulo 3.2 (Fig.5.2e), *Dimensionamento via RNA*, para comparar com o convencional gerado pelo módulo 3.1 da fase 1.

A 3ª fase final foi o desenvolvimento do módulo 3.3 (Fig.5.2f), para gerar os *Orçamentos e Classificações dos Projetos de Melhor Ganho Agregado via técnica AHP*, com os dados dos dimensionamentos da lajes nas fases 1 e 2.

4.3.2 Módulos do Sistema Protótipo - Fase 1 - Básicos

4.3.2.1 Módulo 2.1 Cadastro Básico de Projetos

Permite cadastrar os dados básicos dos projetos, alimentando a tabela de projetos no BD do sistema. A tela do módulo 2.1 pode ser vista no capítulo 5 (Fig.5.1b), [28].

4.3.2.2 Módulo 2.2 Mapeamento das Plantas dos Projetos

O desenvolvimento do módulo 2.2 foi um dos mais complexos, as rotinas envolveram muita lógica e geometria plana para automatizar o mapeamento das coordenadas das lajes dos projetos, o que manualmente seria improdutivo. A tela do modulo 2.2 pode ser encontrada no final desta dissertação (Fig.5.1 apêndice C), [28]. Das tabelas, 7 auxiliares utilizadas nos módulos 2.1 e 2.2 foram carregadas manualmente via SQL no BD, pois tiveram pouquíssima manutenção.

Mapeamento das Coordenadas das Plantas Baixas dos Projetos

Para alimentar os dados do módulo 2.2, foram gerados 6 conjuntos de projetos de

edifícios, com suas respectivas *Plantas Baixas*. A partir das plantas de cada projeto, foram gerados via planilha, os arquivos em formato TXT, com as coordenadas dos nós dos pavimentos térreo, garagem e tipo. Logo a seguir, o mesmo 2.2 permitiu a carga destes arquivos de cada projeto, e em seguida, a geração automática dos elementos (nós, pilares, vigas e lajes). A seguir, 2 exemplares das plantas baixas (Figs.4.9a e b), e todas as plantas dos Cjs.2 a 6 constam nos apêndices B.

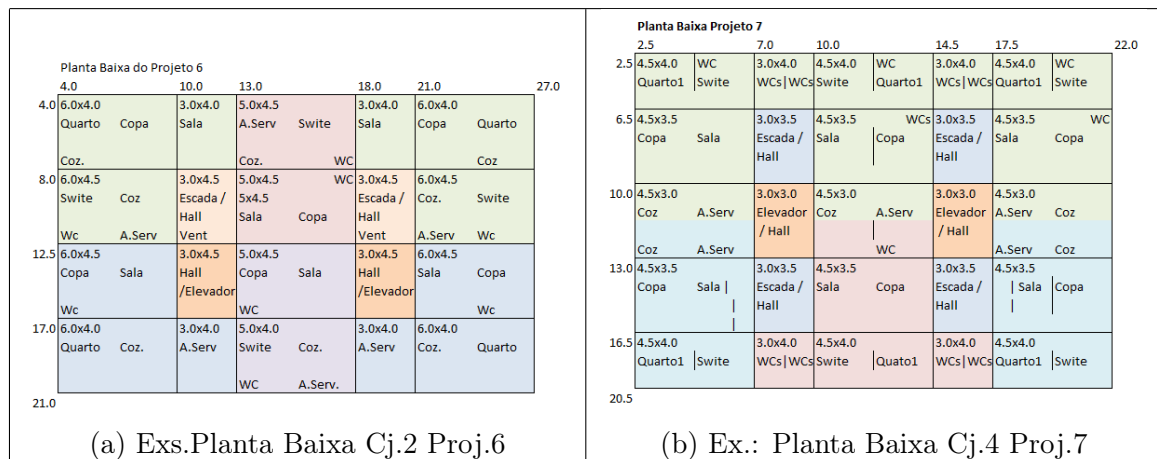


Figura 4.9: Exs. Plantas Baixas - Conjs Projs. para Dimensionamento

Fonte: Autor

Obs.: As *plantas baixas* foram construídas como "croquis dimensionados simplificados" para evitar consumo de cronograma com ferramenta CAD além do previsto, pois os croquis atenderam plenamente à rotina de mapeamento. A seguir, o resumo da quantidades de amostras (lajes) para os Treinamentos e Testes no dimensionamento via RNA (Tabela 4.4).

Conj.	Treino	Treino - NºProj.(Qt. Lajes x 3) = Total Lajes	Teste - Nº Proj. (Qt. Lajes x 3)
1	1	$(6x3 + 12x3 + 9x3 + 25x3) = 156$	$5(6x3)$
2	2	$(6x3 + 12x3 + 9x3 + 25x3) = 156$	$5(6x3), 6(20x3)$
3	3	$1(12x3)+2(12x3)+3(25x3)+4(25x3)+5(20x3)+6(20x3)+7(20x3) = 402$	$8(20x3), 9(25x3), 10(25x3)$
4	4	$1(20x3)+2(20x3)+3(25x3)+4(25x3)+5(20x3)+6(20x3)+7(25x3) = 465$	$8(25x3), 9(20x3), 10(20x3)$
5	5	$1(20x3)+2(20x3)+3(25x3)+4(25x3)+5(20x3)+6(20x3)+7(25x3) = 465$	$8(25x3), 9(20x3), 10(20x3)$
6	6	$1(20x3)+2(20x3)+3(25x3)+4(25x3)+5(20x3)+6(20x3)+7(25x3) = 465$	$8(25x3), 9(20x3), 10(20x3)$

Tabela 4.4: Conjs. Projetos Treino/Teste x Quant.de Lajes

Fonte: Autor

Obs.: Para fins de quantidade na tabela 4.4, o n^o de lajes do pavimento está multiplicado por 3 (Térreo, Garagem, Tipo), pavimentos diferentes num edifício padrão.

4.3.2.3 Módulo 3.1 Dimensionamento Convencional das Lajes

O módulo 3.1 (Fig.5.1d) teve o pseudocódigo construído com base na sistemática de dimensionamento de lajes indicada no capítulo 2. Com a carga e mapeamentos dos 6 conjuntos de projetos, já efetuados no módulo 2.2, os respectivos dimensionamentos foram produzidos no módulo 3.1, pelo operador. A saída do dimensionamento foi feita na tela do 3.1 como listagem, mas o operador também pôde gravá-la em arquivo formato "TXT". Um exemplo da tela do 3.1 com um *dimensionamento convencional* das lajes está no capítulo 5 de resultados (Fig.5.1d), [28] e [41].

A sequência construtiva das rotinas do módulo 3.1, baseada nos requisitos do sistema, está listados a seguir, conforme as orientações de Botelho [11] e Uberaba [48]:

1. Obter e guardar no BD, as variáveis com os dados básicos para dimensionamento: dimensões x e y da laje; F_{ck} = Resistência característica do concreto $28dd$; F_{yd} = Resistência característica do aço da armadura; cl = Classe do ambiente do terreno; c_b = Espessura mínima (cm) de cobertura da armadura; Tabelas de 4 a 11 da ABNT [7] de parâmetros e coeficientes de engenharia;
2. Calcular a Espessura Geral das Lajes (**Altura h**) dos pavimentos Térreo, Garagem e Pavimento Tipo;
3. Calcular a espessura (**Altura h**) geral para todas as lajes desses pavimentos do edifício $h_{min} = \max L_1, \dots, L_n$, onde h_{min} = maior altura dentre as lajes do pavimento (Altura h mínima unificada);
4. Determinar a **direção das armaduras** da laje (em 1 ou 2 direções) via **Índice de Proporcionalidade ϵ** , Obs.: A direção y é na horizontal e a x na vertical;
5. Das tabelas *Czerny* pré-carregadas no BD, obter o tipo de engastamento de cada laje por pavimento, coletar os índices minoradores dos $MF(+)$ (meio de vão) e dos $MF(-)$ (extremidades) nas armaduras em 2 direções). Para as lajes armadas em 1, buscar na tabela *Czerny*, não sendo necessário o cálculo do $K6$;
6. Calcular as **Cargas Distribuídas** sobre as lajes, de (**peso próprio q_{pp} , do revestimento q_{rv} e as acidentais q_{ac}**) utilizando-se a tabela de *Cargas Acidentais*, [7];
7. Calcular os **Momentos Fletores** nas direções x e y das armaduras principais conforme o tipo de engastamento e com os dados dos itens de 1 a 6.

8. Calcular o coeficiente $K6$ com os dados obtidos nos itens de 1 a 7;
9. Com o $K6$, localizar o parâmetro $K3$ para calcular a área de aço das armaduras principais (+/-) e secundárias (+/-), nas direções x e y das lajes de cada pavimento;
10. Com o $K3$, calcular as áreas de aço para todas as armaduras principais positivas (PPX / PPY) e negativas (PNX / PNY).
11. Com as áreas totais de aço A_sT de cada armadura de cada laje, entrar na tabela de *Diâmetros x Espaçamentos* de armaduras, onde se deve localizar o diâmetro e o espaçamento (Tab.C.2a) com área igual ou imediatamente acima da procurada.
12. Calcular a metragem linear das barras das armaduras.
13. As armaduras secundárias positivas (SPX / SPY) e negativas (SNX / SNY) são calculadas pelo valor de *armadura mínima*, conforme norma NBR6118 [7];
14. Calcular o volume de concreto (m^3) consumido pelas lajes dos pavimentos;
15. Calcular da quantidade de formas (m^2) de suporte das lajes.

Obs.: A sistemática (resumida acima) é a padrão para o dimensionamento convencional de lajes, encontrado nas literaturas e também em softwares de mercado, e seguindo as normas da ABNT, [7], [11], [48], [28], [14] e [41].

Importante: As tabelas de 4 a 11 de engenharia não foram incluídas neste trabalho por consumirem quantidade excessiva de páginas, ma podem ser encontradas nas literaturas de Silva [44] e da ABNT [7].

4.3.3 Módulos do Sistema Protótipo - Fase 2 - RNA

O desenvolvimento do protótipo foi retomado na 2^a fase, recebendo os algoritmos mais avançados do programa preliminar de RNA, sendo este adaptado às rotinas do protótipo, com diversas melhorias e automações. Concluído o módulo 3.2, foram iniciadas as prospecções pelas melhores topologias e parâmetros. No módulo 3.1 (fase 1) foram gerados os datasets para dimensionamento convencional, utilizados também no 3.2 no dimensionamento via RNA.

Escolha da Abordagem de Processamento do Problema:

Após criar e testar 2 rotinas de RNA com os métodos **Classificação de Padrões** e **Aproximação de Função**, esta última funcionou para a simulação da função, mas

gerou o efeito **esquecimento catastrófico**, citado em Braga [12], onde na fase de teste operacional, a RNA esqueceu as aproximações aprendidas do início e meio do treinamento. A rotina de **Classificação de Padrões** foi a escolhida, pois generalizou as saídas y da função objetivo com boas convergências, sem perder o aprendizado nos testes, [44].

4.3.3.1 O Desenvolvimento do Módulo 3.2

Prosseguiu-se com o desenvolvimento do módulo 3.2 de dimensionamento das lajes via rotinas de RNA PMC conforme requisitos, utilizando os modelos matriciais das plantas baixas dos conjuntos de projetos mapeados na fase 1, com os devidos treinos e testes.

A *função-objetivo*, se bem generalizada pela RNA, identifica os diâmetros comerciais das armaduras, via assimilação da sistemática do dimensionamento convencional das lajes, tentando a máxima aproximação das saídas calculadas y_c com as esperadas y_e (os diâmetros das armaduras (+) e (-) principais e secundárias), [44]. A ideia foi maximizar a resistência da laje, mas também minimizando a quantidade de material utilizado, com a RNA, tentando escolher o maior diâmetro imediatamente acima do exigido, [11] e [7]. A estratégia adotada para a geração da *função-objetivo* foi transformar as y_c da camada de saída, num conjunto de sinais formando 1 Byte com 5 bits, que ao ser traduzido para decimal, pode gerar os 6 valores de diâmetros das barras de aço comerciais (5, 6, 8, 10, 12, 16mm).

Os pseudocódigos recomendados por Silva [44] e Ludwig [31] foram apenas uma ideia básica inicial, muito resumida e simplificada, pois quando do desenvolvimento na prática, o volume de programação, as incongruências da *Lógica x Dados* aumentou muito, expondo então, os detalhes e problemas lógicos não documentados, que surgiam e que foram sendo solucionados durante a programação, com mais estudos nas literaturas de Braga [12], [30], [8] e em outros trabalhos. Com os diversos ajustes e correções e novas lógicas, o algoritmo de RNA tornou-se mais avançado e completo. Esta fase consumiu muito cronograma, e como não se utilizou funções prontas de **ML**, foi um desafio construir as rotinas do zero, mas um ótimo aprendizado sobre a lógica matemática não trivial das RNAs.

Da ideia básica, novas rotinas foram geradas (*Carga Rápida de Datasets via arquivos TXT, Prospecção Manual ou Automática de Treinos e Testes e Armazenamento dos Resultados em BD*), pela necessidade de ganho de desempenho e precisão, uma vez que o volume de lajes (amostras) e projetos, a conferir e gravar, aumentou muito (> 400). Essas rotinas ampliaram o protótipo em otimização, performance e automação, [31], até atingir a versão funcional 3.3.9 com resultados eficazes. A seguir, os pseudocódigos de

Treino (Fig.4.10) e Teste Operacional (Fig.4.11):

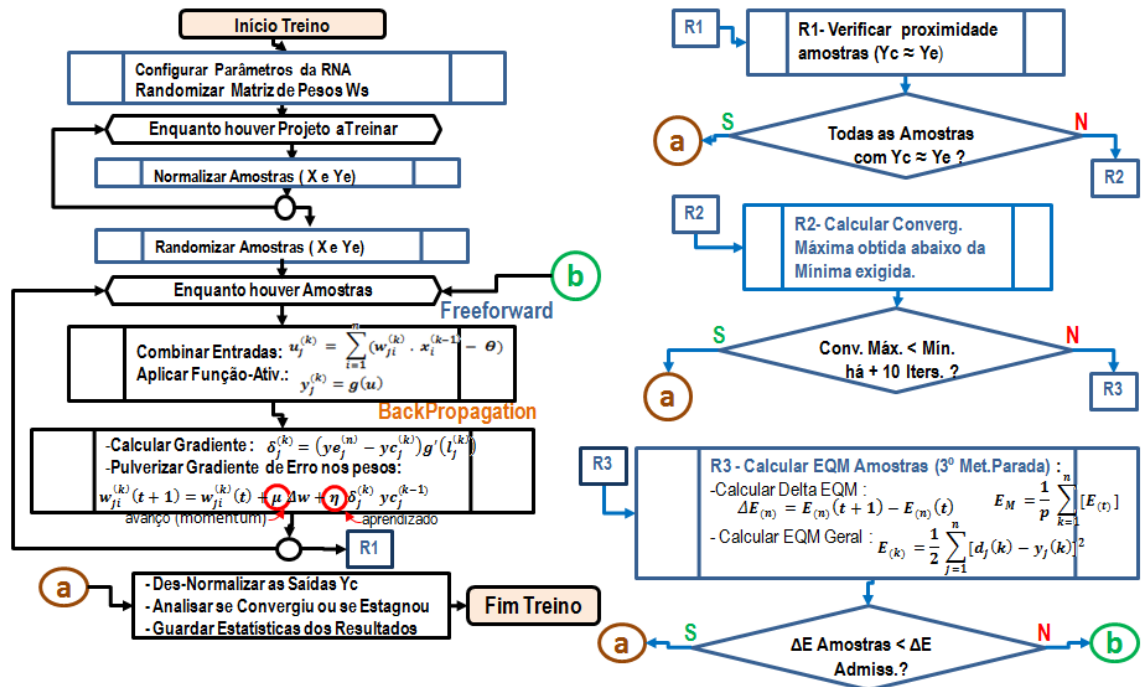


Figura 4.10: Pseudo-Código de Treinamento (aperfeiçoado) usado nas Rotinas de RNA

Fonte: Autor

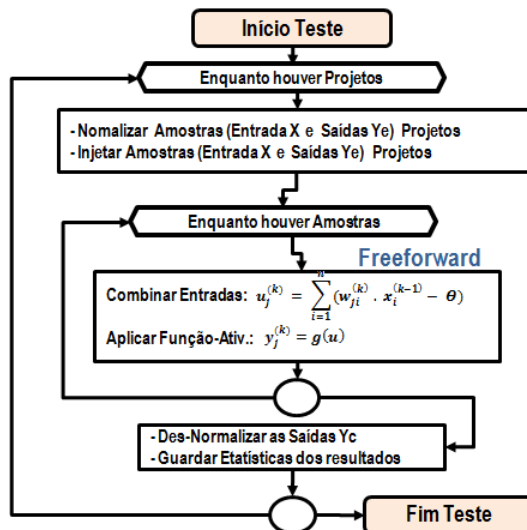


Figura 4.11: Pseudo-Código de Teste (aperfeiçoado) usado nas Rotinas de RNA

Fonte: Autor

Importante: Na prática, o EQM não foi o método mais preciso de parada, e após estudos em Braga [12], a rotina de parada foi aperfeiçoada para uma versão mais eficaz,

com 3 métodos (ver Fig.4.10): 1º) Por conferência exata das amostras; 2º) Por longa estagnação da convergência abaixo da exigida; 3º) Pelo Erro Quadrático Médio (EQM).

4.3.3.2 Etapa de Prospecção de Treinos e Testes

Esta etapa foi vital, e conforme orientações nas literaturas, [8], [26], [31] e [44], foram feitas mais de 40 prospecções (treinamentos e testes) para cada conjunto de 1 a 6 de projetos, coletando-se as estatísticas para se chegar às melhores topologias e parâmetros de execução, com as maiores convergências e o menor tempo possível, [17],[20].

As *Topologias* de maiores convergências (quantidade e correlação com o problema). Os *Aceleradores de Aprendizado* (η) e (μ) de *avanço* são parâmetros de processamento da RNA, que influenciam no % de convergência. Na Tabela 4.5 a evolução das topologias e aceleradores prospectados nos Cjs.1 a 6 de projetos. A Tabela 4.6 apresenta a evolução das quantidades de atributos dos conjuntos de *Entradas x* e *Saídas esperadas y_e*, estes são os **Datasets** que "ensinam" a RNA a aproximar os pesos w da *função generalizada* o mais próximo da *unção-solução*.

Conj.	Treino / Teste	Projs. Treino / Teste	Nº ents. / Nº nros / Nº saídas	Top. Melhor Converg.	Acels. Melhor Converg.
1	1	Tr(1 a 4) / Ts(5)	9 / 8 a 12 / 5	09-12-05	η 0.10 μ 0.10
2	2	Tr(1 a 4) / Ts(5)	9 a 13 / 8 a 12 / 5	13-12-05	η 0.10 μ 0.05
3	3	Tr(1 a 7) / Ts(8 a 10)	13 a 14 / 10 a 12 / 5	14-10-05	η 0.10 μ 0.05
4	4	Tr(1 a 7) / Ts(8 a 10)	14 / 10 a 12 / 5	14-10-05	(+) η 0.05 μ 0.05 e (-) η 0.03 μ 0.03
5	5	Tr(1 a 7) / Ts(8 a 10)	15 / 10 a 12 / 5	15-10-05	(+) η 0.05 μ 0.05 e (-) η 0.03 μ 0.03
6	6	Tr(1 a 7) / Ts(8 a 10)	15 / 10 a 14 / 5	15-12-05	η 0.10 μ 0.03↓

Tabela 4.5: Conjuntos Projs. vs Topologias Prospectadas vs Adotadas
Fonte: Autor

Tabela de Atributos Significativos utilizada para Prospecção das Topologias e Aceleradores da RNA								
Col.Tab.	Atributos de Entrada	Descrição Atributos	Cj1	Cj2	Cj3	Cj4	Cj5	Cj6
1	NumPavLj	Nº Pavto	-	-	-	-	E	E
7	CodLajeNLj	Nº Laje a Norte	-	E	E	E	E	E
8	CodLajeOLj	Nº Laje a Oeste	-	E	E	E	E	E
9	CodLajeLLj	Nº Laje a Leste	-	E	E	E	E	E
10	CodLajeSLj	Nº Laje a Sul	-	E	E	E	E	E
12	TipLajeLj	Tip. Comodo da Laje	-	-	E	E	E	E
15	ComprXLj	Largura	E	E	E	E	E	E
16	ComprYLj	Comprimento Laje	E	E	E	E	E	E
17	AlturahZLj	Espessura da Laje	E	E	E	E	E	E
18	DirecArmLj	Qt. Direções Armadura	E	E	E	E	E	E
19	CgDistPesPrLj (adic.Atrb.21)	Carga Distrib. Peso Próprio	+	+	+	+	+	+
20	CgDistPesRevLj (adic.Atrb.21)	Carga Distrib. Peso Revest.	+	+	+	+	+	+
21	CgDistPesActLj (19 + 20 + 21)	Carga Distrib. Acidental	E	E	E	E	E	E
39	CdConcrLj	Fck do Concreto	E	E	E	E	E	E
40	CdAcoArmLj	Fyd do Aço	E	E	E	E	E	E
45	AreAcoArmPPxLj	Area de Aço Armad. Dir. X	E	E	E	E	E	E
46	DmAcoArmPPxLj	Diametro Armadura Dir. X	S	S	S	S	S	S
47	EspAcoArmPPxLj	Espaçamento Armad. Dir. X	E	E	E	E	E	E
Total de Atributos			9	13	14	14	15	15

Legenda: E = Entrada Xi S = Saída esperada Ye

Tabela 4.6: Lista de Atributos das Amostras Entrada - Conjuntos de Projetos
Fonte: Autor

4.3.3.3 Fase de Consolidação das Melhores Topologia e Parâmetros

A seguir, os melhores **datasets** e parametrizações obtidos.

1. **Atributos de Entrada:** Indicados na página anterior (Tab.4.6).
2. **Funções de Ativação**, conforme Haykin [26] e Silva [44] e em Favan [19]:
Tangente Hiperbólica → Camada(s) Intermediária(s);
Linear → Camada de Saída.
3. **Projetos e Topologias com melhor Convergência:**
A última coluna à direita na tabela (Tab.4.5) lista as Topologias de maiores % de convergência dos conjuntos de projetos, confirmadas com resultados semelhantes em várias pesquisas tais como em Abdalla [4], Favan [19] e Manzan [32].
4. **Nº de Neurônios na camada Intermediária:**
Conforme a evolução do nº de 8 a 14 de neurônios nas prospecções, a quantidade 10 teve os maiores % de convergência, seguida da 12, compatíveis com o mínimo calculado pela técnica Witten-Flank em Silva [44] e resultados em Favan [19].
5. **Aceleradores com os Maiores % de Convergência:**
Os melhores Aceleradores foram η (0,10 e 0,5) e μ (0,05 a 0,03), fixos aderentes às sugestões de Silva [44]. E os variáveis η (0,10 ↓) e μ (0,03 ↓), conforme Braga [12], sendo encontrados resultados semelhantes em Abdalla [4] e Manzan [4].
6. **Percentual Mínimo de Convergência Prospectado:**
As Convergências % mínimas utilizadas para as Armaduras (+) foram 75%, 85% e 95% e para as Armaduras (-) foram 65% e 75%.
7. **Nº Máximo Pretendido de Iterações:**
De 1 a 10, tal qual Favan [19] também obteve prospecções com até 10, por topologia.
8. **Nº de Prospecções de Treinamento e Testes:**
Foram 400 ou mais. Favan [19] também efetuou prospecções com até 10 treinos por topologia. Manzan [32] também efetuou 400 prospecções em sua pesquisa.
9. Erro Médio Quadrático Admissível: $\delta EQM \leq 0,01$

4.3.4 Módulo 3.3 - Orçamento e Classificação via AHP

Dimensionadas e armazenadas as armaduras das lajes dos pavimentos, de todos os conjuntos de projetos, via convencional (módulo 3.1) e por RNA (3.2) prosseguiu-se para o 3.3, onde também foram geradas rotinas do zero, para orçamentação e classificação dos projetos, utilizando os estudos na literatura e pesquisas. Os Dados da tabela de lajes (Quilometragem das Barras de Aço; Volume de Concreto (m^3); Quantidade de Formas (m^2)) foram utilizados para gerar os orçamentos dos projetos de Teste e classificá-los por ordem decrescente de *ganho agregado* (o menor custo). O 3.3 tem a função de auxiliar o engenheiro e patrocinadores, a chegarem na melhor alternativa de projeto a se investir.

Os procedimentos a seguir, descrevem a execução de 2 rotinas. A 1ª gerou o orçamento (métodos convencional e RNA). A 2ª, logo em seguida à 1ª, classifica os projetos (convencional e RNA) por melhor ganho. Os resultados dos orçamentos e classificações dos conjuntos 3 a 6 de projetos estão no capítulo 5.

4.3.4.1 Proced.1 - Orçamento dos Projetos de Teste

1. Na tela do Módulo 3.3 (Fig.5.2b), foi marcada a opção *Convencional* (ou *RNA*) e acionado o botão para efetuar o cálculo dos orçamentos das armaduras das lajes, de todos os pavimentos, de todos de todos projetos (8 a 10) dos conjuntos 3 a 6, já dimensionados via convencional (ou RNA), no módulo 3.1 (e 3.2).
2. A direita da tela (módulo 3.3) (Fig.5.2b) foram configurados os valores das utilidades dos critérios (Orçamento, Acabamento, Margem de Lucro e ROI) indicando também, o tipo de normalização aplicada aos mesmos, se 1(ganho) ou 0(perda). A cada conjunto de Projetos (8 a 10), a configuração foi incluída via botão [Atualizar].

Obs.: Nos orçamentos está incluso o somatório dos custos das lajes dos pavimentos dos projetos de Teste de cada Conj.(3 a 6) contendo: Custo da quilometragem das Arms. Principais e Secundárias, (+ e -); Custo do Volume Total de Concreto; Custo da quantidade de formas (sem os custos: escoramento, pontaletes e pregos).

4.3.4.2 Proced.2 - Classificação Projetos de Teste - Melhor Ganho Agregado:

1. Após o orçamento das lajes dos projetos, aciona-se o botão [Classificar Projetos].
2. As tabelas *Hierárquica Principal de Alternativas x Critérios* e a *Cruzada de Peso x Peso*, calculadas no módulo 3.3, conforme metodologia descrita (cap.2), sobre AHP,

[21]. A seguir, são visualizados alguns exemplares dos cálculos dos projetos 8 a 10 (Conj.5), (Tabela 4.7a) para o orçamento por dimensionamento convencional e (Tabela 4.7b) por RNA. A tabela *Cruzada de Pesos por Alternativa* (Tab.4.7c) para o orçamento por dimensionamento convencional e por RNA (Tab.4.7d).

3. A Tabela *Hierárquica Principal* gera o gráfico *Classificação dos Projetos por ordem de ganho agregado* das tabelas do módulo 3.3 (Exs.: Tabelas 4.12a e b).

- Resumo: 1º, executa-se o orçamento e classificação com opção "convencional". Num 2º passo, muda-se na tela a opção para "RNA", repete-se os itens 1 e 2. Para ambos, convencional e RNA, o 3.3 permite redefinir os % de relevância dos critérios, e repetir os 2 procedimentos para nova *classificação dos Projetos*.

Tabela Matriz Hierárquica AHP								
Projeto	CodCrt	CustoArmLjs%	UtiliVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltpj%	
8	1	220.416,07	1,00	60	24,85	-	19,08	
8	2		1	20,00	40	37,28	-	19,08
8	3	100	32,26	70	21,30	-	19,08	
8	4	220.416,07	27,17	90	16,57	-	19,08	
9	1	284.989,22	1,00	60	24,85	-	27,85	
9	2		2	40,00	40	37,28	-	27,85
9	3	100	32,26	70	21,30	-	27,85	
9	4	284.989,22	35,13	90	16,57	-	27,85	
10	1	278.101,41	1,00	60	24,85	-	28,97	
10	2		2	40,00	40	37,28	-	28,97
10	3	110	35,48	70	21,30	-	28,97	
10	4	305.911,55	37,71	90	16,57	-	28,97	

(a) Tab. Matriz Alts. x Critérios (Conv.)

Tabela Matriz Hierárquica AHP								
Projeto	CodCrt	CustoArmLjs%	UtiliVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltpj%	
8	1	211.240,49	1,00	60	24,85	-	19,10	
8	2		1	20,00	40	37,28	-	19,10
8	3	100	32,26	70	21,30	-	19,10	
8	4	211.240,49	27,28	90	16,57	-	19,10	
9	1	271.866,90	1,00	60	24,85	-	27,85	
9	2		2	40,00	40	37,28	-	27,85
9	3	100	32,26	70	21,30	-	27,85	
9	4	271.866,90	35,11	90	16,57	-	27,85	
10	1	264.762,49	1,00	60	24,85	-	28,95	
10	2		2	40,00	40	37,28	-	28,95
10	3	110	35,48	70	21,30	-	28,95	
10	4	291.238,74	37,61	90	16,57	-	28,95	

(b) Tab. Matriz Alts. x Critérios (RNA)

Tabela Cruzada - Calculo dos Pesos Individuais das Alternativas						
	CustoArm	TpAcab	MargLucro%	ROI\$	PesIndCrt%	PesIndCrtNm%
CustoArm	1,00	0,67	1,17	1,50	4,33	0,25
TpAcab	1,50	1,00	1,75	2,25	6,50	0,37
MargLucro	0,86	0,57	1,00	1,29	3,71	0,21
ROI	0,67	0,44	0,78	1,00	2,89	0,17
Somat-->	4,02	2,68	4,69	6,04	17,44	

(c) Tab. Pesos p/ Alternativa (Conv.)

Tabela Cruzada - Calculo dos Pesos Individuais das Alternativas						
	CustoArm	TpAcab	MargLucro%	ROI\$	PesIndCrt%	PesIndCrtNm%
CustoArm	1,00	0,67	1,17	1,50	4,33	0,25
TpAcab	1,50	1,00	1,75	2,25	6,50	0,37
MargLucro	0,86	0,57	1,00	1,29	3,71	0,21
ROI	0,67	0,44	0,78	1,00	2,89	0,17
Somat-->	4,02	2,68	4,69	6,04	17,44	

(d) Tab. Pesos p/ Alternativa (RNA)

Tabela 4.7: Matrizes Principais e Cruzadas de Pesos/Pesos
Fonte: Autor

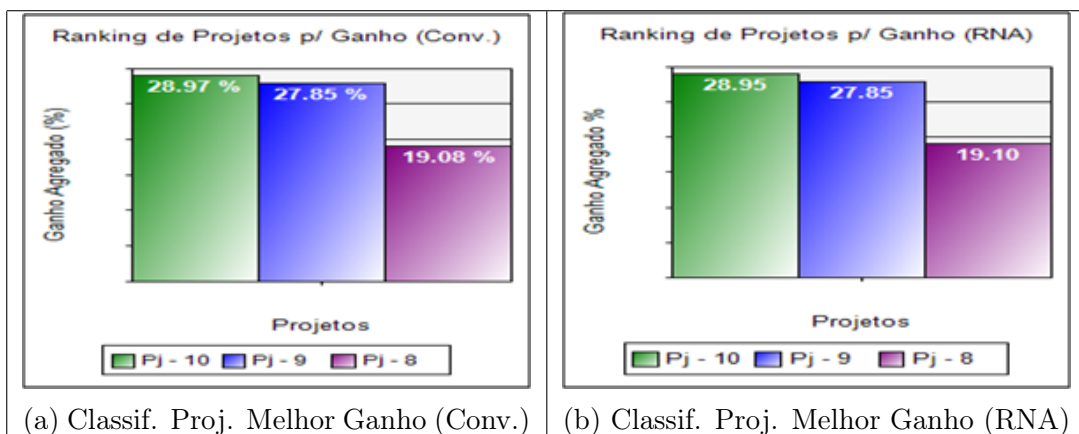


Figura 4.12: Gráficos Classificação de Projetos por Ganho Agregado
Fonte: Autor

Capítulo 5

Resultados e Discussões

5.1 Estrutura dos Resultados Obtidos

Este capítulo contém os resultados deste trabalho e apresenta os dados, tabelas consolidadas, estatísticas em gráficos para melhor compreensão e comparação.

1. Módulos Desenvolvidos do *Sistema Protótipo*;
2. Resultados do Dimensionamento *Convencional e RNA* dos Conjs.2 a 6 de Projetos.
3. Lista das *Melhores Topologias e Parametrizações* obtidas nas Prospecções.
4. Resumo da *Evolução da Convergência* dos Dimensionamentos das Lajes dos Projetos, testados via RNA e sua aproximação com o método Convencional.
5. *Classificações via AHP* (Convencional x RNA) dos projetos por ordem de *Melhor Ganho Agregado*.
6. Resumo da *Evolução da Precisão de Classificação* (Convencional x AHP) dos Conjuntos de Projetos.

5.2 Módulos Desenvolvidos do Protótipo RNAhpLajes

Lembrando que o desenvolvimento do protótipo foi dividido em 3 fases, na fase 1, foi produzida a *Tela Principal do Sistema* (Fig.5.1a) e os módulos 2.1 Cadastro de Projetos (Fig.5.1b), 2.2 Mapeamento das Plantas Baixas dos Projetos (Fig.5.1c), 3.1 Dimensionamento via Engenharia Convencional (Fig.5.1d). Estes módulos subsidiam os dados para as fases 2 e 3 do protótipo. A seguir, as telas destes módulos:

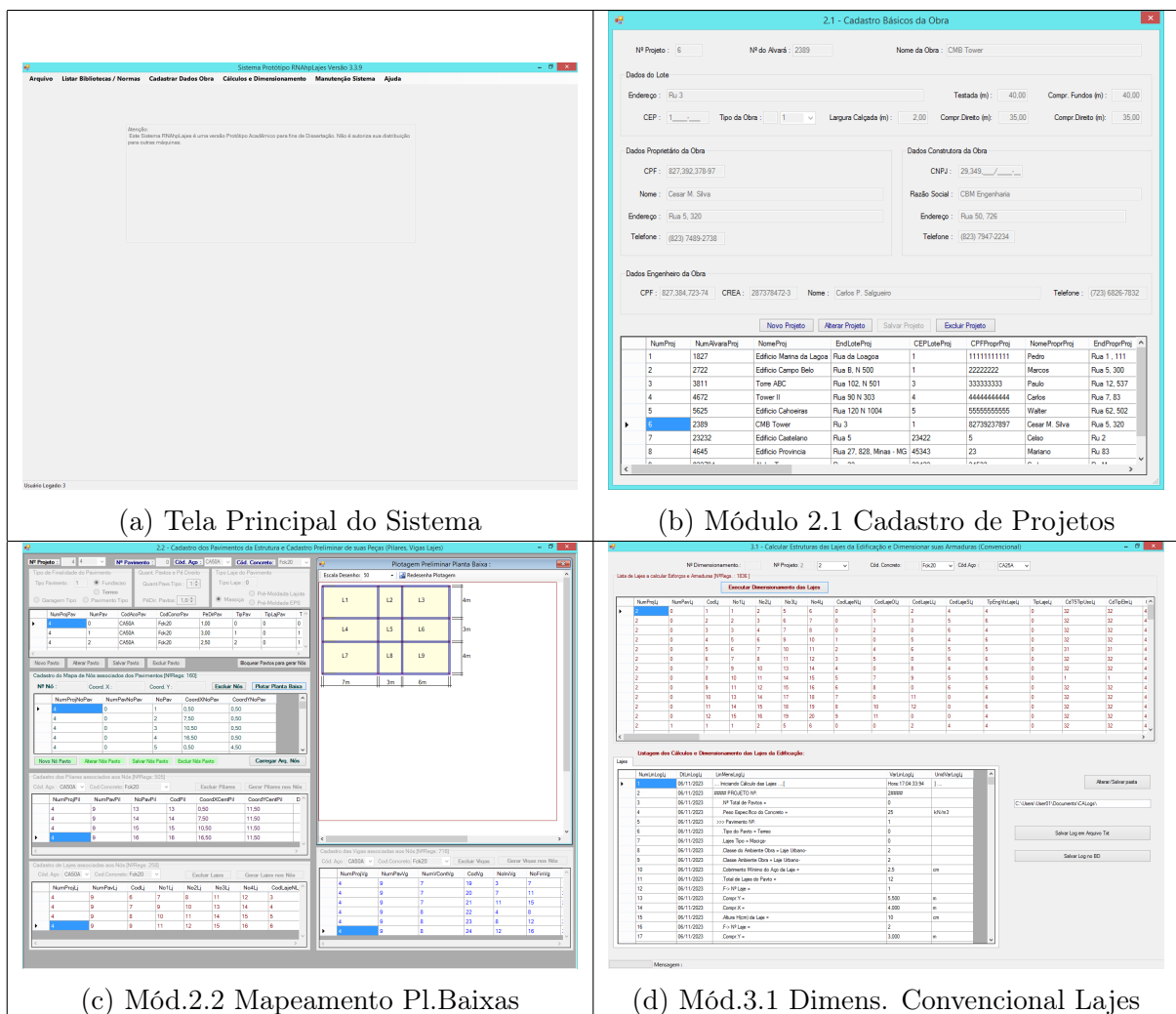
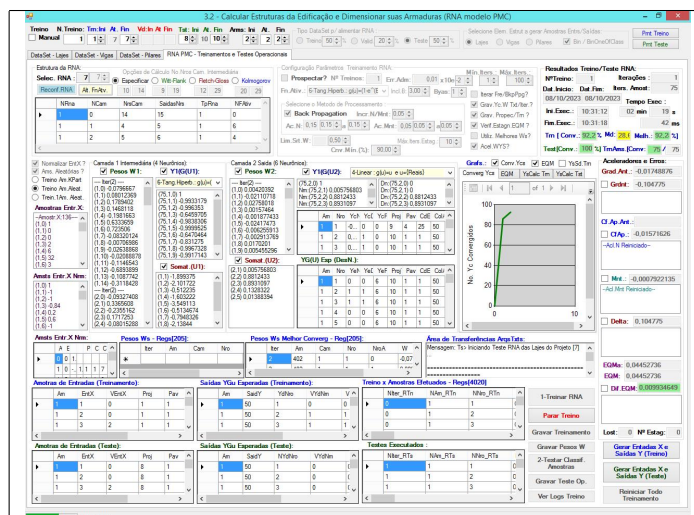


Figura 5.1: Telas do Sistema: Principal e Módulos 2.1 a 3.1

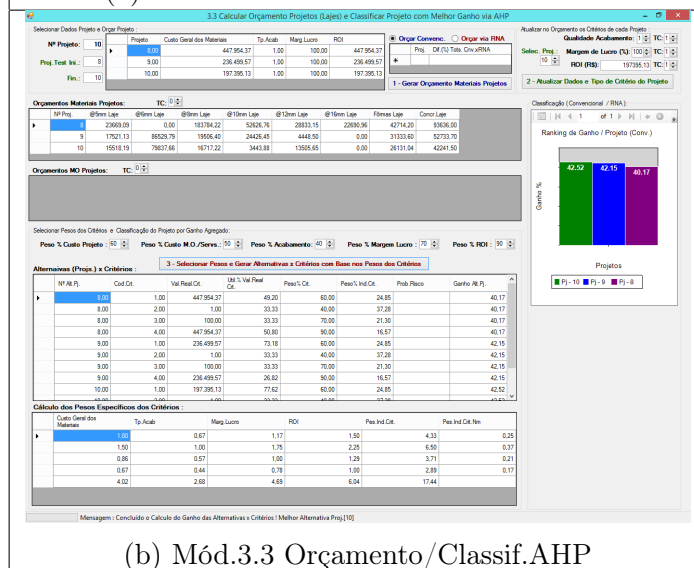
Fonte: Autor

Na 2ª fase, o módulo 3.2 (Fig.5.2a) gerou os dimensionamentos das lajes por RNA, dos projetos de 1 a 10 dos conjuntos 1 a 6, via Treinamentos e Testes, permitindo comparar com o dimensionamento convencional gerado no 3.1 (fase 1).

A 3ª fase final foi o desenvolvimento o módulo 3.3, (Fig.5.2b), que gerou os orçamentos das lajes dos projetos testados de 8a 10, com os custos das lajes dimensionadas nas fases 1 e 2, e também as classificações destes projetos testados, por ordem de melhor ganho agregado, utilizando a técnica *ADMC-AHP*. O detalhamento dos módulos pode ser encontrado no manual do usuário, no link: projeto.rnahplajes@gmail.com A seguir, as telas dos módulos das fases 2 a 3 (Fig.5.2a e b):



(a) Mód.3.2 Dimensionamento via RNA



(b) Mód.3.3 Orçamento/Classif.AHP

Figura 5.2: Telas do Sistema: Módulo 3.2 a 3.3

Fonte: Autor

5.2.1 Comparativos Protótipo x Software TQS

Mesmo sendo um sistema protótipo bem mais simples do que sistemas profissionais como o *TQSTM*, pôde-se comparar algumas funções semelhantes (Tab.5.1):

Funções	Protótipo	<i>TQSTM</i>
Tabelas Auxiliares	Pré-carregadas (atualizáveis)	Pré-carregadas (atualizáveis)
Dados do Projeto	Cadastrável via Usuário	Cadastrável via Usuário
Mapeamento	Automático após carga TXTs Nós	Automático após modelo 3D
Memorial Dimensions.	Lajes (automatizado)	Ljs.Vigs.Pils.(automatizado)

Tabela 5.1: Comparativo de Algumas Funções - Protótipo x *TQSTM*

5.3 Resultados do Dimensionamento via RNA

A seguir, os resultados das prospecções dos Treinos via RNA, Cjs.3 a 6, com 10 Treinos/Testes cada, e estatística médias. No 1º Bloco, os gráficos dos 10 Treinos e no 2º, os gráficos dos respectivos Testes de predição dos diâmetros das armaduras, lendo-se PPX Principal Positiva(+) direção x e PPY na direção y , e PNX Principal Negativas(-) direção x e PNY direção y , Figs.5.3 até Figs.5.16. Para não estender esta dissertação, o Cj.1 (empírico para aprendizado e pouco convergente) não foi listado. São apresentados também, comparativos de verossimilitude dos resultados via *Orange DataMining*TM.

5.3.1 Treinamento 2 - Cj. 2 - 13 Atributos - Projetos (1 a 4)

A seguir, os gráficos de Convergências das Armaduras (+) e (-) (Fig.5.3a), e suas Convergências Médias (Fig.5.3b), Velocidades de Convergência Arms.(+) e (-) (Fig.5.3c), e suas Velocidades Médias de Convergência (Fig.5.3d), todos do Treinamento 2, Cj.2 de plantas baixas, com 10 ensaios dos Projs. de 1 a 4 (Térreo, Garagem e Pavimento Tipo):

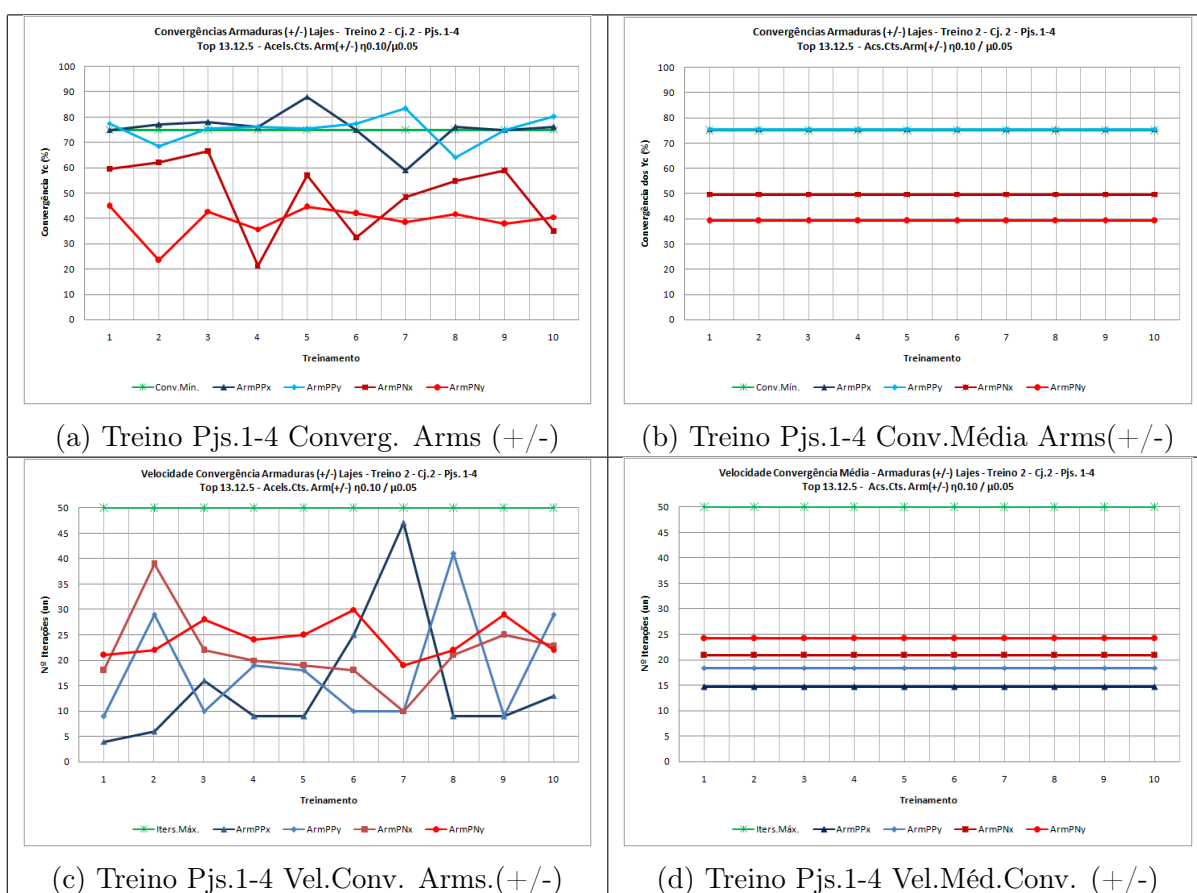


Figura 5.3: Dimens. Arms.(+/-) via RNA - Treino 2 - Cj.02 - Pjs.1 a 4

Fonte: Autor

5.3.2 Teste Operacional 2 - Cj.2 - 13 Atributos - Projeto (6)

A seguir, os gráficos das Convergências da Armadura (+) PPX e PPY (Fig.5.4a) e suas Convergências Médias (Fig.5.4b), Convergências das Armaduras (-) PNX e PNY (Fig.5.4c) e suas Convergências Médias (Fig.5.4d), Homogeneidade de Convergência (+) (Fig.5.4e) e (-) (Fig.5.4f), todos do Teste Operacional 2, do Treino 2, do Conj.2, com 10 ensaios efetuados com o Proj.6:

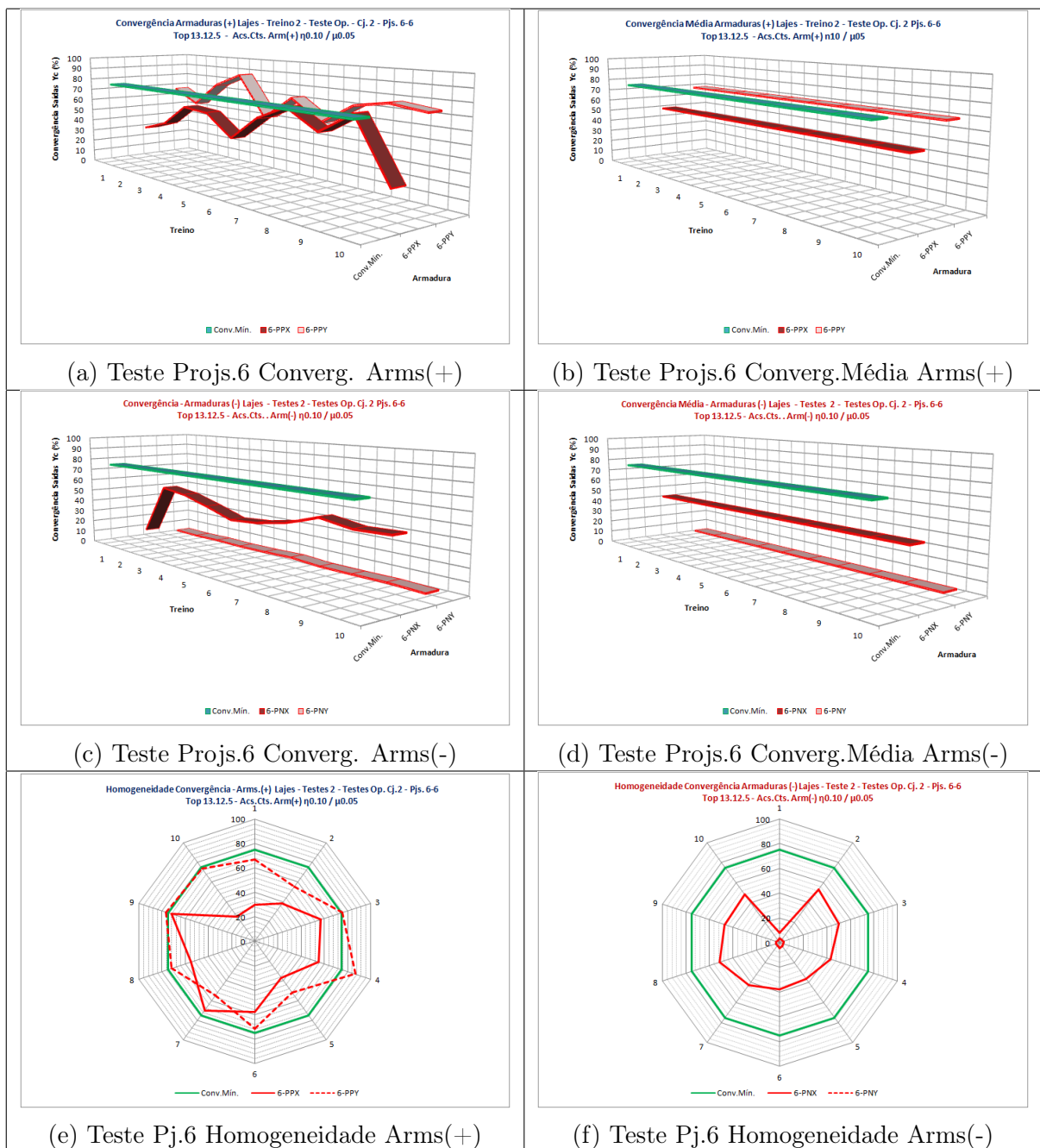


Figura 5.4: Dims. Arms. via RNA - Treino 2 - Cj.02 - Pjs.1-4 / Testes Proj.6

Fonte: Autor

**Análise Cj.2 - Treino 2 (Pjs.1-4) - Teste (Pj.6) - 13 Atribs. - Acels.: $\eta_{0,10}$
 $\mu_{0,05}$ (+/-) - Ver.335:**

- Com o Treino dos Pjs.1 a 4 e Teste do Pj.6, as convergências foram baixas: Arms.(+) PPX (76,2%) e PPY (78,2%) ($> 75\%$ Mín.) e Arms.(-) PNx 50% e PNY 39,2% (Figs.5.3a e b). As Velocidades Médias de Convergência: (+) PPX e PPY com 15 iterações e as (-) PNx 20 e PNY 25 iterações, (Fig.5.4c) e (Fig.5.4d).
- Nos Testes, as Convergências Médias Arms. (+) (Figs.5.4a e f) foram: Pj.6 PPX (49,7%) / PPY (68,4%), $< \text{mín.}75\%$. A Homogeneidade foi $< 75\%$ (Figs.5.4e e f). As convergências médias das (-) do Pj.6 foram PNx (41,8%) e PNY (3,2%) $< 50\%$, abaixo da mínima 75%, refletindo a baixa convergência dos treinamentos.
- Estudando os métodos numéricos em Sperandio [46], a maior heterogeneidade das matrizes são a provável causa do baixo aprendizado nos Cjs.1 e 2. Ex.: Mtz.Conf. Cj.2 com muito mais erros de diâmetro que o Cj.5 (Figs.5.5a a f).

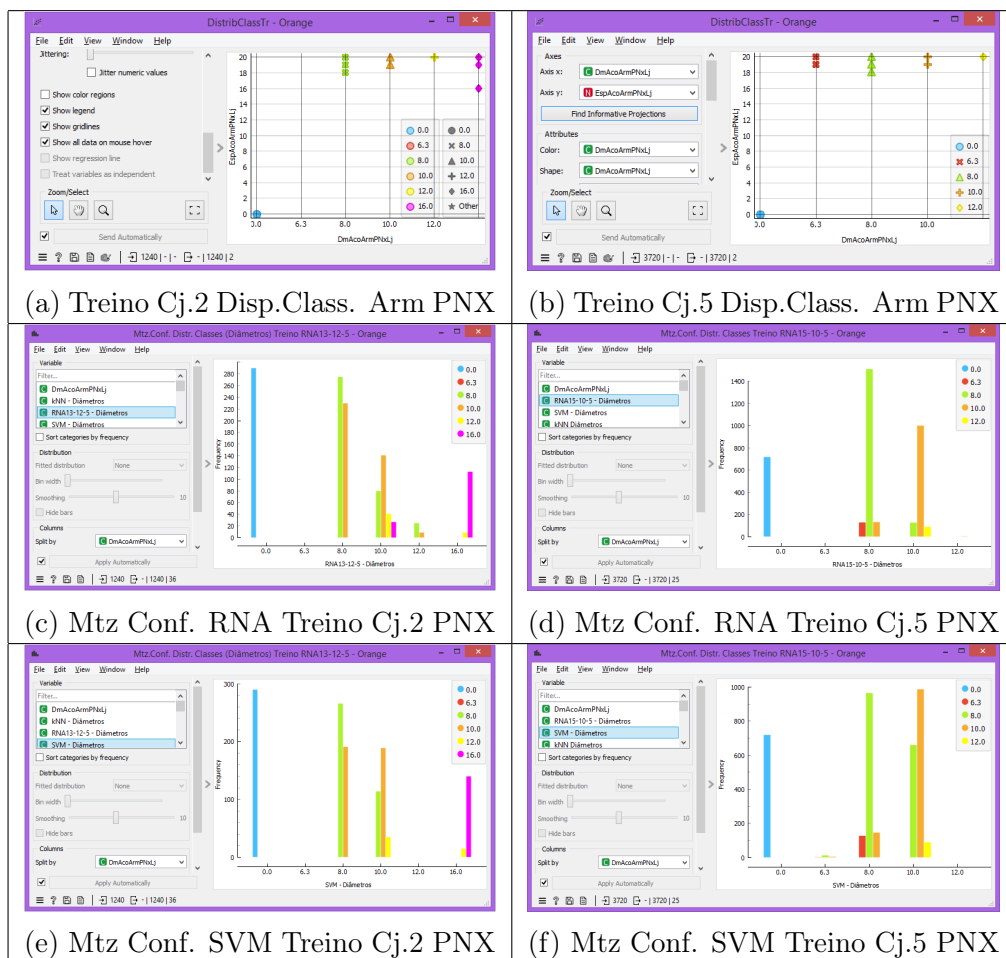


Figura 5.5: Gráfs. *Orange*TM - Compara Dispersão Erros Cj.2 x Cj.5 (RNA e SVM)

Fonte: Autor

5.3.3 Treinamento 3 - Cj.3 - 14 Atributos - Projetos (1 a 7)

A seguir, os gráficos de Convergências das Armaduras (+) e (-) (Fig.5.6a) e suas Convergências Médias (Fig.5.6b), Velocidades de Convergência (Fig.5.6c) e suas Velocidades Médias de Convergência (Fig.5.6d), todos do Treino 3, Cj.3 de plantas baixas, com 10 ensaios efetuados com os Projs.de 1 a 7 (Térreo, Garagem e Pavimento Tipo):

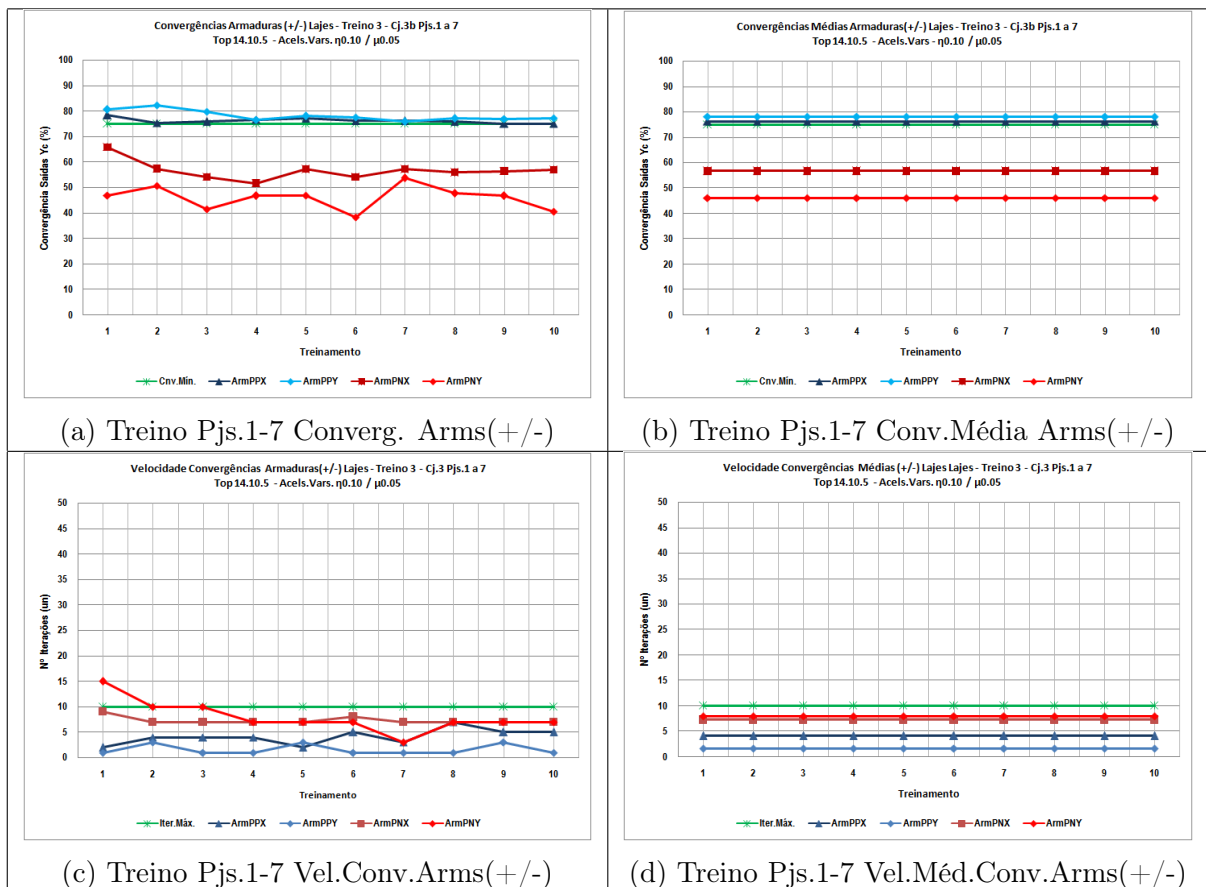


Figura 5.6: Dimens. Arms.(+/-) via RNA - Treino 3 - Cj.3 - Pjs.1 a 7

Fonte: Autor

5.3.4 Teste Operacional 3 - Cj.3 - 14 Atributos - Projs.(8 a 10)

A seguir, os gráficos de Convergências das Armaduras (+) PPX e PPY (Fig.5.7a) e suas Convergências Médias (Fig.5.7b), Convergências das Armaduras (-) PNX e PNY (Fig.5.7c) e suas Convergências Médias (Fig.5.7d), Homogeneidade de Convergência (+) (Fig.5.7e) e (-) (Fig.5.7f), todos do Teste Operacional 3 do Treinamento 3 do Conjunto 3, com 10 ensaios efetuados com os Projs.8 a 10:

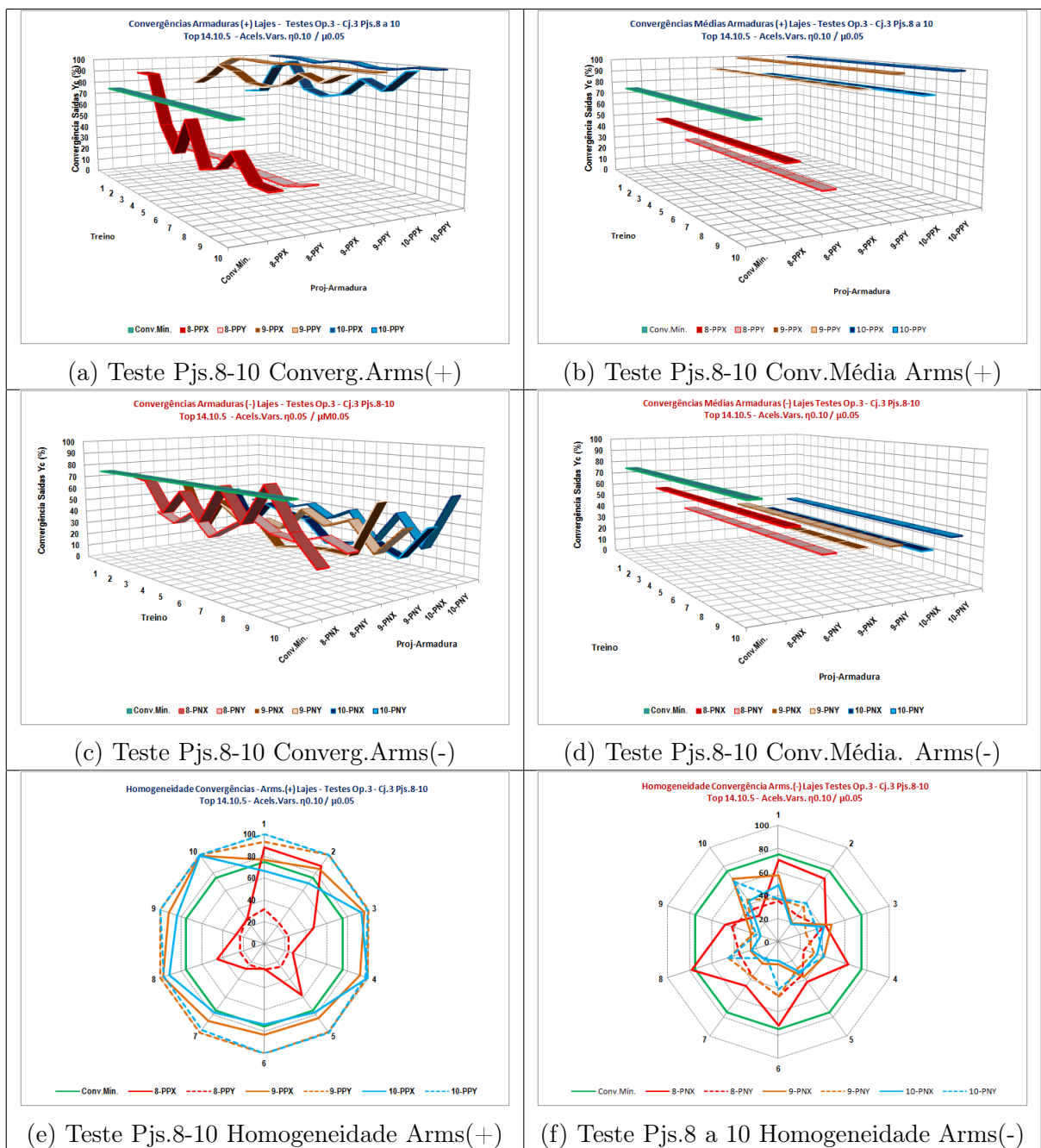


Figura 5.7: Dimens. Arms. via RNA - Treino 3 - Cj.3 - Testes Projs. 8 a 10

Fonte: Autor

Análise Cj.3 - Treino 3 (Pjs.1-7) - Teste (Pjs.8-10) - 14 Atribs. - Acels. (+) $\eta_{0,10} \mu_{0,05}$ - Ver.336:

- Nos Treinos (Pjs.1 a 7) elevou-se o nº de amostras p/ 402 lajes (Figs.5.6a e b). As Convergências Médias (Figs.5.6c e d) das Armaduras (+) PPX (76,2%) e PPY (78,2%), acima dos 75%(mín), e maiores que as do Cj.2. As Armaduras (-) PNX (56,7%) e PNY (46,0%) abaixo de 60% (Figs.5.6c e d), mas ainda acima do Cj.2.

- Os Testes dos Pjs.8 a 10 (Figs.5.7a e b) as Convergências Médias foram: Pj8 (PPX 33,3% e PPY 25%), Pj9 (PPX 89,3% e PPY 99,1%) e Pj10 (PPX 83,8% e PPY 99,4%). Mostrou que a RNA pôde aprender a dimensionar as Armaduras (+) com altas velocidades de convergência. Apenas o Pj.8 teve convergência < 75%(mín). Consideradas alta a convergência (>93%) das (+) .
- Nos Testes dos Pjs.8 a 10 das Armaduras (-) (Figs.5.7c e d) as Convergências Médias foram: Pj8 (PNX 55,8% e PNY 35,7%), Pj9 (PNX 35,2% e PPY 35,6%) e Pj10 (PNX 29,5% e PNY 37,2%). Isto demonstrou que, o aumento de 1 atributo significativo (13→14) gerou entre 10% a 40% de ganho acima das (-) do Cj.2.
- Os aceleradores $\eta=0,10$ e $\mu=0,05$ elevaram as convergências, comparadas com o Cj.2. Além do n^o de atributos, os aceleradores também influenciam na convergência.
- As velocidades de convergência nos Treinos foram: PPX=4 PPY=2, 90% entre 2 a 5 iters., PNX=7 e PNY=8 entre 5 a 10, resultados considerados rápidos. O n^o de Losses das armaduras (+) foi de 0%, e para as (-) 40%, apenas na PNY.
- A homogeneidade (mede a regularidade) ainda foi baixa (Figs.5.7e e f), mais já mostrou evolução do Cj.2 para o 3, com quase todos os Treinos das PPX e PPY acima de 75% e as PNX e PNY com 50% dos treinos, próximos à mínima.
- A seguir, algumas Convergências (Figs.5.8a e d) e Dispersão de Erros de Classes (Figs.5.8b e c) de Treino e Teste, Arm.PPX, e a Disp. Erros Arm.PNX (Figs.5.8c e f) obtidos no *Orange DataMiningTM* para comparação com os % obtidos aqui:

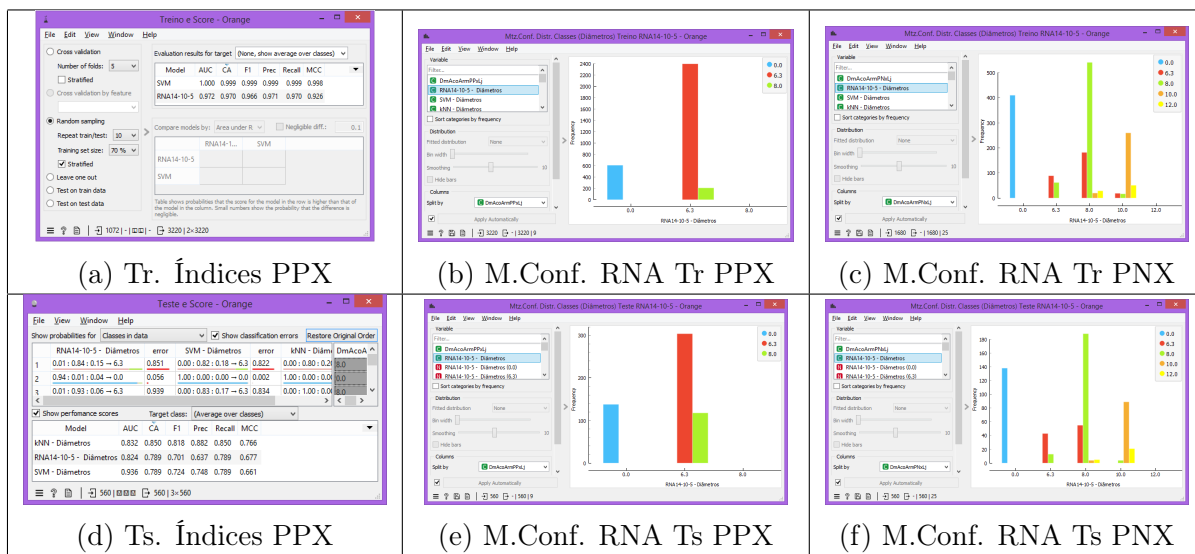


Figura 5.8: Gráfs. Comparativo *Orange DataMiningTM* - Cj.3

Fonte: Autor

5.3.5 Treinamento 4 - Cj.4 - 14 Atributos - Projetos (1 a 7)

A seguir, os gráficos de Convergências das Armaduras (+) e (-) (Fig.5.9a), Convergências Média (Fig.5.9b), Velocidades de Convergência (Fig.5.9c) e suas Velocidades Médias de Convergência (Fig.5.9d), Treino 4, Cj.4 de plantas baixas, com 10 ensaios efetuados com os Projs. 1 a 7 (Térreo, Garagem e Pavimento Tipo):

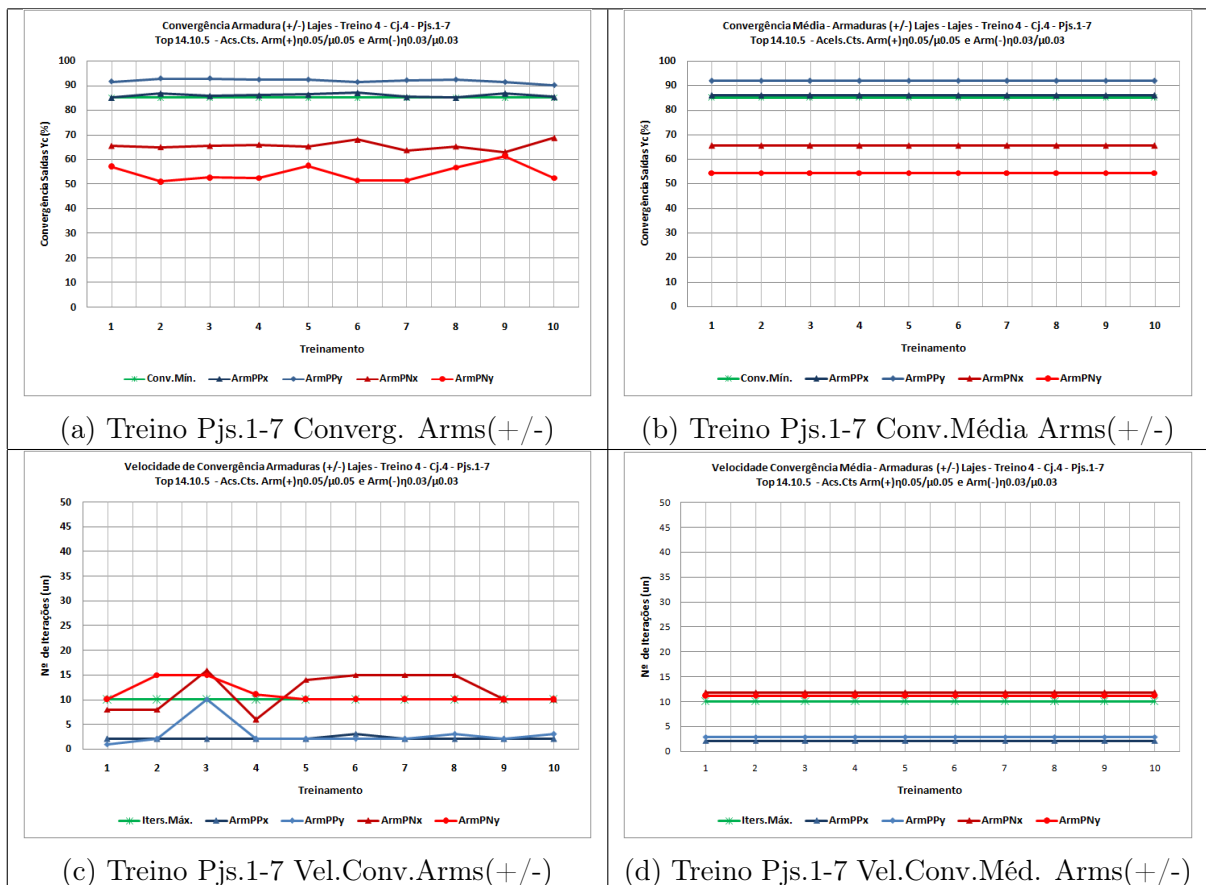


Figura 5.9: Dimens. Arms.(+/-) via RNA - Treino 4 - Cj.4 - Pjs.1 a 7

Fonte: Autor

5.3.6 Teste Operacional 4 - Cj.4 - Projs.(8 a 10)

A seguir, os gráficos de Convergências das Armaduras (+) PPX e PPY (Fig.5.10a) e suas Convergências Médias (Fig.5.10b), Convergências das Armaduras (-) PNx e PNY (Fig.5.10c) e suas Convergências Médias (Fig.5.10d), Homogeneidade de Convergência (+) (Fig.5.10e) e (-) (Fig.5.10f), todos do Teste Operacional 4 do Treino 4 do Conj.4, com 10 ensaios efetuados com os Projs.8 a 10:

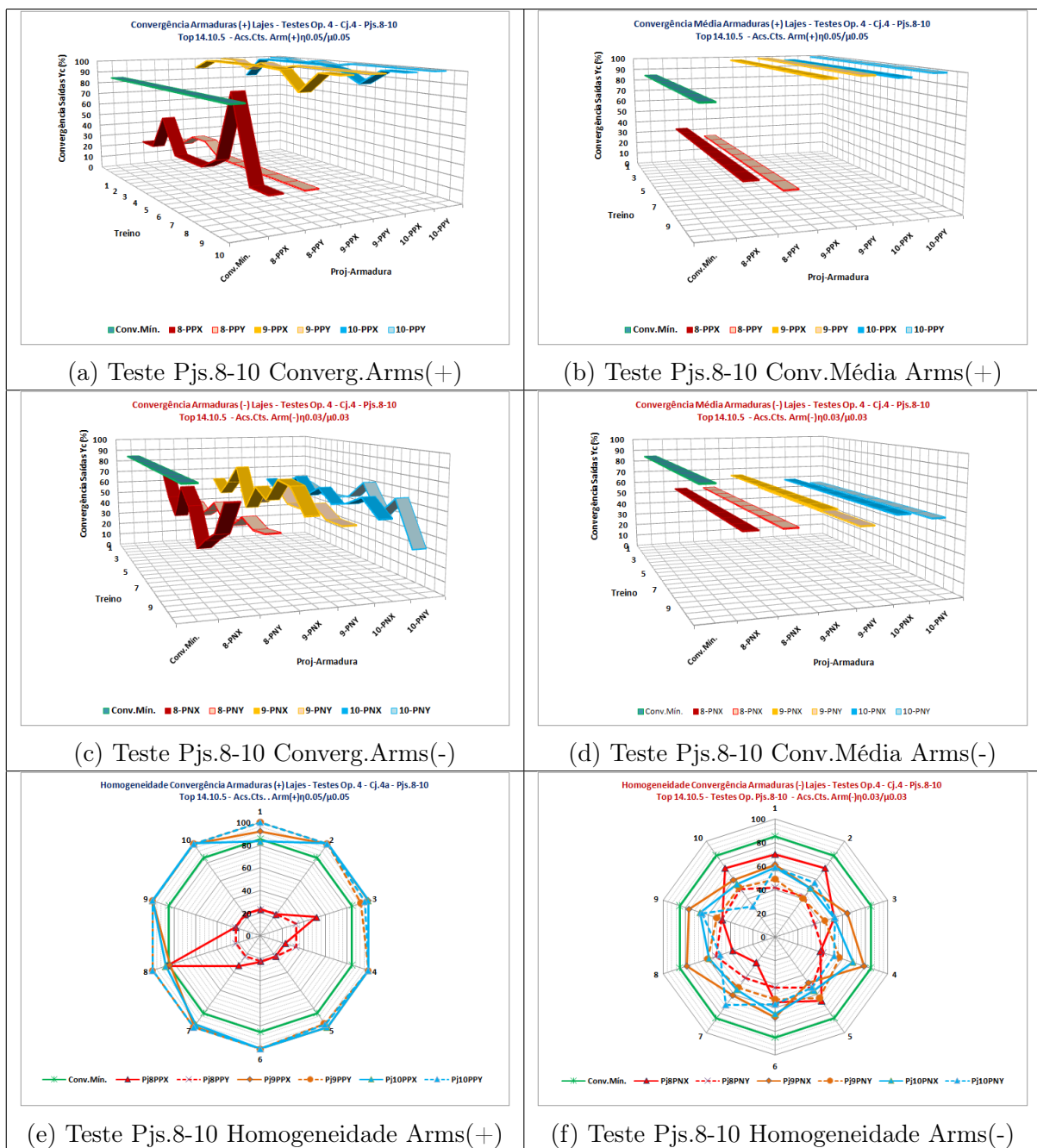


Figura 5.10: Dimens. Arms. via RNA - Treino 4 - Cj.4 - Testes Projs. 8 a 10

Fonte: Autor

Análise Cj.4 - Treino (Pjs.1-7) - Teste (Pjs.8-10) - 14 Atribs. - Acels. (+) $\eta_{0,05} \mu_{0,05}$ / (-) $\eta_{0,03} \mu_{0,03}$ – Ver.339:

- Para os Treinos do Cj.4, Projs.1 a 7, elevou-se o n^o de amostras para 465 lajes (Figs.5.9a e b).
- Nos Treinos, as Convergências Médias (Figs.5.9a e b) das Armaduras (+) foram: PPX (85,97%) e PPY (91,97%), > 85%(mín.). E as (-) PNX (65,5%) e PNY (54,5%)

abaixo dos 85%. Mostraram aumento relevante nas convergências em comparação com o Cj.3. Já as (-), ainda abaixo dos 75%, mas acima do Cj.2.

- Para os Testes do Cj.4, Projs.8 a 10 (Figs.5.10a e b) as Convergências Médias foram: Pj.8(PPX 33,3% e PPY 25%), Pj.9(PPX 97,5% e PPY 98,9%) e Pj.10(PPX 96,8% e PPY 99,4%) confirmando que a RNA pôde aprender a dimensionar as Armaduras PNx e PNY com altas velocidades médias de convergência. Apenas o Pj.8 < 75%.
- As Armaduras (-) (Figs.5.10c e d) tiveram Convergências Médias: Pj.8(PNX 54% e PNY 54%), Pj.9(PNX 64,8% e PPY 52,4%) e Pj.10(PNX 58,8% e PNY 54,4%). Novamente, mais 1 atributo (13→14) gerou ganho extra e estabilidade nas convergências das (+) e (-). As Convergências das (+) >93%, consideradas altas.
- Nas armaduras negativas do Cj.4, ainda com baixas convergências, mas mais isométricas, foram reduzidos os aceleradores $\eta=0,05\rightarrow0,03$ e $\mu=0,05\rightarrow0,03$, causando a elevação das convergências em mais de 100%, se comparadas àquelas dos Cjs.2 e 3, confirmando novamente a influência dos aceleradores na convergência.
- Nas velocidades de convergência dos Treinos, 90% das iterações ficaram entre 2 a 5 para a Armadura PPX, e 100% das iterações entre 1 a 3 para a PPY, convergências consideradas rápidas. O n^o de Losses das armaduras (+) foi de 0%, e nas (-) 30%.
- A seguir, algumas Convergências (Figs.5.11a e d) e Dispersão de Erros de Classes (Figs.5.11b e c) de Treino e Testes Arm.PPX, e a Disp. Erros Arm.PNX (Figs.5.11e e f) obtidos no *Orange DataMining*TM para comparação com % obtidos aqui:

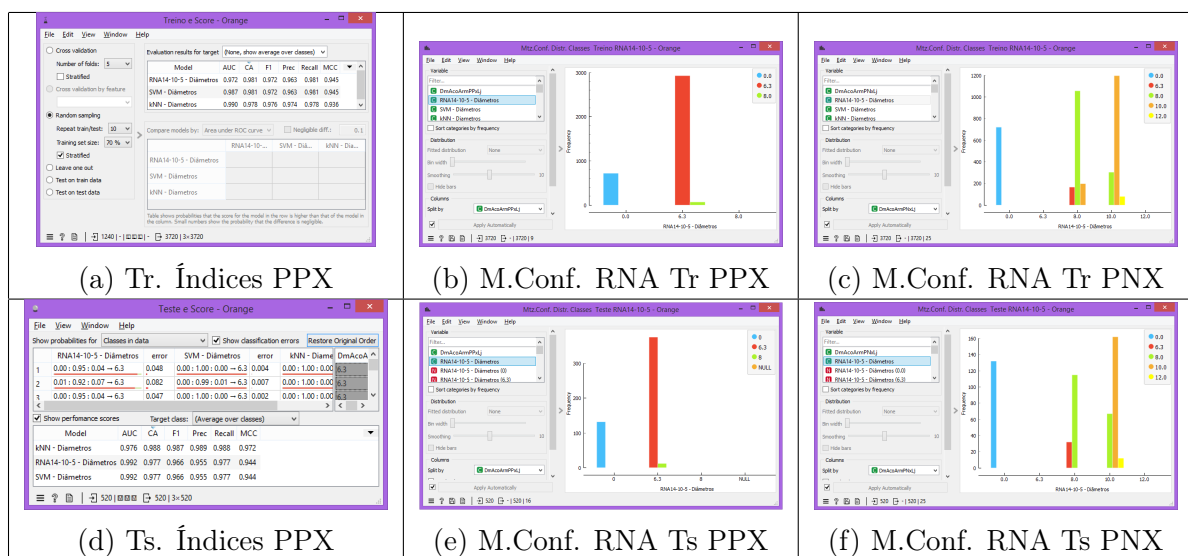


Figura 5.11: Gráfs. Comparativo *Orange DataMining*TM - Cj.4

Fonte: Autor

5.3.7 Treinamento 5 - Cj.5 - 15 Atributos - Projetos (1 a 7)

A seguir, os gráficos de Convergências das Armaduras (+) e (-) (Fig.5.12a), e suas Convergências Médias (Fig.5.12b), Velocidades de Convergência (Fig.5.12c), e suas Velocidades Médias de Convergência (Fig.5.12d), todos do Treino 5, Conj.5 de plantas baixas, com 10 ensaios efetuados com os Projs.1 a 7 (Térreo, Garagem e Pavto.Tipo):

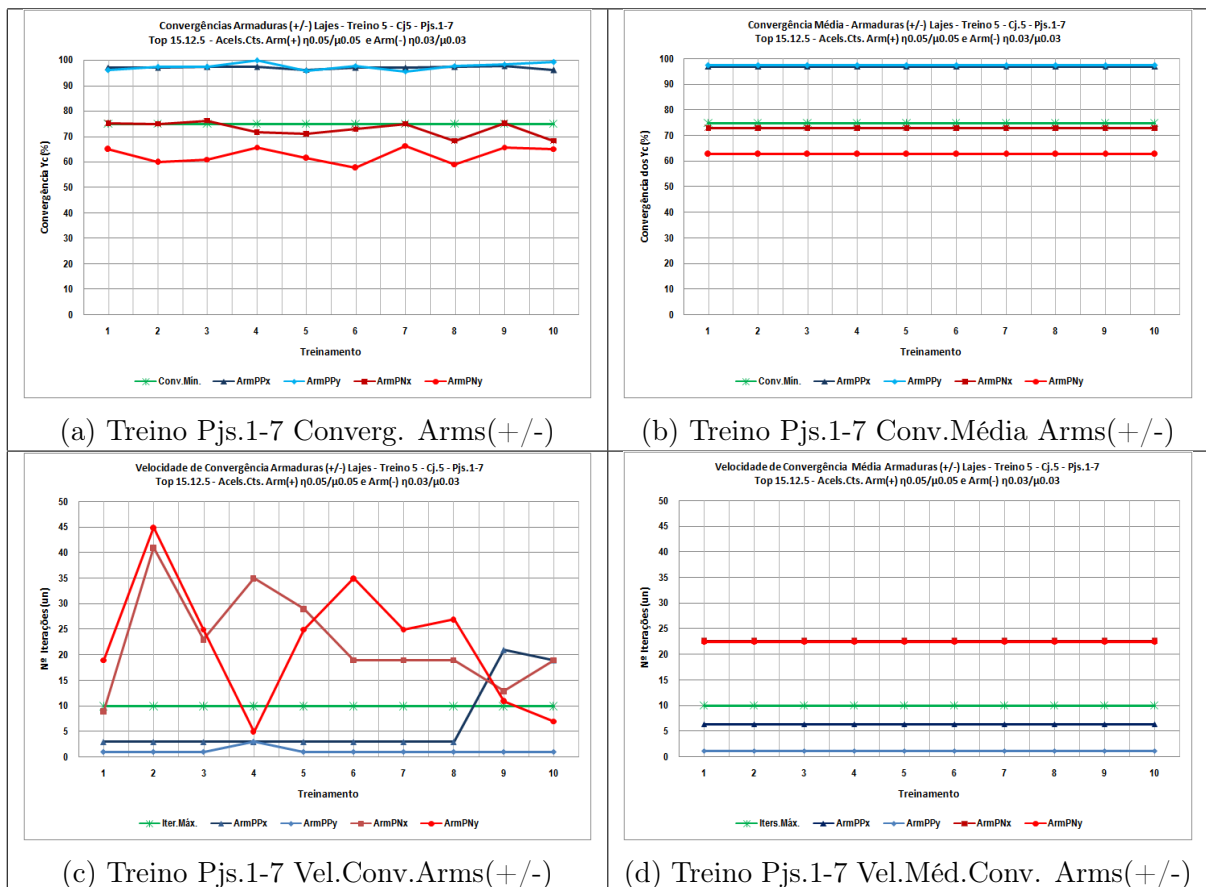


Figura 5.12: Dimens. Arms.(+/-) via RNA - Treino 5 - Cj.5 - Pjs.1 a 7

Fonte: Autor

5.3.8 Teste Operacional 5 - Cj.5 - 15 Atributos - Projs.(8 a 10)

A seguir, os gráficos de Convergências das Armaduras (+) PPX e PPy (Fig.5.13a) e suas Convergências Médias (Fig.5.13b), Convergências das Armaduras (-) PNx e PNY (Fig.5.13c) e suas Convergências Médias (Fig.5.13d), Homogeneidade de Convergência (+) (Fig.5.13e) e (-) (Fig.5.13f), todos do Teste Operacional 5 do Treino 5 do Conj.5, com 10 ensaios efetuados com os projetos 8 a 10:

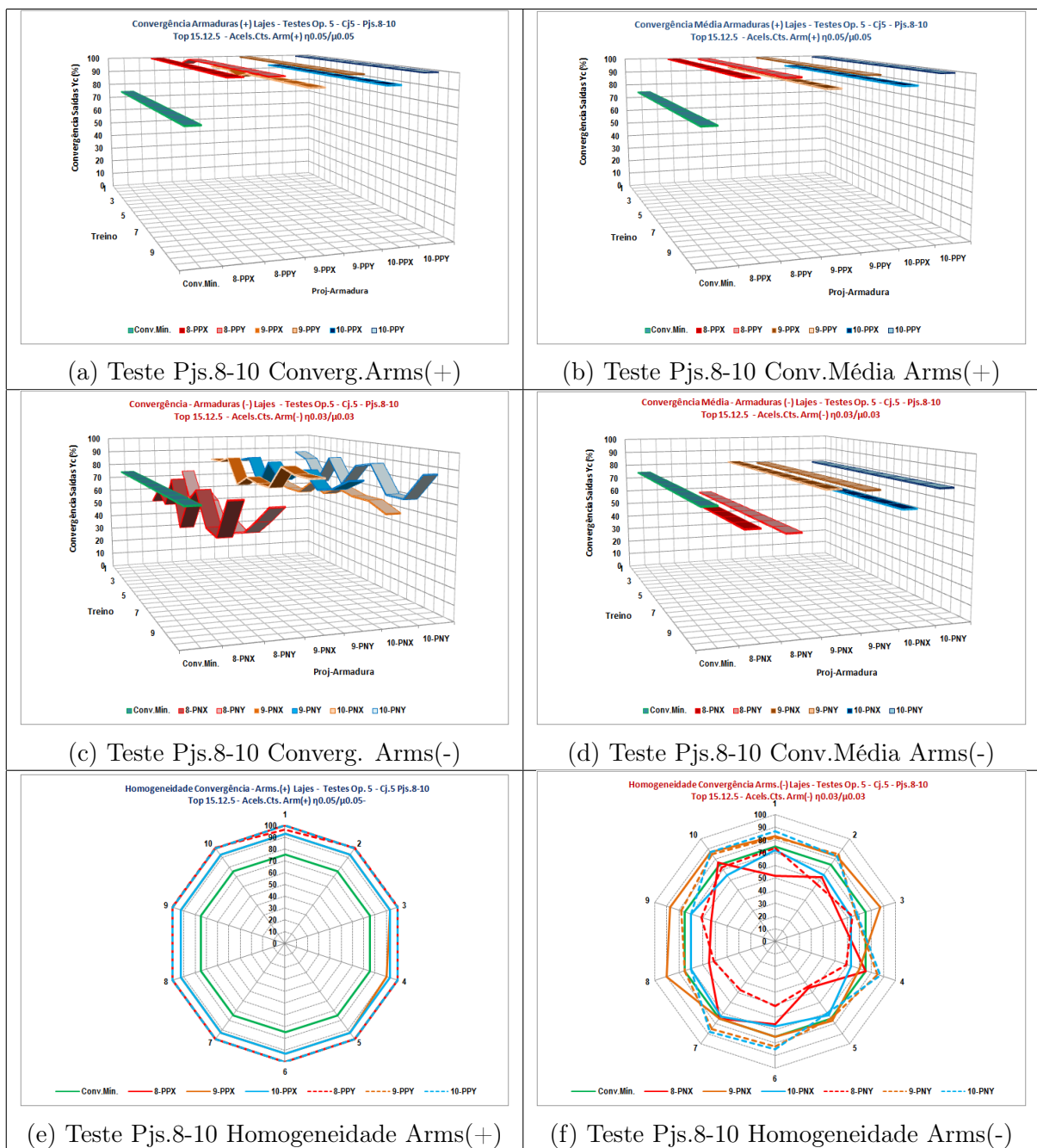


Figura 5.13: Dimens. Arms. via RNA - Treino 5 - Cj.5 - Testes Projs.8 a 10

Fonte: Autor

Análise Cj.5 Treino 5 (Pjs.1-7) - Teste (Pjs.8-10) - 15 Atribs. - Acels.: (+) $\eta_{0,05} \mu_{0,05}$ / (-) $\eta_{0,03} \mu_{0,03}$ - Ver.339:

- Com 465 lajes e mais 1 atributo (14→15), as convergências das Armaduras (-) nos Treinos (Figs.5.12 a e b) e nos Testes (Figs.5.13 a até d) elevaram-se. As Convergências Médias (Figs.5.12a e b) das Armaduras (+) foram: PPX (97,1%) e PPY (97,6%), > 85%(mín.). E as (-) PNX (73%) e PNY (62,8%). O Conj.5 foi o

de maior desempenho, mesmo sem aceleradores variáveis.

- Nos Testes as Convergências Médias (Figs.5.13a e b) das Arms. (+) foram: Pj8 (PPX 100% e PPY 100%), Pj9 (PPX 92,7% e PPY 100%) e Pj10 (PPX 93,0% e PPY 100%), com relevante elevação em comparação às convergências dos Cjs.3 e 4. As Arms. (-) (Figs.5.13c e d) elevaram-se para: Pj8 (PPX 61,5% e PPY 57,9%), Pj9 (PPX 81,4% e PPY 80,0%) e Pj10 (PPX 68,0% e PPY 79,5%), também convergindo mais comparadas aos Cjs.3 e 4.
- As convergências de Treino, Arms.(-) PNX e PNY (Figs.5.13e e f) > 40% comparadas ao Cj.3, devido ao aumento para 15 atributos e aceleradores menores ($\eta=0.03$ e $\mu=0.03$) nas Arms. (+ e -). Os % das (-) empataram com os do Cj.6.
- As velocidades médias de convergência (Treinos) das Armaduras (+) foram: PPX (6,4) e PPY (1,2) iters. com 80% das (+) convergindo em até 6 iters., rápido para uma RNA (Figs.5.12c e d). As (-) PNX (11) e PNY (22) e 60% convergiram na média de 25 iters., parecendo ser a mínima para as (-) convergirem alto.
- A homogeneidade do Cj.5 foi a maior dos conjuntos, (Figs.5.13e e f). Comparado aos Cjs.3 e 4, cresceram nas (+) (100% dos testes PPX e PPY) nos Pjs.8 a 10. As PNX e PNY foram < 80%, mas a regularidade dos treinos (Pjs.8 a 10) aumentou. O n^o de Losses das (-) foi 30% acima das (+).
- Alguns índices (Figs.5.14a e d) e Dispersão de Erros de Classes (Figs.5.14b e c), Treino e Testes, Arms.PPX e PNX (Figs.5.14c e f) via *Orange DataMining*TM:

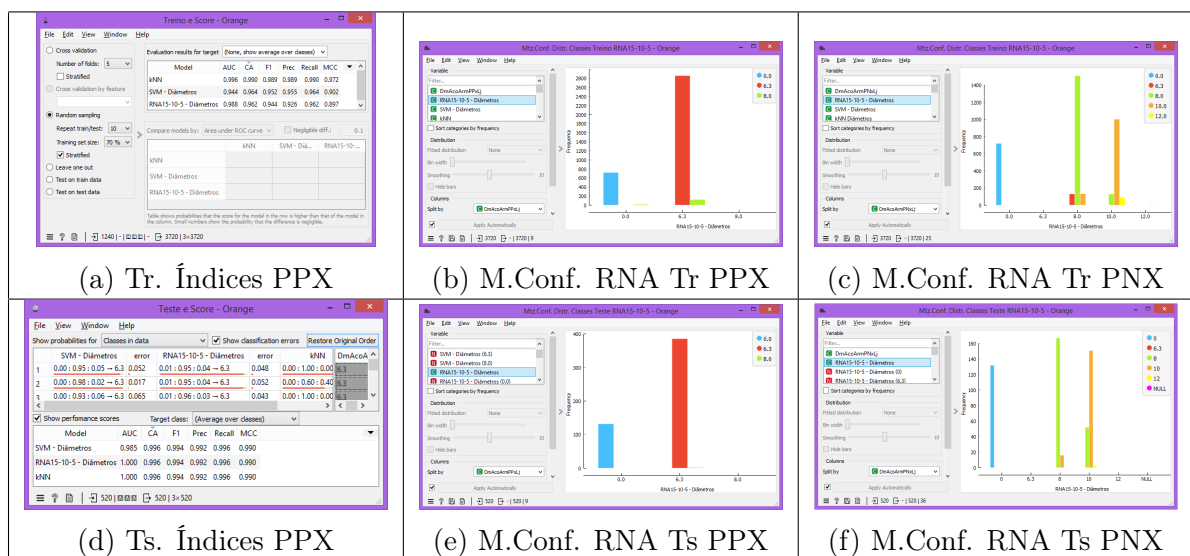


Figura 5.14: Gráfs. Comparativos obtidos via *Orange DataMining*TM - Cj.5

Fonte: Autor

5.3.9 Treinamento 6 - Cj.6 - 15 Atributos - Projetos (1 a 7)

A seguir, os gráficos de Convergências das Armaduras (+) e (-) (Fig.5.15a), e suas Convergências Médias (Fig.5.15b), Velocidades de Convergência (Fig.5.15c), e suas Velocidades Médias de Convergência (Fig.5.15d), sendo o Treino 6 com 10 ensaios com os projetos de 1 a 7, do conjunto 6 de plantas baixas (Térreo, Garagem e Pavimento Tipo):

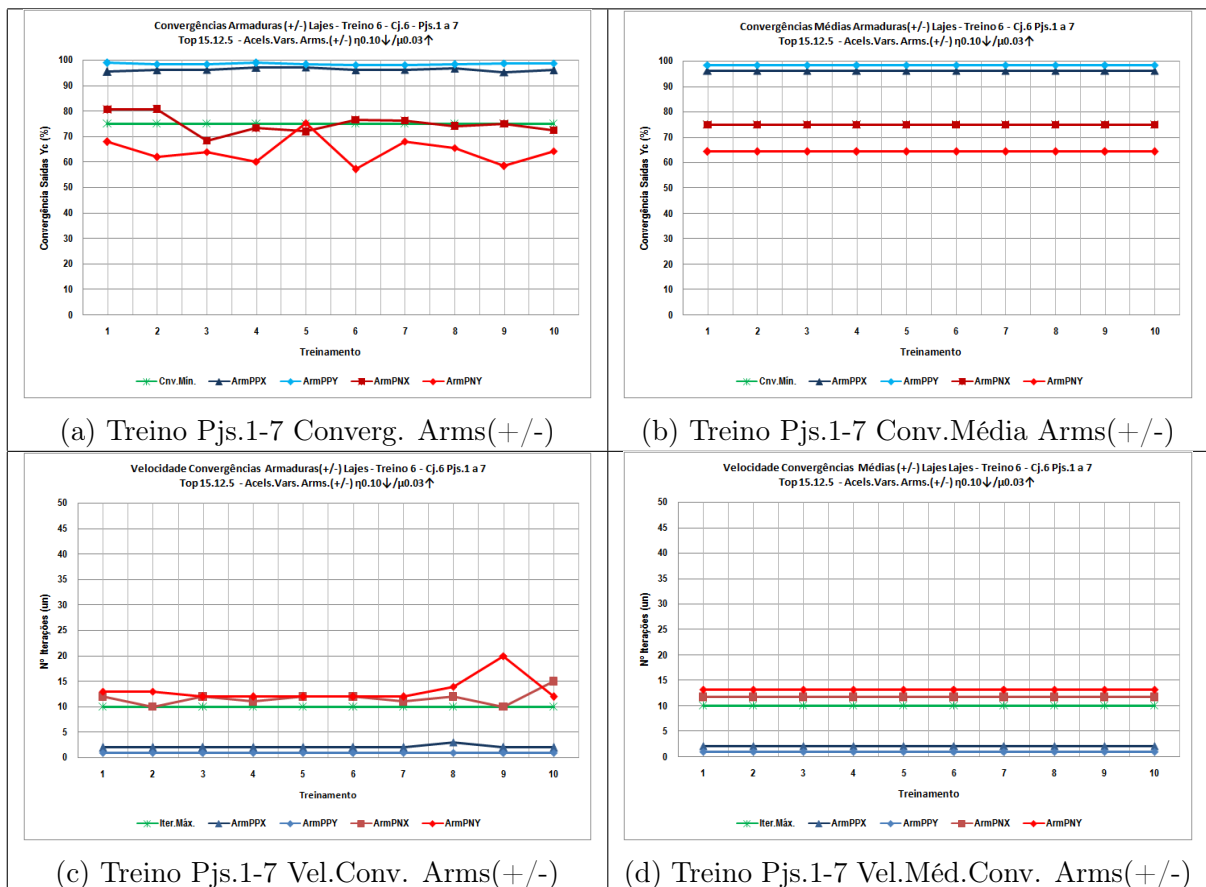


Figura 5.15: Dimens. Arms.(+/-) via RNA - Treino 6 - Cj.6 - Pjs.1-7

Fonte: Autor

5.3.10 Teste Operacional 6 - Cj.6 - Projs.(8 a 10)

A seguir, os gráficos de Convergências das Armaduras (+) PPX e PPY (Fig.5.16a) e suas Convergências Médias (Fig.5.16b), Convergências das Armaduras (-) PNX e PNY (Fig.5.16c) e suas Convergências Médias (Fig.5.16d), Homogeneidade de Convergência (+) (Fig.5.16e) e (-) (Fig.5.16f), todos do Teste Operacional 6 do Treinamento 6, Conj.6, com 10 ensaios efetuados com os Projs.8 a 10:

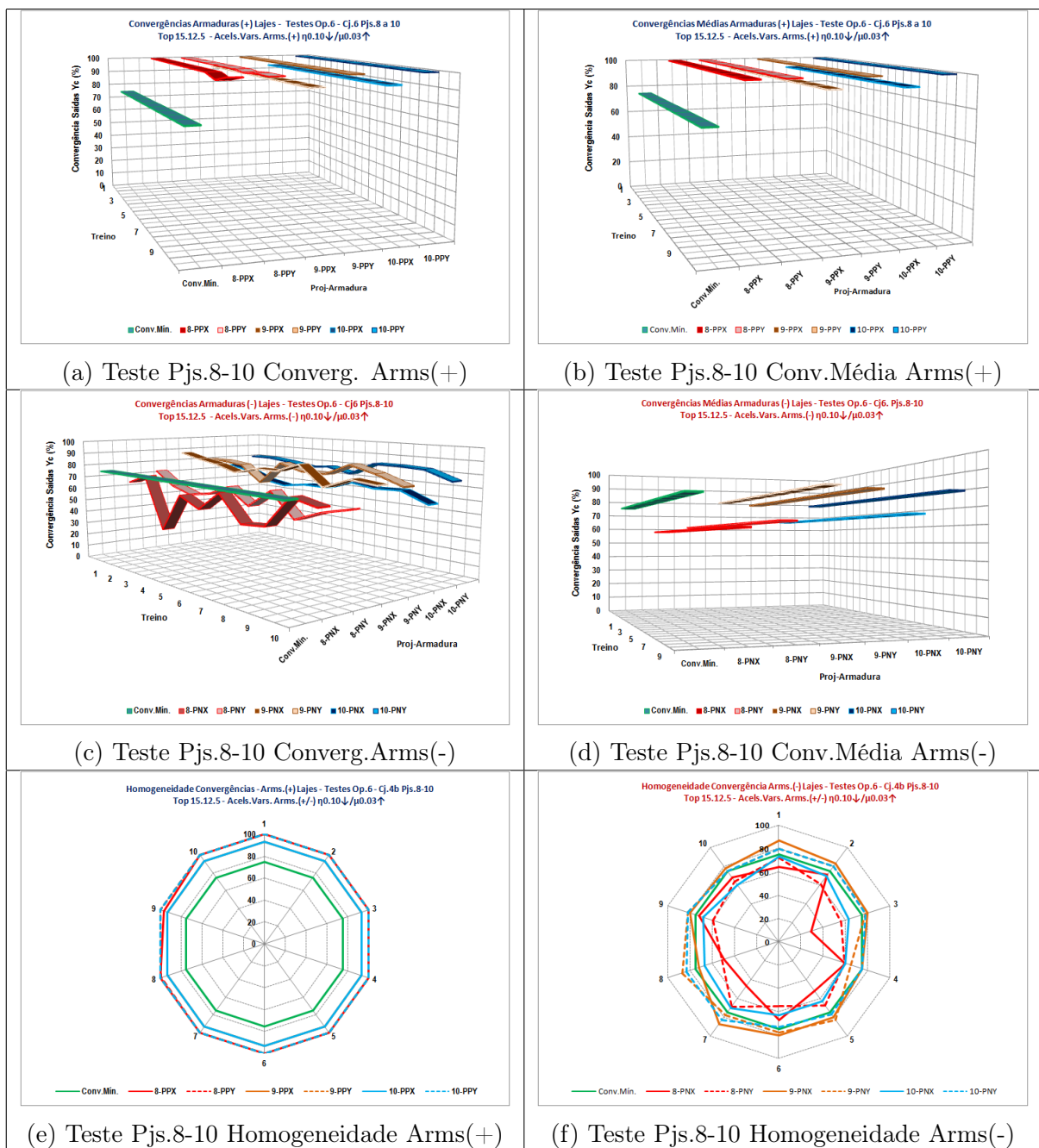


Figura 5.16: Dims. Arms. via RNA - Treino 6 - Cj.6 - Pjs.1-7 / Testes Projs.8-10

Fonte: Autor

Análise Cj.6 Treino 6 (Pjs.1-7) - Teste (Pjs.8-10) - 15 Atribs. - Acs.Variáveis $\eta=0,10 \rightarrow 0,03$ e $\mu=0,03 \rightarrow 0,05$ - ver.339:

- Nos Treinos, as Convergências Médias (465 lajes) (Figs.5.15a e b) das Arms.(+) foram: PPX (96,3%) e PPY (98,5%), acima dos 85%. E as (-) PNX (75%) e PNY (64,3%). As convergências tiveram elevação comparadas aos Cjs.3 e 4. As Arms. PPX e PPY também quase convergiram 100% (Figs.5.15a e b) e com alta velocidade

(Figs.5.16c e d), mostrando que os aceleradores variáveis entre ($\eta=0,10\rightarrow0,03$ e $\mu=0,03\rightarrow0,05$) realmente agilizaram a convergência.

- Nos Testes, as Convergências Médias (Figs.5.16a e b) das Armaduras (+) foram: Pj8 (PPX 99,7% e PPY 99,9%), Pj9 (PPX 93,0% e PPY 100%) e Pj10 (PPX 93,0% e PPY 100%), mais altas se comparadas às dos Cjs.3 e 4. As negativas: Pj8 (PPX 57,9% e PPY 61,3%), Pj9 (PPX 80,2% e PPY 78,6%) e Pj10 (PPX 65,7% e PPY 78,6%), um pouquinho abaixo do Cj.5, mas mais homogêneas. Convergências Médias (Fig.5.16c), e respectivas Vels. Médias (Fig.5.16d) das Arms.(+): PPX 2,1 (90% entre 1 a 2 iters.) e PPY 1,0 (100% em 1). As Arms.(-): PNx 11,7 (90% entre 10 e 12 iters.) e PNY 13,2 (90% entre 10 e 15). Concluiu-se também que, 10 a 15 iterações (Fig.5.15d) parece ser o ideal para as (-) convergirem perto de 100%.
- As Armaduras (+/-) do Cj.6 convergiram alto devido ao uso dos aceleradores variáveis, conforme recomendado em Braga [12] e há maior potencial, mesmo abaixo do Cj.5. As (-) ainda lentas (< 85%) é preciso mais pesquisa.
- A homogeneidade do Cj.6 (Figs.5.16e e f) apresentou redução discreta para as (+) comparado à do Cj.5. As Arms.(-) PNx e PNY aproximaram-se dos 80%, em 60% a 80% dos Treinos dos Pjs.9 e 10. O 8 reduziu p/ 50%.
- A seguir, algumas Convergências (Figs.5.17a e d) e Dispersão de Erros de Classes (Figs.5.17b e c) de Treino e Testes Arm.PPX e a Disp. Erros Arm.PNx (Figs.5.17c e f) obtidos no *Orange DataMiningTM* para comparação com os % obtidos aqui:



Figura 5.17: Gráfs. Comparativos obtidos via *Orange DataMiningTM* - Cj.6

Fonte: Autor

5.3.11 Resultados das Prospecções - Melhores Topologias

Este item lista as topologias e as parametrizações de RNA prospectadas com os projetos ao longo dos Treinamentos e Testes, na busca por RNAs que gerassem dimensionamentos próximos ou iguais aos convencionais.

Os dois gráficos topográficos (Figs.5.18a e b) a seguir, listam a evolução das convergências durante as prospecções, para atingir as topologias e aceleradores de máximas convergências possíveis, das armaduras (+)(-) via RNA dos Cjs.2 a 6 de projetos, cada uma processada 10 vezes para registro da estatística, tarefa semelhante efetuada por Favan [19].

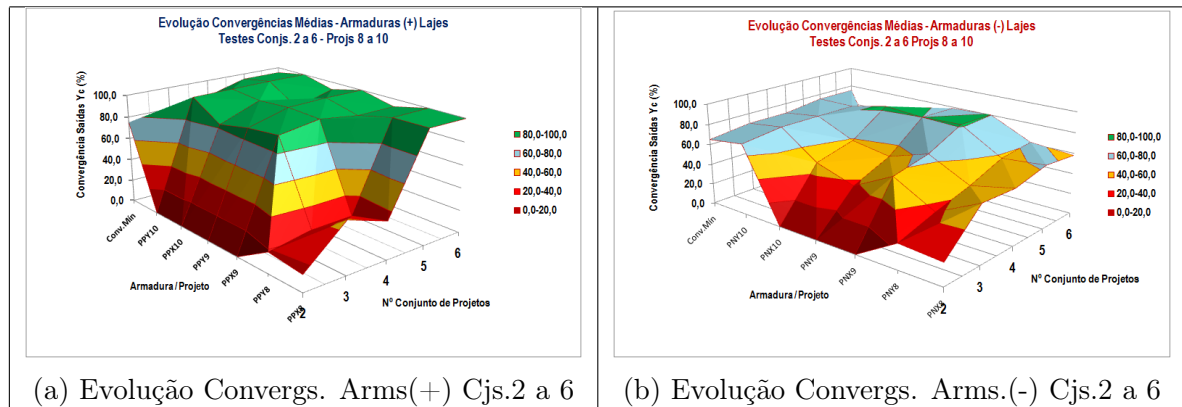


Figura 5.18: Evol. Prospec. Converg. Cjs.2 a 6 Melhores Topologs. e Parâmetros

Fonte: Autor

E a Tabela 5.2 a seguir, lista o resumo das melhores Topologias, Aceleradores e Parâmetros obtidos durante as 40 prospecções de Treinamentos executadas para encontra-los, tal como fizeram também, Félix [20] e Fernandes [21].

Conjunto	Treino / Teste	Projs .Treino / Teste	Nº ents. / Nº nros / Nº saídas	Top. Melhor Converg.	Acels. Melhor Converg.
1	1	Tr(1 a 4) / Ts(5)	9 / 8 a 12 / 5	09-12-05	η 0.10 μ 0.10
2	2	Tr(1 a 4) / Ts(5)	9 a 13 / 8 a 12 / 5	13-12-05	η 0.10 μ 0.05
3	3	Tr(1 a 7) / Ts(8 a 10)	13 a 14 / 10 a 12 / 5	14-10-05	η 0.10 μ 0.05
4	4	Tr(1 a 7) / Ts(8 a 10)	14 / 10 a 12 / 5	14-10-05	(+) η 0.05 μ 0.05 e (-) η 0.03 μ 0.03
5	5	Tr(1 a 7) / Ts(8 a 10)	15 / 10 a 12 / 5	15-10-05	(+) η 0.05 μ 0.05 e (-) η 0.03 μ 0.03
6	6	Tr(1 a 7) / Ts(8 a 10)	15 / 10 a 14 / 5	15-12-05	η 0.10 μ 0.03 \downarrow

Tabela 5.2: Evolução da Topologia e Aceleradores Prospectados - Cjs.1 a 6

Fonte: Autor

- Os conjuntos construídos têm heterogeneidade regressiva, do Cj.1 (projetos com dimensões e unidades mais distantes) até o 6 (mais próximas). Do 1 ao 5 utilizaram aceleradores *constantes*, e o 6, *variáveis*.

- Os Cjs.1 e 2 foram os iniciais e mais empíricos, mas apontaram o Norte para descoberta das topologias e parâmetros mais promissores. Os Cjs.3 a 6 já caminharam num rumo mais convergente, graças ao **Know How** assimilado progressivamente.

5.3.12 Evolução da Convergência dos Conjs.3 a 6 de Projetos

Os 2 gráficos a seguir, das Arms. (+) (Fig.5.19a) e o das Arms. (-) (Fig.5.19b) resumem as convergências dos Testes com os projetos 8 a 10, obtidas após os Treinos dos Cjs.3 a 6, e comparando os métodos Convencional e RNA. Já os gráficos das Armaduras (+) (Fig.5.19c) e (-) (Fig.5.19d) mostram a evolução das suas velocidades médias de convergência.

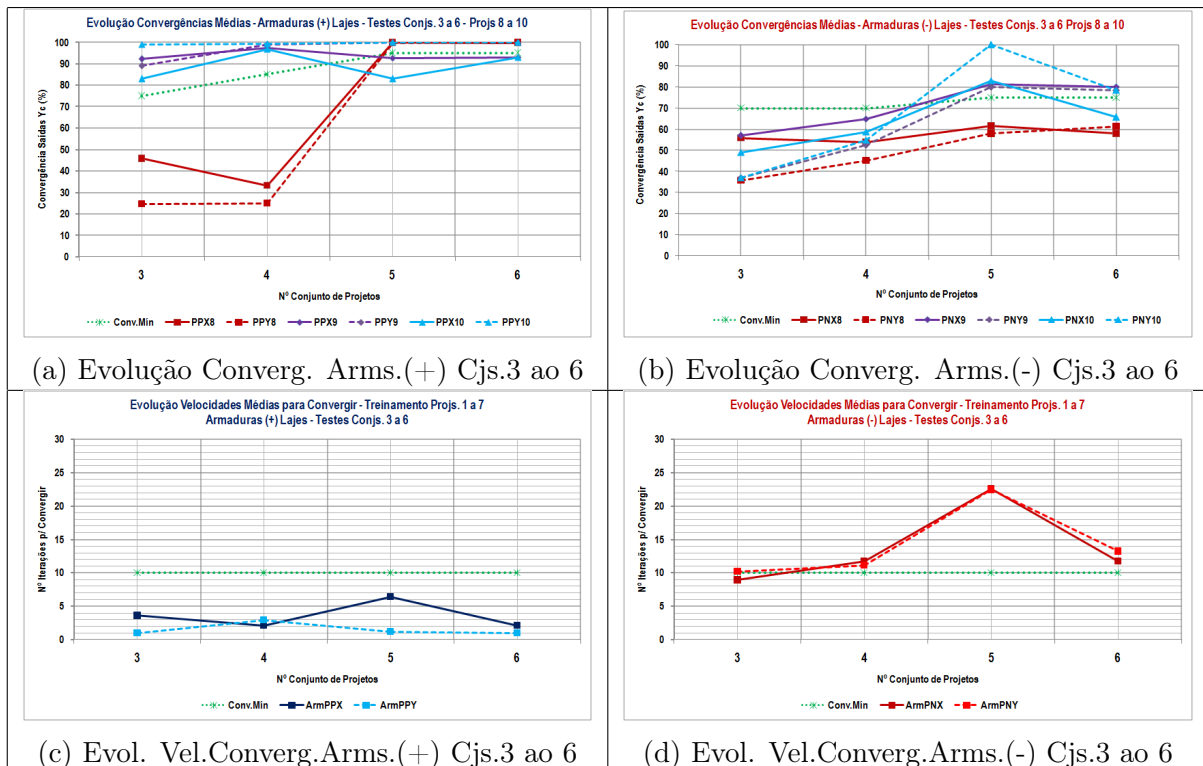


Figura 5.19: Evolução do % e Velocs. Médias de Convergência, Arms. Cjs.3 a 6

Fonte: Autor

Análise da Evolução dos Conjuntos de Projetos 3 a 6:

- As convergências dos Testes dos projetos 8 a 10, das Armaduras (+) (PPX e PPY) apresentaram valores sempre $> 80\%$, desde o Cj.3 até o 6, e praticamente cravaram os 100% em 2 dos projetos nos Cjs.5 e 6.

- A evolução das RNAs nos Testes (Pjs.8 a 10) foi mais expressiva nas Armaduras (-) PNX e PNY do Pj.9, iniciando em 23% e 18% no Cj.3, elevaram-se para 64,8% e 52,4% no 4, saltaram para 81,4% e 80,0% no 5 e estabilizaram-se em 80,2% e 78,6% no Cj.6. O projeto 10 teve quase a mesma evolução do 9 e o projeto 8 teve as menores convergências, que mesmo ficando abaixo dos 65% teve grande evolução.
- O provável motivo das PNX e PNY terem tido nos testes, menor convergência que as (+), aponta para a quantidade maior de classes (4 a 6) para a RNA distinguir.
- Observou-se também que, a evolução das velocidades de convergência das armaduras (+) foram sempre muito rápidas, iniciando em 3 a 4 iterações nos Cjs.3 e 4 até atingirem 1 a 2, no Cj6. Mesmo assim, ainda é rápida comparada às convergências de outros trabalhos tais como, Abdalla [4], Favan [19] e Souza [45].
- A evolução maior das convergências das Armaduras (-) também teve um custo maior, com a redução da velocidade nos Cjs.3 e 4, passando de 9 para 11 iterações e para 22, no Cj.5. Mas foi evidente que no Cj.6, com aceleradores variáveis, as velocidades reduziram para 12 iters., mais rápidas que as do Cj.5 e quase iguais ao Cj.3.
- Percebe-se que, dos Cjs.3 e 4 para o 5 e 6, houveram evoluções significativas das convergências, tanto das Armaduras (+) como das (-), até mais das negativas. Isto mostrou que a redução dos aceleradores ampliou a capacidade de convergência da RNA em se aproximar dos dimensionamentos no método convencional.
- Observou-se na evolução, que o Cj.5 de Projetos foi o de matriz mais equilibrada em relação à rotina de RNA, demonstrando que esta estava no rumo certo e que os mapas dos projetos precisam ser dimensional e posicionalmente mais próximos, como ocorre na realidade dos projetos gerados nas construtoras, [45].

5.3.13 Algumas Pesquisas com Resultados Semelhantes:

Abdalla [4] apesar de ter trabalhado RNAs para aplicação em classificação de imagens, este seguiu procedimentos de treino de RNAs e até alguns parâmetros semelhantes tais como: Treinou e testou várias topologias e parâmetros das RNA, resumindo as prospecções numa tabela evolutiva (p.8204); Utilizou RNA PMC; Adotou 5 classes de saída (corpos d'água, culturas diversas, floresta, campo, urbano); Os atributos de entrada foram calculados como 5 geométricos para cada classe de saída (5 x 5) perfazendo

25 atributos gerados por programa de satélite e ferramenta de análise. Prospectou aceleradores de aprendizado e avanço conseguindo a melhor convergência com $\eta=0,02$ e $\mu=0,53$. Chegou à melhor topologia "25-15-5", mas precisou de 10.000 iterações para obter altas convergências.

Souza [45] em seu trabalho para classificação de solo, também adotou a arquitetura PMC padrão, utilizando o programa *KerasTM*, que implementa o algoritmo de *Tensorflow* de RNA PMC. Também seguiu procedimentos semelhantes tais como: Prospectou várias topologias tentando encontrar uma Proporção de Camadas x N^o de Neurônios; No final, a de melhor convergência foi a 4-2-1. Comentou seus resultados nos Testes que ficaram na faixa dos 80% na validação e 63% nos Testes, e mesmo os Treinamentos convergido em 100% com 90 iterações, alguns de seus resultados de saídas corroboraram os deste trabalho: mostrou que não é trivial a RNA obter altas convergências, dependendo da complexidade da função-objetivo; Confirmou por matriz confusão, que também teve desbalanceamento entre classes com maior n^o de instâncias, tendo problemas no aprendizado.

Moraes [33] também prospectou topologias com 2 a 20 neurônios nas camadas intermediárias e destacou a topologia com 20, onde mesmo obtendo maior % de convergência no Treino, esta não gerou a maior pois a topologia com 2 neurônios gerou a melhor convergência (Treino 68,5% e Teste 63,2%), comprovando tal qual no Cj.6 deste protótipo que, sem ser uma regra, topologias menores podem atingir altas convergências.

5.4 Resultados Módulo 3.3 - Orçamento/Classif. AHP

A seguir, os resultados dos orçamentos e classificações via AHP, dos projetos de Teste (8 a 10), Cjs.3 a 6, comparando os resultantes dos dimensionamentos (Convencional e via RNA) e no final, os resumos evolutivos da precisão das classificações obtidas. A apresentação será através das tabelas *Matriz Principais Hierárquica de Alternativas x Critérios* (Tabs.5.3a e b do Cj.3 às Tabs.5.15a e b do Cj.6), e tabelas *Cruzada de Peso x Peso* (Tabs.5.4a e b do Cj.3 às Tabs.5.16a e b do Cj.6), e respectivos gráficos classificatórios dos projetos por ganho agregado (Figs. 5.20a e b do Cj.3 às Figs.5.29a e b do Cj.6).

5.4.1 Orçamentações e Classificações - Conj.3 - Teste 3

A seguir, as *Matrizes Principais* (Convencional e por RNA) das orçamentações ranqueadas (Tabs.5.3a e b), as respectivas *Tabelas Cruzadas Peso x Peso* (Tabs.5.4a

e b), do Cj.3, Teste 3, Projs.8 a 10, e respectivos *Gráficos de Classificação* (Figs.5.20a e b):

Conj.3 - Orçamentos e Classificação 1 - Projs.8 a 10 (Tab.5.3 a Fig.5.20):

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios								Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios							
Projeto	CodCrt	CustoArmLjs%	UtiliVRcrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltpj%	Projeto	CodCrt	CustoArmLjs%	UtiliVRcrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltpj%
8	1	447.954,37	1,00	60	24,85	-	28,19	8	1	323.185,13	1,00	60	24,85	-	26,77
8	2		33,33	40	37,28	-	28,19	8	2		33,33	40	37,28	-	26,77
8	3	100	33,33	70	21,30	-	28,19	8	3	100	33,33	70	21,30	-	26,77
8	4	447.954,37	50,80	90	16,57	-	28,19	8	4	323.185,13	42,21	90	16,57	-	26,77
9	1	236.499,57	1,00	60	24,85	-	24,22	9	1	239.194,75	1,00	60	24,85	-	24,95
9	2		33,33	40	37,28	-	24,22	9	2		33,33	40	37,28	-	24,95
9	3	100	33,33	70	21,30	-	24,22	9	3	100	33,33	70	21,30	-	24,95
9	4	236.499,57	26,82	90	16,57	-	24,22	9	4	239.194,75	31,24	90	16,57	-	24,95
10	1	197.395,13	1,00	60	24,85	-	23,48	10	1	203.274,90	1,00	60	24,85	-	24,17
10	2		33,33	40	37,28	-	23,48	10	2		33,33	40	37,28	-	24,17
10	3	100	33,33	70	21,30	-	23,48	10	3	100	33,33	70	21,30	-	24,17
10	4	197.395,13	22,38	90	16,57	-	23,48	10	4	203.274,90	26,55	90	16,57	-	24,17

(a) Matriz Class.1 Projs.Cj.3 (Conv.)

(b) Matriz Class.1 Projs.Cj.3 (RNA)

Tabela 5.3: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.1 (Conv./RNA) Pjs.8 a 10 - Teste 3 Cj.3

Fonte: Autor

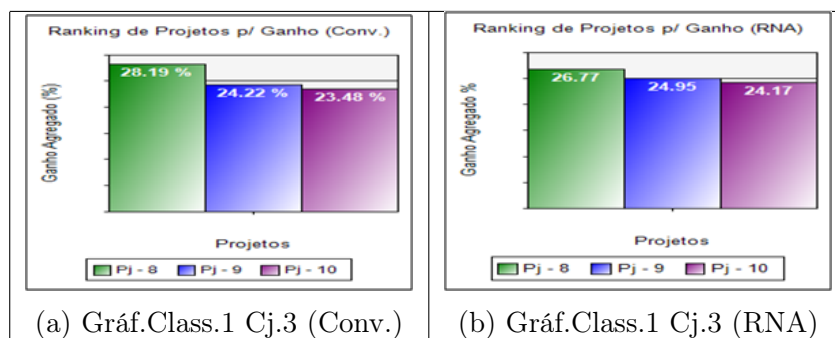
Tabela Cruzada - Calculo dos Pesos Individuais das Alternativas - Teste 3 - Cj.3							Tabela Cruzada - Calculo dos Pesos Individuais das Alternativas - Teste 3 - Cj.3						
	CustoArm	TpAcab	MargLucro%	ROI\$	PesIndCrt%	PesIndCrtNm%		CustoArm	TpAcab	MargLucro%	ROI\$	PesIndCrt%	PesIndCrtNm%
CustoArm	1,00	0,67	1,17	1,50	4,33	0,25	CustoArm	1,00	0,67	1,17	1,50	4,33	0,25
TpAcab	1,50	1,00	1,75	2,25	6,50	0,37	TpAcab	1,50	1,00	1,75	2,25	6,50	0,37
MargLucro	0,86	0,57	1,00	1,29	3,71	0,21	MargLucro	0,86	0,57	1,00	1,29	3,71	0,21
ROI	0,67	0,44	0,78	1,00	2,89	0,17	ROI	0,67	0,44	0,78	1,00	2,89	0,17
Somat-->	4,02	2,68	4,69	6,04	17,44		Somat-->	4,02	2,68	4,69	6,04	17,44	

(a) Tab.Cruz.Pesos/Alt.Cj.3 (Conv.)

(b) Tab.Cruz.Pesos/Alt.Cj.3 (RNA)

Tabela 5.4: Tabelas Cruzadas P x P (Conv. e RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3

Fonte: Autor



(a) Gráf.Class.1 Cj.3 (Conv.)

(b) Gráf.Class.1 Cj.3 (RNA)

Figura 5.20: Gráficos Class.1 - Melhor Ganho (Conv. e RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3

Fonte: Autor

Obs.: Nas classificações 2 e 3 a seguir, não serão visualizadas as tabelas cruzadas, pois são as mesmas da classificação 1.

Conj.3 - Orçamentos e Classifs. 2 e 3 - Projs.8 a 10 (Tab.5.5 a Fig.5.21):

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios							
Projeto	CodCrt	CustoArmLj%	UtiliVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltPj%
8	1	447.954,37	1,00	60	24,85	-	22,81
8	2	2	20,00	40	37,28	-	22,81
8	3	100	32,26	70	21,30	-	22,81
8	4	447.954,37	49,69	90	16,57	-	22,81
9	1	236.499,57	1,00	60	24,85	-	26,38
9	2	2	40,00	40	37,28	-	26,38
9	3	100	32,26	70	21,30	-	26,38
9	4	236.499,57	26,23	90	16,57	-	26,38
10	1	197.395,13	1,00	60	24,85	-	26,71
10	2	2	40,00	40	37,28	-	26,71
10	3	110	35,48	70	21,30	-	26,71
10	4	217.134,64	24,08	90	16,57	-	26,71

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios							
Projeto	CodCrt	CustoArmLj%	UtiliVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltPj%
8	1	323.185,13	1,00	60	24,85	-	21,39
8	2	1	20,00	40	37,28	-	21,39
8	3	100	32,26	70	21,30	-	21,39
8	4	323.185,13	41,12	90	16,57	-	21,39
9	1	239.194,75	1,00	60	24,85	-	27,07
9	2	2	40,00	40	37,28	-	27,07
9	3	100	32,26	70	21,30	-	27,07
9	4	239.194,75	30,43	90	16,57	-	27,07
10	1	203.274,90	1,00	60	24,85	-	27,43
10	2	2	40,00	40	37,28	-	27,43
10	3	110	35,48	70	21,30	-	27,43
10	4	223.802,39	26,45	90	16,57	-	27,43

(a) Matriz Class.2 Projs.Cj.3 (Conv.) (b) Matriz Class.2 Projs.Cj.3 (RNA)

Tabela 5.5: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.2 - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3 Fonte: Autor

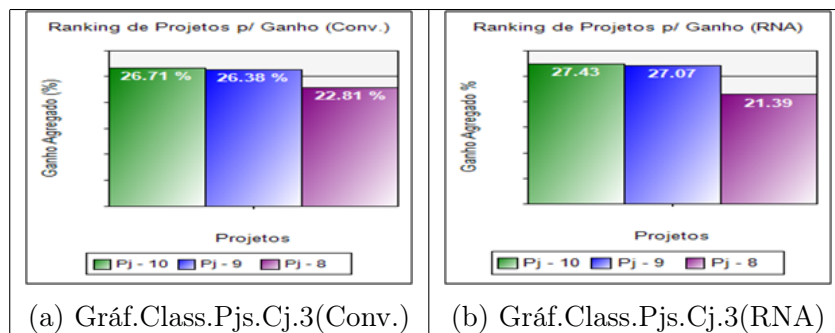


Figura 5.21: Gráficos Class.2 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3 Fonte: Autor

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios							
Projeto	CodCrt	CustoArmLj%	UtiliVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltPj%
8	1	447.954,37	1,00	60	28,27	-	28,27
8	2	2	25,00	80	19,70	-	28,27
8	3	100	32,57	70	22,51	-	28,27
8	4	447.954,37	49,97	50	31,52	-	28,27
9	1	236.499,57	1,00	60	26,27	-	23,61
9	2	3	37,50	80	19,70	-	23,61
9	3	102	33,22	70	22,51	-	23,61
9	4	241.229,56	26,91	50	31,52	-	23,61
10	1	197.395,13	1,00	60	26,27	-	22,64
10	2	3	37,50	80	19,70	-	22,64
10	3	105	34,20	70	22,51	-	22,64
10	4	207.264,89	23,12	50	31,52	-	22,64

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios							
Projeto	CodCrt	CustoArmLj%	UtiliVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltPj%
8	1	323.185,13	1,00	60	24,85	-	24,00
8	2	2	25,00	40	37,28	-	24,00
8	3	105	34,20	70	21,30	-	24,00
8	4	339.344,39	43,14	90	16,57	-	24,00
9	1	239.194,75	1,00	60	24,85	-	26,44
9	2	3	37,50	40	37,28	-	26,44
9	3	102	33,22	70	21,30	-	26,44
9	4	243.978,64	31,02	90	16,57	-	26,44
10	1	203.274,90	1,00	60	24,85	-	25,45
10	2	3	37,50	40	37,28	-	25,45
10	3	100	32,57	70	21,30	-	25,45
10	4	203.274,90	25,84	90	16,57	-	25,45

(a) Matriz Class.Projs.Cj.3 (Conv.) (b) Matriz Class.Projs.Cj.3 (RNA)

Tabela 5.6: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.3 - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3 Fonte: Autor

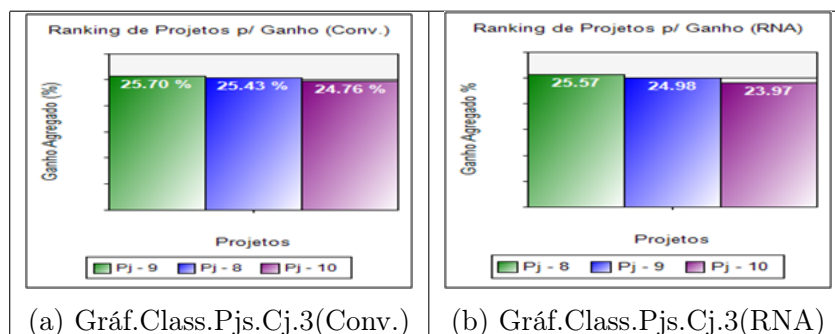


Figura 5.22: Gráficos Class.3 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 3 Cj.3 Fonte: Autor

Análise de Orçamentos e Classificações 1 a 3 - Treino/Teste 3 - Cj.3:

- Os pesos de relevância aplicados aos critérios pelos experts foram *Custo* (60%), *Acabamento* (40%) *Margem Lucro* (70%) e *ROI* (90%) e foram os mesmos para todas as classificações 1, 2 e 3, como indicado na 5^a coluna (Tabs.5.3a e b).
- Neste Teste 3 do Conjunto 3 foram mantidos os *Pesos dos Critérios* no padrão, nas 3 classificações, mas variando apenas o valor da utilidade dos critérios: *Acabamento*, *Margem de Lucro* e *ROI* .
- Na Classificação 1 (Tabs.5.3a e b) e gráficos (Figs.5.20a e b) com as utilidades (*Custo*, *Acabamento*, *Marg. Lucro* e *ROI*) mantidas iguais para os projetos (8 a 10), a RNA acompanhou a Convencional, e a classificação de Projetos por ordem de melhor ganho foi: 8, 9 e 10.
- Na Classificação 2 (Tabs.5.5a e b) e gráficos (Figs.5.21a e b), com o aumento em 1 nível no *Acabamento* para os projetos 9 e 10 e aumento do *ROI* para 110%, a RNA acompanhou a classificação com dimensionamento Convencional, e a ordem dos Projetos por melhor ganho foi: 10, 9 e 8.
- E na Classificação 3 (Tabs.5.6a e b) e gráficos (Figs.5.22a e b), com *Acabamento*=2 para o projeto 8, *Acabamento*=3 para os Projs.9 e 10, e o *ROI* (Pj8 = 105%, Pj.9 = 102%, Pj.10 = 100%), a RNA acompanhou a classificação com dimensionamento Convencional, e a mesma passou a ser: 9, 8 e 10.
- A diferença percentual calculada da precisão nos orçamentos dimensionados por Convencional e RNA foi de: Pj.8 (28%), Pj.9 (1%) e Pj.10 (3%) respectivamente, sendo o 8 o menos preciso e o 9 o mais preciso.
- **Importante:** Em todas as classificações o método por RNA acompanhou a mesma classificação que o método por engenharia convencional, mostrando que o algoritmo de RNA esta correto sendo mais precisa a rotina de RNA e AHP, no projeto 9.

5.4.2 Orçamentações e Classificações - Conj. 4 - Teste 4

A seguir, as *Matrizes Principais* (Convencional e por RNA) das orçamentações ranqueadas (Tabs.5.7a a b), as respectivas *Tabelas Cruzadas Peso x Peso* (Tabs.5.8a a b), do Cj.4, Teste 4, Projs.8 a 10, e respectivos *Gráficos de Classificação* (Figs.5.23a e b):

Conj.4 - Orçamento e Classificação 1 - Projs.8 a 10 - (Tab.5.7 a Fig.5.23):

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios							
Projeto	CodCrt	CustoArmLjs%	UtiliVRcrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltpj%
8	1	447.954,37	1,00	60	24,85		28,19
8	2		1	33,33	40	37,28	28,19
8	3	100	33,33	70	21,30		28,19
8	4	447.954,37	50,80	90	16,57		28,19
9	1	236.499,57	1,00	60	24,85		24,22
9	2		1	33,33	40	37,28	24,22
9	3	100	33,33	70	21,30		24,22
9	4	236.499,57	26,82	90	16,57		24,22
10	1	197.395,13	1,00	60	24,85		23,48
10	2		1	33,33	40	37,28	23,48
10	3	100	33,33	70	21,30		23,48
10	4	197.395,13	22,38	90	16,57		23,48

(a) Matriz Class.Projs.Cj.4(Conv.)

(b) Matriz Class.Projs.Cj.4(RNA)

Tabela 5.7: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.1 (Conv./RNA) Pjs.8 a 10 - Teste 4 Cj.4

Fonte: Autor

Tabela Cruzada - Calculo dos Pesos Individuais das Alternativas						
	CustoArm	TpAcab	MargLucro%	ROI R\$	PesIndCrt%	PesIndCrtNm%
CustoArm	1,00	0,67	1,17	1,50	4,33	0,25
TpAcab	1,50	1,00	1,75	2,25	6,50	0,37
MargLucro	0,86	0,57	1,00	1,29	3,71	0,21
ROI	0,67	0,44	0,78	1,00	2,89	0,17
Somat-->	4,02	2,68	4,69	6,04	17,44	

(a) Tab.Cruz.Pesos/Alt.Cj.4(Conv.)

(b) Tab.Cruz.Pesos/Alt.Cj.4(RNA)

Tabela 5.8: Classif. 1 - Matrizes Cruzadas (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4

Fonte: Autor

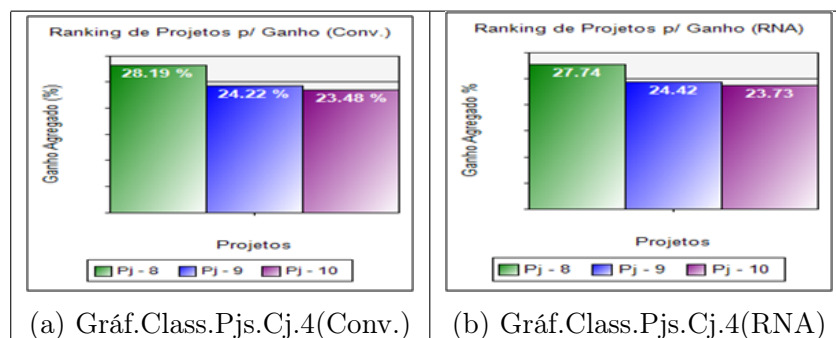


Figura 5.23: Gráficos Class.1 - Melhor Ganho (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4

Fonte: Autor

Obs.: Nas classificações 2 e 3 a seguir, não serão visualizadas as tabelas cruzadas, pois são as mesmas da classificação 1.

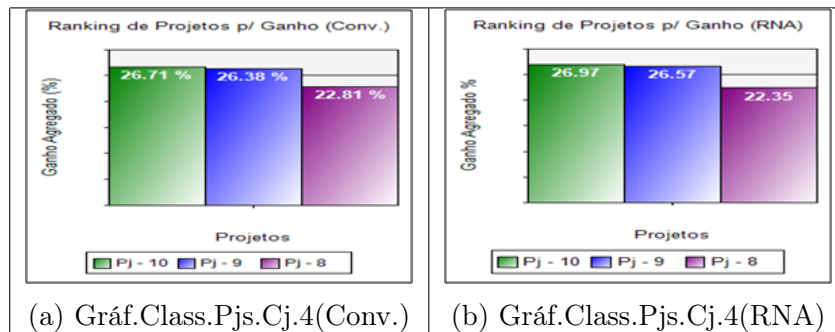
Conj.4 - Orçamentos e Classifs. 2 e 3 - Projs. 8 a 10 (Tabs.5.9 a Figs.5.25):

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios							Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios								
Projeto	CodCrt	CustoArmLjs%	UtilVRcrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltPj%	Projeto	CodCrt	CustoArmLjs%	UtilVRcrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltPj%
8	1	447.954,37	1,00	60	24,85		22,81	8	1	385.733,76	1,00	60	24,85		22,35
8	2		1	20,00	40	37,28	22,81	8	2		1	20,00	40	37,28	22,35
8	3	100	32,26	70	21,30		22,81	8	3	100	32,26	70	21,30		22,35
8	4	447.954,37	49,69	90	16,57		22,81	8	4	385.733,76	46,93	90	16,57		22,35
9	1	236.499,57	1,00	60	24,85		26,38	9	1	225.115,30	1,00	60	24,85		26,57
9	2	2	40,00	40	37,28		26,38	9	2	2	40,00	40	37,28		26,57
9	3	100	32,26	70	21,30		26,38	9	3	100	32,26	70	21,30		26,57
9	4	236.499,57	26,23	90	16,57		26,38	9	4	225.115,30	27,39	90	16,57		26,57
10	1	197.395,13	1,00	60	24,85		26,71	10	1	191.832,80	1,00	60	24,85		26,97
10	2	2	40,00	40	37,28		26,71	10	2	2	40,00	40	37,28		26,97
10	3	110	35,48	70	21,30		26,71	10	3	110	35,48	70	21,30		26,97
10	4	217.134,64	24,08	90	16,57		26,71	10	4	211.016,08	25,88	90	16,57		26,97

(a) Matriz Class.Projs.Cj.4 (Conv.)

(b) Matriz Class.Projs.Cj.4 (RNA)

Tabela 5.9: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.2 - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4 Fonte: Autor



(a) Gráf.Class.Pjs.Cj.4(Conv.)

(b) Gráf.Class.Pjs.Cj.4(RNA)

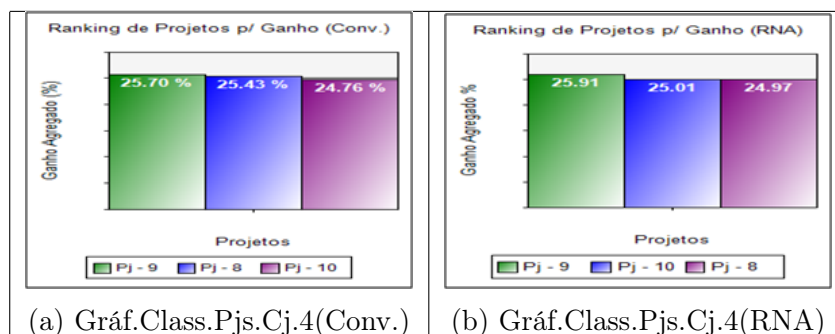
Figura 5.24: Gráficos Class.2 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4 Fonte: Autor

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios							Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios								
Projeto	CodCrt	CustoArmLjs%	UtilVRcrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltPj%	Projeto	CodCrt	CustoArmLjs%	UtilVRcrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltPj%
8	1	447.954,37	1,00	60	24,85		25,43	8	1	385.733,76	1,00	60	24,85		24,97
8	2	2	25,00	40	37,28		25,43	8	2	2	25,00	40	37,28		24,97
8	3	105	34,20	70	21,30		25,43	8	3	105	34,20	70	21,30		24,97
8	4	470.352,09	51,75	90	16,57		25,43	8	4	405.020,45	49,01	90	16,57		24,97
9	1	236.499,57	1,00	60	24,85		25,70	9	1	225.115,30	1,00	60	24,85		25,91
9	2	3	37,50	40	37,28		25,70	9	2	3	37,50	40	37,28		25,91
9	3	102	33,22	70	21,30		25,70	9	3	102	33,22	70	21,30		25,91
9	4	241.229,56	26,54	90	16,57		25,70	9	4	229.617,81	27,78	90	16,57		25,91
10	1	197.395,13	1,00	60	24,85		24,76	10	1	191.832,80	1,00	60	24,85		25,01
10	2	3	37,50	40	37,28		24,76	10	2	3	37,50	40	37,28		25,01
10	3	100	32,57	70	21,30		24,76	10	3	100	32,57	70	21,30		25,01
10	4	197.395,13	21,72	90	16,57		24,76	10	4	191.832,80	23,21	90	16,57		25,01

(a) Matriz Class.Projs.Cj.4 (Conv.)

(b) Matriz Class.Projs.Cj.4 (RNA)

Tabela 5.10: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.3 - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4 Fonte: Autor



(a) Gráf.Class.Pjs.Cj.4(Conv.)

(b) Gráf.Class.Pjs.Cj.4(RNA)

Figura 5.25: Gráficos Class.3 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 4 Cj.4 Fonte: Autor

Análise de Orçamentos e Classificações 1 a 3 - Treino/Teste 4 - Cj.4:

- Os pesos de relevância aplicados aos critérios pelos experts foram *Custo* (60%), *Acabamento* (40%) *Margem Lucro* (70%) e *ROI* (90%) e foram os mesmos para todas as classificações 1, 2 e 3, como indicado na 5^a coluna (Tabs.5.7a e b).
- Nas classificações do Teste 4, Conjunto 4 foram mantidos os *Pesos dos Critérios* no padrão para as 3 classificações, variando apenas o valores das utilidades dos critérios *Acabamento*, *Margem de Lucro* e *ROI*.
- Na Classificação 1 (Figs.5.23a e b), com as utilidades (*Custo*, *Acabamento*, *Marg.Lucro* e *ROI*) mantidas iguais para todos os projetos (8 a 10), a RNA acompanhou a classificação por dimensionamento Convencional, e a ordem dos Projetos por melhor ganho foi: 8, 9 e 10.
- Na Classificação 2 (Figs.5.24a e b), a RNA acompanhou a classificação por dimensionamento Convencional, e com o aumento em 1 nível no *Acabamento* para os projetos 9 e 10 e aumento do *ROI* para 110%, a ordem dos Projetos por melhor ganho foi: 10, 9 e 8.
- Na Classificação 3 (Figs.5.25a e b), com o *Acabamento*=2 para o projeto 8, *Acabamento*=3 para os projetos 9 e 10 e o *ROI* (Pj8 = 105%, Pj.9 = 102%, Pj.10 = 100%), a RNA acompanhou classificação por dimensionamento Convencional, e a ordem passou a ser: 9, 8 e 10.
- A diferença percentual de precisão nos orçamentos dimensionados por Convencional e RNA foi: Pj.8 (14%), Pj.9 (5%) e Pj.10 (3%) respectivamente, sendo o 8 o menos preciso e o 10 o mais preciso.
- **Importante:** Em todas as classificações o método por RNA acompanhou a mesma classificação que o método por engenharia convencional, mostrando que o algoritmo de RNA esta correto sendo mais preciso no projeto 10. Isto mostrou também que, a precisão da rotina de dimensionamento convencional e por RNA se tornou maior.

5.4.3 Orçamentações e Classificações - Conj.5 - Teste 5

A seguir, as *Matrizes Principais* (Convencional e por RNA) das orçamentações ranqueadas (Tabs.5.11a e b), as respectivas *Tabelas Cruzadas Peso x Peso* (Tabs.5.12a a b), do Cj.5, Teste 5, Projs.8 a 10, e respectivos *Gráficos de Classificação* (Figs.5.26a e b):

Conj.5 - Orçamento e Classificação 1 - Projs.8 a 10 - (Tab.5.11 a Fig.5.26):

Tabela Matriz Hierárquica AHP								
Projeto	CodCrt	CustoArmLjs%	UtilVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAlTPj%	
8	1	220.416,07	1,00	60	24,85	-	24,43	
8	2		1	33,33	40	37,28	-	24,43
8	3	100	33,33	70	21,30	-	24,43	
8	4	220.416,07	28,13	90	16,57	-	24,43	
9	1	284.989,22	1,00	60	24,85	-	25,80	
9	2		1	33,33	40	37,28	-	25,80
9	3	100	33,33	70	21,30	-	25,80	
9	4	284.989,22	36,37	90	16,57	-	25,80	
10	1	278.101,41	1,00	60	24,85	-	25,65	
10	2		1	33,33	40	37,28	-	25,65
10	3	100	33,33	70	21,30	-	25,65	
10	4	278.101,41	35,49	90	16,57	-	25,65	

Tabela Matriz Hierárquica AHP								
Projeto	CodCrt	CustoArmLjs%	UtilVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAlTPj%	
8	1	211.240,49	1,00	60	24,85	-	24,45	
8	2		1	33,33	40	37,28	-	24,45
8	3	100	33,33	70	21,30	-	24,45	
8	4	211.240,49	28,25	90	16,57	-	24,45	
9	1	271.866,90	1,00	60	24,85	-	25,80	
9	2		1	33,33	40	37,28	-	25,80
9	3	100	33,33	70	21,30	-	25,80	
9	4	271.866,90	36,35	90	16,57	-	25,80	
10	1	264.762,49	1,00	60	24,85	-	25,64	
10	2		1	33,33	40	37,28	-	25,64
10	3	100	33,33	70	21,30	-	25,64	
10	4	264.762,49	35,40	90	16,57	-	25,64	

(a) Matriz Class.Projs.Cj.5(Conv.)
(b) Matriz Class.Projs.Cj.5(RNA)

Tabela 5.11: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.1 (Conv./RNA) Pjs.8 a 10 - Teste 5 Cj.5

Fonte: Autor

Tabela Cruzada - Calculo dos Pesos Individuais das Alternativas						
	CustoArm	TpAcab	MargLucro%	ROI\$	PesIndCrt%	PesindCrtNm%
CustoArm	1,00	0,67	1,17	1,50	4,33	0,25
TpAcab	1,50	1,00	1,75	2,25	6,50	0,37
MargLucro	0,86	0,57	1,00	1,29	3,71	0,21
ROI	0,67	0,44	0,78	1,00	2,89	0,17
Somat-->	4,02	2,68	4,69	6,04	17,44	

Tabela Cruzada - Calculo dos Pesos Individuais das Alternativas						
	CustoArm	TpAcab	MargLucro%	ROI\$	PesIndCrt%	PesindCrtNm%
CustoArm	1,00	0,67	1,17	1,50	4,33	0,25
TpAcab	1,50	1,00	1,75	2,25	6,50	0,37
MargLucro	0,86	0,57	1,00	1,29	3,71	0,21
ROI	0,67	0,44	0,78	1,00	2,89	0,17
Somat-->	4,02	2,68	4,69	6,04	17,44	

(a) Tab.Cruz.Pesos/Alt.Cj.5(Conv.)
(b) Tab.Cruz.Pesos/Alt.Cj.5(RNA)

Tabela 5.12: Classif. 1 - Tabelas Cruzadas (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5

Fonte: Autor

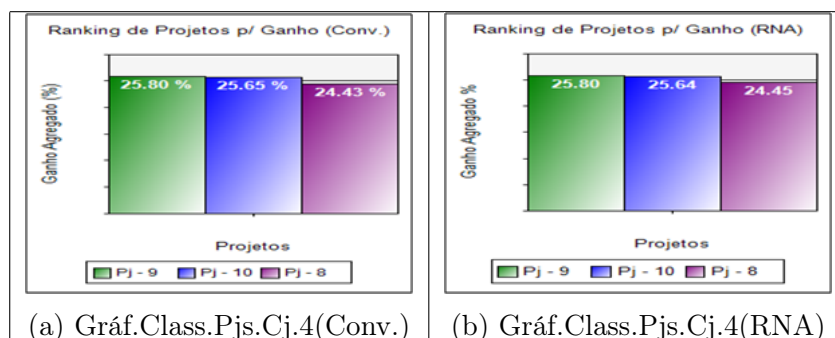


Figura 5.26: Gráficos Class.1 - Melhor Ganho (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5

Fonte: Autor

Obs.: Nas classificações 2 e 3 a seguir, não serão visualizadas as tabelas cruzadas, pois são as mesmas da classificação 1.

Conj.5 - Orçamentos e Classifs. 2 e 3 - Projs. 8 a 10 (Tabs.5.13 a Figs.5.28):

Tabela Matriz Hierárquica AHP							
Projeto	CodCrt	CustoArmlJs%	UtilVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAHPj%
8	1	220.416,07	1,00	60	24,85	-	19,08
8	2	1	20,00	40	37,28	-	19,08
8	3	100	32,26	70	21,30	-	19,08
8	4	220.416,07	27,17	90	16,57	-	19,08
9	1	284.989,22	1,00	60	24,85	-	27,85
9	2	2	40,00	40	37,28	-	27,85
9	3	100	32,26	70	21,30	-	27,85
9	4	284.989,22	35,13	90	16,57	-	27,85
10	1	278.101,41	1,00	60	24,85	-	28,97
10	2	2	40,00	40	37,28	-	28,97
10	3	110	35,48	70	21,30	-	28,97
10	4	305.911,55	37,71	90	16,57	-	28,97

(a) Matriz Class.Projs.Cj.5 (Conv.)

Tabela Matriz Hierárquica AHP							
Projeto	CodCrt	CustoArmlJs%	UtilVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAHPj%
8	1	211.240,49	1,00	60	24,85	-	19,10
8	2	1	20,00	40	37,28	-	19,10
8	3	100	32,26	70	21,30	-	19,10
8	4	211.240,49	27,28	90	16,57	-	19,10
9	1	271.866,90	1,00	60	24,85	-	27,85
9	2	2	40,00	40	37,28	-	27,85
9	3	100	32,26	70	21,30	-	27,85
9	4	271.866,90	35,11	90	16,57	-	27,85
10	1	264.762,49	1,00	60	24,85	-	28,95
10	2	2	40,00	40	37,28	-	28,95
10	3	110	35,48	70	21,30	-	28,95
10	4	291.238,74	37,61	90	16,57	-	28,95

(b) Matriz Class.Projs.Cj.5 (RNA)

Tabela 5.13: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.2 - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5 Fonte: Autor

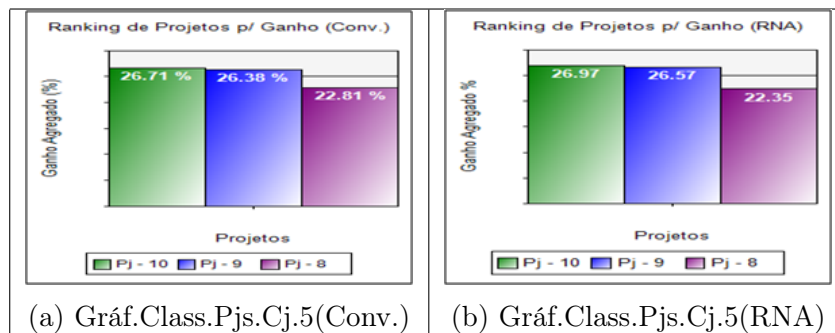


Figura 5.27: Gráficos Class.2 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5 Fonte: Autor

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios							
Projeto	CodCrt	CustoArmlJs%	UtilVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAHPj%
8	1	447.954,37	1,00	60	24,85		25,43
8	2	2	25,00	40	37,28		25,43
8	3	105	34,20	70	21,30		25,43
8	4	470.352,09	51,75	90	16,57		25,43
9	1	236.499,57	1,00	60	24,85		25,70
9	2	3	37,50	40	37,28		25,70
9	3	102	33,22	70	21,30		25,70
9	4	241.229,56	26,54	90	16,57		25,70
10	1	197.395,13	1,00	60	24,85		24,76
10	2	3	37,50	40	37,28		24,76
10	3	100	32,57	70	21,30		24,76
10	4	197.395,13	21,72	90	16,57		24,76

(a) Matriz Class.Projs.Cj.5 (Conv.)

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios							
Projeto	CodCrt	CustoArmlJs%	UtilVRCrt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAHPj%
8	1	385.733,76	1,00	60	24,85		24,97
8	2	2	25,00	40	37,28		24,97
8	3	105	34,20	70	21,30		24,97
8	4	405.020,45	49,01	90	16,57		24,97
9	1	225.115,30	1,00	60	24,85		25,91
9	2	3	37,50	40	37,28		25,91
9	3	102	33,22	70	21,30		25,91
9	4	229.617,81	27,78	90	16,57		25,91
10	1	191.832,80	1,00	60	24,85		25,01
10	2	3	37,50	40	37,28		25,01
10	3	100	32,57	70	21,30		25,01
10	4	191.832,80	23,21	90	16,57		25,01

(b) Matriz Class.Projs.Cj.5 (RNA)

Tabela 5.14: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.3 - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5 Fonte: Autor

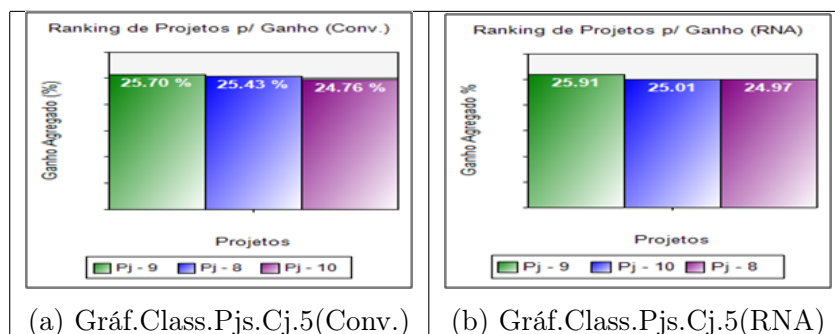


Figura 5.28: Gráficos Class.3 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 5 Cj.5 Fonte: Autor

Análise Orçamentos e Classificações 1 a 3 - Teste 5 - Cj.5:

- Os pesos de relevância aplicados aos critérios pelos experts foram *Custo* (60%), *Acabamento* (40%) *Margem Lucro* (70%) e *ROI* (90%) e foram os mesmos para todas as classificações 1, 2 e 3, como indicado na 5^a coluna das Tabelas 5.11a e b.
- Neste Treino 5 do Conjunto 5, foram mantidos os *Pesos dos Critérios* no padrão nas 3 classificações, variando apenas o valor da utilidade dos critérios *Acabamento* e *Margem de Lucro*.
- Na Classificação 1 (Figs.5.26a e b), com as utilidades (*Custo*, *Acabamento*, *Marg. Lucro* e *ROI*) mantidas iguais para todos os projetos (8 a 10), a ordem de melhor ganho foi: 9, 10, 8.
- Na Classificação 2 (Figs.5.27a e b), com o aumento de 1 no nível de *Acabamento* para os projetos 9 e 10, e aumento do *ROI* para 110%, a ordem dos Projetos por melhor ganho passou a ser: 10, 9, 8.
- E na Classificação 3 (Figs.5.28a e b), com *Acabamento*=2 para o projeto 8, *Acabamento*=3 para os projetos 9 e 10, e o *ROI* (Pj8 105%, Pj.9 102%, Pj.10 100%), a ordem passou a ser: 9, 10 e 8.
- A diferença de precisão no orçamento dimensionamentos Convencional e RNA foi respectivamente: Pj.8 (4%), Pj.9 (5%) e Pj.10 (5%), sendo o projeto 8 o mais preciso seguido do 9 e 10 menos precisos, e mais homogêneos.
- **Importante:** Em todas as classificações o método por RNA acompanhou a mesma classificação do método por engenharia convencional, mostrando novamente, que os algoritmos das rotinas de RNA e AHP estão corretos e no caminho certo, pois as precisões obtidas pelas rotinas de AHP confirmaram as da RNA.

5.4.4 Orçamentações e Classificações - Conj. 6 - Teste 6

A seguir, as *Matrizes Principais* (Convencional e por RNA) das orçamentações ranqueadas (Tabs.5.15a e b), as respectivas *Tabelas Cruzadas Peso x Peso* (Tabs.5.16a a b), do Cj.6, Teste 6, Projs.8 a 10, e respectivos *Gráficos de Classificação* (Figs.5.29a e b):

Conj.6 - Orçamento e Classificação 1 - Projs.8 a 10 - (Tab.5.15 a Fig.5.29):

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios								Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios											
Projeto	CodCrt	CustoArm	LjaR\$	UtilVR	Crt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltPj%	Projeto	CodCrt	CustoArm	LjaR\$	UtilVR	Crt%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAltPj%
8	1	220.416,07		1,00	60	24,85	-		24,50	8	1	220.207,04		1,00	60	24,85	-		24,49
8	2		1	33,33	40	37,28	-		24,50	8	2		1	33,33	40	37,28	-		24,49
8	3	100		33,33	70	21,30	-		24,50	8	3	100		33,33	70	21,30	-		24,49
8	4	220.416,07		28,50	90	16,57	-		24,50	8	4	220.207,04		28,48	90	16,57	-		24,49
9	1	284.989,22		1,00	60	24,85	-		25,88	9	1	279.564,39		1,00	60	24,85	-		25,76
9	2		1	33,33	40	37,28	-		25,88	9	2		1	33,33	40	37,28	-		25,76
9	3	100		33,33	70	21,30	-		25,88	9	3	100		33,33	70	21,30	-		25,76
9	4	284.989,22		36,85	90	16,57	-		25,88	9	4	279.564,39		36,16	90	16,57	-		25,76
10	1	268.012,01		1,00	60	24,85	-		25,51	10	1	273.346,57		1,00	60	24,85	-		25,63
10	2		1	33,33	40	37,28	-		25,51	10	2		1	33,33	40	37,28	-		25,63
10	3	100		33,33	70	21,30	-		25,51	10	3	100		33,33	70	21,30	-		25,63
10	4	268.012,01		34,65	90	16,57	-		25,51	10	4	273.346,57		35,36	90	16,57	-		25,63

(a) Matriz Class.Projs.Cj.6 (Conv.)

(b) Matriz Class.Projs.Cj.6 (RNA)

Tabela 5.15: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.1 (Conv./RNA) Pjs.8 a 10 - Teste 6 Cj.6

Fonte: Autor

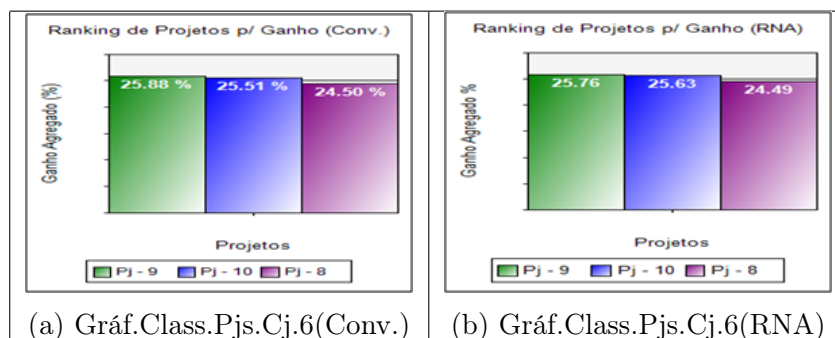
Tabela Cruzada - Calculo dos Pesos Individuais das Alternativas							Tabela Cruzada - Calculo dos Pesos Individuais das Alternativas								
	CustoArm	TpAcab	MargLucro%	ROI	R\$	PesIndCrt%	PesIndCrtNm%		CustoArm	TpAcab	MargLucro%	ROI	R\$	PesIndCrt%	PesIndCrtNm%
CustoArm	1,00	0,67	1,17	1,50	4,33		0,25	CustoArm	1,00	0,67	1,17	1,50	4,33		0,25
TpAcab	1,50	1,00	1,75	2,25	6,50		0,37	TpAcab	1,50	1,00	1,75	2,25	6,50		0,37
MargLucro	0,86	0,57	1,00	1,29	3,71		0,21	MargLucro	0,86	0,57	1,00	1,29	3,71		0,21
ROI	0,67	0,44	0,78	1,00	2,89		0,17	ROI	0,67	0,44	0,78	1,00	2,89		0,17
Somat-->	4,02	2,68	4,69	6,04	17,44			Somat-->	4,02	2,68	4,69	6,04	17,44		

(a) Tab.Cruz.Pesos/Alt.Cj.6 (Conv.)

(b) Tab.Cruz.Pesos/Alt.Cj.6 (RNA)

Tabela 5.16: Classif. 1 - Matrizes Cruzadas (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6

Fonte: Autor



(a) Gráf.Class.Pjs.Cj.6(Conv.)

(b) Gráf.Class.Pjs.Cj.6(RNA)

Figura 5.29: Gráficos Class.1 - Melhor Ganho (Conv./RNA) - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6

Fonte: Autor

Obs.: Nas classificações 2 e 3 a seguir, não serão visualizadas as tabelas cruzadas, pois são as mesmas da classificação 1.

Conj.6 - Orçamentos e Classifs. 2 e 3 - Projs. 8 a 10 (Tabs.5.17 a Figs.5.31):

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios									Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios									
Projeto	CodCrt	CustoArmLjsRS	UtiliVR	Risc%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAHPj%	Projeto	CodCrt	CustoArmLjsRS	UtiliVR	Risc%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAHPj%	
8	1	220.416,07	1,00	60	24,85	-	-	19,14	8	1	220.207,04	1,00	60	24,85	-	-	19,13	
8	2		1	20,00	40	37,28	-	19,14	8	2		1	20,00	40	37,28	-	-	19,13
8	3	100	32,26	70	21,30	-	-	19,14	8	3	100	32,26	70	21,30	-	-	19,13	
8	4	220.416,07	27,54	90	16,57	-	-	19,14	8	4	220.207,04	27,51	90	16,57	-	-	19,13	
9	1	284.989,22	1,00	60	24,85	-	-	27,93	9	1	279.564,39	1,00	60	24,85	-	-	27,82	
9	2		2	40,00	40	37,28	-	27,93	9	2		2	40,00	40	37,28	-	-	27,82
9	3	100	32,26	70	21,30	-	-	27,93	9	3	100	32,26	70	21,30	-	-	27,82	
9	4	284.989,22	35,61	90	16,57	-	-	27,93	9	4	279.564,39	34,93	90	16,57	-	-	27,82	
10	1	268.012,01	1,00	60	24,85	-	-	28,82	10	1	273.346,57	1,00	60	24,85	-	-	28,94	
10	2		2	40,00	40	37,28	-	28,82	10	2		2	40,00	40	37,28	-	-	28,94
10	3	110	35,48	70	21,30	-	-	28,82	10	3	110	35,48	70	21,30	-	-	28,94	
10	4	294.813,21	36,84	90	16,57	-	-	28,82	10	4	300.681,23	37,56	90	16,57	-	-	28,94	

(a) Matriz Class.Projs.Cj.6 (Conv.) (b) Matriz Class.Projs.Cj.6 (RNA)

Tabela 5.17: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.2 - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6 Fonte: Autor

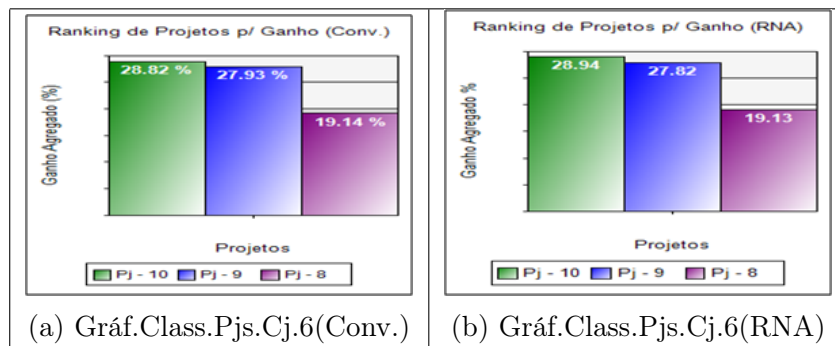


Figura 5.30: Gráficos Class.2 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6 Fonte: Autor

Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios									Tabela Matriz Hierárquica Alternativas x Critérios									
Projeto	CodCrt	CustoArmLjsRS	UtiliVR	Risc%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAHPj%	Projeto	CodCrt	CustoArmLjsRS	UtiliVR	Risc%	PesoCrt%	PesoIndCrt%	RiscCrt%	GanhoAHPj%	
8	1	220.416,07	1,00	60	24,85	-	-	21,71	8	1	220.207,04	1,00	60	24,85	-	-	21,70	
8	2		2	25,00	40	37,28	-	21,71	8	2		2	25,00	40	37,28	-	-	21,70
8	3	105	34,20	70	21,30	-	-	21,71	8	3	105	34,20	70	21,30	-	-	21,70	
8	4	231.436,87	29,29	90	16,57	-	-	21,71	8	4	231.217,39	29,28	90	16,57	-	-	21,70	
9	1	284.989,22	1,00	60	24,85	-	-	27,40	9	1	279.564,39	1,00	60	24,85	-	-	27,29	
9	2		3	37,50	40	37,28	-	27,40	9	2		3	37,50	40	37,28	-	-	27,29
9	3	102	33,22	70	21,30	-	-	27,40	9	3	102	33,22	70	21,30	-	-	27,29	
9	4	290.689,00	36,79	90	16,57	-	-	27,40	9	4	285.155,68	36,11	90	16,57	-	-	27,29	
10	1	268.012,01	1,00	60	24,85	-	-	26,79	10	1	273.346,57	1,00	60	24,85	-	-	26,90	
10	2		3	37,50	40	37,28	-	26,79	10	2		3	37,50	40	37,28	-	-	26,90
10	3	100	32,57	70	21,30	-	-	26,79	10	3	100	32,57	70	21,30	-	-	26,90	
10	4	268.012,01	33,92	90	16,57	-	-	26,79	10	4	273.346,57	34,61	90	16,57	-	-	26,90	

(a) Matriz Class.Projs.Cj.6 (Conv.) (b) Matriz Class.Projs.Cj.6 (RNA)

Tabela 5.18: Mtzs.Princs. Orçamento/Class.3 - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6 Fonte: Autor

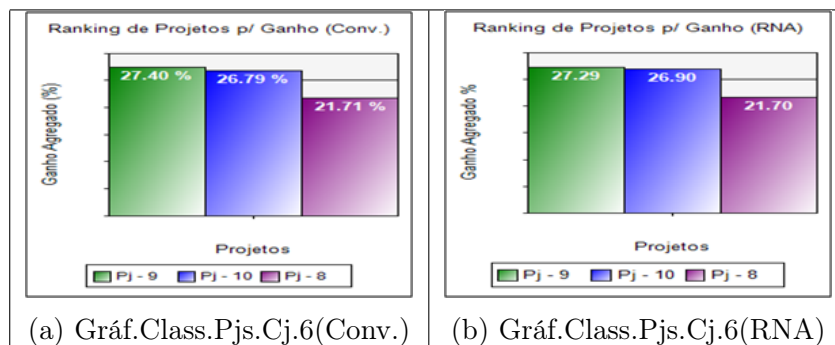


Figura 5.31: Gráficos Class.3 - Melhor Ganho - Pjs 8 a 10 - Teste 6 Cj.6 Fonte: Autor

Análise de Orçamentos e Classificações 1 a 3 - Teste 6 - Cj.6:

- Os pesos de relevância aplicados aos critérios pelos experts foram *Custo* (60%), *Acabamento* (40%) *Margem Lucro* (70%) e *ROI* (90%) e foram os mesmos para todas as classificações 1, 2 e 3, como indicado na 5^a coluna (Tabs.5.15a e b).
- Neste Treino 6 do Conjunto 6, foram mantidos os *Pesos dos Critérios* no padrão para as 3 classificações, variando apenas o valor da utilidade dos critérios *Acabamento*, *Margem de Lucro* e *ROI*.
- Na Classificação 1 (Figs.5.29a e b), com as utilidades (*Custo*, *Acabamento*, *Marg. Lucro* e *ROI*) mantidas iguais para todos os projetos (8 a 10), a ordem dos Projetos por melhor ganho foi: 9, 10 e 8.
- Na Classificação 2 (Figs.5.30a e b), com o aumento de 1 no Nível de *Acabamento* para os projetos 9 e 10 e aumento do *ROI* para 110%, a classificação dos Projetos por ordem de melhor ganho passou a ser: 10, 9, 8.
- Na Classificação 3 (Figs.5.31a e b), com *Acabamento*=2 para o projeto 8, *Acabamento*=3 para os projetos 9 e 10 e o *ROI* (Pj.8 105%, Pj.9 102%, Pj.10 100%), a ordem dos Projetos por melhor ganho passou a ser: 9, 10 e 8.
- **Importante:**
 - Houve pouca instabilidade nas rotinas de orçamento e classificação por AHP.
 - Em todas as classificações, o método por RNA acompanhou a classificação por engenharia convencional, sem discrepância significativa.
 - Observou-se que as Classificações dos Cj.5 e Cj.6 foram praticamente iguais, e precisavam mesmo o ser, pois sendo modelos de plantas baixas semelhantes e mais verossímeis com a realidade. A diferença foi apenas na parametrização dos aceleradores.
 - A precisão da RNA se aproximou bastante da precisão de classificação por Convencional, confirmando novamente que, as rotinas RNA e AHP estão funcionando corretamente e no rumo certo.

5.4.5 Resumo Evolutivo da Precisão da Classificação AHP (Convencional x RNA) dos Conjuntos de 3 a 6

A seguir, os gráficos com a Evolução (em R\$ e %) dos Orçamentos das Lajes, do conjunto 3 ao 6 de projetos (Fig.5.32a e b), e as tabelas das diferenças (Tabs.5.19a e b), comparando os métodos Convencional de dimensionamento (linhas cheias) com o método via RNA PMC (linhas tracejadas).

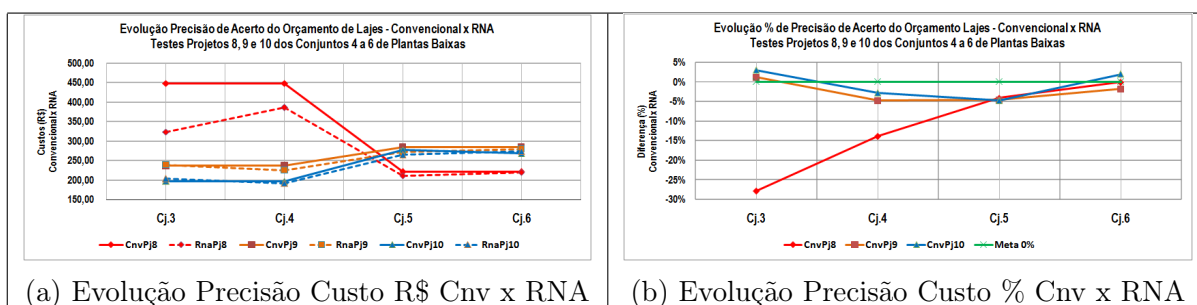


Figura 5.32: Grafs.Evolução da Precisão (R\$ / %) Orçamentos Cjs.3 a 6 - Projs.8 a 10

Fonte: Autor

Diferença de Custo das Lajes (R\$) - Convencional x RNA					Diferença % - Convencional x RNA				
Projeto	Cj.3	Cj.4	Cj.5	Cj.6	Projeto	Cj.3	Cj.4	Cj.5	Cj.6
Pj.8	124.769,24	62.220,61	9.175,58	209,03	Pj.8	-28%	-14%	-4%	0%
Pj.9	- 2.695,18	11.384,27	13.122,32	5.424,83	Pj.9	1%	-5%	-5%	-2%
Pj.10	- 5.879,77	5.562,33	13.338,92	-5.334,56	Pj.10	3%	-3%	-5%	2%

(a) Evolução Diferença Custo R\$ Cnv x RNA

(b) Evolução Diferença % Custo Cnv x RNA

Tabela 5.19: Tabs.Evolução da Diferença Custos Lajes (R\$ / %) Cjs.3 a 6 Projs.8 a 10

Fonte: Autor

O Gráfico da esquerda (Fig.5.32a) apresenta a evolução do total dos custos (em R\$) das lajes, comparando a proximidade dos métodos Convencional (linha cheia) vs RNA (linha tracejada). O Gráfico da direita (Fig.5.32b) mostra a evolução (em %) da precisão de aproximação entre métodos Convencional vs RNA. A Tabela da esquerda (Tab.5.19a) mostra a evolução da diferença (R\$) e a da direita (Tab.5.19b), a mesma em % do custo das Lajes dimensionadas via Convencional e via RNA.

Análise da Evolução da Classificação por AHP, dos conjuntos de 3 a 6:

- O algoritmo de automação do cálculo dos Custos das Lajes se mostrou flexível e rápido (3s) tanto para o dimensionamento Convencional como por RNA.
- Com a opção de ajustes do cálculo dos pesos, o engenheiro pode reajustá-los conforme a sua avaliação da utilidade e dos critérios (Fig.5.2f).

- O Operador conseguiu que a classificação dos projetos 8, 9 e 10 se revezassem como melhor escolha, corretamente, conforme esperado e visto nas tabelas do Cj.3 (Tabs.5.4) ao Cj.6 (Tabs.5.16 a e b).
- A diferença de precisão dos custos, entre os orçamentos dimensionados por Convencional e por RNA, reduziu-se bastante (em %) do Cj.3 [8 (28%) 9 (1%) e 10 (3%)] ao Cj.6 [8 (0%) 9 (2%) e 10 (2%)], e também conforme esperado (Tabs.5.19a e b). O mais preciso foi o Cj.6, com a menor diferença entre Convencional e RNA. O 2º mais preciso, e mais homogêneo nos projetos, foi o Cj.5. O Cj.3 foi o menos preciso devido à menor convergência no projeto 8.
- Observou-se que os conjuntos 5 e 6 de projetos foram mais próximos em termos de orçamento (em R\$) (Tabs.5.19a) e também nas classificações dos % (Tabs.5.19b), confirmando que as rotinas de RNA e AHP evoluíram corretamente. O Cj.5 foi o mais homogêneo e 2º mais preciso, com erro médio máximo de 5%. O mais preciso foi o Cj.6 com imprecisão média máxima de 1%, com o projeto 8 cravando 0% entre convencional e RNA.

5.4.6 Algumas Pesquisas Comparativas dos Resultados com AHP:

Pamplona [39], no seu trabalho sobre a qualidade do cimento da obra com AHP, também seguiu a metodologia ADMC-AHP, criando a *Matriz Hierárquica de Alternativas x Critérios* com pesos globais dos critérios e individuais por alternativa, obtendo com sucesso o concreto de melhor ganho para a obra.

Santos [43] em seu artigo, também utilizou a sistemática AHP, gerou as tabelas *Matriz Hierárquica de Alternativas x Critérios* e *Tabela Cruzada de Pesos por Alternativa* em separado, diferente deste protótipo, onde o autor foi além, unificando as comparações dos pesos por alternativa em uma única tabela (Ex.: Figs.5.15 c e d).

Nos 2 trabalhos anteriores, [39] e [43], os vários critérios foram testados manualmente pelos pesquisadores um por vez, mas aqui neste protótipo, a pesagem recebeu uma rotina que permite ao operador reconfigurar na tela, os % dos pesos globais de relevância dos critérios (Figs.5.2f) e permitiu variar e testar rapidamente outras classificações, sem novas reentradas dos dados.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo apresenta o fechamento da dissertação, com as conclusões sobre a aplicação das RNAs no dimensionamento de lajes bem como a aplicação da técnica AHP na classificação dos custos das lajes dos projetos, conclusões sobre o protótipo e o potencial de aplicação do combinado *RNA + AHP* na construção de edifícios.

6.1 Conclusões sobre a Aplicação RNA no Dimensionamento de Lajes:

Essa seção apresenta as conclusões sobre os objetivos da seção 1.1, a aplicação de RNAs no dimensionamento de lajes de projetos de edifícios.

- **Conj.2 - Treino 2 (Pjs.1-4) Teste(Pjs.5-6) - 13 Atributos - 195 amostras - Acs: η 0,1 μ 0,05 (+/-) - Treino 3 - ver.335:**
 - Para os primeiros Treinos com os projetos de 1 a 4 e Teste com o projeto 6, até que foram bons os resultados para as Armaduras (+), pois as convergências ficaram acima da mínima (75%) na direção x (PPX) com 76,2% e na direção y (PPY) com 78,2% (Fig.5.3a) e (Fig.5.3b), onde a Armadura PPY foi mais rápida que a PPX, com 70% das iterações entre 1 e 2 (Fig.5.4c) e (Fig.5.4d).
 - Foi observado após análise das matrizes de amostras nos Cjs.1 e 2, por matriz confusão via gráficos (Figs.5.5a a f), estas geraram maior heterogeneidade (numéricas e posicionais) comparados aos Cjs.3 a 6, causa da redução do aprendizado do algoritmo e confirmado nos estudos em Sperandio [46].

- **Conj.3 - Treino 3 (Pjs.1-7) Teste (Pjs.8-10) - 14 Atributos - 402 amostras - Acs: η 0,1 μ 0,05 (+/-) - ver.336:**

- Com o aumento para 402 amostras (lajes) houve maior convergência das armaduras (-), e tanto o treino (Projetos 1 a 7, Figs.5.6a e b) como os testes do (Pjs.8 a 10), Figs.5.7a a d) apresentaram convergências médias mais elevadas, acima de 80% nas (+) e acima dos 60% nas (-), sendo considerado bom, mesmo havendo potencial para maior convergência.
- As Armaduras (+) PPY convergiram mais rápido (Figs.5.6c e d) que as PPX, com 70% entre 1 e 2 iterações.
- As Armaduras negativas (-) PNX e PNY (Figs.5.6a e b) ficaram na faixa dos 60%, ainda baixas em comparação com a mínima 75%, mas ainda melhores que as do Cj.2, concluindo-se que 13 atributos ainda eram insuficientes para obter convergência $> 75\%$.
- Nos Testes (Figs.5.7a a d), as convergências das positivas PPX e PPY, para os projetos 9 e 10, foram $> 90\%$, e também melhores que as (-). Apenas as do Pj.8 foram $< 75\%$, o que com mais estudos conclui-se que, o maior n^o de classes das negativas teve alta influência nas baixas convergências, comprovado via testes comparativos (Figs.5.8) com o software *Orange Data Mining*TM [3].

- **Conj.4 - Treino 4 (Pjs.1-7) Teste (Pjs.8-10) - 14 Atributos - 465 amostras - Acs.(+) η 0,05 μ 0,05 / (-) η 0,03 μ 0,03 – ver.339:**

- Para os Treinos do conjunto 4 com os projetos de 1 a 7 (Figs.5.9a e b), as convergências das PPX e PPY foram $> 85\%$ (mín.) para os Pjs.9 e 10, só o 8 ficando $< 85\%$, o que já foi uma melhora expressiva comparada com os conjuntos 3 e 2, comprovando o efeito de mais 1 atributo significativo (13→14) e aceleradores menores na geração de ganho extra na convergência das (+) $> 93\%$ e nas (-).
- Para os Testes Operacionais do Cj.4 dos projetos 8 a 10 (465 lajes) o gráfico (Figs.5.10a até d), apresentou convergências médias Pj8(PPX=33,3% PPY=24,6%), Pj9(PPX=97,5% PPY=98,9%) e Pj10(PPX=96,8% PPY=99,4%) mostrando que a RNA pôde aprender mais, a dimensionar as Armaduras positivas (+) com altas velocidades medias de convergência.

Apenas o Pj.8 teve convergência $< 75\%$ (mín.). Novamente, influencia do 14º atributo e aceleradores menores.

- Nos testes das Armaduras (-) do Cj.4, ainda abaixo dos 50%, ficou evidente que o atributo extra e a redução dos aceleradores $\eta=0,05 \rightarrow 0,03$ e $\mu=0,05 \rightarrow 0,03$ elevaram as convergências Pj.8(50%) a Pj.9(65%) e o Pj.10 (58%). No geral, comparado ao Cj.2, foram 100% maiores, confirmando que os aceleradores têm grande influência na convergência.
- Comparado a outros trabalhos semelhantes, considerou-se rápida a RNA deste protótipo, pois nas velocidades de convergência dos Treinos, 90% das PPX ficaram entre 2 a 5 iters. e 100% entre 1 a 3 iterações nas PPY.

Conj.5 - Treino 5 (Pjs.1-7) Teste (Pjs.8-10) - 15 Atributos - Acs.(+) $\eta 0,05$ $\mu 0,05$ / (-) $\eta 0,03$ $\mu 0,03$ - Ver.339:

- Com a inclusão de mais 1 atributo significativo, passando de 14 \rightarrow 15, as convergências tanto das (+) como das (-) se elevaram nos Treinos (Figs.5.12a e b) e Testes (Figs.5.13 a até d), mostrando a importância dos atributos terem alta correlação com o sistema problema.
- Houve uma redução dos aceleradores para $\eta=0,03$ e $\mu=0,03$ nos Treinos e Testes das Armaduras (-), o que fez com que as convergências das PNX e PNY aumentassem mais de 40% (Figs.5.13e e f) atingindo acima dos 85% nos Testes dos Pjs.8 a 10, se comparados aos Cjs.3 e 4. Ficou demonstrado novamente que, atributos em quantidade e relevância corretas, e também aceleradores menores, influenciam muito na elevação da convergência.
- As velocidades médias de convergência das armaduras (-) nos Treinos ficaram na faixa de 20 iterações, o que parece ser a faixa de parametrização para as negativas terem alta convergência (Figs.5.12c e d).
- Um ponto negativo foi o nº de Losses, ainda na faixa dos 30% para as (-), acima dos Losses das (+). O que se concluiu que, para convergir mais, é preciso mais esforço computacional da RNA.

- **Conj.6 - Treino 6 (Pjs.1-7) Teste (Pjs.8-10) - 15 Atributos - Acs. Variáveis $\eta 0,10 \downarrow$ e $\mu 0,03 \downarrow$ - ver.339:**

- Nos Treinos, as armaduras PPX e PPY quase cravaram 100% da convergência máxima (Figs.5.15a e b) e com alta velocidade média de convergência (Figs.5.16c e d). Os aceleradores variáveis melhoraram a precisão da convergência, conforme recomendação de Braga [12].
 - Concluiu-se também que, sob condições de aceleradores variáveis, de 4 a 5 iterações (Figs.5.15d) parece ser a velocidade ideal para as positivas convergirem mais próximas dos 100%.
 - Como as convergências das Armaduras (-) ficaram mais lentas, foram necessárias mais pesquisas com aceleradores variáveis, para se chegar a valores iniciais ideais, e conseguir maiores velocidades de convergência.
- **Conjs.Projetos de 3 a 6 – RNA e AHP – ver.339:**
- O algoritmo de automação do cálculo dos Custos das Lajes se mostrou flexível e rápido na faixas dos 3s, tanto para o cálculo Convencional como via RNA.
 - Com a opção de ajustes dos critérios de cálculo dos pesos, o engenheiro tem a facilidade em ajustá-los dependendo das considerações de utilidade dos critérios (Fig.5.2f).
 - A classificação dos projetos 8, 9 e 10 para obter a melhor escolha, (Figs.5.4 a até f) até (Figs.5.18 a até f) funcionaram corretamente conforme previsto.
 - A diferença dos custos entre orçamento das lajes dimensionadas, por método Convencional e por RNA, evoluíram muito bem, do Cj.3 [8 (28%) 9 (1%) e 10 (3%)] para o 6 [8 (0%) 9 (2%) e 10 (2%)], conforme se esperava que ocorresse (Figs.5.19 a e b), confirmando as melhorias nas rotinas de RNA e AHP.
 - Mesmo com a alta precisão obtida, ainda é possível melhorar os algoritmos de RNA e AHP para reduzir a oscilação e chegar ao erro $< 1\%$, ou se possível 0%.

6.2 Conclusões sobre os Orçamentos e Classificações AHP:

- Da orçamentação utilizando a técnica AHP, módulo 3.3 de custos das lajes dimensionadas dos conjuntos 3 a 6 de projetos, foram gerados os resultados com

alta velocidade de processamento (média 3s) e ordenadas as alternativas (projetos de 8 a 10) quanto ao melhor ganho, atendendo ao objetivo 4 da seção 1.1, o protótipo foi rápido na resposta ao usuário. (Fig.5.2f).

- No resultado da Evolução (Tabs.5.19a e b) dos conjuntos de projetos 8 a 10, a precisão dos orçamentos via AHP mostrou que as rotinas de RNA conseguiram reduzir a diferença de erro de orçamento, de 28% no Cj.3 para 0% no Cj.6. O Cj.5, mesmo tendo o % dos Pjs.9 e 10, maior que no Cj.3 em 2%, seus % foram mais homogêneos que os do 3 e 4. O Cj.6 foi o mais preciso e seus % foram os 2º mais homogêneos de todos, mostrando o potencial dos aceleradores variáveis no aumento da precisão.
- Confirmou-se também pela técnica AHP que, os mapas de projetos precisam ser dimensional e posicionalmente mais próximos conforme ocorre na realidade dos projetos das construtoras.
- Apesar da precisão conseguida, as configurações das topologias utilizadas ainda podem ser aperfeiçoadas para obter uma classificação com imprecisão abaixo de 1%, o que confirma o potencial RNA + AHP da seção 1.1 de objetivos.

6.3 Conclusões sobre o Software Protótipo:

- Os módulos básicos atenderam às expectativas e ao objetivo específico 1 (cap.1), permitindo no módulo 2.1, Cadastrar os dados dos Projetos e no 2.2, carregar os mapas de coordenadas das plantas baixas via arquivo TXT e gerar o mapeamento automatizado das coordenadas dos elementos das plantas dos projetos (pavimentos, pilares, vigas e lajes) necessários ao dimensionamento das lajes. O 2.2 além de ágil, também permite visualizar se os elementos estão corretos, via plotagem simplificada da planta baixa, na tela.
- Atendendo também aos objetivos 1 e 2 (cap.1), a interface do módulo 3.1 de Dimensionamento Convencional das Lajes ficou compacta, muito simples de operar e permite gerar o memorial (simplificado) dos dimensionamentos das lajes dos projetos mapeados no módulo 2.2, e ainda gravá-los em arquivos formato "TXT".
- O Módulo 3.2 atendeu ao objetivo específico 2, onde a interface **GUI** ficou intuitiva para o usuário, bem completa e com muitos recursos permitindo: Escolher e gerar os atributos de entrada (*Datasets* das lajes); Carregar Topologias de RNA e escolher

a que será treinada; Configurar os parâmetros de execução dos Treinos e Testes; Rodar, manual ou automaticamente, prospecções de Treinos e Testes, tomando apenas entre 1 e 3 minutos em uma máquina *I5 (8GB RAM)*, e de 5 a 12 minutos numa *Core 2 duo (2GB RAM)*.

- Atendendo ao objeto específico 3, o Módulo 3.3 de Orçamento e Classificação dos Custos das Lajes (conjuntos de Projs.3 a 6 no dimensionados no módulo 3.1) a interface ficou intuitiva, compacta e veloz, tomando do operador apenas 1 a 2min para configurar as Utilidades e Critérios (parâmetros da classificação) e de 3s para a execução do orçamento e classificação, com alta precisão; Com a opção de reconfigurar os pesos globais dos critérios, o engenheiro ainda pode-se regular os critérios do cenário dentro das análises (Fig.5.2f) de classificações que desejar.

Atendendo à *flexibilidade* no objetivo específico 3, a **GUI** do módulo 3.3 ainda incluiu os processos sequenciais e automatizados: Geração da tabela *Orçamento dos Custos das Lajes*; Geração da tabela *Matriz de Alternativas x Critérios* e da tabela *Cruzada de Pesos Par a Par*; Geração dos *Gráficos Classificatórios* (Convencional ou RNA) dos custos das lajes dos projetos de melhor vantagem orçamentária.

6.4 Conclusões Finais

- Normalmente, os trabalhos na área de RNA apresentam algoritmos que demandam muito tempo de processamento (Exs.: Barbosa [9], Félix [20], Manzan [32]) com n^o de iterações substancialmente maiores que as obtidas neste protótipo, o que mostra que a otimização e melhorias aplicadas nos algoritmos deste protótipo funcionaram com alto desempenho, e dentro dos objetivos específicos 1 e 2 requeridos.
- Concluiu-se que, a menor/maior dificuldade de convergência é diretamente proporcional ao menor/maior n^o de classes a serem classificadas nos datasets, pela RNA, [21].
- Foi confirmado pelo combinado *RNA + AHP*, que os mapas de projetos dimensional e posicionalmente mais próximos (realidade das construtoras) convergem mais do que aqueles com plantas mais heterogêneas (Figs.5.5a a f), pois estas geram muitos *outsiders* que afastam o algoritmo da generalização da *função-objetivo*.
- Concluiu-se através dos resultados evolutivos e requeridos no objetivo específico 4 que, com poucas iterações é possível uma RNA aprender rápido, a sistemática da

função-objetivo que rege o sistema-problema se:

- Adotar atributos (X e Y_c) com alta correlação com o sistemática do problema.
 - Efetuar Treinos com expressivo n^o de amostras (Ex.: ≥ 400 Lajes), [45] e [32].
 - Definir aceleradores adequados com as faixas ótimas obtidas como $(0,05 < \eta < 0,05)$ p/ Arms.(+) e $(0,03 < \mu < 0,10)$ para Arms.(-) com aceleradores fixos. E para aceleradores variáveis, utilizar as faixas regressivas $(0,10 < \eta < 0,05)$ e $(0,05 < \mu < 0,03)$, ou menores. Para ambos, evitar valores maiores que 0,10 para impedir a geração do Erro $C^{te}/0$. Félix [20] também trabalhou com faixa semelhante para o acelerador η .
- Um fato importante ocorrido durante as prospecções foi que a RNA, em alguns Testes, convergiu para valores maiores que os dos Treinos. Este fato foi constatado por Moraes [33], e alertado por Ludwig [31], ser virtualmente impossível saber como uma RNA chega num resultado específico. Mas longe disto ser um padrão, não se deve subestimar os treinos das RNAs.
 - O objetivo específico 3 foi atendido plenamente pela Técnica AHP, que demonstrou e confirmou pela evolução (seção 5.4.6, cap.5) o aumento da precisão dos orçamentos, como consequência também da evolução da topologia e parametrização da RNA (Figs.5.32a e b). Resultados similares também se confirmaram em Pamplona [39]. As classificações dos Cjs.5 e 6, mais precisos na fase RNA, também o foram na fase AHP (objetivo 4), confirmando que as rotinas de ambas as fases se convalidam e estão no caminho certo.
 - Mesmo para um protótipo, o desempenho foi relevante e ainda há campo para melhorias nos algoritmos, topologias e parametrizações, para atingir % de convergências maiores na RNA PMC. No geral, mesmo para um protótipo inicial e restrito à lajes, considerou-se com bom desempenho se comparado ao de softwares mais completos e mais rápidos do mercado, desenvolvidos e aperfeiçoados por equipes de programadores há mais tempo que este trabalho dispunha.
 - Comparado também, com as demais pesquisas, os resultados obtidos aqui demonstraram que o protótipo teve faixa de convergências melhores do que em vários trabalhos, e com mais aperfeiçoamentos pode chegar a resultados ainda mais precisos. Consideram-se atendidos os objetivos estabelecidos (seção 1.1), mostrando que há um alto potencial do combinado *RNA + AHP* na área de projetos de construção de edifícios.

6.5 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, sabendo que o desempenho do sistema protótipo ainda pode ser melhorado e ampliado, sugere-se:

- Encontrar mais atributos com alto índice de correlação com o dimensionamento das lajes, para aumentar a distinção entre as armaduras positivas e negativas e atingir maiores convergências para as armaduras negativas.
- Experimentar outros aceleradores através de novas prospecções na busca por maiores convergências.
- Upgrade possíveis nas funcionalidades do Protótipo:
 - Estender a combinação *RNA + AHP* para os outros tipos de Lajes, e/ou, demais elementos estruturais do edifício (Ex.: Vigas, Pilares).
 - Pesquisar e incluir chamada à bibliotecas externas de outras linguagens, se houver, para criar rotinas de comparação e/ou ajudar na seleção dos atributos do **Datasets** por estatística e não somente via empírica.

Referências

- [1] *Evolução da Engenharia Civil Engenharia*. Disponível em: <<https://alcancejr.com.br/evolucao-da-engenharia-civil>>. Acesso em 16 de abril de 2022.
- [2] *Geogebra*. Manual Disponível em: <<https://www.geogebra.org/m/etg2rk8j>>. Acesso em 27 de dezembro de 2023.
- [3] *OrangeDataMining*. Manual Disponível em: <<https://orangedatamining.com/docs>>. Acesso em 27 de dezembro de 2023.
- [4] ABDALLA, L. S., VOLOTÃO, C. S. Estudo da configuração de diferentes arquiteturas de redes neurais artificiais mlp para classificação de imagens ópticas. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE, Foz do Iguaçu, RS* (2013), 8200–8207.
- [5] ABNT. *NBR14931 Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento*. ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007.
- [6] ABNT. *NBR4120 Cargas para o Cálculo Estruturas de Edificações - Procedimento*. ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007.
- [7] ABNT. *NBR6118 Projeto de Estruturas de Concreto*. ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007.
- [8] AZEVEDO, F. M., BRASIL, L. M., OLIVEIRA, R. C. L. D. *Redes Neurais Fundamentos com Aplicações em Controle e em Sistemas Especialistas*, 1 ed. Visual Books Editora Ltda., 2000. ISBN: 85-7502-005-6.
- [9] BARBOSA, A. H. *Análise de Confiabilidade Estrutural Utilizando o Método De Monte Carlo e Redes Neurais*. Universidade Federal Ouro Preto, Dissertação de mestrado - Ouro Preto - MG., 2004.
- [10] BASTOS, P. S. *Fundamentos de Concreto Armado*. Universidade do Estado de São Paulo. Apostila. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Campus de Bauru - SP, 2023.
- [11] BOTELHO, M. H. C., MARCHETTI, O. *Concreto Armado Eu te Amo*, 7 ed. Editora Edgard Blucher Ltda., 2013. ISBN: 978-85-212-0706-1.
- [12] BRAGA, A. D. P., LUDERMIR, T. B., CARVALHO, A. C. P. D. L. F. *Redes Neurais Artificiais Teoria e Aplicações*, 1 ed. LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000. ISBN: 85-216-1218-4.

- [13] CALDAS, L. R., CARVALHO, M. M. T. Avaliação do desempenho de vedações verticais utilizando o processo de análise hierárquica na tomada de decisão. *PARC Pesq. em Arquit. e Constr., Campinas, SP 9 n^o 2* (2018), 109–121. ISSN: 1980-6809.
- [14] CARDOSO, E. L., GODINHO, D. S. S. Estudo do dimensionamento de lajes maciças para análise de custo x benefício para fins de utilização em habitação residencial – estudo de caso. *UNESC - Universidade do Extremo Sul Catarinense - SC* (2016), 1–22.
- [15] DEITEL, H. M., DEITEL, P. J. *Java: Como programar*, 6 ed. Pearson Education do Brasil, 2005. ISBN: 85-7605-019-6.
- [16] DIACENCO, A. A. *Modelagem de Otimização aplicada à Topologia de Sensores para Identificação e Localização de Danos em Placa Compósita*. Universidade Federal de Itajubá. Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica Graduação Curso de Engenharia Civil. Tese de Doutorado. Itajubá - MG., 2016.
- [17] DINIZ, C. A. *Otimização Estrutural de Elementos em Compósitos Usando Redes Neurais Artificiais*. Universidade Federal de Itajubá, Dissertação de Mestrado - Engenharia Mecânica, Itajubá - MG., 2017.
- [18] FARRER, H., BECKER, C. G., FARIA, E. C., MATOS, H. F., SANTOS, M. A., MAIA, M. L. *Algoritmos Estruturados*, 2 ed. LTC Livros Técnicos e Científicos Editora, 1998. ISBN: 978-85-268-0911-6.
- [19] FAVAN, J. R. *Utilização de Redes Neurais Artificiais Aplicadas na Discriminação de Padrões de Doenças Florestais*. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” Faculdade de Ciências Aronomicas. Dissertação de Mestrado. Botucatu - SP., 2015.
- [20] FELIX, E. F. *Desenvolvimento de Software para a Estimativa da Profundidade de Carbonatação, Vida Útil e Captura de CO₂ de Estruturas de Concreto empregando RNA's*. Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Dissertação de Pós-Graduação. Instituto de Tecnologia, Infraestrutura e Território Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura. Foz do Iguaçu - PR., 2015.
- [21] FERNANDEZ, J. C. *Uso de Redes Neurais Artificiais e AHP na Redução da Subjetividade na Seleção de Áreas com Potencial para Coleta de Água da Chuva*. Universidade Federal de Itajubá, Dissertação de mestrado - Itajubá - MG., 2020.
- [22] FERREIRA, A. S., OLIVEIRA, C. M., MUSTAFA, H. A., D., S. T., TERRA, T. A. M. Programação da produção e metaheurísticas: Uma revisão de mapeamento sistemático. *RGI - Revisa Gestão Industrial 14 n^o 3* (2018), 38–62. ISSN: 1808-0448.
- [23] FONSECA, M. D. *Otimização de Estruturas Treliçadas Planas e Especiais sob Carregamento Estático e Dinâmico usando Algoritmos Genéticos e Redes Neurais*. Universidade Federal de Ouro Preto . Departamento de Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto - MG., 2007.
- [24] GANE, C. *Análise Rápida de Sistemas*, 1 ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1988. ISBN: 85-216-0612-5.

- [25] GOMES, L. A. M., GOMES, C., ALMEIDA, A. *Tomada de Decisão Gerencial - Enfoque Multicritério*, 3 ed. Editora Atlas S.A., 2009. ISBN: 978-85-224-5351-1.
- [26] HAYKIN, S. *Redes Neurais, Principios e Pática*, 2 ed. Bookman Compahina Editora., 2001. ISBN: 85-7307-718-2.
- [27] HILÁRIO, B. A., O., J. A. S. Implementação computacional de rotinas para dimensionamento de lajes maciças. *Revista de Engenharia e Tecnologia - ISSN 2176-7270 11-3* (2019), 58–70.
- [28] JUNIOR, L. G., FILHO, M. D. *Análise Comparativa entre Diferentes Tipos de Lajes quanto as Cargas Geradas e Consumo de Materiais*. UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA, TCC de conclusão de graduação de Engenharia Civil, Palhoça - SC, 2019.
- [29] KIMURA, A. *Informática aplicada em Estruturas de Concreto Armado*, 1 ed. Editora PINI Ltda., 2007. ISBN: 978-85-7266-182-9.
- [30] KOVACS, L. Z. *Redes Neurais Fundamentos Artificiais Fundamentos e Aplicações*, 2 ed. Editora Collegium Cognitivo e Edição Academica, 2000. ISBN: 85-86396-02-8.
- [31] LUDWIG, O., MONTGOMERY, E. *Redes Neurais Fundamentos e Aplicações com Programas em C*, 1 ed. Editora Ciência Moderna Ltda., 2007. ISBN: 978-85-7393-619-3.
- [32] MANZAN, J. R. G. *Análise de Desempenho de Redes Neurais Artificiais do Tipo Multilayer Perceptron por meio do Distanciamento dos Pontos do Espaço de Saída*. Universidade Federal de Uberlandia, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Uberlândia - MG., 2016.
- [33] MORAES, E. C. *Reconhecimento de Padrões e Redes Neurais Artificiais em Predição de Estruturas Secundárias de Proteínas*. Universidade Federal de Uberlandia, Tese de Doutorado em Ciências e Engenharia de Sistemas de Computação, Rio de Janeiro - RJ., 2010.
- [34] MORELLI, E. T. *Oracle 8: SQL, PL/SQL e Administração*, 7 ed. Editora Érica Ltda., 2000. ISBN: 85-7194-709-0.
- [35] MUNEM, M. A., FOULIS, D. J. *Cálculo*, 1 ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 1982. ISBN: 000-00-000-0000-0.
- [36] NETO, L. O., F., P. F. Automatização do dimensionamento de pavimentos de edifício em concreto armado segundo o método das charneiras plásticas. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural 12-1* (2015), 54–73.
- [37] OLIVEIRA, R., AQUINO, J., RANGEL, A. Proposta de modelo multicritério para escolha de sistema de laje em obras civis. *XXXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO - ABEPRO*, Maceió, Alagoas (2018).
- [38] PALMERI, N. L. *Estudo Comparativo entre Lajes Nervuradas Moladas no Local com Formas de Polipropileno e Lajes Pré-fabricadas Treliçadas*. Universidade Paulista - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, São Paulo - SP., 2017.

- [39] PAMPLONA, B. L., FREITAS, F. F. T. Aplicação do método ahp na escolha do tipo de concreto a ser utilizado na construção civil. *XXXII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. ENEGEP* (2012), 15.
- [40] PORTILHO, S. *Análise Essencial*, 1 ed. Livraria e Ed. Infobook SA., 1981. ISBN: 95-0572.
- [41] RIBEIRO, O. S. K., C., M. L. Estudo comparativo no dimensionamento de um edifício utilizando o cálculo manual e software estruturais. *Universidade Federal de Viçosa Campus Rio Paranaíba* (2017), 1–20.
- [42] SANTOS, D. F., AGUIAR, E. S. Priorização das atividades de projeto na construção civil através da abordagem multicritério. *RGI - Revista Científica Eletrônica de Engenharia de Produção* 19 n^o 4 (2021), 1177–1196. ISSN: 1676-1901.
- [43] SANTOS, L. F., CRUZ, R. B. C. O uso do método ahp na tomada de decisão para seleção de sistemas de lajes de edifícios comerciais. *Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE* 13 n^o 1 (2013), 39–52.
- [44] SILVA, I. N. D., SPATTI, D. H., FLAUZINO, R. A. *Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas*, 1 ed. Artliber Editora Ltda., 2010. ISBN: 978-85-88098-53-4.
- [45] SOUZA, K. X. S., NETO, J. C. Uso de redes neurais multicamadas para classificação de perfis de solos. *Embrapa Informática Agropecuária, Campinas - SP* (2019), 23. ISBN: 1677-9266.
- [46] SPERANDIO, D., T., M. J., M., S. L. H. *Cálculo Numérico*, 1 ed. Pearson Prentice Hall, 2000. ISBN: 85-87918-74-5.
- [47] SUSSEKIND, J. C. *Curso de Concreto I*, 3 ed. Editora Globo S.A., 1987. ISBN: 85-250-0236-4.
- [48] UBERABA, L. R. H. *Projeto de Estrutura de Concreto*, 9 ed. Editora e Gráfica Publi Ltda., 2009. ISBN: 978-85-88098-53-4.
- [49] ZAPELINI, C. Z., AL., E. Um estudo abrangente sobre metaheurística, incluindo um histórico. *USP Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. 19 n^o 4* (2009), 1177–1196.

APÊNDICE B - Plantas Baixas

B.1 Plantas Baixas Cj.2 - Pjs.1 a 6

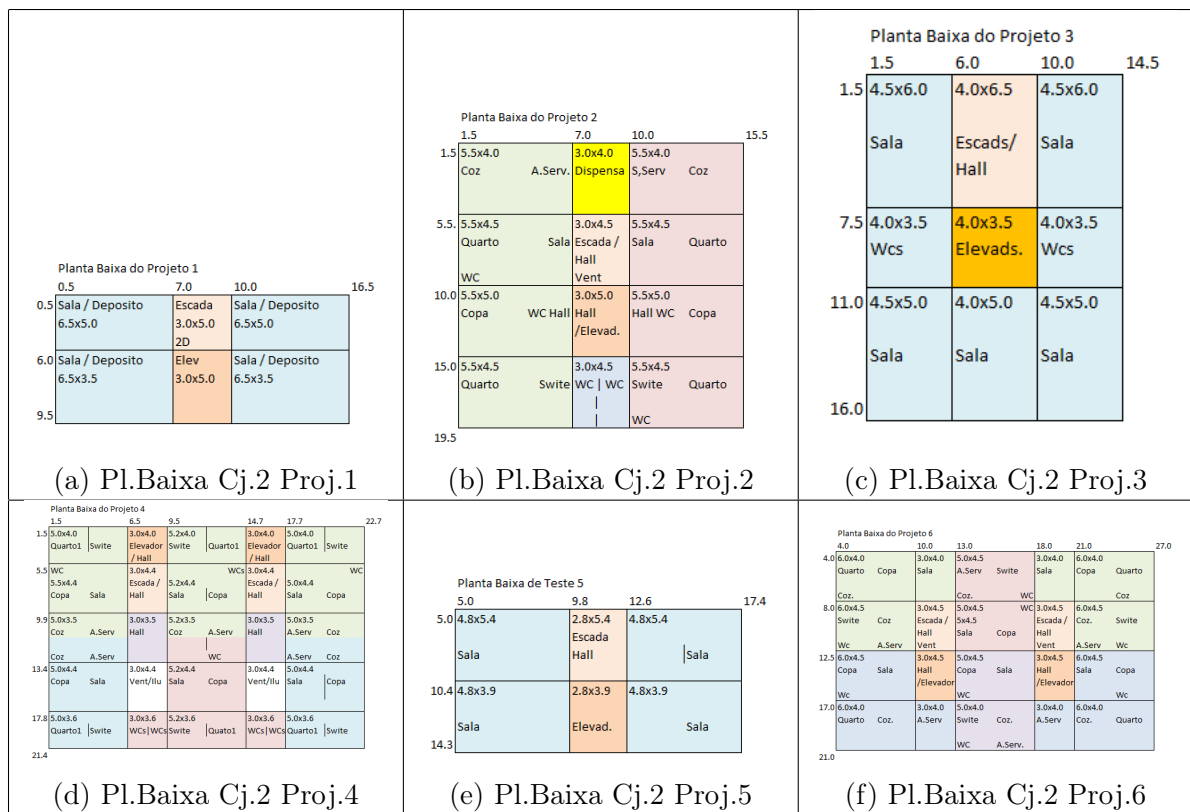


Figura B.1: Plantas Baixas - Cj.2 - Pjs.Treino 1 a 4 - Teste 6

Fonte: Autor

B.2 Plantas Baixas Cj.3 - Pjs.1 a 10

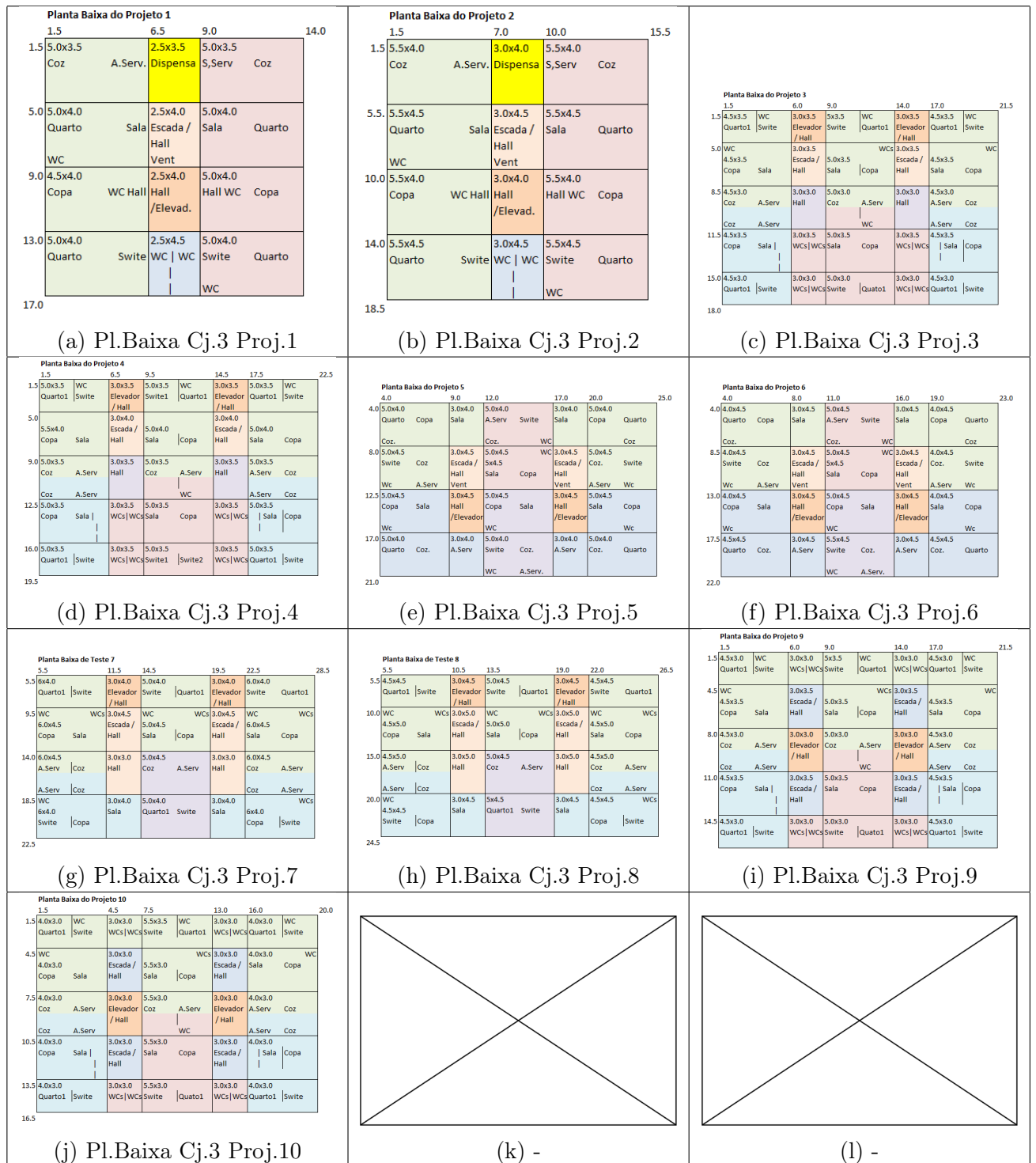


Figura B.2: Plantas Baixas - Cj.3 - Pjs.Treino 1 a 7 - Teste 8 a 10

Fonte: Autor

B.3 Plantas Baixas Cj.4 - Pjs.1 a 10

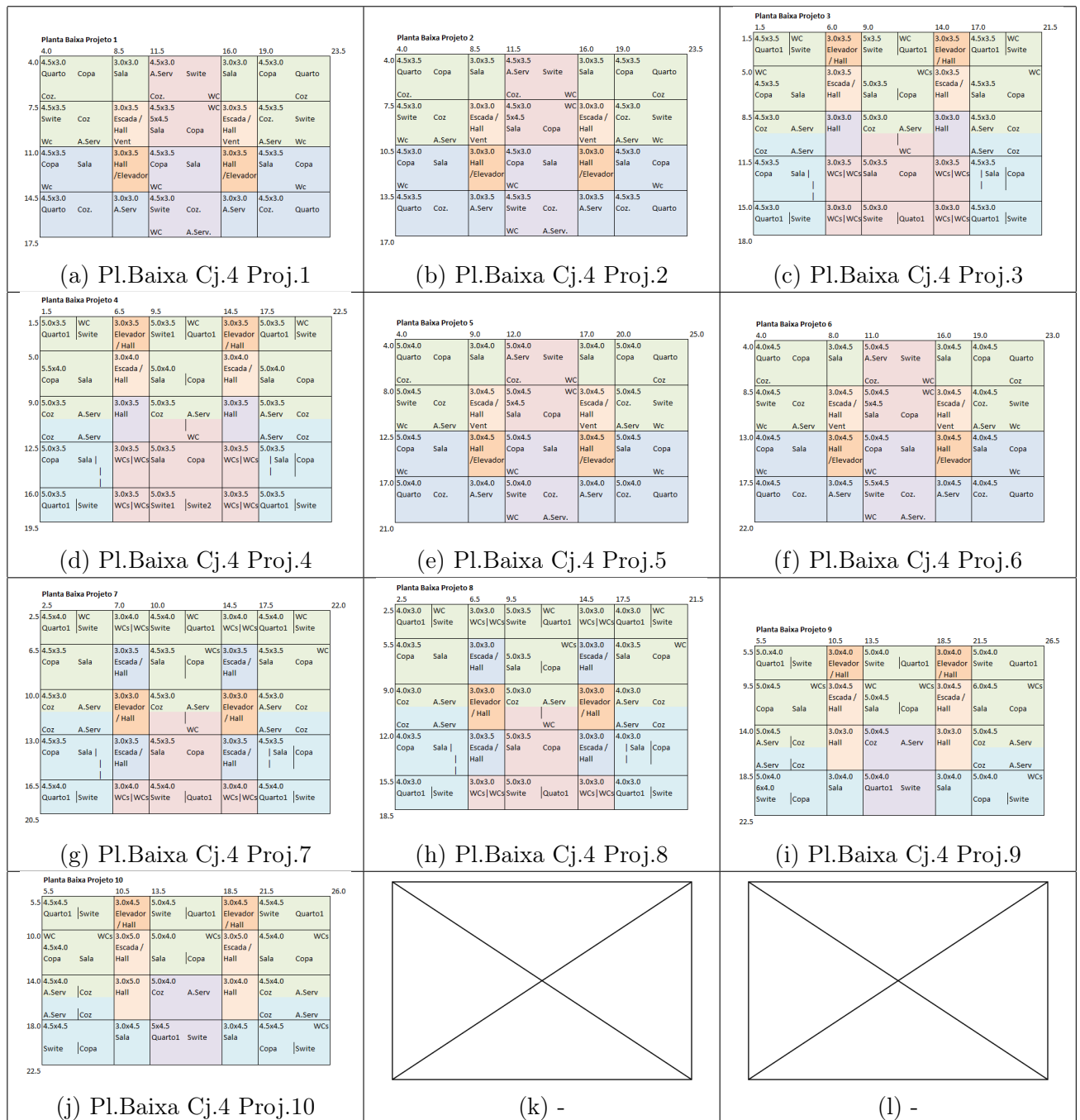


Figura B.3: Plantas Baixas - Cj.4 - Pjs.Treino 1 a 7 - Teste 8 a 10

Fonte: Autor

B.4 Plantas Baixas Cj.5 e 6 - Pjs.1 a 10

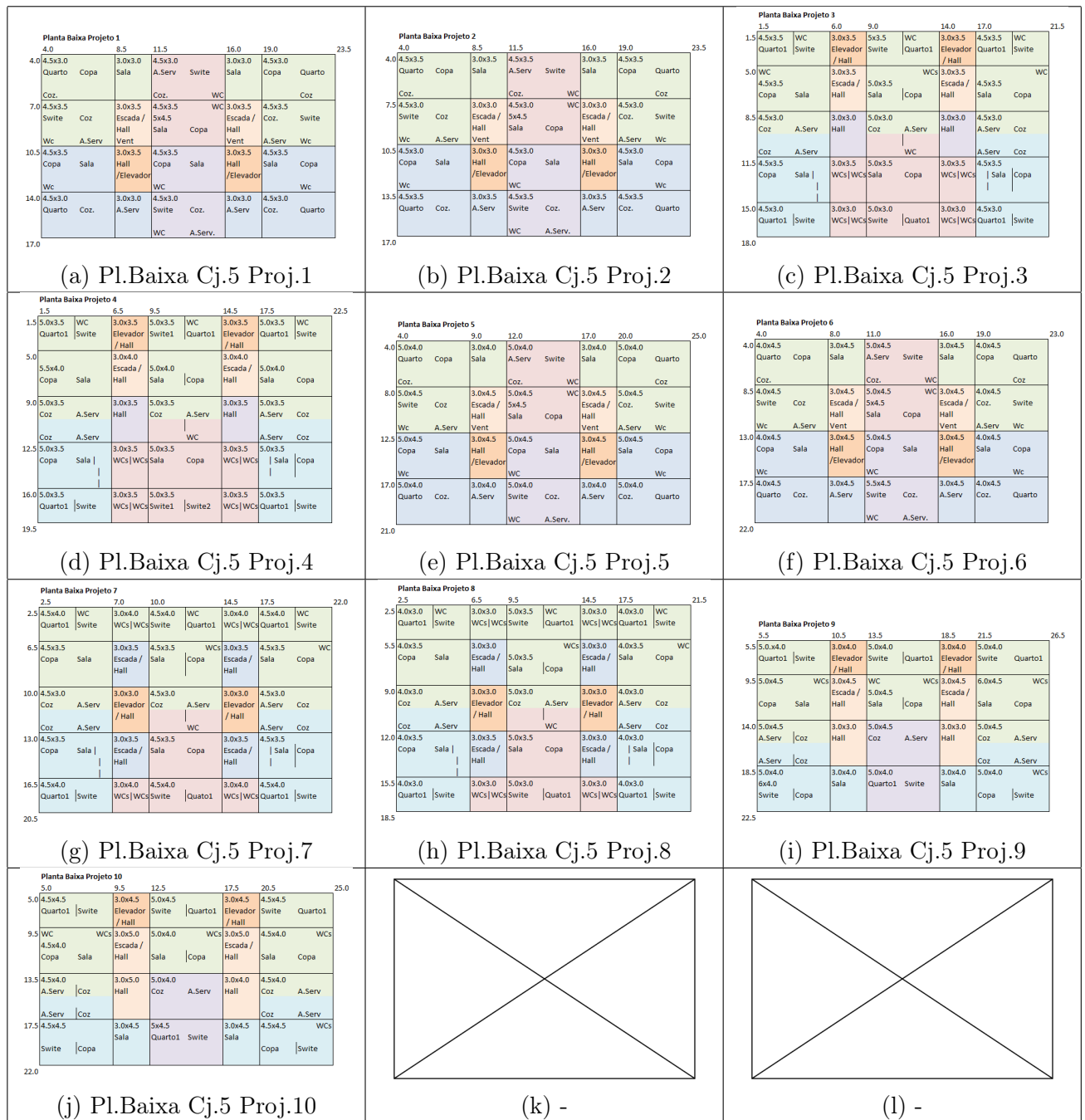


Figura B.4: Plantas Baixas - Cjs.5 e 6 - Pjs.Treino 1 a 7 - Teste 8 a 10

Fonte: Autor

APÊNDICE C – Tabelas Auxiliares - Lajes

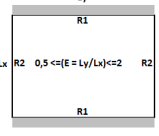
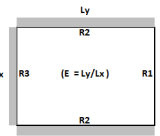
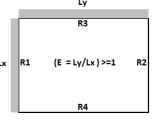
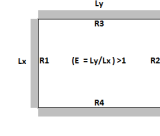
<p>Tabela Bares-Czerny - Caso 3</p>  <p>Ly</p> <p>R1</p> <p>R2</p> <p>R3</p> <p>R1</p> <p>Lx</p> <p>0,5 <= (E = Ly/Lx) <= 2</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>E = Ly/Lx</th> <th>mx</th> <th>my</th> <th>nx</th> <th>ny</th> <th>v1</th> <th>v2</th> <th>v3</th> <th>v4</th> <th>w</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,50</td><td>169,5</td><td>50,0</td><td>33,7</td><td>-</td><td>0,216</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>157,947</td></tr> <tr><td>0,55</td><td>123,5</td><td>47,4</td><td>28,6</td><td>-</td><td>0,238</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>122,514</td></tr> <tr><td>0,60</td><td>95,2</td><td>46,1</td><td>25,0</td><td>-</td><td>0,259</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>99,306</td></tr> <tr><td>0,65</td><td>76,9</td><td>45,8</td><td>22,2</td><td>-</td><td>0,280</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>83,864</td></tr> <tr><td>0,70</td><td>64,3</td><td>46,2</td><td>20,1</td><td>-</td><td>0,299</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>72,058</td></tr> <tr><td>0,75</td><td>55,5</td><td>47,4</td><td>18,5</td><td>-</td><td>0,308</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>63,948</td></tr> <tr><td>0,80</td><td>49,3</td><td>49,4</td><td>17,3</td><td>-</td><td>0,320</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>57,580</td></tr> <tr><td>0,85</td><td>44,4</td><td>52,0</td><td>16,3</td><td>-</td><td>0,330</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>52,774</td></tr> <tr><td>0,90</td><td>40,5</td><td>55,1</td><td>15,5</td><td>-</td><td>0,340</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>48,851</td></tr> <tr><td>0,95</td><td>37,5</td><td>58,9</td><td>14,8</td><td>-</td><td>0,348</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>45,811</td></tr> <tr><td>1,00</td><td>35,1</td><td>61,7</td><td>14,3</td><td>-</td><td>0,356</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>43,478</td></tr> <tr><td>1,10</td><td>31,7</td><td>67,2</td><td>13,5</td><td>-</td><td>0,369</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>39,942</td></tr> <tr><td>1,20</td><td>29,4</td><td>71,6</td><td>13,0</td><td>-</td><td>0,380</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>37,594</td></tr> <tr><td>1,30</td><td>27,8</td><td>74,0</td><td>12,6</td><td>-</td><td>0,388</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>35,727</td></tr> <tr><td>1,40</td><td>26,7</td><td>75,0</td><td>12,3</td><td>-</td><td>0,397</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>34,708</td></tr> <tr><td>1,50</td><td>25,8</td><td>75,8</td><td>12,3</td><td>-</td><td>0,404</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>34,057</td></tr> <tr><td>1,60</td><td>25,2</td><td>76,6</td><td>12,1</td><td>-</td><td>0,410</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>33,171</td></tr> <tr><td>1,70</td><td>24,7</td><td>76,9</td><td>12,0</td><td>-</td><td>0,415</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>33,102</td></tr> <tr><td>1,80</td><td>24,4</td><td>77,0</td><td>12,0</td><td>-</td><td>0,420</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>33,033</td></tr> <tr><td>1,90</td><td>24,2</td><td>77,0</td><td>12,0</td><td>-</td><td>0,424</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>32,964</td></tr> <tr><td>2,00</td><td>24,1</td><td>77,0</td><td>12,0</td><td>-</td><td>0,428</td><td>0,144</td><td>-</td><td>-</td><td>32,895</td></tr> </tbody> </table>	E = Ly/Lx	mx	my	nx	ny	v1	v2	v3	v4	w	0,50	169,5	50,0	33,7	-	0,216	0,144	-	-	157,947	0,55	123,5	47,4	28,6	-	0,238	0,144	-	-	122,514	0,60	95,2	46,1	25,0	-	0,259	0,144	-	-	99,306	0,65	76,9	45,8	22,2	-	0,280	0,144	-	-	83,864	0,70	64,3	46,2	20,1	-	0,299	0,144	-	-	72,058	0,75	55,5	47,4	18,5	-	0,308	0,144	-	-	63,948	0,80	49,3	49,4	17,3	-	0,320	0,144	-	-	57,580	0,85	44,4	52,0	16,3	-	0,330	0,144	-	-	52,774	0,90	40,5	55,1	15,5	-	0,340	0,144	-	-	48,851	0,95	37,5	58,9	14,8	-	0,348	0,144	-	-	45,811	1,00	35,1	61,7	14,3	-	0,356	0,144	-	-	43,478	1,10	31,7	67,2	13,5	-	0,369	0,144	-	-	39,942	1,20	29,4	71,6	13,0	-	0,380	0,144	-	-	37,594	1,30	27,8	74,0	12,6	-	0,388	0,144	-	-	35,727	1,40	26,7	75,0	12,3	-	0,397	0,144	-	-	34,708	1,50	25,8	75,8	12,3	-	0,404	0,144	-	-	34,057	1,60	25,2	76,6	12,1	-	0,410	0,144	-	-	33,171	1,70	24,7	76,9	12,0	-	0,415	0,144	-	-	33,102	1,80	24,4	77,0	12,0	-	0,420	0,144	-	-	33,033	1,90	24,2	77,0	12,0	-	0,424	0,144	-	-	32,964	2,00	24,1	77,0	12,0	-	0,428	0,144	-	-	32,895	<p>Tabela Bares-Czerny - Caso 6</p>  <p>Ly</p> <p>R2</p> <p>R3</p> <p>R1</p> <p>R2</p> <p>Lx</p> <p>(E = Ly/Lx)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>E = Ly/Lx</th> <th>mx</th> <th>my</th> <th>nx</th> <th>ny</th> <th>v1</th> <th>v2</th> <th>v3</th> <th>v4</th> <th>w</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,50</td><td>400,0</td><td>74,8</td><td>49,3</td><td>35,2</td><td>0,125</td><td>0,159</td><td>0,217</td><td>-</td><td>296,296</td></tr> <tr><td>0,55</td><td>250,0</td><td>66,9</td><td>40,5</td><td>30,7</td><td>0,131</td><td>0,174</td><td>0,227</td><td>-</td><td>218,564</td></tr> <tr><td>0,60</td><td>175,4</td><td>61,5</td><td>34,4</td><td>27,2</td><td>0,136</td><td>0,18</td><td>0,236</td><td>-</td><td>167,740</td></tr> <tr><td>0,65</td><td>133,3</td><td>57,7</td><td>29,8</td><td>24,6</td><td>0,14</td><td>0,206</td><td>0,242</td><td>-</td><td>133,063</td></tr> <tr><td>0,70</td><td>105,3</td><td>55,3</td><td>26,2</td><td>22,5</td><td>0,143</td><td>0,222</td><td>0,247</td><td>-</td><td>109,030</td></tr> <tr><td>0,75</td><td>85,5</td><td>54,2</td><td>23,4</td><td>21,0</td><td>0,144</td><td>0,238</td><td>0,249</td><td>-</td><td>91,875</td></tr> <tr><td>0,80</td><td>70,9</td><td>53,9</td><td>21,2</td><td>20,0</td><td>0,144</td><td>0,254</td><td>0,250</td><td>-</td><td>79,525</td></tr> <tr><td>0,85</td><td>61,3</td><td>54,3</td><td>19,5</td><td>19,2</td><td>0,144</td><td>0,268</td><td>0,250</td><td>-</td><td>70,430</td></tr> <tr><td>0,90</td><td>54,3</td><td>55,4</td><td>18,1</td><td>18,7</td><td>0,144</td><td>0,281</td><td>0,250</td><td>-</td><td>63,243</td></tr> <tr><td>0,95</td><td>48,5</td><td>55,7</td><td>17,1</td><td>18,4</td><td>0,144</td><td>0,293</td><td>0,250</td><td>-</td><td>57,371</td></tr> <tr><td>1,00</td><td>44,1</td><td>55,9</td><td>16,2</td><td>18,3</td><td>0,144</td><td>0,303</td><td>0,250</td><td>-</td><td>53,191</td></tr> <tr><td>1,10</td><td>37,9</td><td>60,3</td><td>14,8</td><td>17,7</td><td>0,144</td><td>0,321</td><td>0,250</td><td>-</td><td>47,104</td></tr> <tr><td>1,20</td><td>33,8</td><td>66,2</td><td>13,9</td><td>17,5</td><td>0,144</td><td>0,336</td><td>0,250</td><td>-</td><td>42,677</td></tr> <tr><td>1,30</td><td>31,0</td><td>69,0</td><td>13,2</td><td>17,5</td><td>0,144</td><td>0,348</td><td>0,250</td><td>-</td><td>39,787</td></tr> <tr><td>1,40</td><td>29,0</td><td>71,9</td><td>12,8</td><td>17,5</td><td>0,144</td><td>0,359</td><td>0,250</td><td>-</td><td>37,187</td></tr> <tr><td>1,50</td><td>27,4</td><td>75,2</td><td>12,5</td><td>17,5</td><td>0,144</td><td>0,368</td><td>0,250</td><td>-</td><td>35,913</td></tr> <tr><td>1,60</td><td>26,6</td><td>78,7</td><td>12,3</td><td>17,5</td><td>0,144</td><td>0,377</td><td>0,250</td><td>-</td><td>34,679</td></tr> <tr><td>1,70</td><td>25,8</td><td>82,9</td><td>12,2</td><td>17,5</td><td>0,144</td><td>0,384</td><td>0,250</td><td>-</td><td>34,209</td></tr> <tr><td>1,80</td><td>25,3</td><td>86,9</td><td>12,1</td><td>17,5</td><td>0,144</td><td>0,391</td><td>0,250</td><td>-</td><td>34,021</td></tr> <tr><td>1,90</td><td>24,8</td><td>91,5</td><td>12,0</td><td>17,5</td><td>0,144</td><td>0,396</td><td>0,250</td><td>-</td><td>33,862</td></tr> <tr><td>2,00</td><td>24,3</td><td>96,2</td><td>12,0</td><td>17,5</td><td>0,144</td><td>0,400</td><td>0,250</td><td>-</td><td>33,895</td></tr> </tbody> </table>	E = Ly/Lx	mx	my	nx	ny	v1	v2	v3	v4	w	0,50	400,0	74,8	49,3	35,2	0,125	0,159	0,217	-	296,296	0,55	250,0	66,9	40,5	30,7	0,131	0,174	0,227	-	218,564	0,60	175,4	61,5	34,4	27,2	0,136	0,18	0,236	-	167,740	0,65	133,3	57,7	29,8	24,6	0,14	0,206	0,242	-	133,063	0,70	105,3	55,3	26,2	22,5	0,143	0,222	0,247	-	109,030	0,75	85,5	54,2	23,4	21,0	0,144	0,238	0,249	-	91,875	0,80	70,9	53,9	21,2	20,0	0,144	0,254	0,250	-	79,525	0,85	61,3	54,3	19,5	19,2	0,144	0,268	0,250	-	70,430	0,90	54,3	55,4	18,1	18,7	0,144	0,281	0,250	-	63,243	0,95	48,5	55,7	17,1	18,4	0,144	0,293	0,250	-	57,371	1,00	44,1	55,9	16,2	18,3	0,144	0,303	0,250	-	53,191	1,10	37,9	60,3	14,8	17,7	0,144	0,321	0,250	-	47,104	1,20	33,8	66,2	13,9	17,5	0,144	0,336	0,250	-	42,677	1,30	31,0	69,0	13,2	17,5	0,144	0,348	0,250	-	39,787	1,40	29,0	71,9	12,8	17,5	0,144	0,359	0,250	-	37,187	1,50	27,4	75,2	12,5	17,5	0,144	0,368	0,250	-	35,913	1,60	26,6	78,7	12,3	17,5	0,144	0,377	0,250	-	34,679	1,70	25,8	82,9	12,2	17,5	0,144	0,384	0,250	-	34,209	1,80	25,3	86,9	12,1	17,5	0,144	0,391	0,250	-	34,021	1,90	24,8	91,5	12,0	17,5	0,144	0,396	0,250	-	33,862	2,00	24,3	96,2	12,0	17,5	0,144	0,400	0,250	-	33,895
E = Ly/Lx	mx	my	nx	ny	v1	v2	v3	v4	w																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,50	169,5	50,0	33,7	-	0,216	0,144	-	-	157,947																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,55	123,5	47,4	28,6	-	0,238	0,144	-	-	122,514																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,60	95,2	46,1	25,0	-	0,259	0,144	-	-	99,306																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,65	76,9	45,8	22,2	-	0,280	0,144	-	-	83,864																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,70	64,3	46,2	20,1	-	0,299	0,144	-	-	72,058																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,75	55,5	47,4	18,5	-	0,308	0,144	-	-	63,948																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,80	49,3	49,4	17,3	-	0,320	0,144	-	-	57,580																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,85	44,4	52,0	16,3	-	0,330	0,144	-	-	52,774																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,90	40,5	55,1	15,5	-	0,340	0,144	-	-	48,851																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,95	37,5	58,9	14,8	-	0,348	0,144	-	-	45,811																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,00	35,1	61,7	14,3	-	0,356	0,144	-	-	43,478																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,10	31,7	67,2	13,5	-	0,369	0,144	-	-	39,942																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,20	29,4	71,6	13,0	-	0,380	0,144	-	-	37,594																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,30	27,8	74,0	12,6	-	0,388	0,144	-	-	35,727																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,40	26,7	75,0	12,3	-	0,397	0,144	-	-	34,708																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,50	25,8	75,8	12,3	-	0,404	0,144	-	-	34,057																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,60	25,2	76,6	12,1	-	0,410	0,144	-	-	33,171																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,70	24,7	76,9	12,0	-	0,415	0,144	-	-	33,102																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,80	24,4	77,0	12,0	-	0,420	0,144	-	-	33,033																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,90	24,2	77,0	12,0	-	0,424	0,144	-	-	32,964																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
2,00	24,1	77,0	12,0	-	0,428	0,144	-	-	32,895																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
E = Ly/Lx	mx	my	nx	ny	v1	v2	v3	v4	w																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,50	400,0	74,8	49,3	35,2	0,125	0,159	0,217	-	296,296																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,55	250,0	66,9	40,5	30,7	0,131	0,174	0,227	-	218,564																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,60	175,4	61,5	34,4	27,2	0,136	0,18	0,236	-	167,740																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,65	133,3	57,7	29,8	24,6	0,14	0,206	0,242	-	133,063																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,70	105,3	55,3	26,2	22,5	0,143	0,222	0,247	-	109,030																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,75	85,5	54,2	23,4	21,0	0,144	0,238	0,249	-	91,875																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,80	70,9	53,9	21,2	20,0	0,144	0,254	0,250	-	79,525																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,85	61,3	54,3	19,5	19,2	0,144	0,268	0,250	-	70,430																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,90	54,3	55,4	18,1	18,7	0,144	0,281	0,250	-	63,243																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
0,95	48,5	55,7	17,1	18,4	0,144	0,293	0,250	-	57,371																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,00	44,1	55,9	16,2	18,3	0,144	0,303	0,250	-	53,191																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,10	37,9	60,3	14,8	17,7	0,144	0,321	0,250	-	47,104																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,20	33,8	66,2	13,9	17,5	0,144	0,336	0,250	-	42,677																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,30	31,0	69,0	13,2	17,5	0,144	0,348	0,250	-	39,787																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,40	29,0	71,9	12,8	17,5	0,144	0,359	0,250	-	37,187																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,50	27,4	75,2	12,5	17,5	0,144	0,368	0,250	-	35,913																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,60	26,6	78,7	12,3	17,5	0,144	0,377	0,250	-	34,679																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,70	25,8	82,9	12,2	17,5	0,144	0,384	0,250	-	34,209																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,80	25,3	86,9	12,1	17,5	0,144	0,391	0,250	-	34,021																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,90	24,8	91,5	12,0	17,5	0,144	0,396	0,250	-	33,862																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
2,00	24,3	96,2	12,0	17,5	0,144	0,400	0,250	-	33,895																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
<p>(a) Bares-Czerny Caso 3 Engaste</p> <p>Tabela Bares-Czerny - Caso 4</p>  <p>Ly</p> <p>R3</p> <p>R1</p> <p>R2</p> <p>R4</p> <p>Lx</p> <p>(E = Ly/Lx) >= 1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>E = Ly/Lx</th> <th>mx</th> <th>my</th> <th>nx</th> <th>ny</th> <th>v1</th> <th>v2</th> <th>v3</th> <th>v4</th> <th>w</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1,0</td><td>40,2</td><td>40,2</td><td>14,3</td><td>14,3</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>39,683</td></tr> <tr><td>1,1</td><td>35,1</td><td>41,3</td><td>13,0</td><td>13,0</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>0,340</td><td>0,200</td><td>35,156</td></tr> <tr><td>1,2</td><td>30,0</td><td>44,0</td><td>11,5</td><td>13,1</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>0,370</td><td>0,214</td><td>28,706</td></tr> <tr><td>1,3</td><td>26,3</td><td>47,7</td><td>10,7</td><td>12,6</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>0,390</td><td>0,225</td><td>25,745</td></tr> <tr><td>1,4</td><td>24,0</td><td>51,0</td><td>10,1</td><td>12,6</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>0,414</td><td>0,231</td><td>23,451</td></tr> <tr><td>1,5</td><td>22,2</td><td>52,9</td><td>9,6</td><td>12,4</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>0,428</td><td>0,244</td><td>21,707</td></tr> <tr><td>1,6</td><td>20,9</td><td>55,0</td><td>9,2</td><td>12,3</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>0,446</td><td>0,252</td><td>20,620</td></tr> <tr><td>1,7</td><td>19,8</td><td>56,6</td><td>8,9</td><td>12,3</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>0,447</td><td>0,258</td><td>19,959</td></tr> <tr><td>1,8</td><td>19,0</td><td>57,7</td><td>8,7</td><td>12,2</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>0,458</td><td>0,264</td><td>19,441</td></tr> <tr><td>1,9</td><td>18,4</td><td>59,1</td><td>8,6</td><td>12,2</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>0,467</td><td>0,270</td><td>18,716</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>17,9</td><td>60,2</td><td>8,4</td><td>12,2</td><td>0,317</td><td>0,183</td><td>0,475</td><td>0,275</td><td>17,857</td></tr> </tbody> </table>	E = Ly/Lx	mx	my	nx	ny	v1	v2	v3	v4	w	1,0	40,2	40,2	14,3	14,3	0,317	0,183	0,317	0,183	39,683	1,1	35,1	41,3	13,0	13,0	0,317	0,183	0,340	0,200	35,156	1,2	30,0	44,0	11,5	13,1	0,317	0,183	0,370	0,214	28,706	1,3	26,3	47,7	10,7	12,6	0,317	0,183	0,390	0,225	25,745	1,4	24,0	51,0	10,1	12,6	0,317	0,183	0,414	0,231	23,451	1,5	22,2	52,9	9,6	12,4	0,317	0,183	0,428	0,244	21,707	1,6	20,9	55,0	9,2	12,3	0,317	0,183	0,446	0,252	20,620	1,7	19,8	56,6	8,9	12,3	0,317	0,183	0,447	0,258	19,959	1,8	19,0	57,7	8,7	12,2	0,317	0,183	0,458	0,264	19,441	1,9	18,4	59,1	8,6	12,2	0,317	0,183	0,467	0,270	18,716	2,0	17,9	60,2	8,4	12,2	0,317	0,183	0,475	0,275	17,857	<p>(b) Bares-Czerny Caso 6 Engaste</p> <p>Tabela Bares-Czerny - Caso 5</p>  <p>Ly</p> <p>R3</p> <p>R1</p> <p>R2</p> <p>R4</p> <p>Lx</p> <p>(E = Ly/Lx) >= 1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>E = Ly/Lx</th> <th>mx</th> <th>my</th> <th>nx</th> <th>ny</th> <th>v1</th> <th>v2</th> <th>v3</th> <th>v4</th> <th>w</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1,0</td><td>56,8</td><td>56,8</td><td>19,4</td><td>19,4</td><td>0,250</td><td>0,250</td><td>-</td><td>-</td><td>65,400</td></tr> <tr><td>1,1</td><td>46,1</td><td>60,3</td><td>17,4</td><td>18,4</td><td>0,250</td><td>0,273</td><td>-</td><td>-</td><td>55,082</td></tr> <tr><td>1,2</td><td>39,4</td><td>66,1</td><td>15,8</td><td>17,9</td><td>0,250</td><td>0,292</td><td>-</td><td>-</td><td>48,225</td></tr> <tr><td>1,3</td><td>35,0</td><td>74,0</td><td>14,5</td><td>17,6</td><td>0,250</td><td>0,308</td><td>-</td><td>-</td><td>43,766</td></tr> <tr><td>1,4</td><td>31,8</td><td>83,6</td><td>13,7</td><td>17,5</td><td>0,250</td><td>0,321</td><td>-</td><td>-</td><td>40,047</td></tr> <tr><td>1,5</td><td>29,6</td><td>93,5</td><td>13,2</td><td>17,5</td><td>0,250</td><td>0,333</td><td>-</td><td>-</td><td>37,987</td></tr> <tr><td>1,6</td><td>28,0</td><td>98,1</td><td>12,8</td><td>17,5</td><td>0,250</td><td>0,344</td><td>-</td><td>-</td><td>36,330</td></tr> <tr><td>1,7</td><td>26,6</td><td>103,1</td><td>12,5</td><td>17,5</td><td>0,250</td><td>0,353</td><td>-</td><td>-</td><td>35,215</td></tr> <tr><td>1,8</td><td>25,4</td><td>109,3</td><td>12,3</td><td>17,5</td><td>0,250</td><td>0,361</td><td>-</td><td>-</td><td>34,021</td></tr> <tr><td>1,9</td><td>24,4</td><td>116,6</td><td>12,1</td><td>17,5</td><td>0,250</td><td>0,368</td><td>-</td><td>-</td><td>33,362</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>23,6</td><td>125,0</td><td>12,0</td><td>17,5</td><td>0,250</td><td>0,375</td><td>-</td><td>-</td><td>32,895</td></tr> </tbody> </table>	E = Ly/Lx	mx	my	nx	ny	v1	v2	v3	v4	w	1,0	56,8	56,8	19,4	19,4	0,250	0,250	-	-	65,400	1,1	46,1	60,3	17,4	18,4	0,250	0,273	-	-	55,082	1,2	39,4	66,1	15,8	17,9	0,250	0,292	-	-	48,225	1,3	35,0	74,0	14,5	17,6	0,250	0,308	-	-	43,766	1,4	31,8	83,6	13,7	17,5	0,250	0,321	-	-	40,047	1,5	29,6	93,5	13,2	17,5	0,250	0,333	-	-	37,987	1,6	28,0	98,1	12,8	17,5	0,250	0,344	-	-	36,330	1,7	26,6	103,1	12,5	17,5	0,250	0,353	-	-	35,215	1,8	25,4	109,3	12,3	17,5	0,250	0,361	-	-	34,021	1,9	24,4	116,6	12,1	17,5	0,250	0,368	-	-	33,362	2,0	23,6	125,0	12,0	17,5	0,250	0,375	-	-	32,895																																																																																																																																																																																																								
E = Ly/Lx	mx	my	nx	ny	v1	v2	v3	v4	w																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,0	40,2	40,2	14,3	14,3	0,317	0,183	0,317	0,183	39,683																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,1	35,1	41,3	13,0	13,0	0,317	0,183	0,340	0,200	35,156																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,2	30,0	44,0	11,5	13,1	0,317	0,183	0,370	0,214	28,706																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,3	26,3	47,7	10,7	12,6	0,317	0,183	0,390	0,225	25,745																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,4	24,0	51,0	10,1	12,6	0,317	0,183	0,414	0,231	23,451																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,5	22,2	52,9	9,6	12,4	0,317	0,183	0,428	0,244	21,707																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,6	20,9	55,0	9,2	12,3	0,317	0,183	0,446	0,252	20,620																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,7	19,8	56,6	8,9	12,3	0,317	0,183	0,447	0,258	19,959																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,8	19,0	57,7	8,7	12,2	0,317	0,183	0,458	0,264	19,441																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,9	18,4	59,1	8,6	12,2	0,317	0,183	0,467	0,270	18,716																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
2,0	17,9	60,2	8,4	12,2	0,317	0,183	0,475	0,275	17,857																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
E = Ly/Lx	mx	my	nx	ny	v1	v2	v3	v4	w																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,0	56,8	56,8	19,4	19,4	0,250	0,250	-	-	65,400																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,1	46,1	60,3	17,4	18,4	0,250	0,273	-	-	55,082																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,2	39,4	66,1	15,8	17,9	0,250	0,292	-	-	48,225																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,3	35,0	74,0	14,5	17,6	0,250	0,308	-	-	43,766																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,4	31,8	83,6	13,7	17,5	0,250	0,321	-	-	40,047																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,5	29,6	93,5	13,2	17,5	0,250	0,333	-	-	37,987																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,6	28,0	98,1	12,8	17,5	0,250	0,344	-	-	36,330																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,7	26,6	103,1	12,5	17,5	0,250	0,353	-	-	35,215																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,8	25,4	109,3	12,3	17,5	0,250	0,361	-	-	34,021																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1,9	24,4	116,6	12,1	17,5	0,250	0,368	-	-	33,362																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
2,0	23,6	125,0	12,0	17,5	0,250	0,375	-	-	32,895																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
<p>(c) Bares-Czerny Caso 4 Engaste</p>	<p>(d) Bares-Czerny Caso 5 Engaste</p>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

Tabela C.1: Tabelas Bares-Czerny - Engastamento x Índices p/ Lajes Maciças 2 Dirs.

Design: Autor - Fonte: Botelho [11]

<p>Dimensionamento de Lajes Maciças Armadas 2Dirs.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">E=x/d</th> <th colspan="3">Valor K6 (Fck Concreto)</th> <th colspan="3">Valor K3 (Fyd Aço)</th> </tr> <tr> <th>20Mpa</th> <th>25Mpa</th> <th>30Mpa</th> <th>CA25</th> <th>CAS0A</th> <th>CA60B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,01</td><td>1447,0</td><td>1158,0</td><td>965,0</td><td>0,647</td><td>0,323</td><td>0,269</td></tr> <tr><td>0,02</td><td>726,0</td><td>581,0</td><td>484,0</td><td>0,649</td><td>0,325</td><td>0,271</td></tr> <tr><td>0,03</td><td>486,0</td><td>389,0</td><td>324,0</td><td>0,652</td><td>0,326</td><td>0,272</td></tr> <tr><td>0,04</td><td>366,0</td><td>293,0</td><td>244,0</td><td>0,655</td><td>0,327</td><td>0,273</td></tr> <tr><td>0,05</td><td>294,0</td><td>235,0</td><td>196,0</td><td>0,657</td><td>0,329</td><td>0,274</td></tr> <tr><td>0,06</td><td>246,0</td><td>197,0</td><td>164,0</td><td>0,66</td><td>0,330</td><td>0,275</td></tr> <tr><td>0,07</td><td>212,0</td><td>169,0</td><td>141,0</td><td>0,663</td><td>0,331</td><td>0,276</td></tr> <tr><td>0,08</td><td>186,0</td><td>149,0</td><td>124,0</td><td>0,665</td><td>0,333</td><td>0,277</td></tr> <tr><td>0,09</td><td>166,0</td><td>133,0</td><td>111,0</td><td>0,668</td><td>0,334</td><td>0,278</td></tr> <tr><td>0,10</td><td>150,0</td><td>120,0</td><td>100,0</td><td>0,671</td><td>0,335</td><td>0,280</td></tr> <tr><td>0,11</td><td>137,0</td><td>110,0</td><td>91,4</td><td>0,674</td><td>0,337</td><td>0,281</td></tr> <tr><td>0,12</td><td>126,0</td><td>100,0</td><td>84,1</td><td>0,677</td><td>0,338</td><td>0,282</td></tr> <tr><td>0,13</td><td>117,0</td><td>93,6</td><td>78,0</td><td>0,679</td><td>0,340</td><td>0,283</td></tr> <tr><td>0,14</td><td>109,0</td><td>87,2</td><td>72,7</td><td>0,682</td><td>0,341</td><td>0,284</td></tr> <tr><td>0,15</td><td>102,0</td><td>81,8</td><td>68,1</td><td>0,685</td><td>0,343</td><td>0,285</td></tr> <tr><td>0,16</td><td>96,2</td><td>77,0</td><td>64,2</td><td>0,688</td><td>0,344</td><td>0,287</td></tr> <tr><td>0,17</td><td>91,0</td><td>72,8</td><td>60,6</td><td>0,691</td><td>0,346</td><td>0,288</td></tr> <tr><td>0,18</td><td>86,3</td><td>69,0</td><td>57,5</td><td>0,94</td><td>0,347</td><td>0,289</td></tr> <tr><td>0,19</td><td>82,1</td><td>65,7</td><td>54,7</td><td>0,697</td><td>0,349</td><td>0,290</td></tr> <tr><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td></tr> <tr><td>0,50</td><td>36,0</td><td>28,8</td><td>24</td><td>0,805</td><td>0,403</td><td>-</td></tr> </tbody> </table>	E=x/d	Valor K6 (Fck Concreto)			Valor K3 (Fyd Aço)			20Mpa	25Mpa	30Mpa	CA25	CAS0A	CA60B	0,01	1447,0	1158,0	965,0	0,647	0,323	0,269	0,02	726,0	581,0	484,0	0,649	0,325	0,271	0,03	486,0	389,0	324,0	0,652	0,326	0,272	0,04	366,0	293,0	244,0	0,655	0,327	0,273	0,05	294,0	235,0	196,0	0,657	0,329	0,274	0,06	246,0	197,0	164,0	0,66	0,330	0,275	0,07	212,0	169,0	141,0	0,663	0,331	0,276	0,08	186,0	149,0	124,0	0,665	0,333	0,277	0,09	166,0	133,0	111,0	0,668	0,334	0,278	0,10	150,0	120,0	100,0	0,671	0,335	0,280	0,11	137,0	110,0	91,4	0,674	0,337	0,281	0,12	126,0	100,0	84,1	0,677	0,338	0,282	0,13	117,0	93,6	78,0	0,679	0,340	0,283	0,14	109,0	87,2	72,7	0,682	0,341	0,284	0,15	102,0	81,8	68,1	0,685	0,343	0,285	0,16	96,2	77,0	64,2	0,688	0,344	0,287	0,17	91,0	72,8	60,6	0,691	0,346	0,288	0,18	86,3	69,0	57,5	0,94	0,347	0,289	0,19	82,1	65,7	54,7	0,697	0,349	0,290	0,50	36,0	28,8	24	0,805	0,403	-	<p>Área Total de Aço x Diâmetro x Espaçamento Armadura p/ Lajes</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Espaço. (cm)</th> <th colspan="4">Diâmetro da Barra da Armadura (cm²)</th> </tr> <tr> <th>5</th> <th>6,3</th> <th>8</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>7,5</td><td>3,33</td><td>4,19</td><td>6,66</td><td>10,66</td></tr> <tr><td>8,0</td><td>2,50</td><td>3,93</td><td>6,25</td><td>10,00</td></tr> <tr><td>9,0</td><td>2,22</td><td>3,50</td><td>5,55</td><td>8,88</td></tr> <tr><td>10,0</td><td>2,00</td><td>3,15</td><td>5,00</td><td>8,00</td></tr> <tr><td>11,0</td><td>1,82</td><td>2,86</td><td>4,54</td><td>7,27</td></tr> <tr><td>12,0</td><td>1,67</td><td>2,62</td><td>4,16</td><td>6,66</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>1,60</td><td>2,52</td><td>4,00</td><td>6,40</td></tr> <tr><td>13,0</td><td>1,54</td><td>2,42</td><td>3,84</td><td>6,15</td></tr> <tr><td>14,0</td><td>1,43</td><td>2,25</td><td>3,57</td><td>5,71</td></tr> <tr><td>15,0</td><td>1,33</td><td>2,10</td><td>3,33</td><td>5,33</td></tr> <tr><td>16,0</td><td>1,25</td><td>1,96</td><td>3,12</td><td>5,00</td></tr> <tr><td>17,0</td><td>1,18</td><td>1,85</td><td>2,94</td><td>4,70</td></tr> <tr><td>18,0</td><td>1,11</td><td>1,75</td><td>2,77</td><td>4,44</td></tr> <tr><td>19,0</td><td>1,05</td><td>1,65</td><td>2,63</td><td>4,21</td></tr> <tr><td>20,0</td><td>1,00</td><td>1,57</td><td>2,50</td><td>4,00</td></tr> <tr><td>21,0</td><td>0,95</td><td>1,50</td><td>2,38</td><td>3,80</td></tr> <tr><td>22,0</td><td>0,91</td><td>1,43</td><td>2,27</td><td>3,63</td></tr> <tr><td>23,0</td><td>0,87</td><td>1,36</td><td>2,17</td><td>3,47</td></tr> <tr><td>24,0</td><td>0,83</td><td>1,31</td><td>2,08</td><td>3,33</td></tr> <tr><td>25,0</td><td>0,80</td><td>1,26</td><td>2,00</td><td>3,20</td></tr> <tr><td>26,0</td><td>0,77</td><td>1,21</td><td>1,92</td><td>3,07</td></tr> <tr><td>27,0</td><td>0,74</td><td>1,16</td><td>1,85</td><td>2,96</td></tr> <tr><td>28,0</td><td>0,71</td><td>1,12</td><td>1,78</td><td>2,85</td></tr> <tr><td>29,0</td><td>0,69</td><td>1,08</td><td>1,72</td><td>2,75</td></tr> <tr><td>30,0</td><td>0,67</td><td>1,05</td><td>1,66</td><td>2,66</td></tr> </tbody> </table>	Espaço. (cm)	Diâmetro da Barra da Armadura (cm ²)				5	6,3	8	10	7,5	3,33	4,19	6,66	10,66	8,0	2,50	3,93	6,25	10,00	9,0	2,22	3,50	5,55	8,88	10,0	2,00	3,15	5,00	8,00	11,0	1,82	2,86	4,54	7,27	12,0	1,67	2,62	4,16	6,66	12,5	1,60	2,52	4,00	6,40	13,0	1,54	2,42	3,84	6,15	14,0	1,43	2,25	3,57	5,71	15,0	1,33	2,10	3,33	5,33	16,0	1,25	1,96	3,12	5,00	17,0	1,18	1,85	2,94	4,70	18,0	1,11	1,75	2,77	4,44	19,0	1,05	1,65	2,63	4,21	20,0	1,00	1,57	2,50	4,00	21,0	0,95	1,50	2,38	3,80	22,0	0,91	1,43	2,27	3,63	23,0	0,87	1,36	2,17	3,47	24,0	0,83	1,31	2,08	3,33	25,0	0,80	1,26	2,00	3,20	26,0	0,77	1,21	1,92	3,07	27,0	0,74	1,16	1,85	2,96	28,0	0,71	1,12	1,78	2,85	29,0	0,69	1,08	1,72	2,75	30,0	0,67	1,05	1,66	2,66
E=x/d		Valor K6 (Fck Concreto)			Valor K3 (Fyd Aço)																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
	20Mpa	25Mpa	30Mpa	CA25	CAS0A	CA60B																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,01	1447,0	1158,0	965,0	0,647	0,323	0,269																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,02	726,0	581,0	484,0	0,649	0,325	0,271																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,03	486,0	389,0	324,0	0,652	0,326	0,272																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,04	366,0	293,0	244,0	0,655	0,327	0,273																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,05	294,0	235,0	196,0	0,657	0,329	0,274																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,06	246,0	197,0	164,0	0,66	0,330	0,275																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,07	212,0	169,0	141,0	0,663	0,331	0,276																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,08	186,0	149,0	124,0	0,665	0,333	0,277																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,09	166,0	133,0	111,0	0,668	0,334	0,278																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,10	150,0	120,0	100,0	0,671	0,335	0,280																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,11	137,0	110,0	91,4	0,674	0,337	0,281																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,12	126,0	100,0	84,1	0,677	0,338	0,282																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,13	117,0	93,6	78,0	0,679	0,340	0,283																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,14	109,0	87,2	72,7	0,682	0,341	0,284																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,15	102,0	81,8	68,1	0,685	0,343	0,285																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,16	96,2	77,0	64,2	0,688	0,344	0,287																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,17	91,0	72,8	60,6	0,691	0,346	0,288																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,18	86,3	69,0	57,5	0,94	0,347	0,289																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,19	82,1	65,7	54,7	0,697	0,349	0,290																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
...																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0,50	36,0	28,8	24	0,805	0,403	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Espaço. (cm)	Diâmetro da Barra da Armadura (cm ²)																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	5	6,3	8	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
7,5	3,33	4,19	6,66	10,66																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
8,0	2,50	3,93	6,25	10,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
9,0	2,22	3,50	5,55	8,88																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
10,0	2,00	3,15	5,00	8,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
11,0	1,82	2,86	4,54	7,27																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
12,0	1,67	2,62	4,16	6,66																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
12,5	1,60	2,52	4,00	6,40																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
13,0	1,54	2,42	3,84	6,15																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
14,0	1,43	2,25	3,57	5,71																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
15,0	1,33	2,10	3,33	5,33																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
16,0	1,25	1,96	3,12	5,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
17,0	1,18	1,85	2,94	4,70																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
18,0	1,11	1,75	2,77	4,44																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
19,0	1,05	1,65	2,63	4,21																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
20,0	1,00	1,57	2,50	4,00																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
21,0	0,95	1,50	2,38	3,80																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
22,0	0,91	1,43	2,27	3,63																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
23,0	0,87	1,36	2,17	3,47																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
24,0	0,83	1,31	2,08	3,33																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
25,0	0,80	1,26	2,00	3,20																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
26,0	0,77	1,21	1,92	3,07																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
27,0	0,74	1,16	1,85	2,96																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
28,0	0,71	1,12	1,78	2,85																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
29,0	0,69	1,08	1,72	2,75																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
30,0	0,67	1,05	1,66	2,66																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
<p>(a) Tab.K6 K3 Dimens. Lajes 2 Dirs.</p>	<p>(b) Tab.Área Total de Aço p/ Armas. Lajes</p>																																																																																																																																																																																																																																																																																																						

Tabela C.2: Tabelas para Cálculo dos Diâmetros e Espaçamentos da Armaduras e Lajes

Design: Autor - Fonte: Botelho [11]