



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente**

GUILHERME FLEITH DE MEDEIROS

**MÉTODO DA BUSCA HARMÔNICA APLICADO NA OTIMIZAÇÃO DE SEÇÕES
DE PILARES RETANGULARES EM CONCRETO ARMADO CONSIDERANDO
CUSTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS**

**Passo Fundo
2012**

GUILHERME FLEITH DE MEDEIROS

MÉTODO DA BUSCA HARMÔNICA APLICADO NA OTIMIZAÇÃO DE SEÇÕES DE
PILARES RETANGULARES EM CONCRETO ARMADO CONSIDERANDO CUSTOS
ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Orientador: Prof. Dr. Moacir Kripka

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo na Área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Passo Fundo
2012

GUILHERME FLEITH DE MEDEIROS

MÉTODO DA BUSCA HARMÔNICA APLICADO NA OTIMIZAÇÃO DE SEÇÕES DE
PILARES RETANGULARES EM CONCRETO ARMADO CONSIDERANDO CUSTOS
ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo na Área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Data de Aprovação: Passo Fundo, 27 de setembro de 2012.

Doutor Moacir Kripka
Orientador

Doutor Armando Miguel Awruch
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Doutor Afonso Celso de Castro Lemonge
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Doutor Zacarias Martin Chamberlain Pravia
Universidade de Passo Fundo - UPF

Doutor Pedro Domingos Marques Prietto
Universidade de Passo Fundo – UPF

Passo Fundo
2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais Adão e Janete e aos meus irmãos Janine e Everton, por tudo o que representam para mim.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de mestrado fornecida.

Agradeço a todos os professores e funcionários do curso de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo, pela convivência e por todos os ensinamentos repassados ao longo desses últimos oito anos.

Agradeço ao professor Moacir, pelo auxílio prestado na orientação deste trabalho, bem como por todo o valioso conhecimento repassado durante os vários anos em que já trabalhamos juntos em nossas pesquisas, além de toda ajuda empregada em meu início de carreira docente.

Agradeço aos demais professores da área de estruturas do Curso de Engenharia Civil, em especial ao professor Zacarias, com os quais já aprendi muito.

Agradeço aos professores membros da banca examinadora deste trabalho, por todas as contribuições efetuadas.

Agradeço aos colegas do mestrado, amigos que tive o prazer de conhecer e conviver diariamente ao longo desses últimos dois anos.

Agradeço à amiga e futura engenheira Juliana, pela ajuda prestada nos estudos sobre Análise de Ciclo de Vida.

Agradeço a todos os meus amigos, pelos momentos de convívio, apoio e lazer.

Agradeço também a Deus.

E a todos os outros que de alguma forma contribuíram para que eu vencesse mais essa etapa em minha vida, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Projetar estruturas mais econômicas e de menor impacto ambiental é uma meta cada vez mais presente nos escritórios de cálculo. Não basta apenas projetar estruturas que suportem os carregamentos com segurança e funcionalidade, mas que isso seja feito da forma mais racional possível. Além do ganho econômico, lançar mão de técnicas de otimização no desenvolvimento de um projeto estrutural pode reduzir o consumo de materiais cuja extração, fabricação e transporte causam um grande dano ambiental, como é o caso dos insumos do concreto armado. Essas técnicas fundamentam o processo de busca da melhor solução através de uma formulação matemática, diminuindo a dependência relacionada à intuição e à experiência do engenheiro, as quais nem sempre garantem a melhor decisão de projeto, dada a infinidade de combinações de soluções que podem existir para um dado problema. O presente trabalho objetivou otimizar os custos monetários e ambientais das seções de pilares retangulares de concreto armado submetidos à flexocompressão reta, utilizando o método de otimização da Busca Harmônica, o qual consiste numa meta-heurística desenvolvida em analogia ao processo de obtenção da melhor harmonia musical. Portanto, além da consideração dos custos de aquisição dos materiais no processo de otimização estrutural, foram efetuadas análises levando-se em conta os custos ambientais de cada insumo, estimados a partir da Análise do Ciclo de Vida. As variáveis para o problema foram as dimensões da seção de concreto, a quantidade e as bitolas das armaduras, bem como as classes de resistência do concreto. Os pilares foram verificados quanto aos Estados Limites Últimos e Estados Limites de Serviço conforme os preceitos da norma ABNT NBR 6118 (2007). Para operacionalizar a otimização dos pilares por meio da formulação desenvolvida, foi implementado um algoritmo em linguagem Fortran, o qual foi empregado em uma série de análises numéricas para comprovar a eficiência do procedimento adotado, bem como do algoritmo do método da Busca Harmônica. Os resultados foram comparados aos obtidos por processos convencionais de dimensionamento, bem como por outros métodos de otimização. De maneira geral, o método de otimização da Busca Harmônica mostrou-se eficiente na busca pelas soluções ótimas, assim como importantes considerações sobre a otimização dos custos monetários e ambientais de pilares de concreto armado foram obtidas a partir dos exemplos desenvolvidos.

Palavras-chave: Otimização. Pilares. Concreto Armado. Busca Harmônica. Análise do Ciclo de Vida.

ABSTRACT

More economical structures with less environmental impact is an important goal to be attained in engineering design. Besides designing structures that support loads safely and preserve their functionality, this should be done as rational as possible. Furthermore, using optimization techniques in structural design can reduce the consumption of materials, whose extraction, manufacturing and transportation cause significant environmental damage. These techniques look for the best solution through a mathematical formulation, decreasing dependence related to intuition and experience of the engineer. This study aimed to optimize material saving and environmental costs of rectangular sections of concrete columns subjected to uniaxial flexural compression, using the Harmony Search method, which is a meta-heuristic technique based in analogy to the process of obtaining the best musical harmony. Therefore, besides the consideration of materials costs in the process of structural optimization, numerical applications were made considering the environmental costs of each material, estimated from the Life Cycle Assessment. The dimensions of the concrete section, the quantity and size of the reinforcement and the characteristic strength of concrete constituted variables of the optimization problem. The columns were checked for the Ultimate Limit States and Serviceability Limit States, according to the precepts of ABNT NBR 6118 (2007). From the developed formulation, an algorithm written in Fortran was used in a series of numerical analysis to confirm the efficiency of the adopted procedure, as well as the algorithm of Harmony Search. Results were compared to those obtained by conventional design, as well as other optimization methods. In general, the optimization method of Harmony Search was efficient in the search for optimal solutions, as well as important considerations for the optimization of material and environmental costs of reinforced concrete columns were obtained from examples presented here.

Keywords: Optimization. Columns. Reinforced Concrete. Harmony Search. Life Cycle Assessment.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Diagrama tensão-deformação idealizado para concretos _____	22
FIGURA 2 – Diagrama tensão-deformação simplificado para aços _____	24
FIGURA 3 – Comportamento da seção no estágio I _____	25
FIGURA 4 – Comportamento da seção no estágio II _____	26
FIGURA 5 – Comportamento da seção no estágio III _____	26
FIGURA 6 – Simplificação do diagrama de tensões _____	27
FIGURA 7 – Domínios de Estado Limite Último de uma seção transversal _____	28
FIGURA 8 – Classificação de pilares quanto à sollicitação _____	30
FIGURA 9 – Espaçamentos limites entre as barras longitudinais de um pilar _____	33
FIGURA 10 – Estágios do ciclo de vida de um produto, atividade ou sistema de produção _____	35
FIGURA 11 – Quatro fases que estruturam a Análise de Ciclo de Vida _____	35
FIGURA 12 – Cadeia de impactos causada pela emissão de substâncias gasosas _____	37
FIGURA 13 – Exemplo de função multimodal de única variável _____	44
FIGURA 14 – Fluxograma básico do método da Busca Harmônica _____	59
FIGURA 15 – Comportamento dos parâmetros PAR e bw variáveis ao longo do número de iterações _____	61
FIGURA 16 – Variáveis de projeto referentes à geometria da seção _____	63
FIGURA 17 – Superfície de interação M-N _____	65
FIGURA 18 – Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo I _____	72
FIGURA 19 – Convergência da função custo para o ótimo independente da solução inicial (exemplo I) _____	74
FIGURA 20 – Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo II _____	75
FIGURA 21 – Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo III _____	78
FIGURA 22 – Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo IV _____	80
FIGURA 23 – Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo VI (dimensões múltiplas de 1 cm) _____	85
FIGURA 24 – Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo VI (dimensões múltiplas de 5 cm) _____	85
FIGURA 25 – Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo VII _____	87
FIGURA 26 – Variação do custo em função do número de iterações para as versões original e final do algoritmo para o exemplo II _____	96

FIGURA 27 – Variação do custo ótimo em função do número de iterações, utilizando o algoritmo do <i>Simulated Annealing</i> (dez tentativas efetuadas para o exemplo II)	98
FIGURA 28 – Variação do custo ótimo em função do número de iterações, utilizando o algoritmo do método da Busca Harmônica (dez tentativas efetuadas para o exemplo II)	98
FIGURA 29 – Relação entre os custos ótimos obtidos para os diferentes métodos de otimização e o custo da solução por Ábaco de Interação, considerando os diferentes indicadores de custos avaliados no exemplo VIII	103
FIGURA 30 – Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo IX	105
FIGURA 31 – Desempenho das soluções ambientais ótimas em relação a melhor solução monetária, quanto ao ganho ambiental e ao acréscimo no custo monetário, para o exemplo IX	106
FIGURA 32 – Variação no consumo de concreto nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo IX	107
FIGURA 33 – Variação no consumo de aço nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo IX	107
FIGURA 34 – Variação no consumo de fôrmas nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo IX	107
FIGURA 35 – Participação dos materiais no custo total das seções considerando os diferentes indicadores de custos avaliados no exemplo IX	108
FIGURA 36 – Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo X	109
FIGURA 37 – Desempenho das soluções ambientais ótimas em relação a melhor solução monetária, quanto ao ganho ambiental e ao acréscimo no custo monetário, para o exemplo X	110
FIGURA 38 – Variação no consumo de concreto nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo X	111
FIGURA 39 – Variação no consumo de aço nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo X	111
FIGURA 40 – Variação no consumo de fôrmas nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo X	112
FIGURA 41 – Participação dos materiais no custo total das seções considerando os diferentes indicadores de custos avaliados no exemplo X	112

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Principais objetivos dos autores na otimização de estruturas de concreto armado	53
QUADRO 2 – Principais métodos de otimização empregados em estruturas de concreto armado	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Valores do coeficiente adicional γ_n em função de b _____	33
TABELA 2 – Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo I _____	71
TABELA 3 – Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo I ____	72
TABELA 4 – Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo I (R\$/m) _____	72
TABELA 5 – Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo II _____	74
TABELA 6 – Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo II ____	76
TABELA 7 – Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo II (R\$/m) _____	76
TABELA 8 – Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo III _____	77
TABELA 9 – Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo III _____	79
TABELA 10 – Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo III (R\$/m) _____	79
TABELA 11 – Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo IV _____	80
TABELA 12 – Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo IV _____	81
TABELA 13 – Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo IV (R\$/m) _____	81
TABELA 14 – Pares de esforços utilizados no exemplo V _____	82
TABELA 15 – Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo V _____	83
TABELA 16 – Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo V (R\$/m) _____	83
TABELA 17 – Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo VI _____	84
TABELA 18 – Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo VI _____	86
TABELA 19 – Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo VI (R\$/m) _____	86
TABELA 20 – Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo VII _____	87
TABELA 21 – Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo VII _____	88
TABELA 22 – Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo VII (R\$/m) _____	88
TABELA 23 – Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de parâmetros PAR e b_w variáveis para o exemplo II _____	90
TABELA 24 – Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de possibilidade de reinicialização da memória harmônica para o exemplo I ____	92

TABELA 25 – Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de possibilidade de reinicialização da memória harmônica para o exemplo II	92
TABELA 26 – Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de possibilidade de reinicialização da memória harmônica para o exemplo VI, considerando f_{ck} igual a 40 MPa	93
TABELA 27 – Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de novo critério de parada para o exemplo I	94
TABELA 28 – Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de novo critério de parada para o exemplo VI, considerando f_{ck} igual a 20 MPa	94
TABELA 29 – Comparativo do desempenho do algoritmo original e do algoritmo final do método da Busca Harmônica para o exemplo II	95
TABELA 30 – Síntese dos resultados obtidos com o algoritmo final do método da Busca Harmônica para os exemplos utilizados no estudo dos parâmetros	96
TABELA 31 – Comparativo entre algoritmos do <i>Simulated Annealing</i> e método da Busca Harmônica para o exemplo I (considerando os limites superiores das variáveis como soluções iniciais)	99
TABELA 32 – Comparativo entre algoritmos do <i>Simulated Annealing</i> e método da Busca Harmônica para o exemplo II (considerando os limites superiores das variáveis como soluções iniciais)	99
TABELA 33 – Comparativo entre algoritmos do <i>Simulated Annealing</i> e método da Busca Harmônica para o exemplo II (considerando os limites inferiores das variáveis como soluções iniciais)	99
TABELA 34 – Comparativo entre algoritmos do <i>Simulated Annealing</i> e método da Busca Harmônica para o exemplo IV (considerando os limites superiores das variáveis como soluções iniciais e f_{ck} igual a 40 MPa)	100
TABELA 35 – Síntese comparativa entre resultados obtidos com os algoritmos do <i>Simulated Annealing</i> e do método da Busca Harmônica para os exemplos analisados	100
TABELA 36 – Comparativo das taxas de sucesso do <i>Simulated Annealing</i> e do método da Busca Harmônica obtidas nos exemplos analisados	101
TABELA 37 – Custos dos insumos do concreto armado para o exemplo VIII	102
TABELA 38 – Custos monetários e ambientais obtidos no exemplo VIII	102
TABELA 39 – Variação percentual obtida nos custos analisados no exemplo VIII, tomando-se como referência a seção gerada por Ábaco de Interação (Figura 18a)	103
TABELA 40 – Custos dos insumos do concreto armado para o exemplo IX	104
TABELA 41 – Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo IX	105
TABELA 42 – Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo IX (Custo/m)	105

TABELA 43 – Custos dos insumos do concreto armado para o exemplo X _____	109
TABELA 44 – Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo X _____	110
<hr/>	
TABELA 45 – Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo X _____	110
TABELA 46 – Variação percentual nas quantidades de material empregadas nas seções ótimas monetárias e ambientais dos exemplos IX e X, considerando aumento do f_{ck} de 20 MPa para 35 MPa _____	113
TABELA 47 – Variação percentual nos custos monetários e ambientais ótimos dos exemplos IX e X, considerando aumento do f_{ck} de 20 MPa para 35 MPa _____	113

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações Iniciais	14
1.2 Justificativa	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
1.4 Estrutura da Dissertação	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado	21
2.1.1 Estados Limites	21
2.1.2 Características Mecânicas dos Materiais	22
2.1.2.1 Concreto	22
2.1.2.2 Aço	23
2.1.3 Estádios de Dimensionamento	25
2.1.4 Domínios de Deformação na Ruína	27
2.1.5 Pilares de Concreto Armado	29
2.1.5.1 Considerações Gerais	29
2.1.5.2 Verificação da Capacidade Resistente na Flexocompressão Reta	30
2.1.5.3 Restrições Dimensionais e Taxas de Armaduras	33
2.2 Análise do Ciclo de Vida	34
2.2.1 Conceitos Gerais	34
2.2.2 Fases da Análise de Ciclo de Vida	35
2.2.3 Métodos de Avaliação de Impacto	36
2.2.4 Vantagens e Barreiras Encontradas na Realização da ACV	40
2.3 Otimização	41
2.3.1 Conceitos Gerais	41
2.3.2 Otimização de Estruturas de Concreto Armado	46
2.3.3 Otimização Estrutural com Enfoque Ambiental	54

2.3.4 Método da Busca Harmônica	56
3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	62
3.1 Introdução	62
3.2 Parâmetros Fixos e Variáveis do Problema	62
3.3 Função Objetivo	64
3.4 Restrições do Problema	65
4 APLICAÇÕES NUMÉRICAS	69
4.1 Introdução	69
4.2 Otimização de Custos Monetários	70
4.2.1 Exemplo I	70
4.2.2 Exemplo II	74
4.2.3 Exemplo III	77
4.2.4 Exemplo IV	79
4.2.5 Exemplo V	82
4.2.6 Exemplo VI	84
4.2.7 Exemplo VII	87
4.3 Estudos dos Parâmetros do Método da Busca Harmônica	88
4.3.1 Algoritmo Original	88
4.3.2 Incorporação de Parâmetros Variáveis	89
4.3.3 Reinicialização da Memória Harmônica	91
4.3.4 Inclusão de Novo Critério de Parada	93
4.3.5 Algoritmo Final	95
4.3.6 Comparativo entre <i>Simulated Annealing</i> e Método da Busca Harmônica	97
4.4 Otimização de Custos Ambientais	101
4.4.1 Exemplo VIII	101
4.4.2 Exemplo IX	104
4.4.3 Exemplo X	108
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
REFERÊNCIAS	117

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O desenvolvimento da engenharia brasileira está intimamente ligado ao concreto armado. A infraestrutura do país é historicamente ligada aos sistemas construtivos que combinam o concreto e o aço como materiais de construção, sendo os mesmos empregados na estrutura de pontes, viadutos, barragens, edificações residenciais de múltiplos pavimentos, entre outros variados usos. Apesar do crescimento e expansão de outras tecnologias construtivas, é ainda hoje o material hegemônico na construção civil brasileira.

Segundo Giongo (2007), a viabilidade técnica e econômica do concreto armado na indústria da construção é atestada pelo grande número de obras que utilizam de pequenos a grandes volumes deste material.

O concreto armado domina a construção brasileira desde meados do século XX. Esse fato se deve a diversos fatores, muitos deles intrínsecos à realidade do país, dos quais se citam a pouca qualificação da mão de obra, que encontrou fácil adaptação a um sistema construtivo bastante simplificado, a disponibilidade fácil dos insumos necessários, a própria ousadia da arquitetura e engenharia nacionais, visto que o concreto é um material que dá margem a experimentações formais e estruturais, a uma extensa campanha publicitária da indústria cimentícia pela expansão do uso do concreto, ocorrida décadas atrás, entre outros (SANTOS; OLIVEIRA, 2008).

A construção civil no Brasil acabou estruturando-se em torno do sistema construtivo do concreto armado, sendo a tecnologia empregada nas edificações formais e até mesmo informais, o que tornou o cimento o material de construção mais utilizado no país. Toda engenharia e arquitetura brasileira são estruturadas no sistema, nas mais variadas esferas que compõem a sua atuação (SANTOS; OLIVEIRA, 2008). A engenharia de estruturas brasileira foi reconhecida e internacionalmente respeitada a partir do concreto armado (GIONGO, 2007). Mas a importância do concreto vai, obviamente, muito além das fronteiras nacionais, sendo citado por Edvardsen e Tollose (2001) como o principal material de construção no mundo.

Nesse contexto, ganha destaque a extensa participação das construções de concreto armado na geração de impactos sobre o meio ambiente. A produção mundial do cimento,

principal componente do concreto, era, em 2001, de 1,6 bilhões de toneladas/ano, quantidade correspondente a cerca de 7% da carga global de dióxido de carbono lançado na atmosfera. São gerados cerca de 480 kg de CO₂ por metro cúbico de concreto para os traços de concreto convencional, bem como grandes emissões de dióxido nitroso (MEHTA, 2001; BREMNER, 2001). Em 2010, de acordo com dados da *International Cement Review*, a produção mundial de cimento atingiu cerca de 3,3 bilhões de toneladas anuais, um incremento de mais de 100% em cerca de 10 anos, aumentando ainda mais os impactos gerados ao meio ambiente (INTERCEMENT, 2011).

Uma grande quantidade de agregados (areia e pedra britada) é obtida de jazidas naturais para a produção do concreto. Além do esgotamento dos recursos, isso acaba por degradar as áreas de extração, com prejuízos ao solo, recursos hídricos e perda da biodiversidade da flora e faunas locais. A fabricação do cimento também exige a extração de argila e materiais calcários, acarretando prejuízos similares. Além do consumo de recursos naturais e da geração de gases de efeito estufa, deve-se dar destaque também ao consumo de água e de energia envolvido no processo de obtenção de estruturas de concreto, sem contar com impactos indiretos, oriundos, por exemplo, das emissões de dióxido de carbono durante a fase de transporte dos insumos e do concreto dosado em central até a obra (METHA, 2001; OLIVEIRA, 2007; VALLE; LÓPEZ, 2005).

Apesar do grande consumo de energia requerido para a produção do concreto, bem como de emissões de gases que provocam o efeito estufa, e principalmente da extensa necessidade de exploração de recursos naturais, muitos pesquisadores afirmam que ao longo do ciclo de vida das estruturas em aço e em concreto armado, este último leva vantagem em termos de menor impacto ao meio ambiente. Para isso, os mesmos utilizaram a metodologia do *Life Cycle Assessment (LCA)*, ou Análise do Ciclo de Vida (ACV), a qual determina todos os impactos ambientais gerados por um material ou processo durante todas as fases de sua vida, da extração da matéria-prima à deposição final, passando pela fabricação, utilização e manutenção (FERREIRA, 2004; GARCIA; RODRIGUES; AGUILAR, 2010).

Segundo o exposto por Denilson e Halligan (2010), os edifícios em concreto podem, por exemplo, se aproveitar de seu menor atraso térmico, em relação ao aço, para gerar um menor consumo de energia nas edificações durante o seu uso. Quanto maior o atraso térmico de uma edificação, mais lenta a sua oscilação térmica, diminuindo as necessidades de climatização da mesma. Isso acabaria por compensar alguns itens em que o concreto leva desvantagem durante a geração do produto, como a maior necessidade de exploração de recursos naturais para a sua obtenção. Para Struble e Godfrey (2004), que comparam o

impacto ambiental ao longo da vida útil para vigas de concreto armado e aço utilizadas para o mesmo fim, as primeiras consomem menor energia e ocasionam menor poluição dos recursos hídricos se comparadas às segundas. A maior emissão de dióxido de carbono do concreto em relação ao aço seria de apenas 10%, concentrando-se a maior diferença pró-aço na extração mineral, cerca de 60% menor.

Peyroteo, Silva e Jalali (2007) ao analisarem estruturas de concreto armado e aço através da Análise do Ciclo de Vida chegaram à conclusão que o concreto armado é menos nocivo ao ambiente do que estruturas em aço. Segundo os autores, o aço consome, por exemplo, maior quantidade de energia, gera maior quantidade de óxido nítrico e dióxido de carbono, levando vantagem apenas no que diz respeito às emissões de dióxido de enxofre. Garcia, Rodrigues e Aguilar (2010) reiteram que o concreto possui melhor resultado ao se considerar a extração de matéria-prima, a fabricação dos materiais, o transporte e a aplicação à obra.

Porém, é incorreto afirmar categoricamente que o concreto armado é mais sustentável que o aço, pois há estudos que indicam o caminho contrário. Dependendo das particularidades de cada região ou país, os materiais podem apresentar custos de ciclo de vida bastante distintos. Além disso, é fundamental fazer comparações para uma mesma situação de projeto, pois não se pode comparar o impacto para uma mesma unidade de volume dos materiais, devido ao fato dos mesmos apresentarem desempenho estrutural distinto (JOHNSON, 2006).

De qualquer forma, a redução do consumo de materiais é fundamental para uma maior sustentabilidade da construção civil, independente do sistema estrutural adotado. E como o concreto é o material mais utilizado no país, torna-se de grande interesse reduzir ao máximo o seu consumo e, conseqüentemente, o seu impacto ao meio ambiente. O desenvolvimento sustentável tem como um de seus princípios a necessidade de uma redução considerável no emprego dos principais materiais não renováveis (HÁJEK, 2005).

A partir disso, pode-se afirmar que a otimização estrutural acaba por estar intimamente ligada ao desenvolvimento sustentável, pois acaba se conectando de maneira íntima às questões econômicas e ambientais. A otimização de estruturas de concreto representam um potencial significativo de redução do impacto ambiental da construção, e a busca por projetos menos impactantes ao meio ambiente deve se tornar uma rotina para os projetistas que querem entrar no mercado ou manter-se nele (OLIVEIRA, 2007).

Através da maior disponibilidade atual de recursos computacionais, o projeto estrutural pode lançar mão de ferramentas de otimização, buscando projetos que atendam aos requisitos de norma, sendo seguros e funcionais, bem como os mais racionais possíveis,

utilizando as menores quantidades de material e, conseqüentemente, o menor custo monetário. Não basta, muitas vezes, encontrar uma boa solução baseada apenas na experiência do projetista, mas sim fundamentar um processo sistemático de busca que encontre a melhor solução possível, ou pelo menos um valor muito próximo a esta, através das chamadas técnicas de otimização, aumentando a sustentabilidade dos projetos e trazendo maior competitividade aos escritórios de cálculo frente à concorrência.

E além da otimização das estruturas pelo viés econômico, a otimização no contexto ambiental tende a se transformar em uma ferramenta importante no projeto de estruturas de edificações neste novo milênio. É necessário avaliar os impactos gerados ao ambiente para se obterem os elementos necessários à construção de um determinado elemento estrutural. No caso do concreto armado, deve-se saber o impacto da coleta e industrialização do cimento, dos agregados miúdos e graúdos, dos fios e barras de aço, bem como da madeira utilizada para fôrmas e escoramentos. Projetar os sistemas de infraestrutura baseado no ciclo de vida dos materiais não só maximiza o retorno sobre o capital disponível, mas também sobre os recursos naturais disponíveis (FIALA; HÁJEK, 2006; MEHTA, 2001; GIONGO, 2007).

Este trabalho propôs, dentro do que foi exposto, a minimização do custo monetário e ambiental das seções de pilares retangulares de concreto armado, submetidos à flexocompressão reta, através do processo heurístico de otimização conhecido como Busca Harmônica (*Harmony Search*). Assim, foi dado prosseguimento a estudos desenvolvidos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo por Bordignon (2010), o qual otimizou o custo monetário de seções de pilares retangulares através do método *Simulated Annealing*. A norma brasileira ABNT NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (2007) foi utilizada na verificação das seções. O método da Busca Harmônica, proposto originalmente por Geem, Kim e Loganathan (2001), apresenta ótimo desempenho na resolução de problemas de otimização com diversos pontos de mínimo local, inclusive na área estrutural, de acordo com a bibliografia consultada.

1.2 Justificativa

O dimensionamento estrutural é um processo iterativo, onde a solução final adotada é bastante sensível à capacidade e experiência do projetista em propor boas soluções (PAYÁ-ZAFORTEZA et al., 2010). Os próprios programas de cálculo estrutural de concreto armado

existentes são muito eficientes para o dimensionamento, porém apresentam resultados finais intimamente ligados à solução inicial proposta pelos usuários.

Isso faz com que muitas vezes os projetos afastem-se do máximo aproveitamento dos recursos financeiros disponíveis, bem como promovam um maior consumo de materiais e conseqüentemente um maior impacto ambiental. Técnicas de otimização auxiliam a reverter este processo, promovendo a busca pelas soluções de projeto mais racionais e econômicas possíveis de uma maneira sistemática, fundamentada em uma formulação matemática, e com rapidez, tendo em vista os recursos computacionais hoje disponíveis.

A busca pela excelência é inerente ao trabalho do engenheiro. O desenvolvimento de ferramentas de otimização e de parâmetros que auxiliem o pré-dimensionamento de estruturas de concreto tem sido mais lento do que para outros materiais, devido a uma maior complexidade do material, que envolve a combinação de dois componentes distintos (concreto e aço), sendo um desafio e um interessante campo de estudo (MAIA, 2009).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Minimizar os custos monetário e ambiental de seções de pilares retangulares de concreto armado submetidos à flexocompressão reta através da técnica heurística de otimização Busca Harmônica.

1.3.2 Objetivos Específicos

Este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

a) Propor formulação matemática para a minimização do custo monetário e ambiental de pilares submetidos à flexocompressão reta, obedecendo às restrições de segurança e

funcionalidade da ABNT NBR 6118 (2007), considerando o consumo de concreto, aço e fôrmas;

b) Implementar computacionalmente a formulação matemática proposta através do método heurístico de otimização Busca Harmônica;

c) Confirmar a aplicabilidade do método da Busca Harmônica na otimização de estruturas de concreto armado, bem como da formulação matemática proposta, comparando o custo final dos pilares otimizados, em relação a projetos elaborados por técnicas convencionais, ou otimizados por outros métodos;

d) Comparar os resultados obtidos com a otimização de custos monetários com a otimização de custos ambientais, buscando subsidiar uma maior redução do impacto ambiental das estruturas de concreto armado.

1.4 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho se encontra dividido em cinco capítulos.

Neste primeiro capítulo são apresentadas algumas considerações sobre a temática do trabalho, bem como a justificativa e os objetivos.

A revisão bibliográfica é apresentada no segundo capítulo. Nesta, é desenvolvida a fundamentação teórica, apresentando os conceitos básicos necessários para o entendimento do trabalho. A revisão foi dividida em três partes. Na primeira, são apresentadas considerações referentes ao dimensionamento de estruturas de concreto armado. Na segunda, são mostrados os conceitos básicos sobre a Análise de Ciclo de Vida (ACV), uma das metodologias existentes para a avaliação de impactos ambientais de produtos e processos. E, na terceira, é enfocado o tema otimização, citando conceitos gerais e apresentando o método da Busca Harmônica, bem como enfocando a otimização de estruturas de concreto armado, tanto para custos monetários como ambientais.

No terceiro capítulo é descrita a formulação matemática do problema de otimização, definindo a função objetivo, os parâmetros fixos e variáveis, bem como as restrições existentes.

No quarto capítulo são apresentadas as aplicações numéricas efetuadas empregando a formulação desenvolvida. Inicialmente são mostrados alguns exemplos referentes à otimização de custos monetários, seguindo-se da apresentação do estudo dos parâmetros do

Algoritmo da Busca Harmônica efetuado. O capítulo é finalizado com exemplos considerando a otimização de custos ambientais das seções dos pilares.

Finalmente, no quinto capítulo relacionam-se as conclusões obtidas através do desenvolvimento desta dissertação, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado

2.1.1 Estados Limites

Quando as estruturas de concreto armado são projetadas, de acordo com a ABNT NBR 6118 (2007), as mesmas devem ser dimensionadas de modo que apresentem segurança e funcionalidade satisfatórias. Isso está condicionado à verificação dos Estados Limites, que correspondem a situações em que a estrutura apresenta desempenho inadequado à finalidade da construção. Enfim, são estados em que a estrutura encontra-se imprópria para o uso.

Os Estados Limites são classificados em Estados Limites Últimos e Estados Limites de Utilização. O primeiro caso diz respeito à situação de ruína, enquanto que o segundo se refere ao uso em serviço. Dessa forma, a segurança pode estar relacionada tanto à capacidade de carga como à capacidade de utilização da estrutura.

De forma resumida, pode-se definir da seguinte maneira cada estado limite, segundo a norma ABNT NBR 8681 (2003):

a) Estado Limite de Utilização (ou de serviço): estado limite onde deformações ou vibrações excessivas comprometem a utilização da estrutura, bem como levam ao desconforto do usuário e fissuração excessiva, com comprometimento da durabilidade dos elementos estruturais;

b) Estado Limite Último (ou de ruína): estado limite que se refere ao colapso local ou global de uma estrutura. Pode ser atingido, em estruturas de concreto armado, devido ao esmagamento do concreto, por deformação plástica excessiva das armaduras, por perda de equilíbrio, por perda de aderência das armaduras, por problemas de flambagem, por instabilidade dinâmica, entre outros possíveis efeitos causadores.

2.1.2 Características Mecânicas dos Materiais

2.1.2.1 Concreto

O diagrama tensão-deformação do concreto, obtido experimentalmente por meio de ensaios de compressão simples, apresenta uma relação não linear entre tensões e deformações, como ilustra a Figura 1.

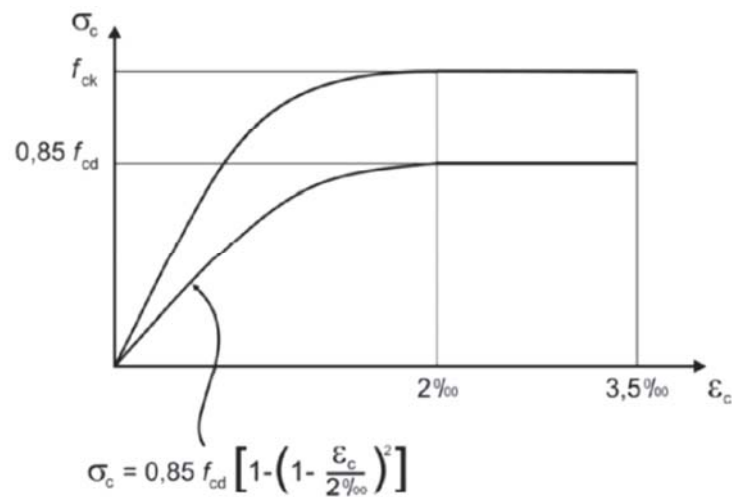


Figura 1: Diagrama tensão-deformação idealizado para concretos (Fonte: ABNT NBR 6118, 2007).

O diagrama tensão-deformação é descrito pelas seguintes relações:

$$\sigma_c = 0, \text{ se } \epsilon_c \leq 0 \quad (1)$$

$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} \left[1 - \left(\frac{\epsilon_c}{0,002} \right)^2 \right], \text{ se } 0 \leq \epsilon_c \leq 2‰ \quad (2)$$

$$\sigma_c = \sigma_{cd}, \text{ se } 2‰ \leq \epsilon_c \leq 3,5‰ \quad (3)$$

Onde:

ϵ_c : deformação de compressão;

σ_c : tensão de compressão no concreto.

A resistência característica do concreto, designada como f_{ck} , é o valor mínimo estatístico acima do qual ficam situados 95% dos resultados experimentais. A resistência de cálculo f_{cd} é resistência característica minorada por meio do coeficiente de segurança γ_c , tendo por finalidade cobrir incertezas do material, e é definido como:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (4)$$

Segundo a norma ABNT NBR 6118 (2007), a tensão máxima para o concreto (σ_{cd}) é definida como equivalente a 85% de f_{cd} , como mostra a Equação 5. Isso é válido quando a largura da seção, medida paralelamente à linha neutra, não diminuir até a borda mais comprimida.

$$\sigma_{cd} = 0,85 \cdot f_{cd} \quad (5)$$

O coeficiente redutor 0,85 (efeito de Rusch) leva em consideração a minoração da resistência do concreto devido à atuação de cargas de longa duração.

2.1.2.2 Aço

O diagrama tensão-deformação simplificado para o aço é mostrado na Figura 2, de acordo com o que está apresentado na ABNT NBR 6188 (2007), sendo válido tanto para aços com patamar de escoamento quanto para aços sem patamar de escoamento.

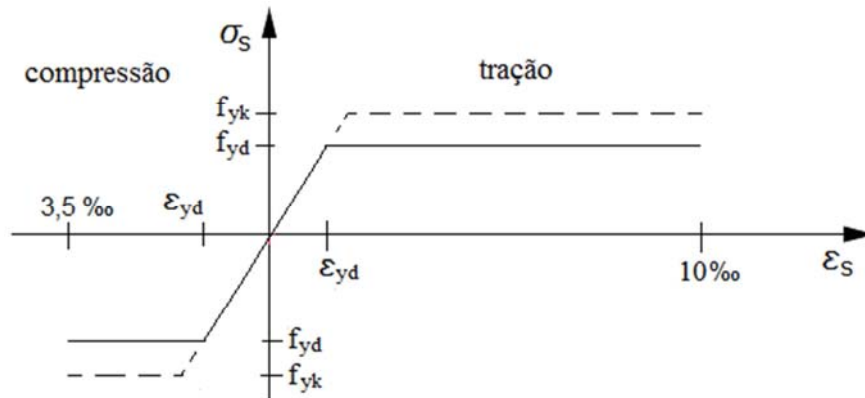


Figura 2: Diagrama tensão-deformação simplificado para aços (Adaptado: ABNT NBR 6118, 2007).

As relações obtidas pelo diagrama são as seguintes:

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s, \quad \text{se } |\varepsilon_s| \leq \varepsilon_{yd} \quad (6)$$

$$\sigma_s = f_{yd}, \quad \text{se } |\varepsilon_s| > \varepsilon_{yd} \quad (7)$$

Onde:

σ_s : tensão no aço;

ε_s : deformação no aço.

A deformação de escoamento de cálculo (ε_{yd}) é dada pela Equação 8, enquanto que a resistência de cálculo do aço (f_{yd}) é definida pela Equação 9.

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (8)$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (9)$$

Onde:

E_s : módulo de elasticidade longitudinal do aço, admitido igual a 210 GPa;

γ_s : coeficiente de minoração da resistência do aço.

2.1.3 Estádios de Dimensionamento

O desempenho de uma seção de concreto pode ser caracterizado pela aplicação de um carregamento que inicia do zero e vai até a ruptura da mesma. Durante esse processo, a seção passa por três fases distintas, designadas como estádio I, estádio II e estádio III.

O estádio I corresponde à fase inicial de carregamento (Figura 3). As tensões normais são de baixa intensidade e o concreto consegue resistir às tensões de tração. Tem-se um diagrama linear de tensões ao longo da seção transversal, ou seja, é válida a lei de Hooke.

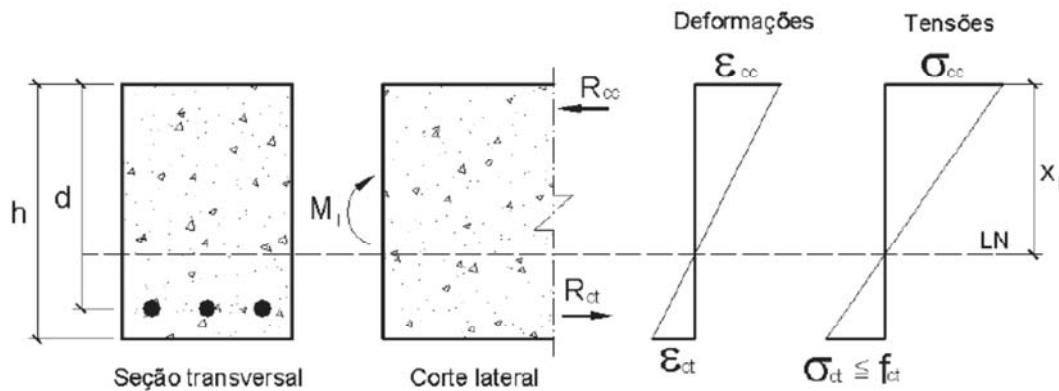


Figura 3: Comportamento da seção no estádio I (Fonte: Pinheiro, Muzardo, Santos, 2005).

As seções de concreto não são dimensionadas neste estádio tendo em vista a baixa resistência do concreto à tração se comparada à resistência à compressão. É nesse estádio que é feito o cálculo do momento de fissuração, valor utilizado para calcular a armadura mínima necessária para a seção. Quando a seção fissura, entra-se no estádio II.

No estádio II (Figura 4), o concreto não resiste mais à tração, encontrando-se fissurado na região de tração. A contribuição de resistência à tração do concreto deve ser desprezada. Na parte comprimida da seção a lei de Hooke segue válida, mantendo-se um diagrama linear de tensões.

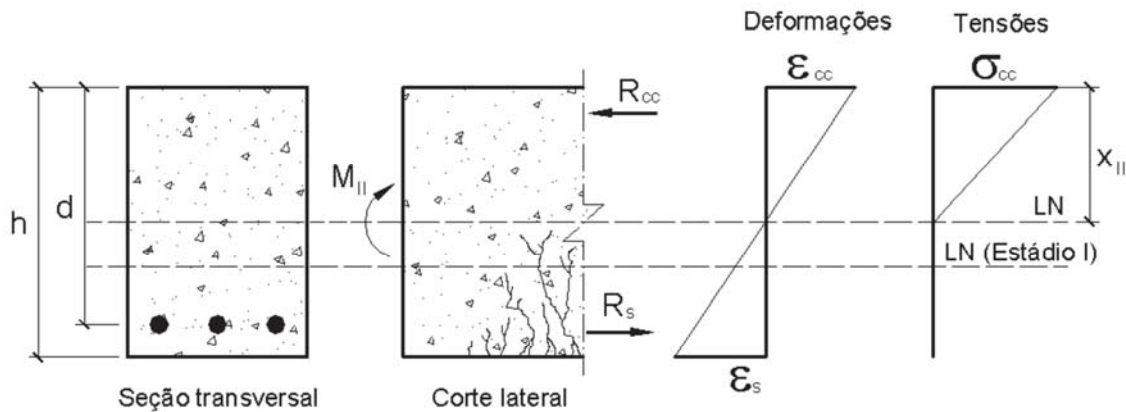


Figura 4: Comportamento da seção no estágio II (Fonte: Pinheiro, Muzardo, Santos, 2005).

De forma geral, esse estágio é utilizado para verificação dos estados limites de serviço (estado limite de abertura de fissuras e estado limite de deformações excessivas). Com o aumento do carregamento, as fissuras vão em direção à borda comprimida, assim como a linha neutra. As tensões na armadura crescem, podendo atingir ou não o escoamento. O estágio II acaba quando o concreto comprimido entra em fase de plastificação.

No último estágio (estádio III), a zona comprimida está plastificada e o concreto encontra-se na iminência da ruptura (Figura 5). É nessa fase que se realiza o dimensionamento. Admite-se que o diagrama de tensões é da forma parabólico-retangular, também conhecido como diagrama parábola-retângulo.

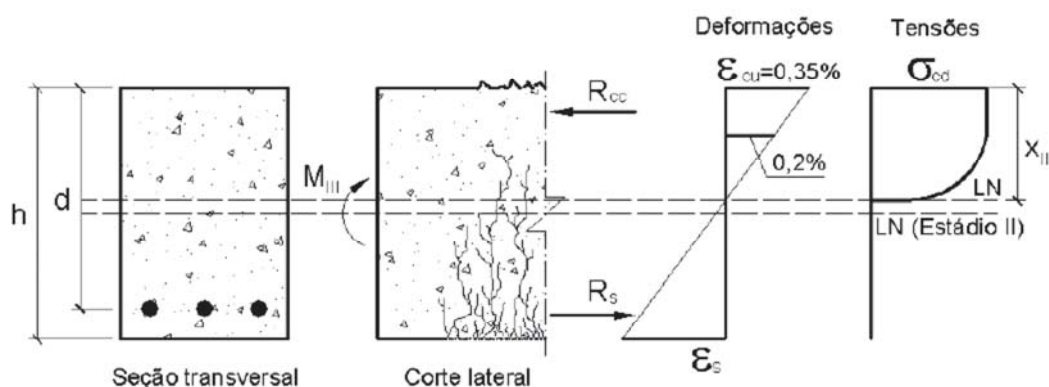


Figura 5: Comportamento da seção no estágio III (Fonte: Pinheiro, Muzardo, Santos, 2005).

A norma ABNT NBR 6118 (2007) permite, para efeitos de cálculo, que se trabalhe com um diagrama retangular equivalente, de altura $0,8 \cdot x_0$, sendo x_0 a profundidade da linha neutra, conforme mostrado na Figura 6.

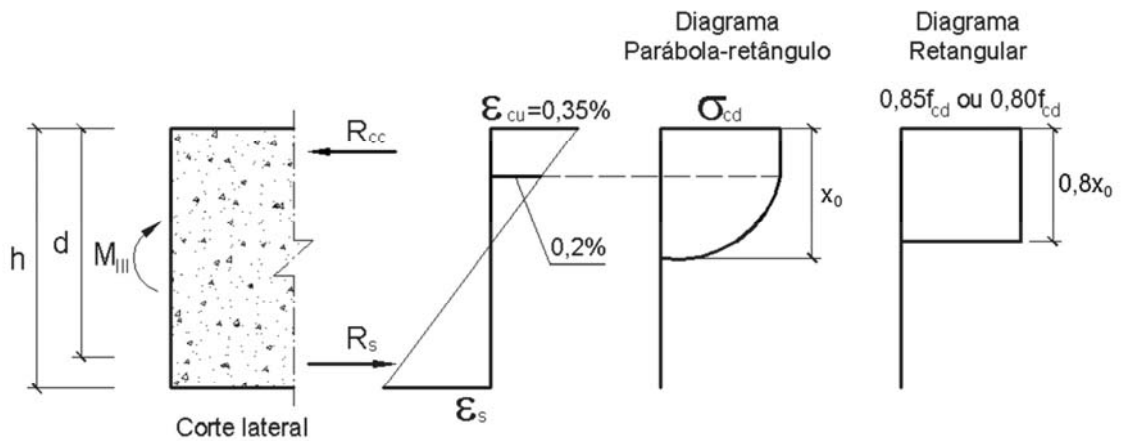


Figura 6: Simplificação do diagrama de tensões (Fonte: Pinheiro, Muzardo, Santos, 2005).

Assim, a resultante de compressão (R_{cc}) no concreto é dada por:

$$R_{cc} = 0,8 \cdot x_0 \cdot b \cdot \sigma_{cd} \quad (10)$$

Onde:

x_0 : altura da linha neutra;

b : base da seção transversal;

σ_{cd} : tensão no concreto

2.1.4 Domínios de Deformação na Ruína

Os tipos de ruptura do concreto armado são definidos por meio de seis diferentes domínios, os quais representam as possíveis configurações deformadas de uma seção transversal para o Estado Limite Último. Na Figura 7, apresenta-se o diagrama de domínios definido pela norma ABNT NBR 6118 (2007).

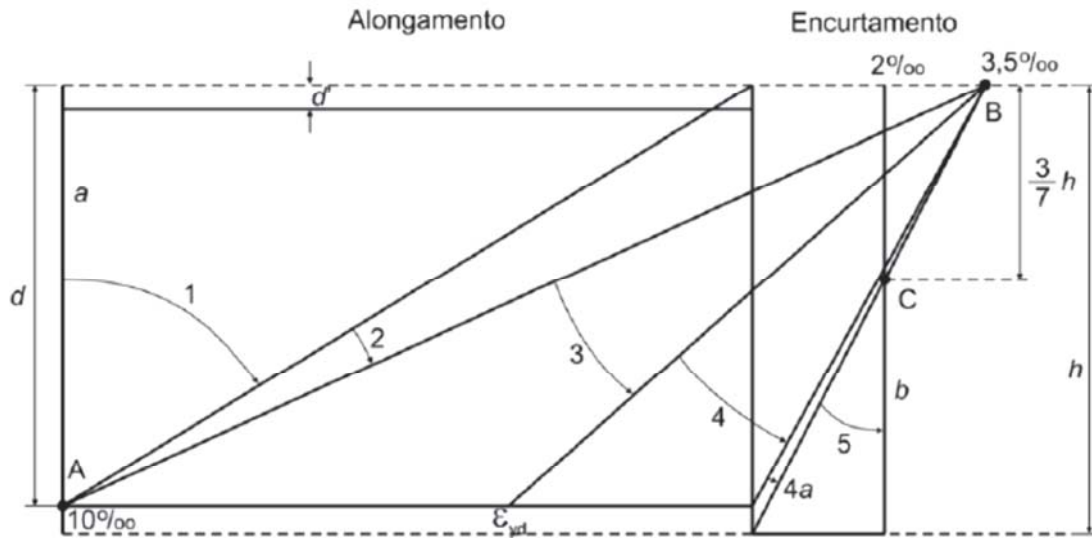


Figura 7: Domínios de Estado Limite Último de uma seção transversal

(Fonte: ABNT NBR 6118, 2007).

A caracterização dos domínios pode ser feita da seguinte maneira:

a) Domínio 1: Corresponde aos casos de tração não uniforme (flexotração), sem tensões de compressão. As armaduras de aço correspondem à seção resistente, com deformação máxima (ϵ_{sd}) de 10‰. O concreto encontra-se totalmente fissurado, não apresentando capacidade resistente.

b) Domínio 2: É caracterizado pela flexão simples ou composta. As armaduras atingem o alongamento máximo permitido (ϵ_{sd}), igual a 10‰, enquanto que a zona comprimida não atinge a ruptura, com deformação (ϵ_{cd}) menor que 3,5‰.

c) Domínio 3: Situação ideal de projeto, onde aço e concreto são utilizados em sua capacidade máxima. Corresponde aos casos de flexão simples ou composta onde há a ruptura do concreto ($\epsilon_c = 3,5‰$) e escoamento do aço ($\epsilon_s > \epsilon_{yd}$). Neste domínio não há risco de ruína não avisada, e as seções são ditas subarmadas.

d) Domínio 4: Corresponde aos casos de flexão simples ou composta onde há a ruptura do concreto ($\epsilon_c = 3,5‰$), sem escoamento do aço ($\epsilon_s < \epsilon_{yd}$). Neste domínio, a ruptura da peça ocorre de forma frágil, sem aviso, pois o concreto se rompe sem que a armadura tracionada possa causar uma fissuração que sirva de advertência.

e) Domínio 4a: Corresponde aos casos de flexão composta onde há deformação máxima do concreto ($\epsilon_c = 3,5‰$) e compressão de ambas as armaduras.

f) Domínio 5: Corresponde aos casos de compressão não uniforme, sem tensões de tração. Toda a seção encontra-se comprimida. É admitido que a deformação última do concreto seja igual a 2,0‰ na compressão uniforme e 3,5‰ na flexocompressão. A deformação na fibra situada a $3h/7$ da borda superior tem valor igual a 2,0‰. Os diagramas de deformação dos dois casos limites citados cruzam-se no ponto C, afastado $3h/7$ da borda, e ε_c está compreendido entre os limites 2,0‰ e 3,5‰.

2.1.5 Pilares de Concreto Armado

2.1.5.1 Considerações Gerais

Uma estrutura de concreto armado usual é composta basicamente de lajes, vigas e pilares. Estes últimos se constituem em elementos estruturais lineares de eixo reto, os quais são dispostos de maneira vertical, sendo responsáveis pela transmissão de cargas dos demais elementos estruturais até os elementos de fundação. Os esforços normais de compressão constituem-se nos preponderantes nesse tipo de estrutura, conforme exposto pela ABNT NBR 6118 (2007), podendo atuar, de forma concomitante, esforços de flexão, cisalhamento e momento torsor. De maneira geral, as solicitações em pilares podem ser divididas em três possibilidades:

- a) Compressão centrada: somente o efeito do esforço normal de compressão é levado em conta para efeito de cálculo (pilares internos);
- b) Flexocompressão reta: além do esforço de compressão, considera-se que o pilar está submetido a um momento fletor, cuja direção coincide com um dos eixos principais de inércia da seção transversal (pilares de borda);
- c) Flexocompressão oblíqua: além do esforço de compressão, considera-se que o pilar está submetido a um momento fletor, cuja direção não coincide com um dos eixos principais de inércia da seção transversal (pilares de canto).

Na Figura 8, apresentam-se as três possibilidades de classificação dos pilares quanto ao tipo de solicitação:



Figura 8: Classificação de pilares quanto à solicitação.

No caso de pilares retangulares submetidos à flexocompressão reta ou oblíqua, o processo usual de dimensionamento é feito por meio do auxílio de ábacos adimensionais, como apresentado por Montoya, Meseguer e Cabré (1987), ou também como apresentado por Araújo (2003), com o emprego de tabelas específicas para o dimensionamento de seções.

2.1.5.2 Verificação da Capacidade Resistente na Flexocompressão Reta

As hipóteses básicas consideradas para verificação da capacidade resistente ou dimensionamento de uma seção transversal de concreto armado submetida à flexocompressão são descritas na sequência:

a) **Manutenção das seções planas:** é admitido que uma seção transversal se mantém plana após as deformações do elemento, seguindo-se a Hipótese de Bernoulli. Isso faz com que as deformações normais variem linearmente ao longo da altura da seção transversal, de forma proporcional a distância de cada camada em relação à linha neutra;

b) **Solidariedade dos Materiais:** é admitida uma perfeita solidariedade entre as armaduras e o concreto que as envolve, o que leva a uma igualdade entre as deformações na armadura e no concreto. Dessa forma, a deformação em um ponto é sempre única, independente do material ser aço ou concreto;

c) Plastificação dos materiais: é admitido que, no Estado Limite Último, o concreto, o aço ou ambos estão plastificados. As tensões nesses materiais são obtidas com base nos diagramas tensão-deformação, definidos segundo a norma ABNT NBR 6118 (2007);

d) Resistência à tração do concreto: desconsidera-se a participação do concreto na resistência à tração. O aço é considerado como o único material resistente à tração.

O processo para a verificação das seções submetidas à flexocompressão reta tem início a partir do conhecimento do esforço normal atuante de cálculo (N_{sd}), do momento fletor de cálculo (M_{sd}), bem como da seção transversal de concreto adotada, cujos diâmetros e arranjo das barras de aço consideradas também são conhecidos. Os esforços atuantes de cálculo (N_{sd} , M_{sd}) são obtidos pela multiplicação dos esforços característicos pelos respectivos coeficientes parciais de segurança (γ_f), fornecidos pela norma ABNT NBR 8681 (2003) para as diferentes ações e combinações envolvidas no projeto.

Os esforços resistentes (N_{rd} , M_{rd}) são obtidos pelas seguintes equações de equilíbrio:

$$N_{rd} = \int_{AC} \sigma_{cd} \cdot dA_c + \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \sigma_{sdi} \quad (11)$$

$$M_{rd} = \int_{AC} \sigma_{cd} \cdot x_c \cdot dA_c + \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \sigma_{sdi} \cdot x_{si} \quad (12)$$

Onde:

N_{rd} : esforço normal resistente de cálculo;

M_{rd} : momento resistente de cálculo;

σ_{cd} : tensão na área de concreto comprimida A_c ;

σ_{sdi} : tensão na área de aço A_{si} ;

x_c : distância do centro da área de concreto comprimida, em relação ao centro de gravidade da seção;

x_{si} : distância da barra de aço i , em relação ao centro de gravidade da seção.

Para a resolução dessas equações é preciso conhecer a profundidade da linha neutra (x_0), bem como sua inclinação α em relação ao eixo x (perpendicular à maior dimensão da seção) e a quantidade de aço adotada (A_s). A determinação da linha neutra (x_0) constitui-se em um processo iterativo, onde se tenta igualar, para uma dada inclinação α , os valores de esforço normal resistente com os valores de esforço normal solicitante. Isso é feito a partir da Equação 13, onde $f(x_0) = 0$.

$$f(x_0) = N_{sd} - A_{cc} \cdot \sigma_{cd} - \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \sigma_{sdi} \quad (13)$$

Portanto, o esforço normal resistente de cálculo (N_{rd}) deve ser igual ao esforço normal solicitante (N_{sd}) aplicado a uma seção transversal com armaduras conhecidas. A profundidade x_0 da linha neutra, em relação a uma borda comprimida da seção transversal, vai estar situada no intervalo $[0, \infty]$, e sua orientação é paralela ao eixo de aplicação do momento fletor ($\alpha = 0$) no caso de flexocompressão reta.

Conhecida a profundidade x_0 da linha neutra, as Equações 11 e 12 tomam a seguinte forma:

$$N_{rd} = A_{cc} \cdot \sigma_{cd} + \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \sigma_{sdi} \quad (14)$$

$$M_{rd} = S_c \cdot \sigma_{cd} + \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \sigma_{sdi} \cdot x_{si} \quad (15)$$

Onde:

A_{cc} : área de concreto comprimida;

S_c : momento estático da parte de concreto comprimida da seção.

Calculado o momento resistente (M_{rd}), é preciso então verificar se o mesmo é maior ou no mínimo igual ao momento solicitante (M_{sd}). Caso contrário, deve-se redimensionar a seção.

2.1.5.3 Restrições Dimensionais e Taxas de Armaduras

Segundo a norma ABNT NBR 6118 (2007), a área da seção transversal de um pilar em concreto armado ($A_{C_{mín}}$) não pode ser inferior a 360 cm². A altura h , que representa a maior dimensão da seção transversal, também deve ser limitada a cinco vezes a largura b , evitando a configuração pilar-parede. Além disso, a norma estabelece, no seu item 13.2.3, que a seção transversal dos pilares, qualquer que seja a sua forma, não deve apresentar dimensão menor que 19 cm. Em casos especiais, é permitida a consideração de dimensões entre 19 cm e 12 cm, desde que se multipliquem as ações por um coeficiente adicional γ_n , o qual é indicado na Tabela 1.

Tabela 1: Valores do coeficiente adicional γ_n em função de b .

b (cm)	≥ 19	18	17	16	15	14	13	12
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35

Fonte: ABNT NBR 6118, 2007.

Nas seções retangulares deve existir, pelo menos, uma barra de aço em cada canto. O espaço livre entre as faces das barras não deve ser menor que 2 cm, que o maior diâmetro das barras, e que 1,2 vezes o diâmetro máximo do agregado. Quanto aos limites de espaçamento máximo, os mesmos correspondem a 40 cm e duas vezes a dimensão da base da seção, conforme mostrado na Figura 9.

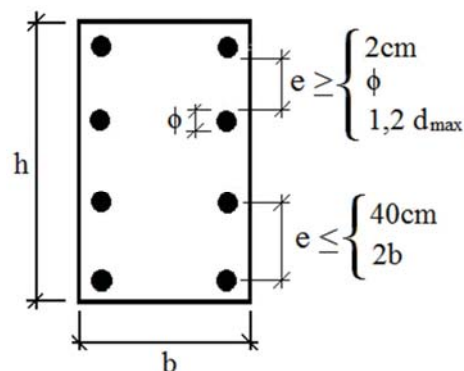


Figura 9: Espaçamentos limites entre as barras longitudinais de um pilar.

Os diâmetros adotados para as barras de aço não devem ser inferiores a 10 mm nem superiores a 1/8 da menor dimensão da seção transversal. Além disso, há as taxas mínimas e

máximas de armadura que devem ser respeitadas de acordo com a ABNT NBR 6118 (2007). A taxa mínima é dada pela equação:

$$A_{s,mín} = 0,15 \frac{N_{sd}}{f_{yd}} \geq 0,004A_c \quad (16)$$

A taxa máxima não deve ser inferior a 8% da área de concreto, como mostra a equação:

$$A_{s,máx} = 0,08A_c \quad (17)$$

2.2 Análise do Ciclo de Vida

2.2.1 Conceitos Gerais

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), a Análise do Ciclo de Vida (ACV) é a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos potenciais impactos ambientais de uma atividade, produto ou processo de produção ao longo do seu ciclo de vida. São identificadas, quantificadas e avaliadas todas as extrações de recursos (entradas) e emissões para o ambiente (saídas) do sistema analisado, desde o seu “nascimento” até sua “morte”, a fim de avaliar os potenciais impactos em relação aos recursos naturais, ao ambiente e à saúde humana. Ou seja, a análise vai desde a obtenção das matérias-primas até a disposição final, passando pelas etapas de fabricação, transporte, utilização e manutenção. A Figura 10 ilustra os possíveis estágios de ciclo de vida que podem ser considerados numa ACV, mostrando as entradas e saídas típicas.

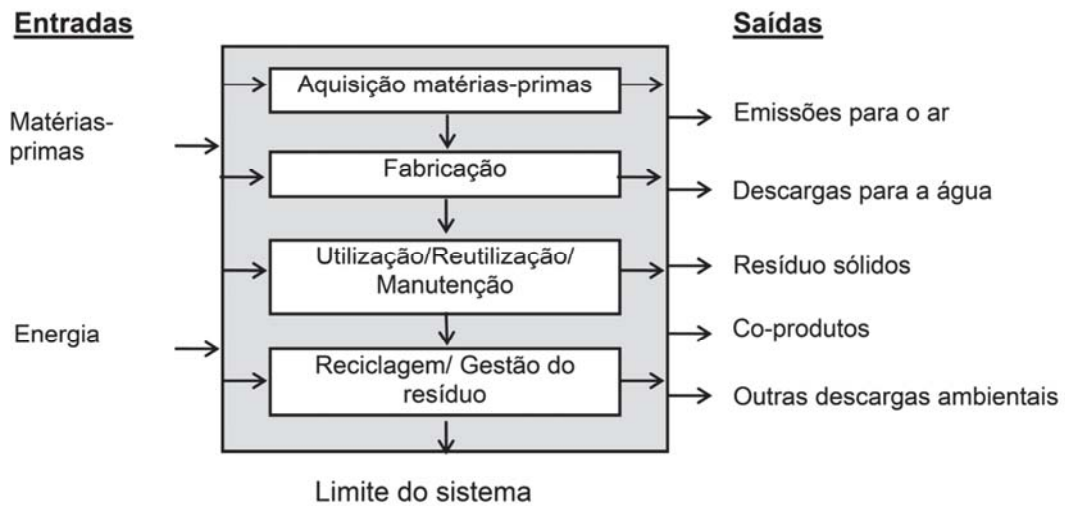


Figura 10: Estágios do ciclo de vida de um produto, atividade ou sistema de produção
(Fonte: adaptado USEPA, 2006).

2.2.2 Fases da Análise de Ciclo de Vida

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), a Análise do Ciclo de Vida é estruturada em quatro fases, inter-relacionadas, como mostrado na Figura 11. São elas: Definição de Objetivos e Escopo; Análise de Inventário; Avaliação de Impacto; Interpretação. Na sequência, é mostrada uma breve descrição de cada uma delas, a partir do exposto por Takeda (2008) e Ferreira (2004) em seus trabalhos.

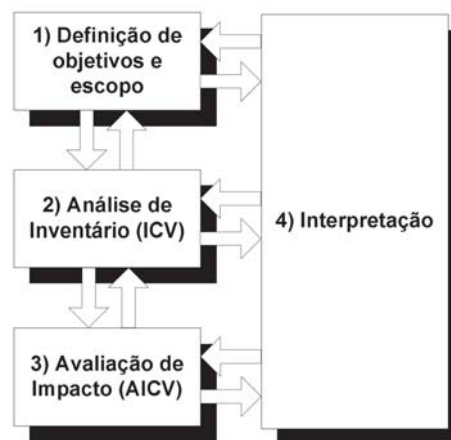


Figura 11: Quatro fases que estruturam a Análise de Ciclo de Vida
(Fonte: adaptado ABNT NBR ISO 14040, 2009).

a) Definição de Objetivos e Escopo: Fase onde é formulado o objetivo e os limites do estudo, sendo estabelecidos, de forma resumida, todos os processos relevantes a serem incluídos na avaliação de um produto ou atividade, bem como a metodologia a ser aplicada nas análises. Nesta etapa é definida a unidade funcional a ser utilizada no estudo, tendo em vista que o produto ou processo avaliado deve ser representado através de uma quantidade fixa de uma determinada unidade de medida;

b) Análise de Inventário (ICV): Nesta fase são coletados, descritos e verificados todos os dados necessários para se atingir os objetivos definidos, estando os mesmos relacionados com a unidade funcional estabelecida. São quantificadas as entradas (extrações) e saídas (emissões) em cada etapa da vida do produto, atividade ou processo produtivo;

c) Avaliação de Impacto (AICV): Fase onde o inventário é interpretado em termos de potenciais impactos ambientais, como, por exemplo, aquecimento global e acidificação. Diferentes tipos ou categorias de impactos podem ser reunidos através de normalização e ponderação, onde uma única categoria de impacto equivalente é estabelecida, de acordo com a importância relativa de cada impacto frente aos demais;

d) Interpretação: Consiste na fase de conclusões do estudo, onde são apresentados os resultados, bem como realizada uma reflexão crítica de todas as fases da Análise do Ciclo de Vida, tendo-se uma compreensão clara das incertezas e suposições utilizadas para gerar os resultados.

2.2.3 Métodos de Avaliação de Impacto

Na fase de Avaliação de Impacto é preciso utilizar alguma metodologia para transformar os dados obtidos na fase do Inventário em resultados em termos de categorias de impacto ambiental. São encontradas na literatura diferentes métodos, provenientes dos mais variados locais do mundo, os quais costumam estar mais afinados com a realidade local dos seus países de origem.

Além disso, de acordo com Takeda (2008), os diferentes métodos tendem a incluir categorias de impacto distintas, as quais podem pertencer a uma etapa intermediária (abordagem *midpoint*) ou final (abordagem *endpoint*) de toda uma cadeia de impactos. Segundo Salaberry (2009), ao se visualizar todo o processo, as entradas e saídas do sistema (trocas definidas na fase de Inventário) representam o ponto inicial, os impactos propriamente

ditos são o ponto intermediário (*midpoint*), enquanto que o dano, ou seja, o efeito real no ambiente e no homem, representa o ponto final (*endpoint*).

Portanto, os métodos de avaliação de impactos *midpoints* param em algum lugar no mecanismo ambiental entre as trocas ambientais e os *endpoints*. Enquanto isso, nos métodos de avaliação de impacto *endpoints*, o impacto ambiental é modelado em itens de valores, como, por exemplo, saúde humana. Tipicamente, os métodos *endpoint* utilizam informações como, por exemplo, o número de pessoas que morrem ou ficam doentes por poluição de particulados por ano para estimar o quão danosas são as várias emissões (TAKEDA, 2008). Diferentes categorias de impacto que as emissões gasosas podem causar, pertencentes às duas abordagens possíveis, são apresentadas na Figura 12, onde é feita também uma interligação entre os três pontos do mecanismo ambiental (inicial, intermediário e final).

Os métodos *midpoints* tendem a fornecer resultados mais confiáveis, de acordo com Udo de Haes et al. (2002), enquanto os resultados de métodos *endpoints* são mais fáceis de se entender e serem utilizados para tomadas de decisão. Uma maior certeza na avaliação, entretanto, pode ser alcançada através de utilização de pelo menos dois métodos de abordagem distinta.

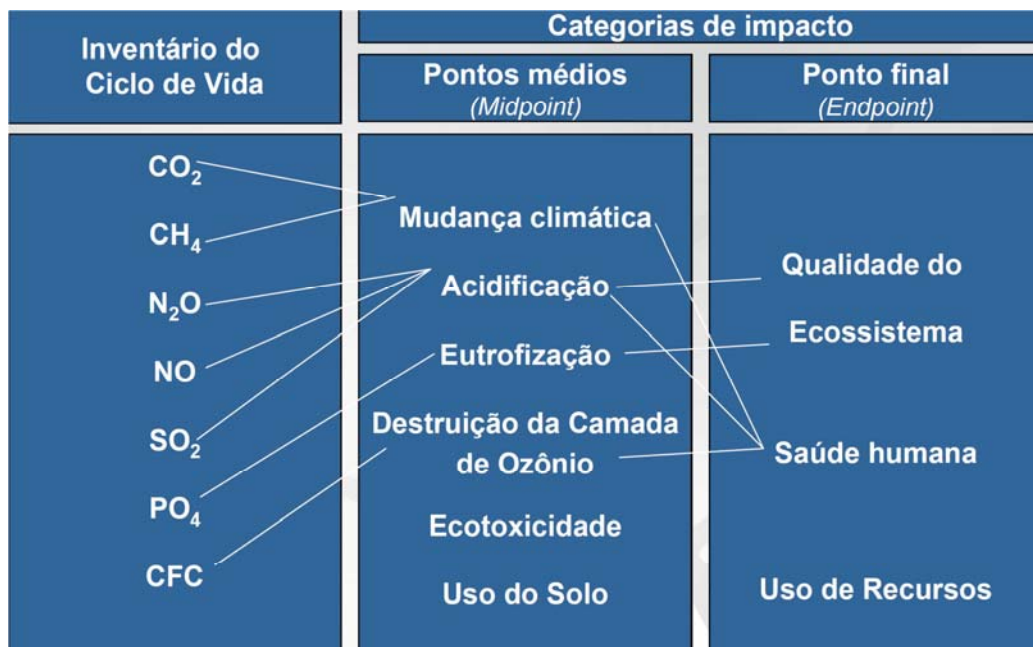


Figura 12: Cadeia de impactos causada pela emissão de substâncias gasosas (Fonte: Ometto, 2009).

Segundo o trabalho de Takeda (2008), que levantou através de uma extensa revisão bibliográfica os métodos de Avaliação de Impacto mais citados e utilizados em artigos internacionais, as famílias de métodos EDIP, Eco-Indicador, EPS, CML, Ecopontos Suíço,

LIME e Impact são as mais difundidas. Na sequência, são apresentadas e brevemente caracterizadas as famílias de métodos mais difundidos para a fase de Avaliação de Impacto, de acordo com o exposto por Ferreira (2004) e Takeda (2008).

a) Projeto Ambiental de Produtos Industriais (*Environmental Design of Industrial Products – EDIP/UMIP*): Método surgido na Dinamarca, em 1997, e atualizado em 2003 (EDIP 2003). Trata-se de uma típica abordagem *midpoint*. As categorias de impactos utilizadas pelo método EDIP são o consumo de recursos renováveis, de não renováveis e de energia, assim como os seguintes potenciais de impactos ambientais: aquecimento global, formação fotoquímica de ozônio troposférico, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade e toxicidade humana;

b) Eco-Indicador (*Eco-Indicator*): Método Holandês surgido em 1995 e atualizado em 1999 (Eco-Indicador 99). Possui abordagem *endpoint*, trabalhando com categorias de impactos que expressam os danos à qualidade dos ecossistemas, à saúde humana e aos recursos. Todas essas categorias de impactos no nível de dano podem passar por normalização e ponderação, sendo reunidas em um único indicador. As referências de normalização do Eco-Indicador são baseadas em informações europeias para as emissões no ar, enquanto as informações para emissões na água e no solo são extrapoladas de informações da Holanda. Esse indicador único pode ser interpretado como um milésimo da carga ambiental anual de um habitante europeu médio;

c) Sistema de Prioridade Ambiental (*Environmental Priority System – EPS*): Metodologia sueca surgida em 1993 e atualizada em 2000 (EPS 2000). Foi desenvolvido para ser uma ferramenta interna ao processo de desenvolvimento de produtos de uma companhia, já que o mesmo é capaz de comparar diferentes propostas de produto em termos de dano ambiental. Possui abordagem *endpoint*, avaliando o impacto ambiental de acordo com a disposição da população em pagar para restaurar as mudanças ou proteger a saúde humana, a capacidade de produção do ecossistema, a biodiversidade, os recursos abióticos e os valores recreacionais e culturais. Os danos podem ser reunidos em único indicador, neste caso, a Unidade de Carga Ambiental (*Environmental Load Unit – ELU*);

d) Manual Holandês de ACV (*Dutch Handbook on LCA – CML*): Apresentado originalmente em 1992, é conhecido por CML em razão do local onde foi desenvolvido (Centro de Ciência Ambiental da Universidade de Leiden). Sua segunda versão foi apresentada em 2001 (CML 2001), e caracteriza-se como uma metodologia de abordagem *midpoint*. Possui praticamente as mesmas categorias de impacto do EDIP (Depleção de

recursos abióticos; Potencial de aquecimento global; Depleção do ozônio estratosférico; Toxicidade humana; Eco-toxicidade de água doce; Eco-toxicidade marinha; Eco-toxicidade terrestre; Formação foto-oxidante; Acidificação; Eutrofização), sendo esses métodos bastante semelhantes entre si. As maiores diferenças entre o EDIP e o CML 2001 encontram-se nas categorias de impacto toxicidade humana e ecotoxicidade. Uma das categorias de impacto levantadas pelo método é o chamado Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* – GWP). Nessa categoria de impacto, todas às emissões relacionadas ao aquecimento global são transformadas para a unidade de gás carbônico (CO₂) equivalente. O método CML não permite ponderação e agregação dos resultados em um mesmo sistema de pontuação;

e) Ecopontos Suíço (*Swiss Ecotoxicity*): publicado primeiramente na Suíça em 1990, com atualizações em 1997 e 2005, este método tem abordagem *midpoint*, fazendo uso dos chamados ecofatores para o cálculo dos potenciais de impacto. Cada ecofator é calculado a partir da razão entre o nível total atual de emissão ou deposição de uma substância dentro de uma certa área e a carga crítica desta substância nesta área. É também chamado de indicador de saturação ecológica. Os ecofatores são específicos para cada região onde o cálculo é realizado, em razão das diferentes suscetibilidades aos poluentes em cada local. A multiplicação da carga poluente pelo seu ecofator dá o peso ecológico expresso em pontos de carga ecológica, os chamados ecopontos;

f) Método de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida com base em Modelagem *Endpoint* (*Life Cycle Impact Assessment Method Based on Endpoint Modeling* – LIME): Método japonês de Avaliação de Impacto, surgido em 2003. Apesar do nome, especialistas o classificam como um método misto (*midpoint/endpoint*). O mesmo correlaciona onze categorias de impacto a quatro temas de salvaguarda: saúde humana, bem-estar social, biodiversidade e produção em planta;

g) *Impact*: método lançado na Suíça, em 2002, o *Impact* caracteriza-se por uma abordagem combinada *midpoint/endpoint*. Sua última versão é conhecida como *Impact* 2002+. Possui como base os métodos Eco-Indicador e CML, possuindo quatorze categorias de impacto *midpoints* e quatro categorias de dano (*endpoints*), quais sejam: saúde humana, qualidade do ecossistema, mudança climática e recursos.

2.2.4 Vantagens e Barreiras Encontradas na Realização da ACV

De acordo com Ferreira (2004), a Análise de Ciclo de Vida, além de ajudar os responsáveis pela tomada de decisão na escolha de produtos ou processos que resultem em menor impacto para o ambiente, é a única metodologia que permite identificar a transferência de impactos ambientais de um meio para outro (eliminação de emissões atmosféricas, por exemplo, pode ser feita à custa do aumento das emissões de efluentes líquidos) e/ou de um estágio de ciclo de vida para outro (exemplificando-se, da fase de aquisição de matérias primas para a fase de utilização).

Além disso, a implementação bem-sucedida da metodologia de Análise de Ciclo de Vida encoraja as indústrias a considerar as questões ambientais associadas à produção. Trata-se de uma tentativa de integração da qualidade tecnológica do produto, da qualidade ambiental e do valor agregado para o consumidor, representando uma mudança estratégica importante.

A Análise do Ciclo de Vida gera uma grande quantidade de informações. Isso torna necessário o uso de ferramentas que auxiliem e agilizem todos os procedimentos de uma ACV. Vários programas de computador e bases de dados têm sido desenvolvidos para apoiar a condução de estudos ambientais de Análise de Ciclo de Vida. Alguns dos softwares citados pela bibliografia são: *SimaPro*; KCL-ECO; LCAiT; GaBi; PEMS; *EcoCalculator Athena*; BEES.

Entretanto, de acordo com HSU (2011), usuários que não têm tempo ou conhecimento para verificar os dados fornecidos por esses softwares podem cometer grandes erros de avaliação na tentativa de obter produtos mais sustentáveis. Afinal, programas como o GaBi e o *SimaPro*, os mais difundidos no mercado mundial, podem às vezes agir como “caixas-pretas”, produzindo resultados sem deixar claro de onde os mesmos vieram, além de possuírem relativa complexidade.

Outro problema enfrentado, especificamente na área da engenharia e da arquitetura, é que não há métricas comuns acordadas para a comunicação dos resultados da ACV para edifícios, sendo adotadas diferentes unidades funcionais, bem como não são estabelecidas categorias de impactos padronizadas.

As ferramentas de Análise de Ciclo de Vida e padrões disponíveis para os engenheiros e arquitetos precisam ser melhoradas, assim como os profissionais precisam de melhor orientação de como executar uma ACV de forma simples, transparente e eficaz. Ou seja, a

Análise de Ciclo de Vida pode ser uma ferramenta importante para conseguir produtos, atividades ou processos de produção mais sustentáveis, mas é preciso um treinamento extensivo para a utilização adequada dos softwares. Muitos profissionais da arquitetura e da engenharia declinam da utilização da Análise de Ciclo de Vida em seus projetos devido a essa dificuldade (HSU, 2011).

Além disso, no caso específico do Brasil, a utilização dos softwares de ACV podem trazer dificuldades pelo fato dos mesmos, bem como das suas bases de dados, estarem adaptados às realidades europeia e norte-americana. Para Barbosa Júnior et al. (2007), apresentam-se como as principais dificuldades encontradas para a aplicação da metodologia da Análise de Ciclo de Vida: a falta de pessoal adequadamente capacitado; a não disponibilidade de bancos de dados nacionais contendo informações sobre a ACV de insumos básicos como energia, aço, cimento, combustíveis, entre outros; bem como a falta de uma total adaptação das metodologias estrangeiras ao caso do Brasil.

2.3 Otimização

2.3.1 Conceitos Gerais

A otimização é uma importante ferramenta para a tomada de decisões e na análise de sistemas físicos. Otimizar consiste basicamente em alcançar a melhor solução possível para um dado problema, que pode ser definido matematicamente através de funções, tendo-se um ou vários objetivos. Essa modelagem matemática pode ou não satisfazer certas condições, as quais são representadas pelas restrições. Tanto a maximização quanto a minimização de uma função podem caracterizar um problema de otimização.

A identificação dos objetivos, das variáveis do problema, bem como das restrições é a fase conhecida como modelagem, sendo este o primeiro passo e talvez o mais importante num processo de otimização, pois o modelo não pode ser excessivamente simplista, de forma a se afastar sobremaneira do problema real, nem excessivamente complexo, tornado o esforço e o tempo necessário para resolvê-lo demasiadamente grandes.

Um problema de otimização pode, de forma geral, ser assim descrito:

Minimizar ou maximizar:

$$f(x_i), \text{ sendo } i = 1, n \quad (18)$$

Sujeito a:

$$g_j(x_i) \leq 0, \text{ sendo } j = 1, m \quad (19)$$

$$h_k(x_i) = 0, \text{ sendo } k = 1, l \quad (20)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (21)$$

Na Equação 18, $f(x)$ representa a função objetivo que se deseja maximizar ou minimizar, a qual normalmente está relacionada a alguma quantidade numérica (medida quantitativa do desempenho do sistema analisado). É uma função de x , sendo x o vetor das variáveis do problema, também chamadas de incógnitas ou parâmetros. São os elementos ou fatores que influenciam no valor final da função a ser otimizada. As relações expostas nas Equações 19 e 20 são chamadas, respectivamente, de restrições de desigualdade e restrições de igualdade. A Equação 21 representa as restrições laterais, com limites inferior e superior do espaço de busca viável.

Quanto às relações de desigualdade, as mesmas podem ser ativas ou inativas. Para que uma determinada restrição de desigualdade seja ativa em um ponto x é necessário que neste ponto a função de restrição seja nula, ou seja, igual a zero. Se a função de restrição de desigualdade for menor que zero a mesma é dita inativa. Já as restrições de igualdade são sempre ativas em qualquer ponto possível de solução.

No caso da otimização estrutural, busca-se de forma geral, a minimização dos custos para uma estrutura que satisfaça aos princípios básicos de segurança, respeitando-se aos Estados Limites Últimos e de Serviço, bem como as demais imposições de normas técnicas.

Os problemas de otimização possuem uma série de termos e definições próprias de larga utilização pela literatura os quais são descritos e resumidamente explicados na sequência:

a) Função objetivo: Conforme já citado, é a função a ser minimizada ou maximizada. É a representação matemática do critério, o qual é influenciado pelas variáveis de projeto. A função objetivo pode ser multi-objetivo, quando leva em conta vários critérios a serem otimizados; multimodal, quando possui mais de um ponto de ótimo (Figura 13), caso contrário é dita unimodal; e multidimensional, quando é função de mais de uma variável de projeto, ao contrário é dita unidimensional. Na otimização estrutural, habitualmente se relaciona ao peso, volume ou custo da estrutura;

b) Variáveis de projeto: São aquelas que se alteram durante o processo de otimização, ou seja, são os parâmetros que influenciam no valor da função objetivo, como por exemplo, no caso de estruturas, a espessura de uma laje, as dimensões da seção de uma viga, a classe de resistência do concreto, etc. Podem ser contínuas ou discretas, inteiras ou não. É frequente em problemas de otimização estrutural a utilização de espaços de busca com variáveis discretas.

c) Restrições de Projeto: São funções, tanto de igualdade como de desigualdade, que descrevem situações de projeto consideradas não desejáveis. Em otimização estrutural podem ser de dois tipos: restrições de comportamento e de resistência, que representam as condições desejáveis de limite de tensões, deslocamentos, capacidade resistente, etc; e restrições de funcionalidade ou laterais, que atuam diretamente sobre as variáveis de projeto, limitando seus valores.

d) Espaço de Busca: É o conjunto que contém as soluções possíveis do problema a ser otimizado. Constitui-se de todos os valores de $f(x)$ para todas as possíveis combinações entre o conjunto de variáveis, obedecendo-se às funções de restrição.

e) Ponto Ótimo: É o ponto caracterizado pelo vetor das variáveis de projeto que extremizam a função objetivo e satisfazem as restrições.

f) Valor Ótimo: É o valor da função objetivo para um respectivo ponto ótimo.

g) Solução Ótima: É o par formado pelo ponto ótimo e valor ótimo. Podem ser do tipo local, quando o valor ótimo é localizado, ou global, quando o valor ótimo for global na região viável. No caso da função apresentar mais de um ponto de máximo ou de mínimo iguais, poderá haver mais de uma solução ótima, as quais são chamadas de soluções alternativas.

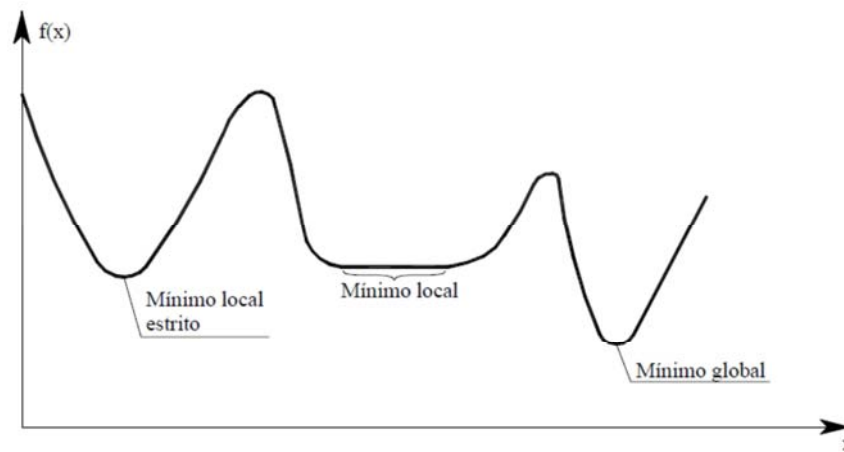


Figura 13: Exemplo de função multimodal de única variável (Fonte: Vianna, 2003).

Após encerrada a modelagem matemática do problema de otimização, parte-se para a busca de um método ou algoritmo que seja o mais adequado para se encontrar a solução. Nesse âmbito, não há um algoritmo universal de otimização, devendo ser exploradas da melhor forma possível as particularidades de cada método, de acordo com cada problema que se queira solucionar. Os algoritmos de otimização são iterativos e iniciam com uma estimativa inicial dos valores ótimos e geram uma sequência de estimativas que vão sendo refinadas até o encontro da melhor solução. O que acaba por distinguir um algoritmo do outro é a estratégia usada para mover uma iteração para a seguinte.

Os algoritmos usados para a solução de um problema de otimização podem ser, basicamente, determinísticos ou probabilísticos. Em métodos determinísticos, nenhuma decisão de caráter aleatório é possível. O algoritmo torna-se probabilístico quando elementos aleatórios são introduzidos dentro do mesmo, tendo-se como objetivo testar novas direções para a busca de novas soluções.

Os métodos clássicos de Programação Matemática, que se constituem em algoritmos determinísticos, geralmente englobam o cálculo de derivadas de primeira ordem ou de derivadas parciais de segunda ordem, sendo conhecidos como algoritmos de ordem n , onde n diz respeito à maior derivada utilizada. De outra maneira, os métodos fundamentados em algoritmos probabilísticos introduzem no processo otimizador dados e parâmetros estocásticos, resolvendo o problema do ponto de vista probabilístico. Usam para isso somente a avaliação da função objetivo, sem o cálculo de derivadas, sendo conhecidos também como métodos de ordem zero.

Apesar de serem convenientemente empregados em problemas unimodais, sendo bastante rápidos e eficientes, métodos matemáticos apresentam uma série de dificuldades em

problemas de maior complexidade, o que torna seu uso inadequado à grande parte dos problemas de otimização da ciência e da engenharia, dentre as quais se citam:

- a) Problema em identificar soluções ótimas globais em problemas multimodais (não existe nenhuma garantia da obtenção de um ponto extremo global, ou seja, o algoritmo converge para o extremo local mais próximo da direção de busca determinada pelas derivadas);
- b) Dificuldade em tratar o problema quando o mesmo envolve variáveis discretas;
- c) Requerem funções contínuas e diferenciáveis no espaço de busca;

Os métodos probabilísticos ou heurísticos, ao contrário, não se prendem tão facilmente a extremos locais, uma vez que a busca é realizada dentro de toda a região viável disponível, sendo, por esta razão, considerados algoritmos de otimização global, além de trabalharem adequadamente tanto com parâmetros contínuos como discretos.

A maioria dos problemas de otimização estrutural tem sido solucionados nas últimas décadas através de métodos heurísticos que fundamentam seu processo de busca através de analogias com fenômenos naturais. O interesse por algoritmos inspirados nos mecanismos naturais da física e da biologia tem aumentado consideravelmente para a resolução de problemas complexos de otimização, onde os métodos da Programação Matemática não podem ser aplicados satisfatoriamente.

Métodos heurísticos incluem um grande número de algoritmos, tais como, *Simulated Annealing* (KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983), Algoritmos Genéticos (GOLDBERG, 1989), Enxame de Partículas (KENNEDY; EBERHART, 1995), Busca Tabu (GLOVER; LAGUNA, 1997), Busca Harmônica (GEEM; KIM; LOGANATHAN 2001), Colônia de Formigas (DORIGO; STÜTZLE, 2004), Colônia de Abelhas (PHAM et al., 2006), entre outros. Algoritmos Genéticos e *Simulated Annealing* são os mais populares na área de otimização estrutural (DEGERTEKIN, 2007; SUJI et al., 2008).

Os métodos heurísticos exigem um grande número de avaliações do valor da função objetivo e das restrições, já que as iterações são regidas por decisões aleatórias, sendo considerados algoritmos computacionalmente caros. Uma questão primordial para esses métodos é, conseqüentemente, determinar quantas vezes o algoritmo deve ser executado para alcançar um resultado satisfatório, não demandando esforço computacional desnecessário. Torna-se preciso alcançar um equilíbrio entre a qualidade dos resultados e da quantidade de tempo de processamento necessário para obtê-los. Além disso, é necessário avaliar o quão

perto as soluções por métodos heurísticos estão para o ótimo global, dado que a solução ótima global é geralmente desconhecida para os problemas que justificam a utilização de um método heurístico. Qualquer solução dada por um procedimento heurístico, porém, é geralmente uma solução de boa qualidade sobre o espaço solução global (RODRIGUES JÚNIOR, 2005; PAYÁ-ZAFORTEZA et al., 2010).

2.3.2 Otimização de Estruturas de Concreto Armado

Segundo Bastos (2004) o interesse pela área de pesquisa em otimização de estruturas de concreto armado teve início na década de 1950, sendo que na década de 1970 diversos trabalhos relevantes foram desenvolvidos, sendo estes estudos os principais responsáveis pela difusão dos processos de otimização pela comunidade mundial.

De acordo com o exposto por Chaves (2004), desde o trabalho de Schmidt, em 1960, a teoria da otimização estrutural tem avançado consideravelmente, conforme ilustrado pelo grande número de livros e artigos publicados. Porém, as publicações em concreto armado e concreto protendido são, na maioria das vezes, encontrados isoladamente devido à sua heterogeneidade e anisotropia. Nesse período, a grande maioria dos trabalhos de otimização estrutural utilizaram o aço como o material estrutural, sendo o espaço ocupado pelas estruturas de concreto armado nesse cenário bem menos considerável.

A seguir, destacam-se alguns dos trabalhos mais recentes sobre a otimização de pilares e pórticos de concreto armado, englobando trabalhos da última década.

Argolo (2000) otimizou, por meio de Algoritmos Genéticos, o custo de pilares de concreto armado submetidos a flexocompressão reta, levando-se em conta os preços do aço, concreto e fôrmas. Foi desenvolvido um algoritmo, em *Visual Basic*, onde foram consideradas as seguintes variáveis no problema de otimização: altura e largura da seção transversal de concreto, número de camadas de aço dentro da seção de concreto, número de barras em uma mesma camada de aço, e diâmetro das barras em uma mesma camada. Os exemplos numéricos desenvolvidos comprovaram a robustez do método proposto na obtenção de soluções mais econômicas (economia no custo da seção de 7% a 30% em relação ao dimensionamento convencional por Ábacos de Interação e a outras técnicas de otimização). Além disso, verificou-se, nos exemplos deste trabalho, que a elevação do preço da fôrma é o que mais afeta no custo ótimo das seções.

Silva (2001) apresentou alguns exemplos de otimização de estruturas de concreto armado como o de um trecho de pilar dimensionado à flexão composta oblíqua e um pórtico plano de concreto armado de cinco pavimentos, desenvolvendo um algoritmo em linguagem *Fortran*. O autor utilizou Algoritmos Genéticos como método de otimização. A função objetivo correspondeu ao custo da estrutura considerando concreto, aço e fôrmas. Como variáveis adotaram-se as alturas das seções, a bitola das barras de aço e o número de barras. Segundo as conclusões do autor, os Algoritmos Genéticos foram bastante eficientes na busca de soluções, mesmo para problemas complexos. No exemplo do pórtico plano obteve-se uma economia de 22,7% em relação à solução proposta por um software comercial de dimensionamento de estruturas de concreto armado.

Camp, Pezeshk e Hansson (2003), utilizando as especificações da norma norte-americana ACI 318-89, minimizaram o custo de pórticos planos e de pilares curtos de concreto armado. Algoritmos Genéticos foi o método de otimização adotado. As restrições para o problema de otimização foram determinadas de maneira que as vigas tivessem resistência à flexão adequada, bem como os pilares resistissem aos esforços gerados por flexocompressão reta. Consideraram-se como variáveis de projeto as dimensões, o número de barras e a topologia da seção de concreto. Vários exemplos de dimensionamento otimizado foram apresentados demonstrando a eficiência do método.

Vianna (2003) automatizou o cálculo de pré-dimensionamento de edifícios em concreto armado, simplificadaamente tratados como pórticos, através da minimização matemática dos custos das seções transversais de vigas e pilares de concreto armado. Nesse trabalho foi utilizado o método dos multiplicadores de Lagrange para a resolução do problema de otimização. Foram computados os custos de concreto, aço e fôrmas e as respectivas mãos de obra. As áreas de aço e dimensões das seções constituíram-se nas variáveis do problema. Para facilitação dos cálculos, as armaduras foram consideradas com mesmo diâmetro nos exemplos desenvolvidos. A otimização proposta pelo autor era constituída por duas etapas distintas. Inicialmente, eram otimizadas as vigas e, posteriormente, os pilares dos pórticos de concreto armado. Sete exemplos de pórticos foram analisados, alguns deles constituídos por até 12 pavimentos. Foi verificado que as seções mais econômicas de vigas encontram-se próximas a uma seção normalmente armada. Entretanto, de acordo com as conclusões do trabalho, com o aumento do carregamento tende a ser mais vantajoso aumentar a armadura de compressão da seção do que aumentar a seção transversal, devido aos custos de concreto e fôrmas. Quanto aos pilares, foi verificado que a situação ideal é aquela onde as taxas de armadura encontram-se o mais próximo possível da taxa mínima, com o menor número

possível de camadas. Foi apurado também que os pilares submetidos apenas a esforços de compressão têm seção ótima quadrada, enquanto que pilares submetidos a momentos têm uma tendência a serem mais alongados na direção atuante deste esforço.

Bastos (2004) otimizou o custo de pilares retangulares de concreto armado submetidos à flexocompressão oblíqua, levando-se em conta os custos de aço, concreto e fôrmas. Para isso foi desenvolvido um programa computacional em *Visual Basic*. Algoritmos Genéticos foi o método de otimização adotado. Como variáveis adotaram-se a altura e a largura da seção transversal de concreto, o número de barras em uma camada de aço e o diâmetro das barras em uma mesma camada. Quanto às restrições, adotaram-se tanto critérios de resistência como relativos ao limite das armaduras. Foram realizados quatro exemplos numéricos. O primeiro comparou a metodologia proposta com o dimensionamento convencional por Ábacos de Interação, obtendo economia na faixa de 25 a 30%. No segundo e terceiro exemplos obteve-se uma redução de custos de 34 e 29% em relação a métodos matemáticos de otimização. E o quarto exemplo se refere a um pilar que faz parte de uma torre de resfriamento de uma usina termelétrica, comparando-se o resultado obtido pelo processo de otimização proposto com a solução adotada para a estrutura, calculada por meio de um programa específico para dimensionamento de seções de concreto submetidos à flexão oblíqua. Nesse último caso, a economia seria de 19%. Foi realizado também um estudo de sensibilidade dos custos dos materiais, a fim de se avaliar o impacto no custo final da solução ótima, concluindo-se, para o caso específico desse estudo, que o material que exerce maior influência no custo final da seção é o aço.

No trabalho de Chaves (2004), um algoritmo foi desenvolvido para a definição da seção transversal de pilares de concreto armado de custo mínimo, bem como para a determinação do índice de confiabilidade desta estrutura para um Estado Limite. Isso foi realizado através de técnicas de otimização matemática (método dos Multiplicadores de Lagrange) e de conceitos estatísticos. Como variáveis do problema de otimização adotaram-se as dimensões da seção transversal e a área de armadura longitudinal. Foram consideradas restrições de forma a garantir o equilíbrio e a compatibilidade das seções, além de restrições laterais que trazem limitações de ordem prática ou normativa para as estruturas.

A pesquisa desenvolvida por Nogueira (2005) visou apresentar um modelo de otimização acoplado à confiabilidade para a análise de estruturas de barras de concreto armado, de modo que a confiabilidade foi adicionada ao processo de otimização como uma restrição. A metodologia de otimização empregada foi a minimização da função de custo da estrutura. O modelo acoplado de otimização e confiabilidade foi empregado para análise de

vigas de concreto armado (isostática e hiperestática) e de um pórtico simples (considerando três possibilidades distintas de vinculação). Como conclusões do trabalho, verificou-se que, ao se otimizar uma estrutura, é possível que ocorra um considerável aumento nas probabilidades de falha da mesma, o que pode conduzir a estados contra a segurança. Constatou-se, assim, que a tendência das novas pesquisas deve ser a busca cada vez maior do acoplamento entre confiabilidade e otimização na análise de estruturas de engenharia.

Rodrigues Júnior (2005) propôs uma formulação para o projeto ótimo de pilares de edifícios altos de concreto armado, sendo a minimização da função custo total das colunas do edifício o objetivo adotado. Para resolução do problema proposto empregaram-se técnicas de Programação Matemática. Foram consideradas variáveis de projeto as dimensões da seção transversal, a armadura longitudinal dos pilares e a resistência característica do concreto. Foram adotadas restrições relativas aos Estados Limites Último e de Serviço, bem como restrições relativas aos limites máximos e mínimos atribuídos a cada variável. Uma estratégia de solução em multinível foi aplicada, dividindo o problema global de otimização em uma série de subproblemas individuais de otimização. No problema global eram determinadas as dimensões da seção transversal de todos os pilares e a resistência característica do concreto, enquanto que nos subproblemas individuais eram determinadas apenas as armaduras longitudinais dos pilares. Com base na formulação proposta, dois edifícios com mais de 20 pavimentos foram eficientemente otimizados. O autor, entre outras considerações, verificou que ao se otimizar a estrutura de edifícios altos deve se ter grande cuidado com os efeitos de segunda ordem decorrentes de estruturas mais esbeltas e flexíveis, que as soluções ótimas obtidas nesse trabalho utilizaram baixas taxas de armadura, que quando há redução nas dimensões da seção transversal ao longo da altura produzem-se significativas reduções no custo dos pilares, que a solução ótima mostra-se pouco sensível a variações no preço do concreto, e que as seções tendem a um formato mais quadrado quando há liberdade para variar ambas as dimensões de um pilar retangular.

Nina (2006) desenvolveu uma rotina computacional para otimizar o pré-dimensionamento de edifícios de concreto armado, tratados simplificadaamente como pórticos planos. Para isso, foi utilizado um processo matemático de otimização (método de Programação Quadrática Sucessiva). Foi otimizado o custo das seções transversais de vigas e pilares. Como variáveis de otimização considerou-se, para os pilares, a altura da seção de concreto e a área de armadura longitudinal. Inicialmente, otimizaram-se, de maneira separada, vigas e pilares. Posteriormente, partiu-se para a análise de quatro exemplos de pórticos, de até 15 pavimentos, utilizando um processo de busca com aproximação combinada, ou seja,

analisaram-se os elementos de maneira independente entre si (aproximação local), para posteriormente unir-se os resultados obtidos e, finalmente, verificar e otimizar a estrutura como um todo (aproximação global). Em relação à otimização dos pilares, foi observado que, independente do domínio de deformação onde a seção se encontra, as curvas que representam as funções de custo em relação ao aumento da solicitação normal basicamente podem ser divididas em dois trechos. No primeiro trecho, o valor mais econômico é determinado com o aumento da altura, mantendo a armadura próxima à mínima. No segundo trecho, a altura passa a ser limitada pelo seu valor máximo e apenas a armadura aumenta para resistir ao incremento dos esforços. Quanto à influência de cada material no custo ótimo total, observou-se que a participação mais significativa é a das fôrmas de madeira (61%), seguido do concreto (23%) e do aço (16%).

Algoritmos Genéticos e Algoritmos Meméticos (uma evolução do primeiro método) são utilizados no trabalho de Perea et al. (2007) para otimizar pórticos de concreto armado utilizados em construções rodoviárias. Os resultados obtidos foram aplicados na prática para um metrô na cidade de Valência, na Espanha. Os métodos de otimização utilizados mostraram-se eficientes em um problema de alta complexidade. Para a adoção das restrições e obtenção das cargas atuantes foi utilizada a normatização espanhola. O modelo de otimização estrutural continha um total de 50 variáveis de projeto: 3 variáveis de caráter geométrico, 3 tipos de concreto e 44 variáveis relacionadas às armaduras de aço. Foi realizada a análise à flexão, cisalhamento e fadiga, além de se limitarem as deflexões máximas.

Payá-Zaforteza (2007) otimizou pórticos de concreto armado utilizados em edificações por meio de cinco métodos heurísticos (*Simulated Annealing*, Algoritmos Genéticos, *Random Walk*, *Gradient First Best* e *Threshold Accepting*). Num primeiro exemplo, testaram-se os diferentes métodos por meio de um exemplo composto por dois vãos e quatro pavimentos (pórtico com 77 variáveis), dentre os quais o *Simulated Annealing* provou ser o método mais eficiente na busca pela solução ótima, com tempo de processamento intermediário. Como variáveis foram adotados parâmetros geométricos, bem como a classe de resistência do concreto. Em uma segunda fase, elegeu-se o *Simulated Annealing* para a sequência das análises, sendo utilizados vários exemplos para refinar o método: pórticos de dois vãos e duas, quatro, seis e oito pavimentos (39, 77, 115, 153 variáveis, respectivamente). E, por fim, trabalhou-se com otimização multiobjetivo de um dos pórticos (77 variáveis), onde se fez um estudo da otimização simultânea de custo da estrutura e de objetivos relacionados com sua facilidade construtiva, sua sustentabilidade ambiental e sua segurança, também por meio do *Simulated Annealing*. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que, com um

pequeno incremento no custo ótimo (5%), é possível obter estruturas de maior facilidade construtiva (32,5% de melhora), maior sustentabilidade ambiental (24,04% de melhora) e maior segurança estrutural global (6,11% de melhora). A maior facilidade construtiva seria obtida através da utilização do menor número possível de barras longitudinais, tendo em vista que um grande número de barras de diâmetro reduzido causa maiores dificuldades à execução. Os artigos de Payá-Zaforteza et al. (2006) e Payá-Zaforteza et al. (2008) são originados da pesquisa dessa mesma dissertação.

Perea et al. (2008) propuseram a otimização pórticos de concreto armado utilizados em pontes rodoviárias por diferentes métodos heurísticos de otimização (*Random Walk*, *Descent Local Search*, *Threshold Accepting* e *Simulated Annealing*). Foram desenvolvidos algoritmos para cada um dos quatro métodos, sendo a implementação realizada em *Visual Fortran*. O problema contou com 50 variáveis (parâmetros de geometria, tipo de concreto, etc.), sendo otimizado o custo total da estrutura. Levaram-se em consideração na composição do mesmo os custos do concreto, do aço e das fôrmas. As restrições relacionaram-se ao serviço, aos Estados Limites Últimos, bem como a construtibilidade e aos limites de geometria do problema. Para o trabalho em questão, o *Threshold Accepting* foi o método mais eficiente dentre os testados para a solução do problema de otimização. Os autores também destacaram que a inclusão da análise de deformações e fadiga é crucial na resolução destes problemas. A não consideração destas restrições pode levar a obtenção de estruturas mais econômicas, porém inseguras.

Martínez-Martín (2008) propôs a otimização de pilares retangulares de seção vazada de concreto armado de viadutos rodoviários e ferroviários utilizando diversos métodos de otimização (*Random Walk*, Colônia de Formigas, Algoritmos Genéticos, *Descent Local Search*, *Threshold Accepting* e *Simulated Annealing*). Verificaram-se diferentes alturas e vãos para as estruturas. Para todas as heurísticas testadas, os resultados encontrados foram similares, sendo o *Simulated Annealing* o método que obteve o menor custo ótimo. O estudo considerou um número de até 95 variáveis, entre as quais se incluíram diferentes classes de resistência do concreto.

González-Vidosa et al. (2008) otimizaram o custo de estruturas de concreto armado utilizando o *Simulated Annealing*, levando-se em conta o concreto, o aço e as fôrmas. O primeiro exemplo consistiu numa barreira de contenção de solo (22 variáveis). O segundo e o terceiro casos estudados consistiram em pórticos utilizados na construção rodoviária (38 e 44 variáveis, respectivamente). E o quarto modelo otimizado consistiu num pórtico plano de dois vãos e 5 pavimentos correspondente à estrutura de uma edificação (95 variáveis). Foram

consideradas como variáveis de projeto as dimensões das seções de concreto, as áreas de aço, e diferentes classes de resistência do concreto. O desenvolvimento do algoritmo foi realizado em *Visual Fortran*. Segundo as conclusões dos autores, o *Simulated Annealing* se mostrou eficiente para os problemas propostos. Além disso, é dado destaque a necessidade da inclusão de alguns Estados Limites na composição das restrições para os problemas de otimização, como limitação nos valores de flecha e análise de fadiga, de forma que se garantam resultados com a devida segurança e funcionalidade.

Payá-Zaforteza et al. (2010) minimizaram os custos de um pórtico plano de concreto armado típico composto por 2 vãos e 4 pavimentos. O problema era composto por 77 variáveis, as quais se referiam às propriedades geométricas da seção de concreto, áreas de aço, bem como características do concreto empregado. O artigo objetivou melhorar os parâmetros do método de otimização empregado (*Simulated Annealing*), sendo eficiente nesse processo. Os autores propuseram uma metodologia geral para determinar o número de testes numéricos necessários para a obtenção de uma solução ótima no nível de precisão desejado para um dado problema, no que se refere à solução ótima global. Para o caso estudado, 1000 iterações foi o número mínimo necessário para a minimização do custo do pórtico.

Finalmente, Bordignon (2010) minimizou o custo de pilares retangulares de concreto armado submetidos à flexocompressão reta através do *Simulated Annealing*, utilizando como variáveis as seções transversais dos elementos (base e altura), bem como a quantidade e diâmetros das armaduras para diferentes camadas da seção (7 diferentes variáveis). Foram desenvolvidos seis exemplos numéricos, comparando os resultados obtidos com o dimensionamento por Ábacos de Interação, Programação Matemática (Método de Powell), e Algoritmos Genéticos. Obteve-se nessas análises uma grande economia em relação aos resultados obtidos pelos demais autores, comprovando a eficiência do método. Foi verificada também a influência da classe de resistência do concreto nos resultados, bem como da alteração nos valores dos esforços. Ficou evidente, segundo os resultados obtidos pelo autor, que o algoritmo de otimização tende a reduzir o consumo do concreto à medida que a sua resistência e respectivo custo aumentam, sendo muito mais econômicas as seções com concreto de maior f_{ck} . As taxas de armadura obtidas, para concretos de classe C20 e C25, encontraram-se bastante próximas à taxa mínima estabelecida pela ABNT NBR 6118 (2007), elevando-se à medida que a resistência do concreto aumenta (porém ainda de baixo valor). Observou-se também que a topologia da seção transversal ótima pouco se altera quando a variação é de 20% no custo unitário dos materiais, sofrendo maiores alterações nas dimensões da seção transversal quando a variação dos custos é de 50%. Além disso, a parcela do custo

representada pelas fôrmas foi a maior contribuinte no custo final dos pilares otimizados (aproximadamente 45,6%), seguido pelo concreto (28,7%) e aço (25,7%).

Nos Quadros 1 e 2, apresenta-se um resumo dos principais trabalhos de otimização de estruturas de concreto armado citados, quanto aos objetivos e aos métodos de otimização empregados, respectivamente.

Autores	Objetivos
Argolo (2000)	Minimizar o custo de pilares submetidos à flexocompressão reta
Silva (2001)	Minimizar o custo de pilar submetido à flexão oblíqua e pórtico plano de 5 pavimentos
Camp, Pezeshk e Hansson (2003)	Minimizar o custo de pórticos planos e de pilares curtos
Vianna (2003)	Minimizar o custo de pórticos planos de até 12 pavimentos
Bastos (2004)	Minimizar o custo de pilares retangulares de concreto armado submetidos à flexocompressão oblíqua
Chaves (2004)	Minimizar o custo das seções transversais de pilares
Nogueira (2005)	Minimizar o custo de vigas e de um pórtico simples
Rodrigues Júnior (2005)	Minimizar o custo de pilares de edifícios com mais de 20 pavimentos
Nina (2006)	Minimizar o custo de pórticos planos de até 15 pavimentos
Perea et al. (2007)	Minimizar o custo de pórticos utilizados em construções rodoviárias
Payá-Zaforteza (2007)	Minimizar o custo de pórticos planos de 2, 4, 6 e 8 pavimentos
	Otimização multiobjetivo de pórtico de 4 pavimentos (custo monetário, facilidade construtiva, sustentabilidade ambiental e segurança estrutural global)
Perea et al. (2008)	Minimizar o custo de pórticos utilizados em pontes rodoviárias
Martínez-Martín (2008)	Minimizar o custo de pilares retangulares de seção vazada
González-Vidosa et al. (2008)	Minimizar o custo de pórticos utilizados em pontes rodoviárias e pórtico plano de 5 pavimentos
Payá-Zaforteza et al. (2010)	Minimizar o custo de pórtico plano típico composto de 4 pavimentos
Bordignon (2010)	Minimizar o custo de pilares retangulares de concreto armado submetidos à flexocompressão reta

Quadro 1: Principais objetivos dos autores na otimização de estruturas de concreto armado.

Autores	Métodos de Otimização
Vianna (2003)	Métodos Matemáticos
Chaves (2004)	
Nogueira (2005)	
Rodrigues Júnior (2005)	
Nina (2006)	
Payá-Zaforteza (2007)	<i>Simulated Annealing</i>
Perea et al. (2008)	
González-Vidosa et al. (2008)	
Martínez-Martín (2008)	
Payá-Zaforteza et al. (2010)	
Bordignon (2010)	Algoritmos Genéticos
Argolo (2000)	
Silva (2001)	
Camp, Pezeshk e Hansson (2003)	
Bastos (2004)	
Payá-Zaforteza (2007)	
Perea et al. (2007)	
Martínez-Martín (2008)	Outras Heurísticas (<i>Random Walk, Gradient First Best, Threshold Accepting, Descent Local Search</i> e Colônia de Formigas)
Payá-Zaforteza (2007)	
Perea et al. (2008)	
Martínez-Martín (2008)	

Quadro 2: Principais métodos de otimização empregados em estruturas de concreto armado.

2.3.3 Otimização Estrutural com Enfoque Ambiental

Existem na literatura diversos trabalhos que tratam sobre a Análise do Ciclo de Vida de estruturas de concreto armado e de aço (BREMNER, 2001; EDVARDBSEN; TOLLOSE, 2001; STRUBLE; GODFREY, 2004; JOHNSON, 2006; OLIVEIRA, 2007; PEYROTEO; SILVA; JALALI, 2007; GARCIA; RODRIGUES; AGUILAR, 2010). A maioria trabalha, simplesmente, com a estimativa dos impactos ambientais totais, quanto ao consumo de energia, emissão de dióxido de carbono, dióxido de enxofre, óxido de nitrogênio, entre outros. Isso é realizado para edificações de maneira integral, para elementos estruturais analisados de

maneira individual, bem como há trabalhos que apenas calculam os impactos para determinada unidade de massa ou de volume dos insumos considerados.

Algumas pesquisas desenvolvidas recentemente têm apontado, também, em direção à otimização estrutural por meio da consideração de custos ambientais. Como exemplos de trabalhos que otimizam estruturas considerando os impactos ambientais das mesmas citam-se os trabalhos de Payá-Zaforteza et al. (2008), Payá-Zaforteza et al. (2009), Yeo e Gabbai (2011) e Yepes et al. (2012).

No trabalho de Payá-Zaforteza et al. (2008), há uma otimização de pórticos de concreto armado pelo método de otimização *Simulated Annealing*. São levados em conta quatro objetivos no processo otimização: minimizar custo monetário, maximizar a facilidade construtiva, maximizar a segurança global e minimizar o impacto ambiental da estrutura. É feita a otimização de cada função de forma isolada e de maneira conjunta de algumas funções (otimização multiobjetivo), como, por exemplo, custo monetário *versus* sustentabilidade ambiental. A minimização dos impactos ou custos ambientais dos pórticos de concreto armado foi realizada através de uma função objetivo considerando uma pontuação ambiental para cada material (aço e concreto), a qual foi calculada de acordo com o método de avaliação de impacto Eco-Indicador. O resultado da otimização, considerando-se as funções objetivos de maneira individual, mostrou que a solução ótima de custo monetário foi 6,7% mais econômica que a solução onde otimizaram-se os custos ambientais. Em contrapartida, a redução no impacto ambiental foi de 26,6% ao otimizarem-se os custos ambientais em relação a otimização dos custos monetários. Ao combinar-se a otimização de custo monetário e a minimização das unidades de impacto ambiental, os autores verificaram que, com um pequeno incremento no custo ótimo, é possível obter estruturas também mais sustentáveis.

Payá-Zaforteza et al. (2009) propuseram a minimização da emissão de dióxido de carbono (CO₂) de pórticos de concreto armado por meio do *Simulated Annealing*, bem como do custo monetário dos mesmos. Seis diferentes pórticos foram analisados, possuindo o exemplo mais complexo um total de 153 variáveis de projeto. Os autores concluíram haver uma íntima relação entre as melhores soluções econômicas e ambientais, utilizando as emissões de CO₂ como parâmetro. As melhores soluções ambientais foram no máximo 2,77% mais caras do que as melhores soluções de custo monetário. Alternativamente, as melhores soluções de custo econômico aumentariam as emissões de CO₂ em apenas 3,8%.

No trabalho de Yeo e Gabbai (2011), é proposta a otimização de uma viga de concreto armado, levando-se em conta toda a energia consumida pelo concreto e pelo aço durante o ciclo de vida dos mesmos. É feita a otimização do custo monetário, e posteriormente a

minimização do consumo de energia para a fabricação da viga. Segundo os resultados obtidos, na viga onde houve a otimização do consumo de energia, o valor de seu custo econômico final teria um aumento de cerca de 5%, em relação à viga onde se otimizou o custo monetário. Em contrapartida, a redução do consumo de energia, em relação à viga otimizada pelo custo monetário, seria na ordem de 10%.

No artigo de Yepes et al. (2012) é apresentada a otimização monetária e a minimização da emissão de dióxido de carbono (CO₂) de muros de arrimo em concreto armado utilizados na construção de rodovias. A estimativa do custo ambiental dos insumos do concreto armado, relacionado ao CO₂ emitido, foi realizada considerando as fases de produção, transporte e construção. O problema envolveu vinte variáveis de projeto: quatro variáveis geométricas, quatro relacionadas aos materiais, e doze referentes às armaduras. É utilizado como método de otimização a heurística VNS (*Variable Neighborhood Search*), ou Busca de Vizinhança Variável. Como conclusões, os autores perceberam que há uma ligação íntima dos resultados da otimização monetária em relação aos resultados da otimização ambiental (minimização do CO₂ emitido), como o trabalho acima citado já havia indicado. Para se obter a melhor solução ambiental o incremento no custo monetário seria de apenas 1,28%. A análise indicou também que uma queda nos custos de €1 poderia representar uma redução na emissão de CO₂ até 2,28 kg. E ainda verificou-se que os muros de arrimo mais econômicos utilizam 4,8% mais concreto que a solução de menor emissão de CO₂, enquanto que esta última usa 1,9% a mais de armadura em relação à primeira.

2.3.4 Método da Busca Harmônica

Um dos métodos heurísticos que tem ganhado destaque nos últimos anos é o Algoritmo da Busca Harmônica (do inglês, *Harmony Search*). O método de otimização foi proposto inicialmente por Geem, Kim e Loganathan (2001), inspirado na observação de que o objetivo de um músico é a busca por uma harmonia perfeita.

O algoritmo da Busca Harmônica imita o processo de improvisação musical do Jazz, onde os músicos tentam encontrar, através de repetidas tentativas, a melhor harmonia possível, levando em conta seu conhecimento musical prévio, a experiência das tentativas anteriores, bem como propondo novas possibilidades ao combinar as notas musicais de cada instrumento. Ou seja, é um algoritmo baseado em memorização e improviso. Os instrumentos

musicais correspondem, no método, ao conjunto de variáveis que, combinados da melhor forma possível, levam a uma harmonia perfeita (ótimo global). No início do algoritmo, é proposto um conjunto inicial de soluções, que seriam as sugestões iniciais dos músicos. A obtenção do valor da função objetivo é denominada estimativa estética, onde se avalia o conjunto formado pelos sons (valor numérico) de cada instrumento (variável). As piores soluções (piores harmonias) vão sendo descartadas ao longo do procedimento, sendo substituídas por outras de melhor qualidade a cada ensaio ou iteração, de acordo com o ranqueamento das soluções.

Cinco etapas básicas caracterizam o método, as quais são descritas individualmente na sequência:

a) Etapa 1 – Inicialização do problema e parâmetros do algoritmo: consiste na definição da função objetivo, bem como do conjunto de restrições. É nessa etapa também que são definidos os parâmetros do algoritmo. Os quatro principais parâmetros são o tamanho da memória harmônica (*Harmony Memory Size* – HMS), a taxa de escolha de um valor da memória (*Harmony Memory Considering Rate* – HMCR), a taxa de ajuste dos valores (*Pitch Adjusting Rate* – PAR) e número máximo de improvisos ou iterações (*Maximum Improvisation* – MI).

b) Etapa 2 – Inicialização da memória harmônica: consiste na definição da primeira memória harmônica, ou seja, do conjunto inicial de soluções. Isso faz analogia ao conjunto de notas que os músicos já têm em mente antes da execução da música. Essa memória harmônica (*Harmony Memory* – HM) é representada através de uma matriz, onde cada linha corresponde a um vetor solução. Ou seja, a matriz possui número de linhas igual ao HMS e número de colunas igual o número de variáveis do problema (N), a qual é mostrada na Equação 22. Essas harmonias podem ser geradas aleatoriamente, dentre um determinado intervalo inferior e superior, ou serem inicialmente sugeridas.

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_N^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{HMS} & \cdots & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (22)$$

c) Etapa 3 – Improvisar uma nova harmonia: a partir da solução inicial, é gerada uma nova harmonia. Em analogia ao processo musical, a criação de um novo vetor de solução, uma nova harmonia, é denominada improvisação. Isso pode ser realizado de três maneiras:

com base na consideração da memória, por meio de ajustes finos na memória existente e através de seleção aleatória dentro do intervalo possível de soluções. Essa etapa é desenvolvida utilizando os parâmetros HMCR e PAR definidos na etapa 1. Para cada variável da nova solução, deve ser gerado um número aleatório entre 0 e 1 (considerando uma distribuição uniforme). Esse número é comparado ao valor do HMCR (taxa de escolha de um valor da memória). Se o número aleatório for menor (probabilidade igual a HMCR), o valor da respectiva variável no novo vetor solução é retirado da memória harmônica já existente. Se for maior (probabilidade igual a 1-HMCR), é criado um novo valor para a respectiva variável do vetor solução:

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\} \text{ com probabilidade HMCR} \\ x'_i \in X_i \text{ com probabilidade } (1 - HMCR) \end{cases} \quad (23)$$

A escolha desse novo valor pode ser feita de duas maneiras distintas, conforme Equação 24. Para isso, gera-se, um novo número aleatório entre 0 e 1, o qual é comparado ao PAR (taxa de ajuste dos valores). Se o número for menor que a taxa (probabilidade igual a PAR), é considerada a memória harmônica, porém com pequeno ajuste, segundo a Equação 25, cujo valor de variação, tanto para menos como para mais, é definido por bw (passo máximo de ajuste para o tom) e um número aleatório sorteado $rand$. Se for maior que PAR (probabilidade igual a 1-PAR), o novo valor para a variável é gerado aleatoriamente dentro de todo o intervalo possível de soluções.

$$\text{ajuste da nota } x'_i \leftarrow \begin{cases} SIM, \text{ com probabilidade } PAR \\ NÃO, \text{ com probabilidade } (1 - PAR) \end{cases} \quad (24)$$

$$x'_i \leftarrow x'_i \pm rand * bw \quad (25)$$

d) Etapa 4 – Atualização da Memória Harmônica: nesta etapa, a cada nova harmonia improvisada, é verificado se esta é melhor do que a pior harmonia da memória harmônica (HM), no que diz respeito à função objetivo estabelecida. Caso confirmada esta condição, a nova harmonia substitui a pior harmonia da HM.

e) Etapa 5 – Verificação do critério de parada: ao término de cada iteração é verificado se a melhor harmonia satisfaz o critério de parada, normalmente o número máximo de improvisos MI. Em caso positivo, a execução é terminada. Caso contrário, o algoritmo retorna para o terceiro passo enquanto não atingir o critério de parada.

Na Figura 14, apresenta-se um fluxograma básico do método da Busca Harmônica.

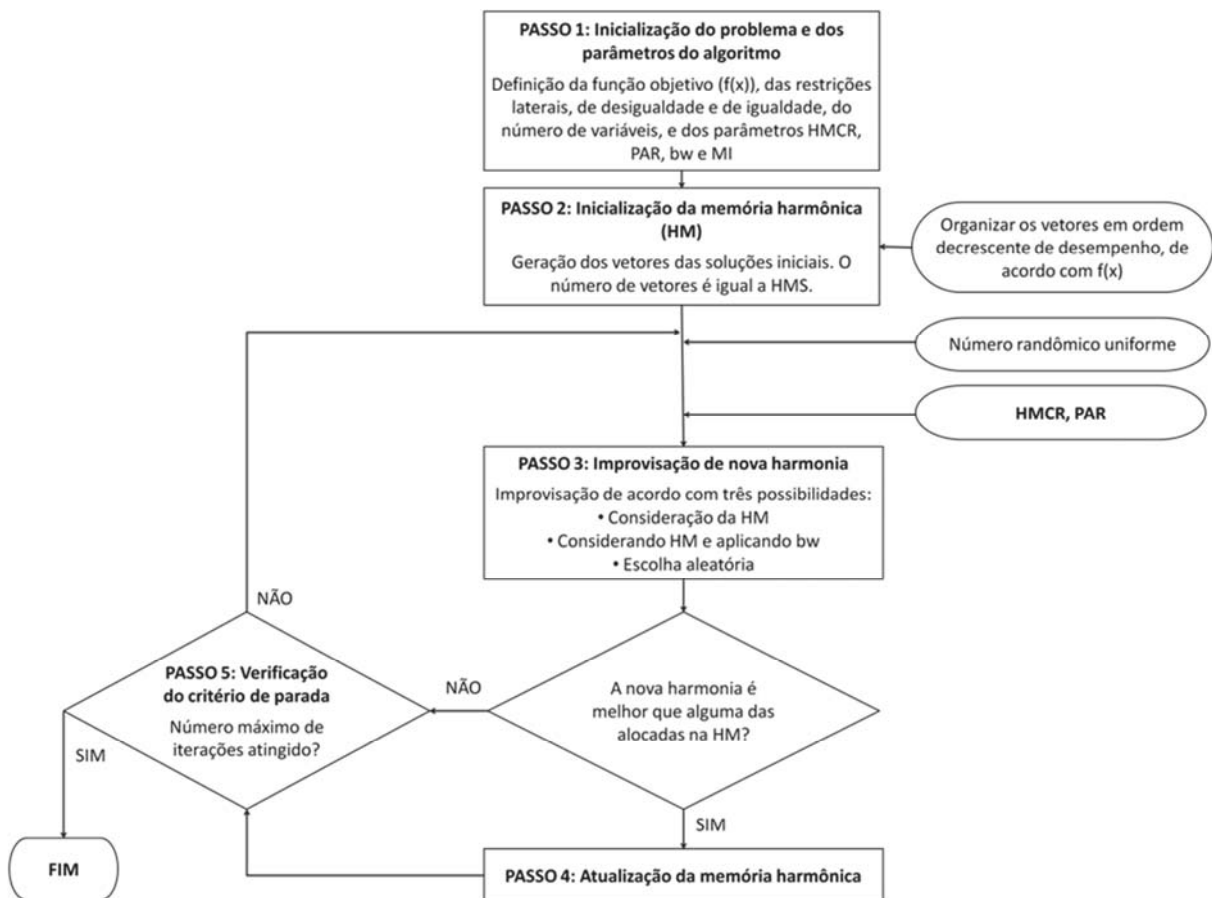


Figura 14: Fluxograma básico do método da Busca Harmônica.

A partir do trabalho original de Geem, Kim e Loganathan (2001), diversos melhoramentos e variações do método foram propostos. Mahdavi, Fesanghary e Damangir (2007) apresentaram um refinamento do método, desenvolvendo o algoritmo de Busca Harmônica Melhorado (*Improved Harmony Search – IHS*). Foi sugerida a variação dinâmica dos parâmetros PAR e bw , ao decorrer do número de iterações, entre limites mínimos e máximos para cada fator. PAR cresce linearmente, enquanto que o parâmetro bw decresce exponencialmente.

O parâmetro PAR para cada improvisação ou iteração, segundo o algoritmo melhorado, é dado por:

$$PAR(gn) = PAR_{mín} + (PAR_{máx} - PAR_{mín}) \frac{gn}{MI} \quad (26)$$

Onde:

gn : número da iteração atual;

MI : número máximo de iterações (improvisações);

$PAR_{mín}$: a menor probabilidade de ajuste de notas, parâmetro definido pelo usuário;

$PAR_{máx}$: a maior probabilidade de ajuste de notas, parâmetro definido pelo usuário;

$PAR(gn)$: probabilidade de ajuste de nota em cada geração gn .

O parâmetro bw varia de acordo com a equação:

$$bw(gn) = bw_{máx} e^{\left\{ \left[\ln \left(\frac{bw_{mín}}{bw_{máx}} \right) \right] \frac{gn}{MI} \right\}} \quad (27)$$

Onde:

$bw_{mín}$: valor máximo utilizado para ajuste de notas em todo o processo;

$bw_{máx}$: valor máximo utilizado para ajuste de notas em todo o processo;

$bw(gn)$: valor utilizado para ajuste das notas na iteração gn ;

MI : número máximo de iterações (improvisações).

Na Figura 15 é apresentado o comportamento de variação dos parâmetros PAR e bw ao longo das iterações desenvolvidas, por meio das Equações 26 e 27.

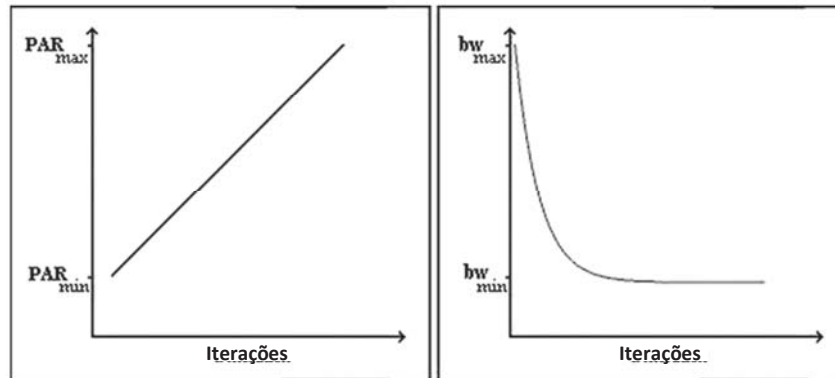


Figura 15: Comportamento dos parâmetros PAR e bw variáveis ao longo do número de iterações
(Fonte: adaptado Mahdavi, Fesanghary e Damangir, 2007).

A aplicabilidade da heurística Busca Harmônica na solução de problemas de otimização estrutural pode ser verificada em alguns trabalhos publicados nos últimos anos, nos quais se citam Lee e Geem (2004), Degertekin (2008), Saka (2009), Saka e Erdal (2009), Degertekin e Hayalioglu (2010), e Hasaņebi, Erdal e Saka (2010). Os autores otimizaram estruturas de aço em seus trabalhos.

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a formulação matemática que embasa a otimização das seções retangulares de pilares de concreto armado no desenvolvimento deste trabalho. Após se definir a função objetivo a ser minimizada, bem como apresentar todos os parâmetros fixos e as variáveis envolvidas em seu cálculo, é preciso estabelecer matematicamente as restrições do problema, tomando-se como referência as condições normativas, bem como construtivas.

De forma geral, objetiva-se que essa formulação seja utilizada para obter seções de menor custo possível (monetário ou ambiental), sendo capaz de atender satisfatoriamente aos critérios de funcionalidade e segurança, considerando a capacidade resistente da seção à flexocompressão reta no estado limite último.

3.2 Parâmetros Fixos e Variáveis do Problema

Antes de se definir matematicamente a função objetivo do problema, tornou-se necessário estabelecer quais eram os parâmetros fixos (características de projeto inalteradas durante o procedimento de otimização) e as variáveis do problema (características de projeto alteradas durante o processo de minimização da função). Como parâmetros fixos, adotaram-se:

N_{sd} : Esforço axial solicitante de cálculo;

M_{sd} : Momento fletor solicitante de cálculo;

c : Cobrimento da armadura;

f_{yk} : Tensão característica de escoamento do aço;

E_s : Módulo de elasticidade do aço;

C_c : Custo referente ao volume de concreto;

C_s : Custo referente à massa de aço;

C_f : Custo referente à área de forma.

Já para os parâmetros variáveis adotaram-se a classe de resistência do concreto (f_{ck}), as dimensões da seção de concreto, bem como as áreas de armadura. Ao todo, foram estabelecidas oito diferentes possíveis variáveis para o problema de otimização, as quais podem ser tomadas como fixas quando necessário. As variáveis do problema (x_i) são apresentadas na Figura 16, bem como cada uma é individualmente descrita na sequência, de acordo com sua numeração. O f_{ck} é tratado como a variável x_8 .

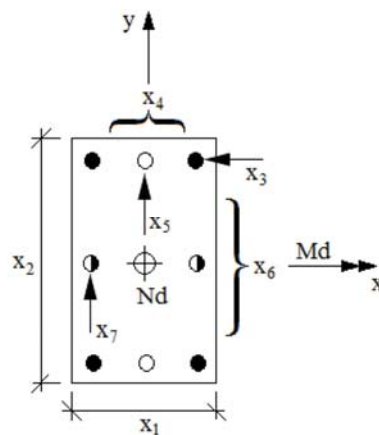


Figura 16: Variáveis de projeto referentes à geometria da seção.

- x_1 : Representa a largura da seção transversal (b);
- x_2 : Representa a altura da seção transversal (h);
- x_3 : Representa o diâmetro das quatro barras dos cantos;
- x_4 : Representa o número de barras nas duas camadas paralelas a x_1 ;
- x_5 : Representa o diâmetro nas duas camadas paralelas a x_1 ;
- x_6 : Representa o número de camadas com duas barras paralelas a x_2 ;
- x_7 : Representa o diâmetro das barras nas camadas paralelas a x_2 ;

Todas as variáveis do problema foram tratadas como discretas. Os diâmetros das armaduras foram limitados aos valores comerciais existentes. As dimensões das seções transversais poderiam variar a cada centímetro ou, alternativamente, a cada 5 cm. Os intervalos possíveis de variação são descritos de maneira mais detalhada na sequência.

3.3 Função Objetivo

A partir da definição das variáveis do problema, no item anterior, é possível estabelecer a função a ser minimizada no problema de otimização, a qual corresponde ao custo da seção por metro linear de pilar. Esse custo pode estar relacionado tanto ao valor monetário dos materiais quanto ao impacto ambiental dos mesmos. A função objetivo pode ser descrita matematicamente pela equação:

$$f(x) = V_c \cdot C_c + P_s \cdot C_s + A_f \cdot C_f \quad (28)$$

A primeira parcela da função relaciona-se ao custo do concreto. Nela, V_c corresponde ao volume de concreto empregado na solução e C_c relaciona-se ao custo unitário do material por unidade de volume, de acordo com o valor adotado para a variável x_8 (f_{ck}). A segunda parcela representa o custo do aço empregado. P_s relaciona-se com a quantidade de armadura utilizada, em massa, γ_s diz respeito ao peso específico do aço (adotado como 77 kN/m³), enquanto que C_s diz respeito ao custo unitário do aço por unidade de massa. Enfim, a terceira parcela representa o custo relativo à fôrma, onde A_f representa a área de fôrmas utilizada e C_f diz respeito ao custo unitário deste material, por unidade de área.

Como já citado no item anterior, os custos unitários (C_c , C_s e C_f) são parâmetros fixos e devem ser estabelecidos antes da resolução do problema. Já os quantitativos de materiais (V_c , P_s e A_f) precisam ser calculados, de acordo com as equações descritas na sequência.

$$V_c = x_1 \cdot x_2 \quad (29)$$

$$P_s = \gamma_s \cdot \pi \cdot (x_3^2 + 0,5 \cdot x_4 \cdot x_5^2 + 0,5 \cdot x_6 \cdot x_7^2) \quad (30)$$

$$A_f = 2 \cdot (x_1 + x_2) \quad (31)$$

Dessa maneira, a formulação final do processo de otimização pode assim descrita:

$$f(x) = x_1 \cdot x_2 \cdot C_c + \gamma_s \cdot \pi \cdot (x_3^2 + 0,5 \cdot x_4 \cdot x_5^2 + 0,5 \cdot x_6 \cdot x_7^2) \cdot C_s + 2 \cdot (x_1 + x_2) \cdot C_f \quad (32)$$

3.4 Restrições do Problema

No processo de minimização dos custos monetários e ambientais, devem-se respeitar uma série de impedimentos estabelecidos em norma, quanto a critérios construtivos e de resistência, aos quais se dá o nome de restrições.

As principais restrições existentes neste problema dizem respeito aos esforços solicitantes e resistentes de cálculo. Afinal, as seções de concreto devem ser capazes de resistir aos esforços solicitantes normais (N_{sd}) e de momento (M_{sd}), através de capacidades resistentes (N_{rd} e M_{rd}) iguais ou superiores a estes valores.

Neste trabalho, o esforço normal resistente (N_{rd}) assume o mesmo valor do esforço normal solicitante de cálculo (N_{sd}). Isso faz com que o ponto S (N_{sd}, M_{sd}) esteja sobre ou muito próximo da curva de interação da seção considerada ótima e que forneça um momento resistente de cálculo (M_{rd}) que atua concomitantemente ao respectivo esforço normal, como mostrado na Figura 17. Uma seção é considerada segura se o ponto S (N_{sd}, M_{sd}) estiver dentro ou sobre a curva de interação.

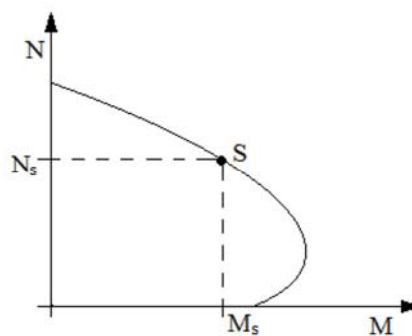


Figura 17: Superfície de interação M-N.

Além disso, todas as variáveis de projeto devem atender as recomendações da norma ABNT NBR 6118 (2007), no que diz respeito a limitações de dimensões, espaçamentos e limites de taxas de armaduras, de acordo com as condições expostas no item 2.1.5.3 da revisão de literatura.

As restrições de desigualdade do problema são apresentadas na sequência, na forma de equações normalizadas.

$$g_1 = 1 - \frac{N_{rd}}{N_{sd}} \leq 0 \quad (33)$$

$$g_2 = 1 - \frac{M_{rd}}{M_{sd}} \leq 0 \quad (34)$$

$$g_3 = 1 - \frac{5 \cdot x_1}{x_2} \leq 0 \quad (35)$$

$$g_4 = 1 - \frac{e}{e_{mín}} \leq 0 \quad (36)$$

$$g_5 = 1 - \frac{e_{máx}}{e} \leq 0 \quad (37)$$

$$g_6 = 1 - \frac{\rho}{\rho_{mín}} \leq 0 \quad (38)$$

$$g_7 = 1 - \frac{\rho_{máx}}{\rho} \leq 0 \quad (39)$$

$$g_8 = 1 - \frac{x_1 \cdot x_2}{A_{Cmín}} \leq 0 \quad (40)$$

$$g_9 = 1 - \frac{x_1}{8 \cdot x_3} \leq 0 \quad (41)$$

$$g_{10} = 1 - \frac{x_1}{8 \cdot x_5} \leq 0 \quad (42)$$

$$g_{11} = 1 - \frac{x_1}{8 \cdot x_7} \leq 0 \quad (43)$$

As Equações 33 e 34 são restrições que visam garantir que os momentos e esforços normais solicitantes sejam inferiores aos momentos e esforços normais resistentes das seções. A Equação 35 limita a dimensão da altura da seção em no máximo cinco vezes a dimensão da base. Os espaçamentos mínimos e máximos para as armaduras são restringidos pelas Equações 36 e 37. As Equações 38 e 39 definem as taxas de armadura mínima e máxima, respectivamente. A restrição da Equação 40 garante que as seções não possuam área menor que a área de concreto mínimo ($A_{Cmín} = 360 \text{ cm}^2$). Finalmente, as Equações 41, 42 e 43

impedem que os diâmetros das barras de aço sejam maiores que 1/8 da dimensão da base das seções.

Em caso de não atendimento de alguma das restrições, a função objetivo é penalizada. Isso é realizado acrescentando-se à função objetivo $f(x)$ uma função de penalidade $P(x)$, como mostrado na Equação 45, sendo $F(x)$ a função penalizada. Ou seja, o problema com restrições é transformado em um problema sem restrições através da adição de uma função de penalização. A função de penalidade $P(x)$ é calculada pela Equação 44, onde $g(x)$ corresponde ao valor de cada uma das m restrições não atendidas e r diz respeito ao fator de penalização adotado. Após uma série de experimentos, adotou-se r igual a 10^4 nas aplicações numéricas desenvolvidas neste trabalho.

$$P(x) = \sum_{i=1}^m r \cdot g_i(x) \quad (44)$$

$$F(x) = f(x) + P(x) \quad (45)$$

Além das restrições de desigualdade, devem ainda ser respeitadas as chamadas restrições laterais do problema, as quais dizem respeito ao intervalo que algumas das variáveis obrigatoriamente devem estar contidas. As variáveis x_1 e x_2 podem pertencer aos intervalos contidos nas Equações 46 e 47 (unidades expostas em cm), sendo o limite inferior (x^l) ora igual a 19 cm, ora igual a 12 cm, dependendo das análises. Lembrando que, neste segundo caso, onde as dimensões dos pilares podem assumir dimensões mínimas de 12 cm, os esforços N_{sd} e M_{sd} são majorados, de acordo com o fator γ_n (Tabela 1). Os valores superiores dos conjuntos acima foram estabelecidos de forma a serem grandes o suficiente para não interferir nos resultados do processo de otimização. E conforme já citado, ambos os conjuntos podem ser discretizados tanto para valores a cada 1 cm, como para múltiplos de 5 cm.

$$x_1 \in [x^l; \dots; 200], \text{ em cm} \quad (46)$$

$$x_2 \in [x^l; \dots; 1000], \text{ em cm} \quad (47)$$

Para as variáveis x_4 e x_6 (número de barras nas duas camadas paralelas a x_1 e número de camadas com duas barras paralelas a x_2 , respectivamente), tomou-se o intervalo entre 0 e 18. O limite superior também foi estabelecido de modo a ser grande o suficiente para não interferir nos resultados obtidos.

As variáveis x_3 , x_5 e x_7 , referentes às bitolas das barras de aço, podem assumir valores do conjunto exposto abaixo, referente a diâmetros comerciais. As unidades estão expostas em mm.

$$x_3, x_5, x_7 \in [10; 12,5; 16; 20; 22; 25], \text{ em mm} \quad (48)$$

E por fim, a variável x_8 , referente à classe de resistência adotada para o concreto (f_{ck}) pode assumir valores dentro do conjunto exposto abaixo, referente à faixa de valores especificados na norma brasileira de concreto armado ABNT NBR 6118 (2007). As unidades estão expostas em MPa.

$$x_8 \in [20; 25; 30; 35; 40; 45; 50], \text{ em MPa} \quad (49)$$

4. APLICAÇÕES NUMÉRICAS

4.1 Introdução

A formulação proposta no capítulo anterior, visando à otimização da seção de pilares de concreto armado submetidos à flexocompressão reta, bem como a verificação da capacidade resistente dessas seções segundo os requisitos de norma (ABNT NBR 6118, 2007), foi implementada em um algoritmo, através da linguagem de programação *Fortran 90*. Foi aproveitado parte do algoritmo inicialmente desenvolvido por Bordignon (2010), sendo incluído em sua estrutura o método heurístico de otimização Busca Harmônica.

Para a validação da formulação proposta, bem como do próprio método de otimização utilizado, foram desenvolvidas uma série de aplicações numéricas, inicialmente referentes à otimização dos custos monetários (item 4.2). Os exemplos desenvolvidos dizem respeito a problemas estudados por outros autores, os quais propuseram suas soluções a partir de outros métodos de otimização ou por métodos convencionais de dimensionamento.

Em algumas dessas aplicações numéricas, houve o ajuste nos custos obtidos nas referências bibliográficas originais, considerando questões de arredondamento distinto, bem como a utilização de pesos específicos diferentes para o aço por parte de alguns autores. A fim de se uniformizar os comparativos, os custos, quando necessário, foram recalculados para o peso específico de 77 kN/m^3 .

Para todos os exemplos desenvolvidos adotou-se módulo de elasticidade do aço (E_s) de 210 GPa e cobrimento de armadura (c) de 4 cm. A obtenção das dimensões ótimas das seções ocorreu de duas maneiras distintas nos exemplos desenvolvidos. Numa primeira situação, era permitido que a base e a altura das seções fossem múltiplas de 1 cm, enquanto que, num segundo momento, as mesmas poderiam variar a cada 5 cm, visando propor uma situação de maior facilidade para a execução prática. A escolha por esta medida deu pelo fato das tábuas de pinho, usualmente utilizadas para a convecção das fôrmas, serem vendidas também em dimensões múltiplas de 5 cm.

Na sequência (item 4.3) é apresentada toda a metodologia de calibração dos parâmetros do algoritmo do método da Busca Harmônica, citando os melhoramentos na estrutura original do método. É realizado também um estudo comparativo entre os algoritmos do método da Busca Harmônica e do *Simulated Annealing*. Na realidade, este estudo dos

parâmetros foi efetuado de forma concomitante às aplicações numéricas do item 4.2, utilizando alguns desses exemplos na tentativa de melhoria do algoritmo proposto. Por este fato, a apresentação desse estudo, no presente documento, é realizada na sequência das aplicações numéricas relacionadas à otimização da seção de pilares por custos econômicos, pois o mesmo traz referências aos exemplos já então apresentados. De maneira geral, o estudo propôs o melhoramento do algoritmo do método da Busca Harmônica através da inclusão dos parâmetros PAR e bw variáveis, conforme recomendações de Mahadavi et al. (2007), a reinicialização da memória harmônica, quando todas os valores convergem para uma única solução durante a busca, bem como incluiu um critério de parada distinto ao número máximo de iterações. Com as alterações propostas, houve uma melhora na taxa de sucesso de convergência, bem como se reduziu o número de iterações necessárias para se atingir o melhor resultado.

E por fim, no item 4.4, são expostos alguns exemplos referentes à otimização dos custos ambientais das seções dos pilares, tomando-se como referência valores de pontuação ambiental para cada insumo do concreto armado retirados da bibliografia.

4.2 Otimização de Custos Monetários

4.2.1 Exemplo I

Este primeiro exemplo foi estudado inicialmente por Argolo (2000). O autor considerou em sua análise a norma ABNT NBR 6118 (1980). Partindo de uma seção de pilar inicialmente dimensionada por meio de Ábacos de Interação (com seção fixa em 30 x 70 cm), ele propôs uma nova configuração utilizando como método de otimização o método dos Algoritmos Genéticos. As dimensões da seção de concreto bem como as armaduras foram as variáveis do problema, sendo que as dimensões das seções foram detalhadas como múltiplas de 5 cm. Posteriormente, Bordignon (2010) reproduziu o exemplo, empregando, porém, o método *Simulated Annealing*, bem como a norma de concreto armado ABNT NBR 6118 (2007). O autor permitiu a obtenção de dimensões múltiplas de 1 cm nas suas análises.

Neste trabalho, o exemplo foi então reproduzido por meio do método da Busca Harmônica. A fim de se permitir uma comparação direta, foram utilizados os mesmos valores

para os custos unitários do trabalho de Argolo (2000), referentes a março de 2000. Da mesma forma, o par de esforços corresponde ao valor utilizado pelo referido autor e por Bordignon (2010) em seu trabalho. Tais informações são apresentadas na Tabela 2. Foi adotado f_{ck} de 25 MPa e f_{yk} de 500 MPa.

Tabela 2: Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo I.

C_C (R\$/m ³)	C_S (R\$/kg)	C_F (R\$/m ²)	Esforços Solicitantes	
25 MPa	500 MPa	-	N_{sd} (kN)	M_{sd} (kN.m)
125,00	1,27	16,49	2142,86	375

As seções obtidas nos trabalhos anteriores, bem como na presente dissertação, são apresentadas na Figura 18. A Figura 18 (a) mostra a seção obtida por meio de Ábacos de Interação (ARGOLO, 2000), a Figura 18 (b) apresenta o resultado obtido por Algoritmos Genéticos (ARGOLO, 2000), a Figura 18 (c) indica o melhor resultado por meio do *Simulated Annealing* (BORDIGNON, 2010), a Figura 18 (d) refere-se à solução obtida por meio do método da Busca Harmônica com seções de concreto múltiplas de 1 cm, enquanto que a Figura 18 (e) também relaciona-se com a solução obtida com o Busca Harmônica, porém permitindo-se apenas dimensões múltiplas de 5 cm. Na Tabela 3, são mostrados os resultados para os diferentes trabalhos comparados, em termos de consumo de materiais das soluções ótimas, bem como as taxas de armadura (ρ) para cada caso. A Tabela 4 apresenta os custos ótimos obtidos para cada método empregado. Na última coluna é indicada a variação percentual no custo, tomando-se como referência a solução original proposta pelo Ábaco de Interação.

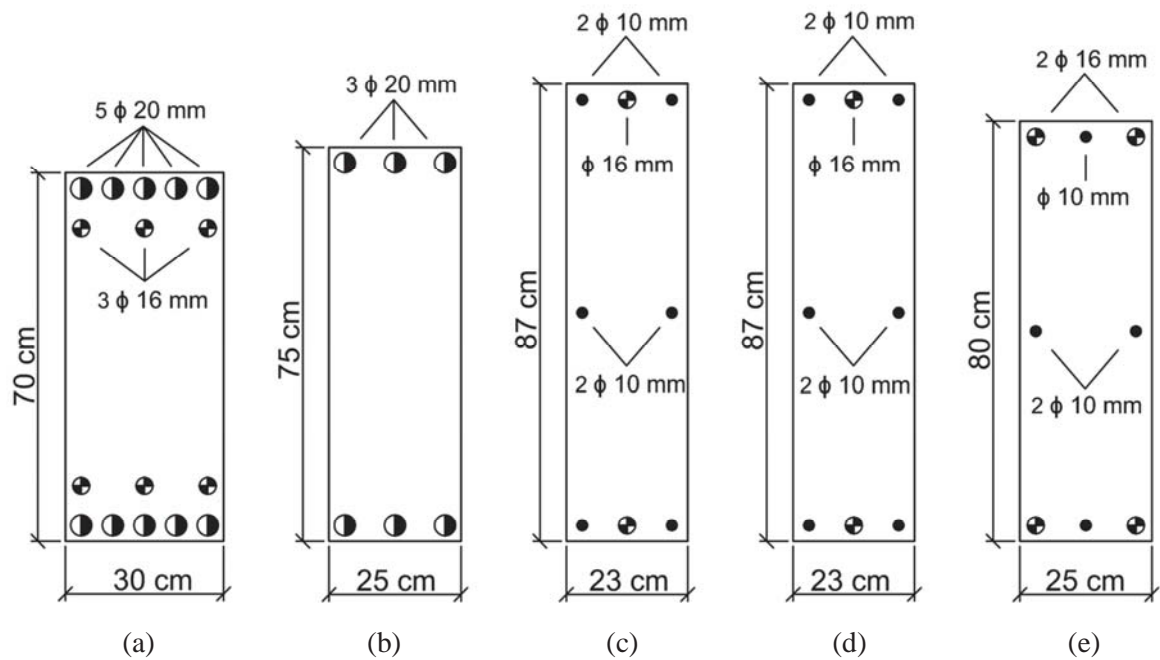


Figura 18: Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo I: (a) Ábaco de Interação; (b) Algoritmos Genéticos; (c) *Simulated Annealing*; (d) Busca Harmônica com seções discretizadas a cada 1 cm; (e) Busca Harmônica com seções discretizadas a cada 5 cm.

Tabela 3: Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo I.

Método	Concreto (cm ²)	Aço (cm ²)	Fôrmas (cm)	ρ (%)
Ábaco de Interação (a)	2100,00	43,48	200,00	2,07%
Algoritmos Genéticos (b)	1875,00	18,85	200,00	1,01%
<i>Simulated Annealing</i> (c)	2001,00	8,73	220,00	0,44%
Busca Harmônica (d)	2001,00	8,73	220,00	0,44%
Busca Harmônica (e)	2000,00	11,18	210,00	0,56%

Tabela 4: Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo I (R\$/m).

Método	Concreto	Aço	Fôrmas	Custo Total	Varição no Custo
Ábaco de Interação (a)	26,25	43,35	32,98	102,58	-
Algoritmos Genéticos (b)	23,44	18,79	32,98	75,21	-26,68%
<i>Simulated Annealing</i> (c)	25,01	8,70	36,28	70,00	-31,76%
Busca Harmônica (d)	25,01	8,70	36,28	70,00	-31,76%
Busca Harmônica (e)	25,00	11,15	34,63	70,78	-31,00%

A partir dos resultados obtidos, é possível verificar que o método da Busca Harmônica também permitiu alcançar o mesmo resultado obtido por Bordignon (2010) com o método

Simulated Annealing, sendo utilizada taxa de armadura próxima à mínima nestes casos. Em relação aos Algoritmos Genéticos, observou-se uma economia de 6,93% no custo total da seção. A solução por Busca Harmônica, considerando dimensões múltiplas de 5 cm, provoca um acréscimo de 1,11% no custo, porém a solução ainda é econômica em relação à obtida pelo Ábaco de Interação (31%) e Algoritmos Genéticos (5,89%). A mesma não consistiu apenas num arredondamento da solução com múltiplos de 1 cm para os múltiplos de 5 cm superiores mais próximos, como a princípio poder-se-ia imaginar, mostrando que essa simplificação nem sempre é a melhor alternativa.

É importante salientar que a análise da seção realizada por Argolo (2000), tanto pelo método prático quanto pelo ótimo, não leva em conta algumas disposições construtivas exigidas pela norma ABNT NBR 6118 (2007) para pilares de concreto armado, como o espaçamento máximo entre as barras. Assim, as soluções apresentadas pelo autor não seriam factíveis na ótica da formulação empregada nesse trabalho.

A otimização por Busca Harmônica, cujos resultados foram apresentados acima, foi efetuada permitindo-se dimensão mínima para a base e a altura dos pilares de 19 cm. Após, foi realizado um teste permitindo-se dimensão mínima de 12 cm. Entretanto, não se verificou modificação nas soluções ótimas propostas para este exemplo.

Para este e mais dois exemplos desenvolvidos nesta dissertação (exemplos II e VI), foram realizados alguns testes do algoritmo do método da Busca Harmônica, a fim de se verificar se o mesmo seria capaz de convergir para as soluções ótimas independente do ponto de partida das soluções iniciais. Em algumas tentativas, todas as variáveis assumiram inicialmente seu valor máximo (limites superiores). Em outras, as mesmas assumiram, inicialmente, seu valor mínimo (limites inferiores). Os resultados obtidos confirmaram a convergência para a solução ótima em ambas as situações, sendo os mesmos apresentados na Figura 19, para o presente exemplo. O gráfico indica a variação do custo (função não penalizada) de acordo com o número de iterações decorridas. Esses resultados foram obtidos com a média de dez tentativas sequenciais.

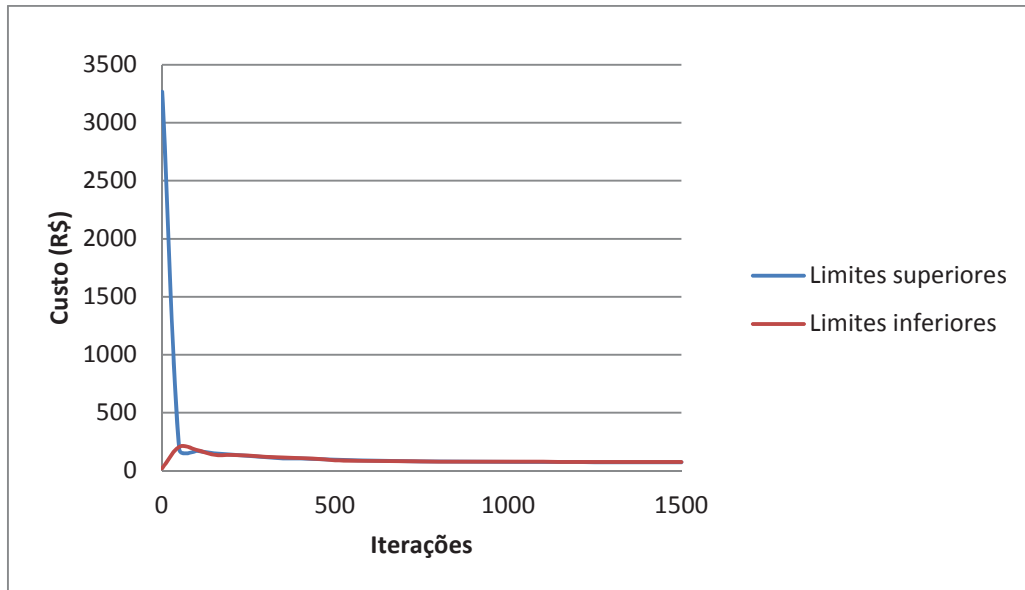


Figura 19: Convergência da função custo para o ótimo independente da solução inicial (exemplo I).

4.2.2 Exemplo II

O segundo exemplo estudado foi retirado originalmente do trabalho de Zielinski, Long e Troitsky (1995). As seções dos pilares foram verificadas pelos autores de acordo com a norma canadense CSA CAN3-A23.3-M84. O dimensionamento ótimo foi baseado em Programação Matemática (P.M.), utilizando o Método de Powell. O par de esforços empregado no exemplo, bem como os respectivos custos, são mostrados na Tabela 5. Utilizou-se f_{ck} de 30 MPa e f_{yk} igual a 500 MPa.

Tabela 5: Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo II.

C_C (R\$/m ³)	C_S (R\$/kg)	C_F (R\$/m ²)	Esforços Solicitantes	
			N_{sd} (kN)	M_{sd} (kN.m)
30 MPa	400 MPa	-	1780	362
110,00	2,10	27,00		

Posteriormente o mesmo exemplo foi estudado por Argolo (2000) e Camp, Pezeshk e Hansson (2003), que otimizaram as seções por meio do método Algoritmos Genéticos, e por Bordignon (2010), utilizando o *Simulated Annealing*. Argolo (2000) utilizou a norma canadense, Camp, Pezeshk e Hansson (2003) empregaram a norma norte-americana ACI 318-89, enquanto que o Bordignon (2010) fez a verificação da seção de acordo com norma

brasileira ABNT NBR 6118 (2007). O problema foi então reproduzido neste trabalho, utilizando o método da Busca Harmônica.

As seções obtidas em cada estudo, bem como no presente trabalho são apresentadas na Figura 20. A Figura 20 (a) mostra a seção alcançada por otimização matemática (ZIELINSKI, LONG E TROITSKY, 1995), a Figura 20 (b) relaciona-se com a solução ótima por Algoritmos Genéticos (ARGOLO, 2000), a Figura 20 (c) refere-se à seção por *Simulated Annealing* (BORDIGNON, 2010), a Figura 20 (d) corresponde à solução ótima pelo Busca Harmônica com dimensões múltiplas de 1 cm, enquanto que a Figura 20 (e) mostra o detalhamento obtido também pelo Busca Harmônica, porém considerando dimensões múltiplas de 5 cm. A seção obtida por Zielinski, Long e Troitsky (1995) foi ajustada para valores práticos de execução, múltiplos de 5 cm. No resultado sem o ajuste, a seção seria de 31,96 cm x 59,36 cm, com área de aço de 25,8 cm² (variáveis contínuas). A seção obtida por Algoritmos Genéticos no trabalho de Argolo (2000) também foi ajustada para dimensões múltiplas de 5 cm. Camp, Pezeshk e Hansson (2003) trabalharam com variáveis contínuas obtendo seção de 30,48 cm x 63,5 cm, e área de aço de 20,26 cm².

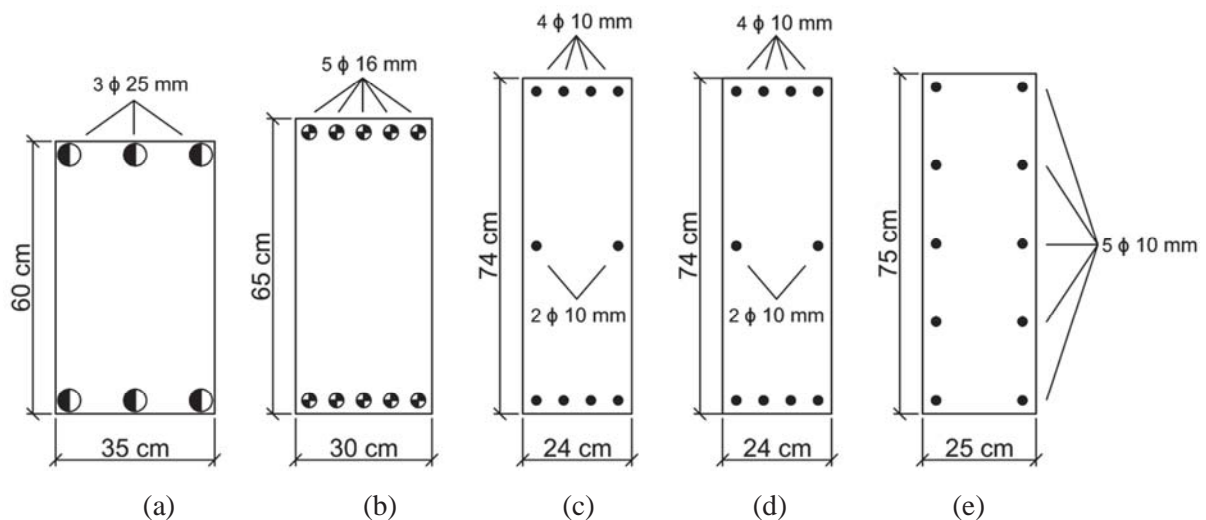


Figura 20: Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo II: (a) Otimização Matemática; (b) Algoritmos Genéticos; (c) *Simulated Annealing*; (d) Busca Harmônica com seções discretizadas a cada 1 cm; (e) Busca Harmônica com seções discretizadas a cada 5 cm.

É importante salientar, também para esse exemplo, que as seções obtidas por Zielinski, Long E Troitsky (1995) e Argolo (2000) não levam em conta algumas disposições construtivas exigidas pela norma ABNT NBR 6118 (2007) para pilares de concreto armado,

como o espaçamento máximo entre as barras. Assim, as soluções apresentadas por estes autores não seriam factíveis na ótica da formulação empregada nesse trabalho.

Na Tabela 6 são detalhados os resultados para cada método considerado para esta aplicação numérica, em termos de consumo de materiais. Já na Tabela 7, são mostrados os respectivos resultados em termos de custos ótimos. Na última coluna é mostrada a variação percentual do custo em relação à solução ótima inicial obtida por Zielinski, Long e Troitsky (1995) com otimização matemática.

Tabela 6: Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo II.

Método	Concreto (cm ²)	Aço (cm ²)	Fôrmas (cm)	ρ (%)
Otimização Matemática ¹	1897,15	25,80	182,64	1,36%
Otimização Matemática (a)	2100,00	29,45	190,00	1,40%
Algoritmos Genéticos ²	1935,48	20,26	187,96	1,05%
Algoritmos Genéticos (b)	1950,00	20,11	190,00	1,03%
<i>Simulated Annealing</i> (c)	1776,00	7,85	196,00	0,44%
Busca Harmônica (d)	1776,00	7,85	196,00	0,44%
Busca Harmônica (e)	1875,00	7,85	200,00	0,42%

1) Resultado obtido com variáveis contínuas (ZIELINSKI, LONG, TROITSKY, 1995).
2) Resultado obtido com variáveis contínuas (CAMP, PEZESHK, HANSSON, 2003).

Tabela 7: Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo II (R\$/m).

Método	Concreto	Aço	Fôrmas	Custo Total	Varição no Custo
Otimização Matemática ¹	20,87	42,53	49,31	112,71	-
Otimização Matemática (a)	23,10	48,55	51,30	122,95	9,08%
Algoritmos Genéticos ²	21,29	33,40	50,75	105,44	-6,45%
Algoritmos Genéticos (b)	21,45	33,15	51,30	105,90	-6,04%
<i>Simulated Annealing</i> (c)	19,54	12,94	52,92	85,40	-24,23%
Busca Harmônica (d)	19,54	12,94	52,92	85,40	-24,23%
Busca Harmônica (e)	20,63	12,94	54,00	87,57	-22,31%

1) Resultado obtido com variáveis contínuas (ZIELINSKI, LONG, TROITSKY, 1995).
2) Resultado obtido com variáveis contínuas (CAMP, PEZESHK, HANSSON, 2003).

Como é possível verificar, o algoritmo implementado nessa dissertação conseguiu alcançar o melhor resultado obtido pelos demais trabalhos, o qual foi alcançado por Bordignon (2010). A taxa de armadura ficou próxima à mínima (0,44% e 0,42%) nas soluções ótimas alcançadas. O custo ótimo obtido foi 19,35% menor que o alcançado por Algoritmos Genéticos por Argolo (2000), 19,01% menor que o obtido, também por Algoritmos

Genéticos, por Camp, Pezeshk e Hansson (2003) e 30,54% menor que o obtido por otimização matemática por Zielinski, Long e Troitsky (1995), considerando a seção prática.

A solução proposta por Busca Harmônica, porém considerando dimensões de seção múltiplas de 5 cm, também reduz efetivamente o custo em relação às soluções alcançadas por otimização matemática (28,78%) e Algoritmos Genéticos (17,31%), considerando apenas as seções práticas. Em relação à solução proposta pelo Busca Harmônica, mas com dimensões de seção a cada centímetro, o acréscimo obtido foi de apenas 2,54%. Houve, nesse caso, um arredondamento das seções de uma solução para a outra, porém as áreas de aço sofreram variação em sua disposição.

A otimização por Busca Harmônica, cujos resultados foram apresentados acima, foi efetuada permitindo-se dimensão mínima para a base e a altura dos pilares de 19 cm. Após, assim como no exemplo anterior, foi realizado um teste permitindo-se dimensão mínima de 12 cm. Novamente não se verificou modificação nas soluções ótimas propostas.

4.2.3 Exemplo III

Esta aplicação numérica também foi proposta originalmente por Zielinski, Long e Troitsky (1995). Assim como no exemplo II, houve a otimização das seções de pilares curtos, as quais foram verificadas de acordo com a norma canadense CSA CAN3-A23.3-M84. O dimensionamento ótimo no trabalho original foi baseado em Programação Matemática (P.M.), utilizando o Método de Powell. Os custos empregados para os materiais, bem como os esforços solicitantes, são mostrados na Tabela 8. Foi utilizado concreto de f_{ck} igual a 30 MPa e aço de f_{yk} igual a 400 MPa.

Tabela 8: Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo III.

C_C (R\$/m ³)	C_S (R\$/kg)	C_F (R\$/m ²)	Esforços Solicitantes	
			N_{sd} (kN)	M_{sd} (kN.m)
30 MPa	400 MPa	-	N_{sd} (kN)	M_{sd} (kN.m)
110,00	2,10	27,00	2000	562

Camp, Pezeshk e Hansson (2003) repetiram o mesmo exemplo, porém utilizaram os Algoritmos Genéticos como método de otimização, além de empregarem a norma norte-americana ACI 318-89. Ambos os trabalhos citados trabalharam com variáveis contínuas,

além de não proporem soluções práticas para o detalhamento final das soluções. No primeiro trabalho, a solução final teria seção de concreto de 47,4 cm x 49,91 cm, com área de aço de 73,23 cm². No segundo, a seção de concreto ótima obtida foi de 30,48 cm x 74,93 cm, com área de aço de 25,81 cm².

Os resultados destes trabalhos foram então comparados com o método da Busca Harmônica. Seções com dimensões entre 12 e 19 cm foram permitidas, porém as seções ótimas não convergiram para este intervalo. O desenho das seções obtidas é mostrado na Figura 21. A Figura 21 (a) apresenta a seção com dimensões de seção múltiplas de 1 cm, enquanto que a Figura 21 (b) mostra a seção obtida com dimensões múltiplas de 5 cm.

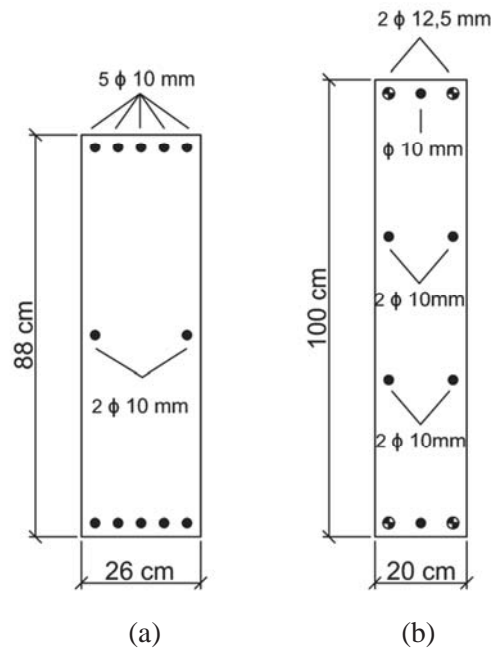


Figura 21: Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo III: (a) Busca Harmônica com seções discretizadas a cada 1 cm; (b) Busca Harmônica com seções discretizadas a cada 5 cm.

Os resultados obtidos para os quatro casos citados são resumidos nas Tabelas 9 e 10. Na primeira, é mostrado o consumo de materiais para cada solução ótima, bem como as taxas de armadura. Na segunda, expõem-se os custos obtidos para cada uma das soluções, bem como se apresenta a variação percentual obtida no custo, tomando-se como referência a solução do trabalho de Zielinski, Long e Troitsky (1995).

Tabela 9: Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo III.

Método	Concreto (cm²)	Aço (cm²)	Fôrmas (cm)	ρ (%)
Otimização Matemática	2365,73	73,23	194,62	3,10%
Algoritmos Genéticos	2283,87	25,81	210,82	1,13%
Busca Harmônica (a)	2288,00	9,42	228,00	0,41%
Busca Harmônica (b)	2000,00	9,62	240,00	0,48%

Tabela 10: Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo III (R\$/m).

Método	Concreto	Aço	Fôrmas	Custo Total	Varição no Custo
Otimização Matemática	26,02	120,72	52,55	199,29	-
Algoritmos Genéticos	25,12	42,55	56,92	124,59	-37,48%
Busca Harmônica (a)	25,17	15,53	61,56	102,26	-48,69%
Busca Harmônica (b)	22,00	15,86	64,80	102,66	-48,49%

Os resultados obtidos mostram que o Busca Harmônica foi efetivo em alcançar melhores soluções tanto em relação à otimização matemática, como em relação à heurística Algoritmos Genéticos. As taxas de armadura das soluções ótimas pelo Busca Harmônica ficaram próximas da mínima. Em relação ao primeiro método, a economia chegou a 48,69%, enquanto que em relação ao segundo, a mesma foi de 17,92%, tomando-se como referência a solução da Figura 21 (a). Mesmo a solução da Figura 21 (b) é mais econômica que as obtidas por outros métodos, apresentando acréscimo de apenas 0,39% no custo. Os desenhos das soluções ótimas para dimensões múltiplas de 1 cm e 5 cm ficaram bastante diferentes entre si, ou seja, a seção da Figura 21 (b) não correspondeu a um simples arredondamento para cima das dimensões da seção da Figura 21 (a) para os múltiplos de 5 cm mais próximos.

4.2.4 Exemplo IV

O próximo exemplo estudado foi obtido a partir do trabalho de Bastos (2004). Foi comparado o dimensionamento de um pilar real, pertencente a uma torre de resfriamento de uma usina termelétrica, com o dimensionamento por meio do método de otimização dos Algoritmos Genéticos, obtendo-se uma economia de quase 20% com o uso da heurística. O autor empregou a norma ABNT NBR 6118 (1980) nas análises. O pilar originalmente havia

sido calculado a partir de um programa para dimensionamento de seções de concreto submetidos à flexão oblíqua, chamado FLEOB. Os esforços de flexocompressão reta a qual o pilar estava submetido são expostos na Tabela 11, bem como são informados os custos empregados para os materiais. Adotaram-se f_{ck} igual a 28 MPa e f_{yk} igual a 400 MPa. Foram consideradas dimensões múltiplas de 5 cm para o detalhamento das seções de concreto.

Tabela 11: Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo IV.

C_C (R\$/m ³)	C_S (R\$/kg)	C_F (R\$/m ²)	Esforços Solicitantes	
25 MPa	500 MPa	-	N_{sd} (kN)	M_{sd} (kN.m)
390,00	7,60	78,00	121,4	126,7

O problema foi então repetido neste trabalho, utilizando o método da Busca Harmônica. Permitiram-se na análise a obtenção de seções com dimensões de até 12 cm, conforme as prescrições da ABNT NBR 6118 (2007). As seções para os pilares obtidas neste trabalho, por meio do método da Busca Harmônica, e por Bastos (2004), utilizando os Algoritmos Genéticos, são mostradas na Figura 22. A Figura 22 (a) se refere à seção dimensionada por Algoritmos Genéticos (BASTOS, 2004), a Figura 22 (b) mostra a seção obtida pelo Busca Harmônica, com as dimensões da seção de concreto variando a cada centímetro, e a Figura 22 (c) apresenta o resultado também para o Busca Harmônica, porém com a base e a altura da seção podendo variar a cada 5 cm.

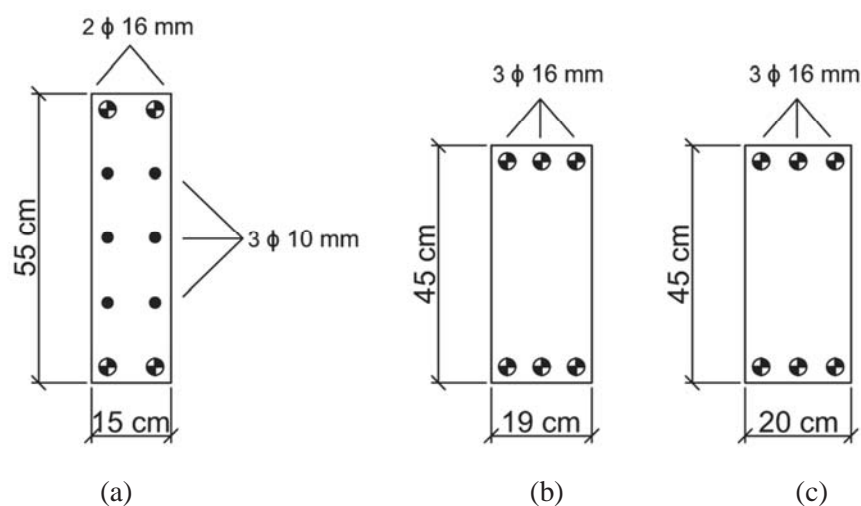


Figura 22: Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo IV: (a) Algoritmos Genéticos; (b) Busca Harmônica com seções discretizadas a cada 1 cm; (c) Busca Harmônica com seções discretizadas a cada 5 cm.

As quantidades de materiais empregadas nas seções, para cada um dos três casos são mostrados na Tabela 12, enquanto que os custos obtidos para cada situação são apresentados na Tabela 13. A Tabela 12 também apresenta as respectivas taxas de armadura (ρ), em sua última coluna, enquanto que a Tabela 13 mostra a variação obtida no custo em relação ao custo ótimo alcançado por meio dos Algoritmos Genéticos.

Tabela 12: Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo IV.

Método	Concreto (cm²)	Aço (cm²)	Fôrmas (cm)	ρ (%)
Algoritmos Genéticos (a)	825,00	12,75	140,00	1,55%
Busca Harmônica (b)	855,00	12,06	128,00	1,41%
Busca Harmônica (c)	900,00	12,06	130,00	1,34%

Tabela 13: Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo IV (R\$/m).

Método	Concreto	Aço	Fôrmas	Custo Total	Varição no Custo
Algoritmos Genéticos (a)	32,18	76,07	109,20	217,44	-
Busca Harmônica (b)	33,35	71,95	99,84	205,16	-5,65%
Busca Harmônica (c)	35,10	71,95	101,40	208,47	-4,13%

Através dos resultados mostrados, é possível perceber que o método da Busca Harmônica foi novamente efetivo em obter uma solução de menor custo que os Algoritmos Genéticos. Considerando o detalhamento das seções de concreto com dimensões múltiplas de 5 cm, a economia chegou a 4,13%.

Entre a solução obtida para dimensões da seção transversal de 1 cm e a solução alcançada com dimensões múltiplas de 5 cm, houve pequena variação no custo (aumento de 1,6%), tendo em vista que houve apenas o aumento da base em 1 cm. Neste caso, um simples arredondamento para cima das dimensões de base e altura, obtidas para o primeiro caso, para múltiplos de 5 cm, corresponderia a melhor solução possível, para o segundo caso considerado. Novamente, nenhuma das seções obteve dimensões menores que 19 cm.

4.2.5 Exemplo V

O próximo exemplo apresentado foi retirado do trabalho de Nina (2006), onde foram otimizadas as seções de pilares submetidos a esforços de flexocompressão reta por meio de método matemático de otimização (Programação Quadrática Sequencial). Foram consideradas as dimensões da base fixas em 24 cm, sendo empregada a norma ABNT NBR 6118 (2003) nas análises. As variáveis foram consideradas contínuas, tanto as dimensões das seções do concreto como as áreas de aço. O presente trabalho comparou os resultados obtidos pelo referido autor, para alguns pares de esforços, utilizando o método da Busca Harmônica. Os pares de esforços utilizados nas análises são apresentados na Tabela 14. A classe de resistência adotada para o concreto (f_{ck}) foi de 20 MPa, enquanto que empregou-se classe de resistência para o aço (f_{yk}) de 500 MPa. Consideraram-se os seguintes custos para os materiais, retirados do trabalho original: $C_c = 226,58$ R\$/m³; $C_s = 4,36$ R\$/kg; $C_f = 42,10$ R\$/m².

Tabela 14: Pares de esforços utilizados no exemplo V.

Pares de Esforços	Esforços Solicitantes	
	N_{sd} (kN)	M_{sd} (kN.m)
1	500	150
2	1000	300
3	1500	450
4	2000	600
5	2500	750
6	3000	900
7	3500	1050
8	4000	1200

Os resultados obtidos para os oito pares de esforços testados são apresentados na Tabela 15, no que diz respeito ao consumo de materiais e taxas de armadura (ρ). Os resultados em termos de custos são mostrados na Tabela 16. Na última coluna desta tabela é apresentada a variação obtida no custo em relação à otimização matemática empregada por Nina (2006).

Tabela 15: Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo V.

Pares de Esforços	Método	Concreto (cm ²)	Aço (cm ²)	Fôrmas (cm)	ρ (%)
1	Otimização Matemática	960,00	12,56	128,00	1,31%
	Busca Harmônica	1128,00	8,93	142,00	0,79%
2	Otimização Matemática	1885,92	7,54	205,16	0,40%
	Busca Harmônica	1776,00	8,73	196,00	0,49%
3	Otimização Matemática	2342,16	9,37	243,18	0,40%
	Busca Harmônica	2256,00	10,30	236,00	0,46%
4	Otimização Matemática	2752,08	11,00	277,34	0,40%
	Busca Harmônica	2688,00	11,18	272,00	0,42%
5	Otimização Matemática	2880,00	22,76	288,00	0,79%
	Busca Harmônica	2880,00	18,62	288,00	0,65%
6	Otimização Matemática	2880,00	40,49	288,00	1,41%
	Busca Harmônica	2856,00	34,11	286,00	1,19%
7	Otimização Matemática	2880,00	58,69	288,00	2,04%
	Busca Harmônica	2880,00	53,97	288,00	1,87%
8	Otimização Matemática	2880,00	77,10	288,00	2,68%
	Busca Harmônica	2880,00	75,46	288,00	2,62%

Tabela 16: Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo V (R\$/m).

Pares de Esforços	Método	Concreto	Aço	Fôrmas	Custo Total	Varição no Custo
1	Otimização Matemática	21,75	42,99	53,89	118,65	-
	Busca Harmônica	25,56	30,56	59,78	115,90	-2,31%
2	Otimização Matemática	42,73	25,81	86,37	154,91	-
	Busca Harmônica	40,24	29,88	82,52	152,65	-1,46%
3	Otimização Matemática	53,07	32,07	102,38	187,52	-
	Busca Harmônica	51,12	35,25	99,36	185,74	-0,95%
4	Otimização Matemática	62,36	37,65	116,76	216,77	-
	Busca Harmônica	60,90	38,26	114,51	213,70	-1,41%
5	Otimização Matemática	65,26	77,90	121,25	264,40	-
	Busca Harmônica	65,26	63,73	121,25	250,25	-5,35%
6	Otimização Matemática	65,26	138,58	121,25	325,08	-
	Busca Harmônica	64,71	116,74	120,41	301,85	-7,15%
7	Otimização Matemática	65,26	200,87	121,25	387,38	-
	Busca Harmônica	65,26	184,72	121,25	371,21	-4,17%
8	Otimização Matemática	65,26	263,88	121,25	450,39	-
	Busca Harmônica	65,26	258,27	121,25	444,78	-1,24%

Através dos resultados apresentados, é possível perceber que o Busca Harmônica foi efetivo em obter soluções mais econômicas que as obtidas por Nina (2006) empregando método matemático de otimização, para os oito pares testados, com economia variando de 0,95% a 7,15%. Há de se destacar também, que o trabalho de referência utilizou variáveis contínuas, tanto para as dimensões da seção de concreto como para as áreas de armadura. Num dimensionamento prático, os custos se elevariam, tendo em vista que a discretização das variáveis faria crescer o consumo de materiais. Em outros pares de exemplos deste mesmo trabalho, onde as seções obtidas pela autora foram mais econômicas, a comparação foi afetada por este fato.

4.2.6 Exemplo VI

O próximo exemplo estudado no presente trabalho foi a reprodução de um problema proposto por Bordignon (2010) por meio do método da Busca Harmônica. Esta aplicação numérica objetivou, no trabalho original, mostrar a influência da classe de resistência do concreto na obtenção das soluções ótimas. Os custos dos insumos, bem como o par de esforços considerados são mostrados na Tabela 17. Foram consideradas as resistências para o concreto (f_{ck}) de 20, 30 e 40 MPa. A resistência utilizada para o aço (f_{yk}) foi de 500 MPa.

Tabela 17: Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo VI.

C_C (R\$/m ³)	C_S (R\$/kg)	C_F (R\$/m ²)	Esforços Solicitantes	
			N_{sd} (kN)	M_{sd} (kN.m)
20 MPa	245,00	-		
30 MPa	275,00	6,56	42,36	2480
40 MPa	305,00			324,89

As seções obtidas pelo método de otimização Busca Harmônica, considerando dimensões de seção múltiplas de 1 cm, foram exatamente às mesmas que as obtidas por meio do *Simulated Annealing* (BORDIGNON, 2010), para as três classes de resistência estudadas. As mesmas são apresentadas na Figura 23. Utilizando-se dimensões múltiplas de 5 cm para as seções, na otimização com o Busca Harmônica, obtiveram-se as seções detalhadas na Figura

24, as quais ficaram bastante próximas às soluções propostas com dimensões múltiplas de 1 cm.

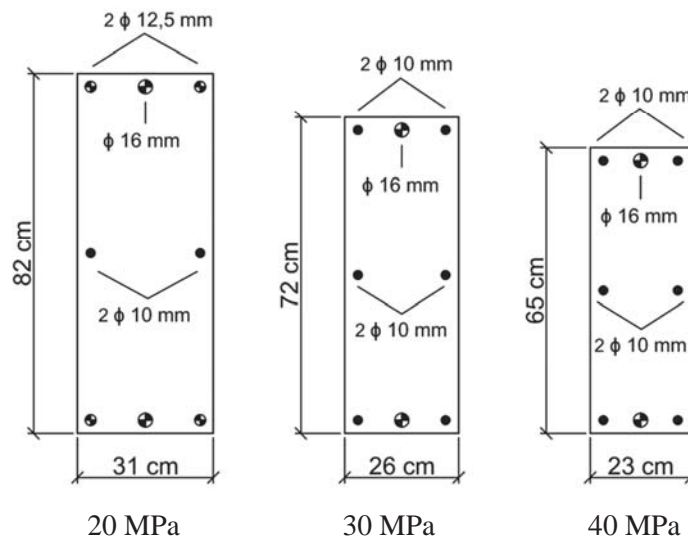


Figura 23: Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo VI (dimensões múltiplas de 1 cm).

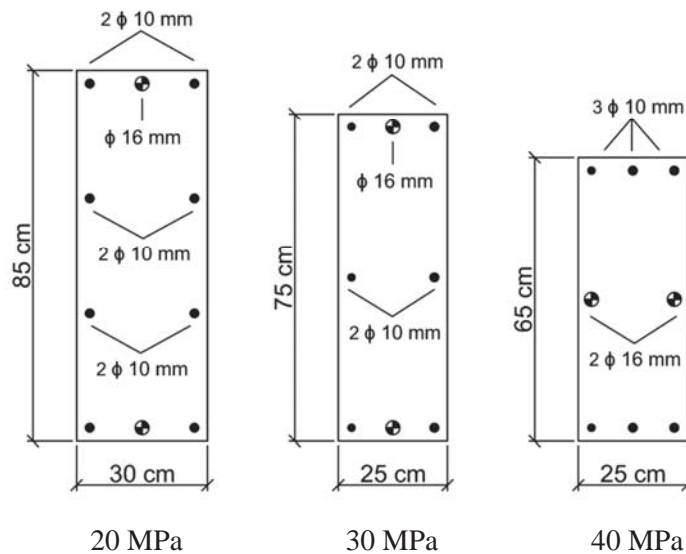


Figura 24: Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo VI (dimensões múltiplas de 5 cm).

Conforme Bordignon (2010) já havia indicado em seu trabalho, na medida em que a classe de resistência do concreto (f_{ck}) aumenta, menor a seção de concreto, maior a taxa de armadura e menor o custo ótimo obtido. Os resultados obtidos, em termos de consumo de materiais e de custos ótimos, para as três classes de resistência, são mostrados na Tabela 18 e 19, respectivamente. A última coluna da Tabela 19 apresenta o acréscimo no custo ao se trabalhar com dimensões múltiplas de 5 cm em relação às seções detalhadas com dimensões a cada centímetro.

Tabela 18: Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo VI.

f_{ck}	Método	Concreto (cm ²)	Aço (cm ²)	Fôrmas (cm)	ρ (%)
20 MPa	<i>Simulated Annealing</i>	2542,00	10,50	226,00	0,41%
	Busca Harmônica (1 cm)	2542,00	10,50	226,00	0,41%
	Busca Harmônica (5 cm)	2550,00	10,30	230,00	0,40%
30 MPa	<i>Simulated Annealing</i>	1872,00	8,73	196,00	0,47%
	Busca Harmônica (1 cm)	1872,00	8,73	196,00	0,47%
	Busca Harmônica (5 cm)	1875,00	8,73	200,00	0,47%
40 MPa	<i>Simulated Annealing</i>	1495,00	8,73	176,00	0,58%
	Busca Harmônica (1 cm)	1495,00	8,73	176,00	0,58%
	Busca Harmônica (5 cm)	1625,00	8,73	180,00	0,54%

Tabela 19: Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo VI (R\$/m).

f_{ck}	Método	Concreto	Aço	Fôrmas	Custo Total	Varição no Custo
20 MPa	<i>Simulated Annealing</i>	62,28	54,07	95,73	212,09	-
	Busca Harmônica (1 cm)	62,28	54,07	95,73	212,09	-
	Busca Harmônica (5 cm)	62,48	53,04	97,43	212,97	0,41%
30 MPa	<i>Simulated Annealing</i>	51,48	44,96	83,03	179,48	-
	Busca Harmônica (1 cm)	51,48	44,96	83,03	179,48	-
	Busca Harmônica (5 cm)	51,56	44,96	84,72	181,26	0,99%
40 MPa	<i>Simulated Annealing</i>	45,60	44,96	74,55	165,13	-
	Busca Harmônica (1 cm)	45,60	44,96	74,55	165,13	-
	Busca Harmônica (5 cm)	49,56	44,96	76,25	170,79	3,43%

Como é possível verificar, o acréscimo de custos para as seções dimensionadas com múltiplos de 5 cm foi de apenas 0,41%, 0,99% e 3,43% em relação às seções otimizadas com dimensões múltiplas de 1 cm, para as classes de 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa, respectivamente.

A otimização por Busca Harmônica foi feita, nas análises acima, permitindo-se dimensão mínima para a base e a altura dos pilares de 19 cm. Na sequência, foi realizado um teste permitindo-se dimensão mínima de 12 cm, assim como já havia sido feito para os exemplos I e II. Novamente, não se verificou modificação nas soluções ótimas propostas.

Por fim, fez-se um último teste, colocando-se o f_{ck} como variável do problema de otimização pelo Busca Harmônica, podendo o mesmo assumir as três classes antes já citadas (20, 30 e 40 MPa). O algoritmo de otimização foi capaz de encontrar as soluções ótimas anteriormente propostas, referentes a um f_{ck} de 40 MPa.

4.2.7 Exemplo VII

A próxima aplicação numérica consiste no dimensionamento de um pilar submetido aos esforços de flexocompressão reta expostos na Tabela 20, por meio do algoritmo do método da Busca Harmônica desenvolvido. O par de esforços foi retirado de um dos exemplos desenvolvidos por Argolo (2000). A classe de resistência do concreto (f_{ck}) foi definida como variável para este exemplo, podendo estar compreendida entre 20 e 40 MPa. A resistência do aço (f_{yk}) foi adotada como 500 MPa. A Tabela 20 apresenta, também, os custos dos materiais empregados, estando os mesmos atualizados para o mês de maio de 2012, considerando o estado do Rio Grande do Sul (GUIA DA CONSTRUÇÃO, 2012).

Tabela 20: Custos dos materiais e esforços solicitantes para o exemplo VII.

C_C (R\$/m ³)	C_S (R\$/kg) 500 MPa	C_F (R\$/m ²) -	Esforços Solicitantes	
			N_{sd} (kN)	M_{sd} (kN.m)
20 MPa	255,00			
25 MPa	276,00			
30 MPa	296,00	5,57	45,69	2142,86 375
35 MPa	313,00			
40 MPa	331,00			

As seções ótimas obtidas nesse exemplo são mostradas na Figura 25. Num primeiro momento, as dimensões da seção de concreto poderiam assumir valores a cada centímetro, de acordo com a Figura 25 (a). Em um segundo momento, a seção obtida poderia contar apenas com dimensões múltiplas de 5 cm, como apresentado na Figura 25 (b). Foi permitida nas análises a obtenção de seções com dimensão mínima de 12 cm.

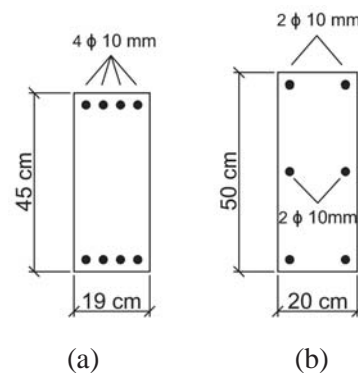


Figura 25: Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo VII: (a) Busca Harmônica com seções discretizadas a cada 1 cm; (b) Busca Harmônica com seções discretizadas a cada 5 cm.

Como é possível perceber, novamente a segunda solução ótima não representa um simples arredondamento para cima das dimensões da primeira solução ótima para valores múltiplos de 5 cm. Na Tabela 21 é mostrado o consumo de cada material nas duas soluções obtidas, enquanto que na Tabela 22 são apresentados os custos das seções.

Tabela 21: Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo VII.

Método	Concreto (cm²)	Aço (cm²)	Fôrmas (cm)	ρ (%)
Busca Harmônica (a)	855,00	6,28	128,00	0,73%
Busca Harmônica (b)	1000,00	4,71	140,00	0,47%

Tabela 22: Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo VII (R\$/m).

Método	Concreto	Aço	Fôrmas	Custo Total	Variação no Custo
Busca Harmônica (a)	28,30	27,46	58,48	114,26	-
Busca Harmônica (b)	33,10	20,59	63,97	117,67	2,98%

Como verificado na Tabela 22, a variação no custo entre as duas soluções foi de apenas 2,98%. Ambas as soluções ótimas utilizaram o maior f_{ck} considerado.

4.3 Estudos dos Parâmetros do Método da Busca Harmônica

4.3.1 Algoritmo Original

A versão inicial do algoritmo de otimização pelo método da Busca Harmônica seguiu basicamente a estrutura original proposta por Geem, Kim e Loganathan (2001). Neste primeiro algoritmo desenvolvido foi proposta a possibilidade de inclusão de uma harmonia (solução) já conhecida na composição da memória harmônica (conjunto de soluções) inicial. Afinal, uma solução baseada na experiência não precisa ser de todo modo descartada no processo, assim como, dessa maneira, também é possível partir a solução de um resultado anterior obtido pelo mesmo ou outro programa de otimização, numa tentativa de melhora contínua do resultado ótimo obtido.

Nesta primeira versão, fixaram-se os seguintes valores para os parâmetros básicos do método:

- a) Tamanho da Memória Harmônica (HMS): 50
- b) Taxa de Escolha de um Valor da Memória (HMCR): 0,9
- c) Taxa de Ajuste dos Valores (PAR): 0,45
- d) Passo Máximo de Ajuste para o Tom (bw): 1,5
- e) Número Máximo de Improvisos ou Iterações (MI): 255.921

O número máximo de iterações adotado diz respeito à quantidade de iterações usualmente obtida no algoritmo de otimização de seções de pilares pelo *Simulated Annealing* desenvolvido por Bordignon (2010), tendo em vista a realização de comparações com os resultados deste trabalho, bem como pelo fato de se ter acesso ao código fonte do mesmo.

Os demais coeficientes foram fundamentados em sugestões da bibliografia sobre o método da Busca Harmônica, nos quais se podem citar os trabalhos de Lee e Geem (2004), Degertekin (2008), Saka (2009), Saka e Erdal (2009), Hasańcebi, Erdal e Saka (2010), e Degertekin e Hayalioglu (2010).

Por meio de alguns exemplos estudados por Bordignon (2010), verificou-se que, a partir dos parâmetros adotados já nessa fase inicial, já era possível a convergência para as melhores soluções das aplicações numéricas do trabalho de referência, para um pequeno número de tentativas efetuadas.

A partir disso, foram realizadas diversas tentativas de melhoramento do algoritmo original do método da Busca Harmônica, proposto por Geem, Kim e Loganathan (2001), os quais são descritos detalhadamente nos itens da sequência. Para os exemplos desenvolvidos, adotou-se um número de dez tentativas sequenciais para a obtenção do valor ótimo para um dado problema. As soluções iniciais eram tomadas a partir dos limites superiores das variáveis.

4.3.2 Incorporação de Parâmetros Variáveis

A primeira evolução proposta na estrutura do algoritmo de otimização foi a incorporação da possibilidade de se variar os parâmetros PAR e bw , fixos no método original

de Geem, Kim e Loganathan (2001). Essa alternativa foi fundamentada no trabalho de Mahdavi, Fesanghary e Damangir (2007), autores que propuseram o Método da Busca Harmônica Melhorado (IHS), onde os parâmetros bw e PAR variam a uma taxa mínima e máxima ao longo das iterações, respectivamente, de acordo com Equações 26 e 27 (item 2.3.4 deste trabalho). Foram adotados os seguintes valores para os parâmetros variáveis, após algumas tentativas de melhoramento:

- a) bw máximo: 2,0
- b) bw mínimo: 1,0
- c) PAR máximo: 0,5
- d) PAR mínimo: 0,3

Ao compararem-se os resultados obtidos nessa etapa com os alcançados na versão original, verifica-se uma franca evolução no que diz respeito à média do custo ótimo, à pior solução obtida, à frequência de repetições da melhor solução, bem como em relação ao número de iterações necessárias para se chegar ao ótimo. Dessa maneira, a modificação foi aceita e incorporada definitivamente ao algoritmo desenvolvido. Para o exemplo II, foram obtidos os resultados expostos na Tabela 23.

Tabela 23: Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de parâmetros PAR e bw variáveis para o exemplo II.

Algoritmo Adotado	Número de Iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	Nº de Repetições da Melhor Solução ¹
Busca Harmônica original	50.000	85,64	86,05	85,99	0
	100.000	85,40	86,05	85,95	1
	150.000	85,40	86,05	85,95	1
	200.000	85,40	86,05	85,95	1
	255.921	85,40	86,05	85,95	1
Busca Harmônica com parâmetros PAR e bw variáveis	50.000	85,40	86,05	85,78	3
	100.000	85,40	86,05	85,68	3
	150.000	85,40	86,05	85,67	4
	200.000	85,40	86,05	85,66	6
	255.921	85,40	86,05	85,66	6

1) Considerando dez tentativas.

Ao final dessa etapa, foi verificado se uma variação no número de harmonias da memória harmônica, para a nova versão do algoritmo (parâmetros bw e PAR variáveis), acabaria por trazer alguma melhora nos resultados alcançados. Testaram-se valores entre 10 e 180 harmonias, e as tentativas não indicaram algum resultado que recomendasse a troca do valor inicialmente adotado. Dessa forma, foi confirmado o tamanho da memória harmônica (HMS) em 50 harmonias.

4.3.3 Reinicialização da Memória Harmônica

Ao se verificar que nos testes efetuados até então a chance de melhora caía muito durante o decorrer do número de iterações, principalmente na medida em que todas as soluções da memória harmônica ficassem iguais ou muito próximas, decidiu-se por introduzir um processo de reinicialização da memória harmônica, quando todas as soluções convergissem para o mesmo valor.

Inicialmente, propôs-se manter apenas uma das soluções ótimas encontradas até o momento da reinicialização, e modificar todos os demais vetores da memória harmônica, sorteando-se aleatoriamente o valor das variáveis para cada nova solução, dentro do intervalo mínimo e máximo de cada uma delas.

Além disso, propôs-se a introdução de mais uma solução inicial de valor conhecido pelo usuário na estrutura do algoritmo, mantendo-se a reinicialização, a qual correspondeu aos valores mínimos para as variáveis do problema. A solução, dessa forma, passou a partir dos dois limites possíveis para as variáveis: superior e inferior.

Ao se analisar o resultados obtidos para o exemplo I (Tabela 24), nota-se uma grande melhora nos resultados obtidos, com um significativo aumento no número de repetições para a melhor solução do problema, ao se comparar a última versão do algoritmo (com reinicialização e partindo dos limites superior e inferior) em relação à anterior (sem reinicialização e partindo do limite superior). Nas Tabelas 25 e 26 têm-se os resultados obtidos para o exemplo II e para o exemplo VI (40 MPa), respectivamente, onde se observou igual tendência.

Tabela 24: Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de possibilidade de reinicialização da memória harmônica para o exemplo I.

Algoritmo Adotado	Número de Iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	Nº de Repetições da Melhor Solução ³
Busca Harmônica sem reinicialização da memória harmônica ¹	50.000	70,00	71,45	71,05	2
	100.000	70,00	71,45	71,01	2
	150.000	70,00	71,45	71,00	2
	200.000	70,00	71,45	71,00	2
	255.921	70,00	71,45	71,00	2
Busca Harmônica com reinicialização da memória harmônica ²	50.000	70,00	71,38	70,58	2
	100.000	70,00	70,55	70,28	3
	150.000	70,00	70,55	70,21	4
	200.000	70,00	70,55	70,18	6
	255.921	70,00	70,55	70,17	6

1) Uma das soluções iniciais da memória harmônica partindo dos limites superiores das variáveis.

2) Duas das soluções iniciais da memória harmônica partindo do limite superior e do limite inferior das variáveis.

3) Considerando dez tentativas.

Tabela 25: Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de possibilidade de reinicialização da memória harmônica para o exemplo II.

Algoritmo Adotado	Número de Iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	Nº de Repetições da Melhor Solução ³
Busca Harmônica sem reinicialização da memória harmônica ¹	50.000	85,40	86,05	85,78	3
	100.000	85,40	86,05	85,68	3
	150.000	85,40	86,05	85,67	4
	200.000	85,40	86,05	85,66	6
	255.921	85,40	86,05	85,66	6
Busca Harmônica com reinicialização da memória harmônica ²	50.000	85,40	85,82	85,48	4
	100.000	85,40	85,40	85,40	10
	150.000	85,40	85,40	85,40	10
	200.000	85,40	85,40	85,40	10
	255.921	85,40	85,40	85,40	10

1) Uma das soluções iniciais da memória harmônica partindo dos limites superiores das variáveis.

2) Duas das soluções iniciais da memória harmônica partindo do limite superior e do limite inferior das variáveis.

3) Considerando dez tentativas.

Tabela 26: Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de possibilidade de reinicialização da memória harmônica para o exemplo VI, considerando f_{ck} igual a 40 MPa.

Algoritmo Adotado	Número de Iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	Nº de Repetições da Melhor Solução ³
Busca Harmônica sem reinicialização da memória harmônica ¹	50.000	165,13	166,43	165,98	1
	100.000	165,13	166,43	165,96	1
	150.000	165,13	166,43	165,75	3
	200.000	165,13	166,43	165,67	4
	255.921	165,13	166,43	165,60	5
Busca Harmônica com reinicialização da memória harmônica ²	50.000	165,13	166,43	165,82	2
	100.000	165,13	165,97	165,36	6
	150.000	165,13	165,22	165,14	9
	200.000	165,13	165,22	165,14	9
	255.921	165,13	165,13	165,13	10

1) Uma das soluções iniciais da memória harmônica partindo dos limites superiores das variáveis.

2) Duas das soluções iniciais da memória harmônica partindo do limite superior e do limite inferior das variáveis.

3) Considerando dez tentativas.

Após comprovada a evolução do algoritmo com a introdução do processo de reinicialização, propôs-se, além da manutenção de um vetor contendo a melhor solução obtida na memória harmônica, a introdução de duas soluções de valor conhecido, correspondentes aos limites superior e inferior as variáveis. As outras 47 harmonias (para HMS igual a 50) continuaram sendo obtidas de maneira aleatória dentro do limite de valores das variáveis. Não se observou uma variação muito significativa nos resultados obtidos, porém os novos resultados alcançados foram satisfatórios para a maioria dos exemplos, mantendo-se essa alteração na estrutura do algoritmo final.

4.3.4 Inclusão de Novo Critério de Parada

O método de otimização original da Busca Harmônica trabalha apenas com o número de iterações como critério de parada. Com a introdução do processo de reinicialização, aproveitou-se para se introduzir um critério adicional, já que era perceptível que, para alguns exemplos, o número de iterações máximo era muito elevado se comparado ao número médio de iterações necessário para se atingir as melhores soluções.

Segundo o novo critério, se, após repetidas reinicializações efetuadas, a melhor solução encontrada continuar sendo a mesma, a procura da solução ótima passa a ser encerrada, mesmo sem ter se atingido o número máximo de iterações. Adotou-se nos exemplos analisados, um número de cinco reinicializações máximas sem haver alteração na solução ótima obtida.

Ao se introduzir o novo critério de parada em alguns problemas, pôde-se reduzir consideravelmente a quantidade de iterações desenvolvidas. Nos problemas de maior dificuldade para a convergência, o critério não provocou paradas prematuras.

Nas Tabelas 27 e 28, mostra-se que o resultado final manteve-se tão satisfatório quanto aos anteriores para os problemas I e VI (20 MPa), obtendo-se até mesmo resultados melhores nos casos apresentados.

Tabela 27: Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de novo critério de parada para o exemplo I.

Algoritmo Adotado	Número de Iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	N° de Repetições da Melhor Solução¹
Busca Harmônica com critério de parada único	255.921	70,00	70,55	70,17	6
Busca Harmônica com critério de parada adicional	130.800 a 255.921	70,00	70,49	70,08	8

1) Considerando dez tentativas.

Tabela 28: Evolução no desempenho do algoritmo do método da Busca Harmônica com inclusão de novo critério de parada para o exemplo VI, considerando f_{ck} igual a 20 MPa.

Algoritmo Adotado	Número de Iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	N° de Repetições da Melhor Solução¹
Busca Harmônica com critério de parada único	255.921	212,09	215,86	213,31	3
Busca Harmônica com critério de parada adicional	225900 a 255.921	212,09	215,86	212,96	4

1) Considerando dez tentativas.

4.3.5 Algoritmo Final

As alterações desenvolvidas no programa original do método da Busca Harmônica, implementado nessa dissertação, permitiram uma grande melhora nas soluções obtidas, ao se comparar as versões inicial e final do algoritmo. Na Tabela 29, são mostrados os resultados obtidos pelas versões original e final do algoritmo para o exemplo II deste trabalho. Na Figura 26, para o mesmo exemplo, torna-se bem visível a queda no número de iterações necessárias para que houvesse a convergência à solução ótima, a partir das alterações propostas na estrutura do algoritmo.

Tabela 29: Comparativo do desempenho do algoritmo original e do algoritmo final do método da Busca Harmônica para o exemplo II.

Algoritmo Adotado	Número de Iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	Nº de Repetições da Melhor Solução¹
	50.000	85,64	86,06	86,00	0
Busca	100.000	85,40	86,06	86,00	1
Harmônica	150.000	85,40	86,06	85,95	1
original	200.000	85,40	86,06	85,95	1
	255.921	85,40	86,06	85,95	1
	50.000	85,40	85,47	85,41	9
Busca	100.000	85,40	85,40	85,40	10
Harmônica	150.000	85,40	85,40	85,40	10
final	200.000	85,40	85,40	85,40	10
	255.921	85,40	85,40	85,40	10

1) Considerando dez tentativas.

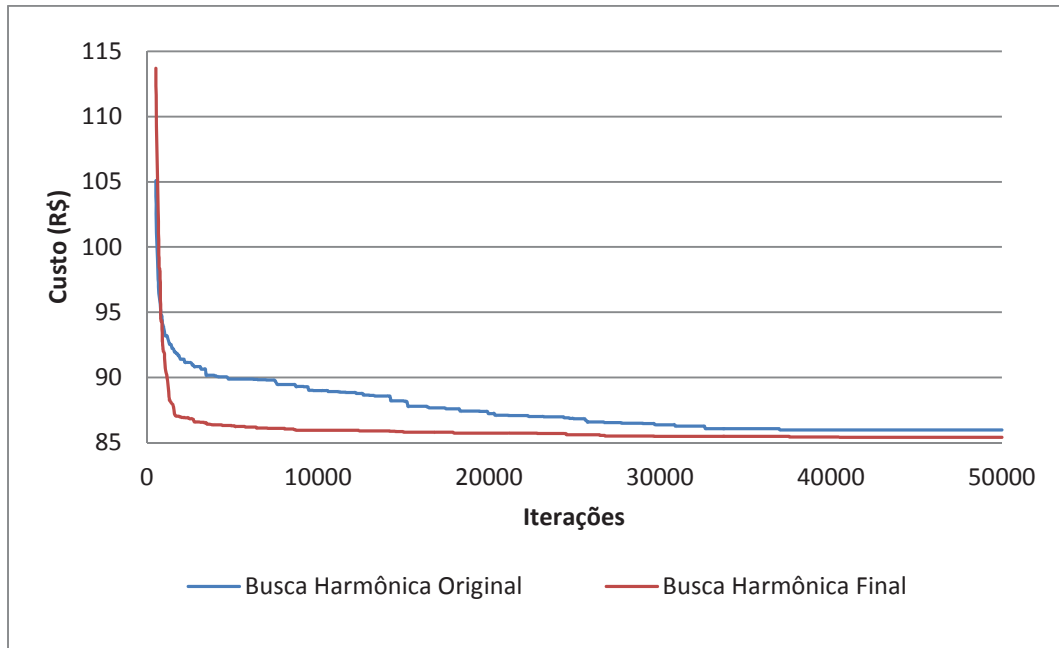


Figura 26: Variação do custo em função do número de iterações para as versões original e final do algoritmo para o exemplo II.

O resumo dos resultados finais obtidos através da última versão do algoritmo, para os exemplos desenvolvidos na etapa de calibração dos parâmetros do mesmo, são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30: Síntese dos resultados obtidos com o algoritmo final do método da Busca Harmônica para os exemplos utilizados no estudo dos parâmetros.

Exemplo	Número Máximo de Iterações	Número Médio de iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	N° de Repetições da Melhor Solução¹
I	255.921	223.800	70,00	70,16	70,01	9
II	255.921	158.950	85,40	85,40	85,40	10
VI (20 MPa)	255.921	255.300	212,09	215,86	212,66	3
VI (30 MPa)	243.800	139.400	179,48	179,75	179,61	5
VI (40 MPa)	255.921	135.200	165,13	165,22	165,14	9

1) Considerando dez tentativas.

Cabe observar que o número de iterações citadas corresponde a um tempo de processamento computacional bastante pequeno. Nos exemplos analisados, o mesmo nunca superou 1 minuto.

4.3.6 Comparativo entre *Simulated Annealing* e Método da Busca Harmônica

Neste item, apresenta-se uma comparação entre os métodos de otimização *Simulated Annealing* e Busca Harmônica. Para tal, foram realizados testes para alguns exemplos deste trabalho, utilizando o algoritmo elaborado por Bordignon (2010), bem como a última versão do algoritmo desenvolvido na presente dissertação.

A primeira razão para a escolha do *Simulated Annealing* como método a ser utilizado neste comparativo se deu pelo fato de se ter acesso aos resultados e ao algoritmo desenvolvido por Bordignon (2010) para otimização das seções de pilares. Além disso, nos exemplos efetuados pelo referido autor, o *Simulated Annealing* alcançou resultados superiores a outros métodos, como, por exemplo, os Algoritmos Genéticos, corroborando o fato do método já ter alcançado ótimos resultados em outros trabalhos sobre otimização estrutural, sendo extremamente reconhecido no meio acadêmico.

Foram feitas análises partindo dos limites superiores das variáveis, bem como dos limites inferiores. A opção de se partir dos dois limites, possível no algoritmo de otimização pelo Busca Harmônica, não foi empregada nessas análises comparativas, já que o algoritmo do *Simulated Annealing* parte de apenas uma solução e isso acabaria por desequilibrar os resultados em favor do método da Busca Harmônica. Para cada exemplo foram efetuadas dez tentativas partindo dos limites superiores das variáveis e dez tentativas partindo-se dos limites inferiores.

Através dos resultados obtidos nos exemplos desenvolvidos, ficou evidente que o método da Busca Harmônica precisou de um número bem menor de iterações para alcançar o ótimo em relação ao *Simulated Annealing*. Essa tendência pode ser visualizada, para o exemplo II (tentativas partindo do limite superior), através das Figuras 27 e 28, as quais se referem, respectivamente, a evolução do custo ótimo para o *Simulated Annealing* e para o Busca Harmônica. São apresentados, em cada gráfico, os resultados obtidos para as dez tentativas efetuadas em cada situação.

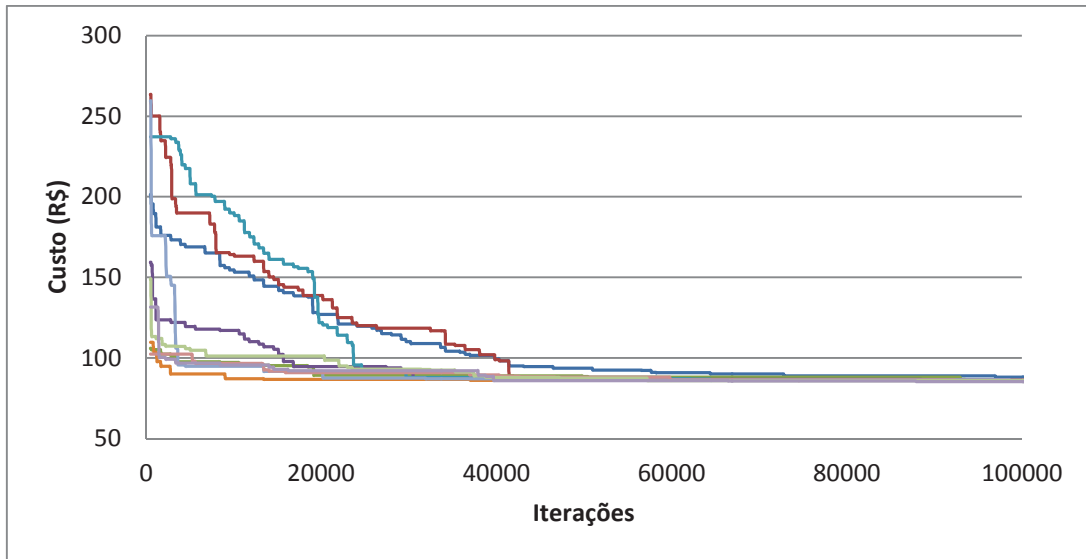


Figura 27: Variação do custo ótimo em função do número de iterações, utilizando o algoritmo do *Simulated Annealing* (dez tentativas efetuadas para o exemplo II).

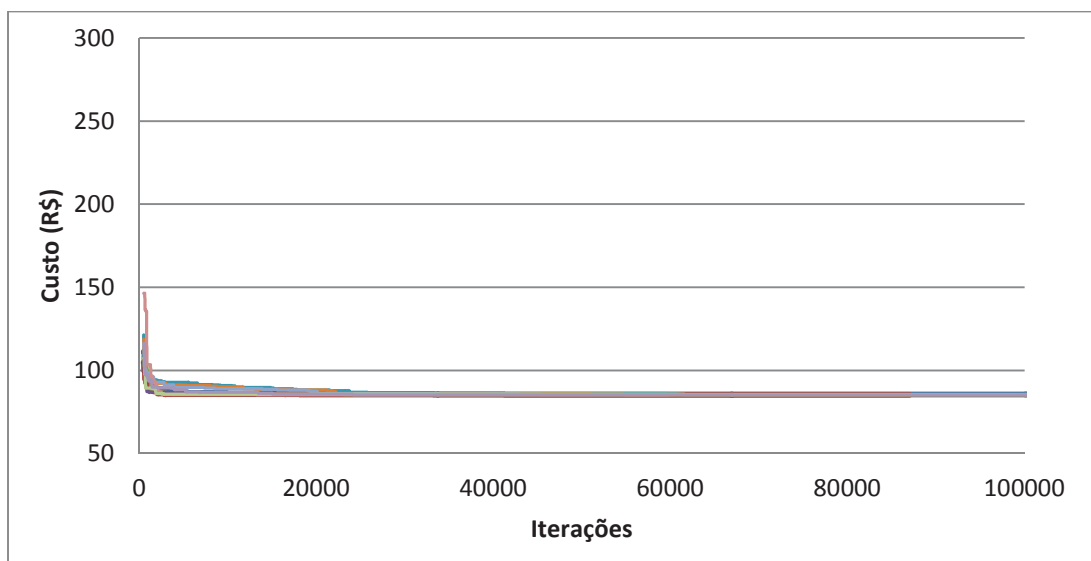


Figura 28: Variação do custo ótimo em função do número de iterações, utilizando o algoritmo do método da Busca Harmônica (dez tentativas efetuadas para o exemplo II).

Os resultados para o exemplo I, partindo a solução dos limites superiores das variáveis, são apresentados na Tabela 31. As Tabelas 32 a 34 mostram, respectivamente, os resultados obtidos para os exemplos II (limites superiores), exemplo II (limites inferiores) e exemplo VI (40 MPa e limites superiores). Os números de iterações utilizadas para a comparação referem-se ao número médio de iterações no Busca Harmônica e ao número de iterações para ambos os métodos, de acordo com a legenda posicionada na extremidade inferior das tabelas. Os resultados para os exemplos efetuados neste comparativo estão

resumidos na Tabela 35. Os mesmos se referem às vinte tentativas realizadas para cada exemplo.

Tabela 31: Comparativo entre algoritmos do *Simulated Annealing* e método da Busca Harmônica para o exemplo I (considerando os limites superiores das variáveis como soluções iniciais).

Algoritmo Adotado	Número de Iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	Nº de Repetições da Melhor Solução³
<i>Simulated Annealing</i>	200.400 ¹	70,00	70,32	70,19	1
<i>Simulated Annealing</i>	255.921 ²	70,00	70,32	70,19	1
Busca	200.400 ¹	70,00	70,90	70,15	7
Harmônica	255.921 ²	70,00	70,90	70,15	7

- 1) Número médio de iterações no BH.
- 2) Número máximo de iterações no SA e no BH.
- 3) Considerando dez tentativas.

Tabela 32: Comparativo entre algoritmos do *Simulated Annealing* e método da Busca Harmônica para o exemplo II (considerando os limites superiores das variáveis como soluções iniciais).

Algoritmo Adotado	Número de Iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	Nº de Repetições da Melhor Solução³
<i>Simulated Annealing</i>	156.400 ¹	85,40	86,05	85,55	1
<i>Simulated Annealing</i>	255.921 ²	85,40	85,47	85,44	4
Busca	156.400 ¹	85,40	85,47	85,42	8
Harmônica	255.921 ²	85,40	85,47	85,42	8

- 1) Número médio de iterações no BH.
- 2) Número máximo de iterações no SA e no BH.
- 3) Considerando dez tentativas.

Tabela 33: Comparativo entre algoritmos do *Simulated Annealing* e método da Busca Harmônica para o exemplo II (considerando os limites inferiores das variáveis como soluções iniciais).

Algoritmo Adotado	Número de Iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	Nº de Repetições da Melhor Solução³
<i>Simulated Annealing</i>	184.950 ¹	85,40	85,64	85,47	3
<i>Simulated Annealing</i>	255.921 ²	85,40	85,47	85,45	3
Busca	184.950 ¹	85,40	85,47	85,41	9
Harmônica	255.921 ²	85,40	85,47	85,41	9

- 1) Número médio de iterações no BH.
- 2) Número máximo de iterações no SA e no BH.
- 3) Considerando dez tentativas.

Tabela 34: Comparativo entre algoritmos do *Simulated Annealing* e método da Busca Harmônica para o exemplo IV (considerando os limites superiores das variáveis como soluções iniciais e f_{ck} igual a 40 MPa).

Algoritmo Adotado	Número de Iterações	Melhor Solução (R\$/m)	Pior Solução (R\$/m)	Solução Média (R\$/m)	Nº de Repetições da Melhor Solução ³
<i>Simulated Annealing</i>	212.600 ¹	165,13	165,22	165,18	4
Busca Harmônica	255.921 ²	165,13	165,22	165,18	4
Busca Harmônica	212.600 ¹	165,13	166,43	165,33	8
<i>Simulated Annealing</i>	255.921 ²	165,13	166,43	165,33	8

1) Número médio de iterações no BH.

2) Número máximo de iterações no SA e no BH.

3) Considerando dez tentativas.

Tabela 35: Síntese comparativa entre resultados obtidos com os algoritmos do *Simulated Annealing* e do método da Busca Harmônica para os exemplos analisados.

Item Considerado	Exemplo I		Exemplo II		Exemplo VI (20 MPa)		Exemplo VI (30 MPa)		Exemplo VI (40 MPa)	
	SA	BH	SA	BH	SA	BH	SA	BH	SA	BH
Nº Médio de Iterações	255.921	220.267	255.921	170.652	255.921	255.921	255.921	137.683	255.921	201.653
Nº Máximo de Iterações	255.921	255.921	255.921	255.921	255.921	255.921	255.921	255.921	255.921	255.921
Nº de Repetições da Melhor Solução ¹	10	12	7	17	11	9	19	12	9	16

1) Considerando vinte tentativas.

Ao se analisar as tabelas, verifica-se que, em alguns problemas (exemplo VI, para 20 MPa e 30 MPa), o *Simulated Annealing* obteve uma maior repetição da solução ótima. No entanto, em outros (exemplo I, II e VI, para 40 MPa), o Busca Harmônica teve maior sucesso, e isso, aliado ao fato do número de iterações necessário para a convergência ser muito menor que o do *Simulated Annealing*, conforme mostrado anteriormente, bem como ao fato de ter sempre alcançado a convergência em até dez tentativas nos testes efetuados, faz com que o Busca Harmônica seja competitivo com o *Simulated Annealing*.

Além disso, a opção de se partir dos limites inferior e superior pode tornar os resultados do método da Busca Harmônica ainda melhores. Na Tabela 36, são apresentados os resultados obtidos para o método da Busca Harmônica, partindo-se dos limites inferior e superior, bem como para o *Simulated Annealing*, ora partindo-se dos limites inferiores das variáveis, ora dos limites superiores. Para todos os casos, são consideradas dez tentativas em sequência.

Tabela 36: Comparativo das taxas de sucesso do *Simulated Annealing* e do método da Busca Harmônica obtidas nos exemplos analisados.

Exemplo	Busca Harmônica ¹	<i>Simulated Annealing</i> ²	<i>Simulated Annealing</i> ³
I	90%	10%	90%
II	100%	40%	30%
VI (20 MPa)	30%	70%	40%
VI (30 MPa)	50%	90%	100%
VI (40 MPa)	90%	40%	50%

1) Duas das soluções iniciais da memória harmônica referentes ao limite superior e ao limite inferior para os valores das variáveis.
2) Solução inicial referente ao limite inferior para os valores das variáveis.
3) Solução inicial referente ao limite superior para os valores das variáveis.

4.4 Otimização de Custos Ambientais

Na sequência desse item são apresentadas algumas aplicações numéricas do algoritmo de otimização, considerando-se diferentes modalidades de custos ambientais para os insumos do concreto armado. Esses valores foram obtidos a partir da literatura, sendo na sequência detalhados. Como exemplos de custos utilizados, citam-se: dióxido de carbono emitido (CO_2), dióxido de carbono equivalente emitido (CO_2e), ou Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* - GWP), consumo de energia, e unidades de pontuação ambiental conhecidas como Eco-Indicadores, as quais são obtidas a partir do método Eco-Indicador 99 (descrito no item 2.2.3 deste trabalho).

4.4.1 Exemplo VIII

Neste exemplo, verificou-se qual seria o respectivo custo ambiental de cada solução proposta para o exemplo I dos custos monetários, considerando os diferentes métodos de otimização utilizados. Foram empregados os seguintes custos ambientais neste exemplo: emissão de CO_2 , Potencial de Aquecimento Global (GWP) e Eco-Indicadores. Os custos ambientais unitários utilizados para os materiais são apresentados na Tabela 37, assim como os custos monetários.

Tabela 37: Custos dos insumos do concreto armado para o exemplo VIII.

Material	Custo Monetário (R\$)	Custos Ambientais		
		CO ₂ (kg)	GWP (kg CO ₂ e)	Eco-Indicadores
Concreto 25 MPa (m ³)	125,00	224,34	256,88	39100
Aço (kg)	1,27	3,02	1,241	61
Fôrmas (m ²)	16,49	8,9	2,153	-

Os custos em termos de CO₂ foram retirados do trabalho de Payá-Zaforteza et al. (2009), os custos em Potencial de Aquecimento Global (GWP) são provenientes do trabalho de Ochsendorf (2011) e os custos em Eco-Indicadores tem como referência o trabalho de Payá-Zaforteza et al. (2008). A emissão de CO₂ é quantificada em kg, a medida GWP é quantificada em kg de CO₂ equivalente emitidos, enquanto que a unidade do Eco-Indicador se refere a um milésimo da carga ambiental anual de um habitante europeu médio. Para os custos referentes ao Potencial de Aquecimento Global (GWP) considerou-se o impacto de pré-uso e de final de vida para o concreto.

O custo ambiental das fôrmas de madeira é menos considerável do que o seu custo monetário, sendo até mesmo desconsiderado por alguns indicadores de custos ambientais. Isso se deve ao fato das fôrmas não fazerem parte da estrutura ao longo de sua vida útil, além da madeira ser um material renovável e colaborar com o meio ambiente enquanto árvore. O uso de madeiras de reflorestamento também pode contribuir para esse custo ser menor.

Os custos monetários se referem ao mês de maio de 2012 para o Estado do Rio Grande do Sul, sendo os mesmos retirados do Guia da Construção (2012). Os resultados alcançados para este exemplo são apresentados na Tabela 38. As configurações correspondentes às seções otimizadas foram apresentadas na Figura 18 deste trabalho. Na Figura 29 é mostrada, para cada um dos custos avaliados, a relação entre o custo obtido por cada método de otimização e o resultado alcançado por meio do Ábaco de Interação.

Tabela 38: Custos monetários e ambientais obtidos no exemplo VIII.

Custo Otimizado	Unidade	Ábaco de Interação (Figura 18a)	Algoritmos Genéticos (Figura 18b)	<i>Simulated Annealing</i> (Figura 18c)	Busca Harmônica (Figura 18d)	Busca Harmônica (Figura 18e)
Monetário	R\$	102,58	75,21	70,00	70,00	70,78
CO ₂	Kg	167,99	104,55	85,17	85,17	90,06
GWP	Kg CO ₂ e	100,61	70,83	64,64	64,64	66,79
Eco-Indicadores	-	10293,04	8233,88	8241,95	8241,95	8355,35

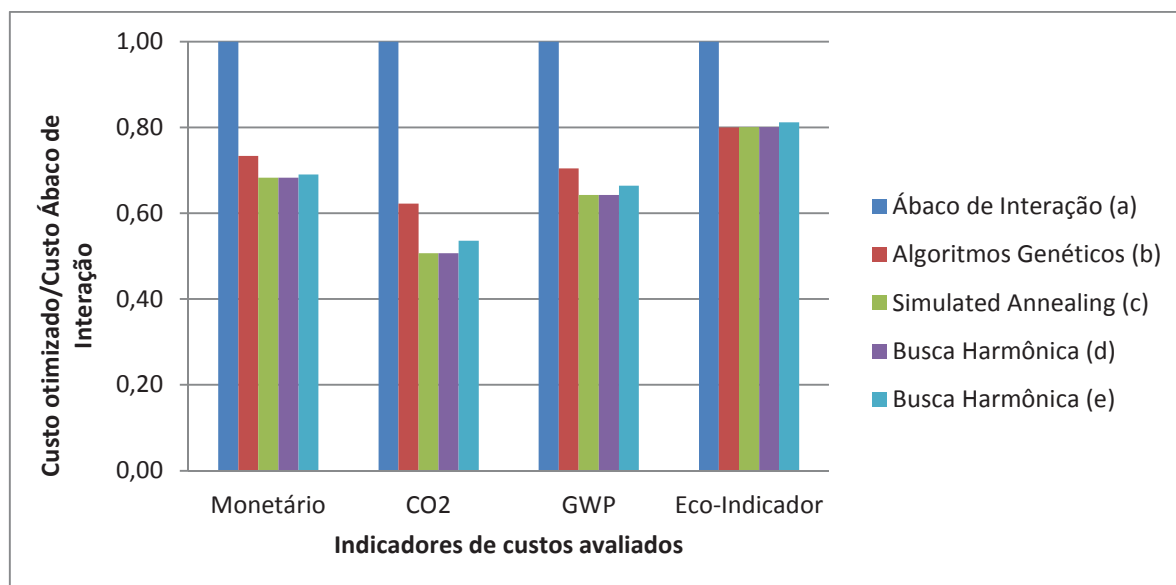


Figura 29: Relação entre os custos ótimos obtidos para os diferentes métodos de otimização e o custo da solução por Ábaco de Interação, considerando os diferentes indicadores de custos avaliados no exemplo VIII.

Como é possível verificar, a otimização de custos monetários relaciona-se de maneira direta com a redução dos custos ambientais. À medida que os diferentes métodos vão propondo melhores soluções econômicas, esses resultados também vão sendo mais vantajosos em termos ambientais. A única exceção ocorreu com o custo em Eco-Indicadores, onde a solução por Algoritmos Genéticos seria melhor que a obtida pelo *Simulated Annealing* e Busca Harmônica, ao contrário do ocorrido para os custos monetários. Mesmo assim, a variação entre essas soluções não passa de 0,1%. Na Tabela 39 é mostrada a variação obtida, em termos percentuais, para cada custo considerado, tomando-se como referência os resultados obtidos para o Ábaco de Interação.

Tabela 39: Variação percentual obtida nos custos analisados no exemplo VIII, tomando-se como referência a seção gerada por Ábaco de Interação (Figura 18a).

Custo Otimizado	Algoritmos Genéticos (Figura 18b)	<i>Simulated Annealing</i> (Figura 18c)	Busca Harmônica (Figura 18d)	Busca Harmônica (Figura 18e)
Monetário	-26,68%	-31,76%	-31,76%	-31,00%
CO ₂	-37,76%	-49,30%	-49,30%	-46,39%
GWP	-29,59%	-35,75%	-35,75%	-33,62%
Eco-Indicadores	-20,01%	-19,93%	-19,93%	-18,83%

4.4.2 Exemplo IX

Nesta próxima aplicação numérica foi otimizada a seção de um pilar considerando custos econômicos e ambientais. Foram utilizados os seguintes pares de esforços nas análises: $N_{sd} = 2142,86$ kN e $M_{sd} = 375$ kN.m. Adotou-se classe de resistência do aço (f_{yk}) igual a 500 MPa. A classe de resistência do concreto (f_{ck}) foi de 35 MPa. Os custos ambientais unitários para este exemplo, bem como o custo unitário monetário dos materiais, são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40: Custos dos insumos do concreto armado para o exemplo IX.

Material	Custo Monetário (R\$)	Custos Ambientais			
		CO ₂ (kg)	GWP (kg CO ₂ e)	Eco-Indicadores	Energia (MJ)
Concreto 35 MPa (m ³)	313,00	265,28	352,29	42000	3180
Aço (kg)	5,57	3,02	1,241	61	8,9
Fôrmas (m ²)	45,69	8,9	2,153	-	-

Os custos em termos de CO₂, GWP e Eco-Indicadores foram retirados das mesmas referências citadas no exemplo anterior. Os custos em termos de consumo de energia foram adaptados de Yeo e Gabbai (2011), sendo MJ a respectiva unidade deste custo ambiental.

Na Figura 30, têm-se desenhadas as seções ótimas obtidas para cada natureza de custo avaliada. Na Figura 30 (a) a seção de mínimo custo monetário (R\$), na Figura 30 (b) a seção de menor emissão de dióxido de carbono (CO₂), na Figura 30 (c), a seção com menor Potencial de Aquecimento Global (GWP), na Figura 30 (d) a seção onde se minimizaram os Eco-Indicadores, e na Figura 30 (e) a seção onde se minimizou o consumo de energia. Como é possível verificar, todos os resultados apresentaram seções parecidas, com exceção da seção otimizada por Eco-Indicadores. Esta última apresentou área de concreto consideravelmente inferior, bem como maior área de aço, pois nesse índice, o impacto ambiental do concreto é mais significativo em relação ao aço do que nos demais custos.

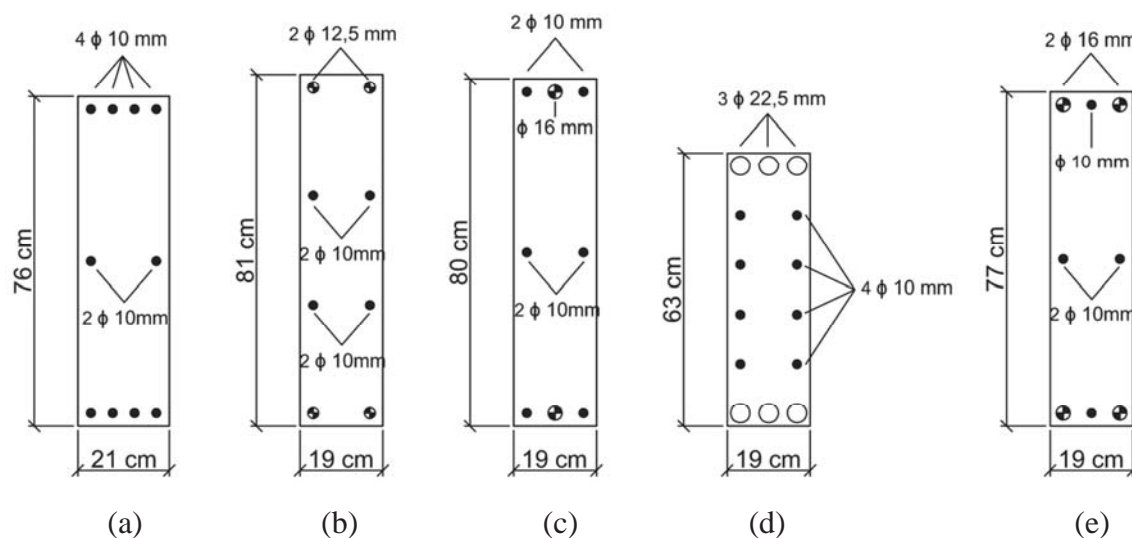


Figura 30: Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo IX: (a) Custo monetário; (b) Dióxido de carbono emitido; (c) Potencial de Aquecimento Global; (d) Eco-indicadores; (e) Consumo de energia.

Os resultados obtidos, para todas as naturezas de custos avaliadas, são mostrados nas Tabelas 41 e 42. Na primeira, são mostradas as quantidades de materiais empregados em cada seção ótima, enquanto que, na segunda, são expostos os custos para cada modalidade de custo ambiental considerada. Na Tabela 41, a última coluna indica as taxas de armadura (ρ). Na Figura 31 é mostrada a redução no impacto ambiental que cada solução ótima ambiental é capaz de proporcionar, em termos percentuais, bem como indicado o acréscimo de custo monetário que as mesmas trariam, tomando como referência a solução ótima monetária.

Tabela 41: Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo IX.

Custo Otimizado	Concreto (cm ²)	Aço (cm ²)	Fôrmas (cm)	ρ (%)
Monetário	1596,00	7,85	194,00	0,49%
CO ₂	1539,00	8,05	200,00	0,52%
GWP	1520,00	8,73	198,00	0,57%
Eco-Indicadores	1197,00	29,51	164,00	2,47%
Energia	1463,00	11,18	192,00	0,76%

Tabela 42: Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo IX (Custo/m).

Custo Otimizado	Unidade	Concreto	Aço	Fôrmas	Custo Total
Monetário	R\$	49,95	34,32	88,64	172,93
CO ₂	Kg	40,83	19,08	17,80	77,71
GWP	Kg CO ₂ e	53,55	8,50	4,26	66,32
Eco-Indicadores	-	5027,40	1413,09	-	6440,38
Energia	MJ	465,23	78,11	-	543,37

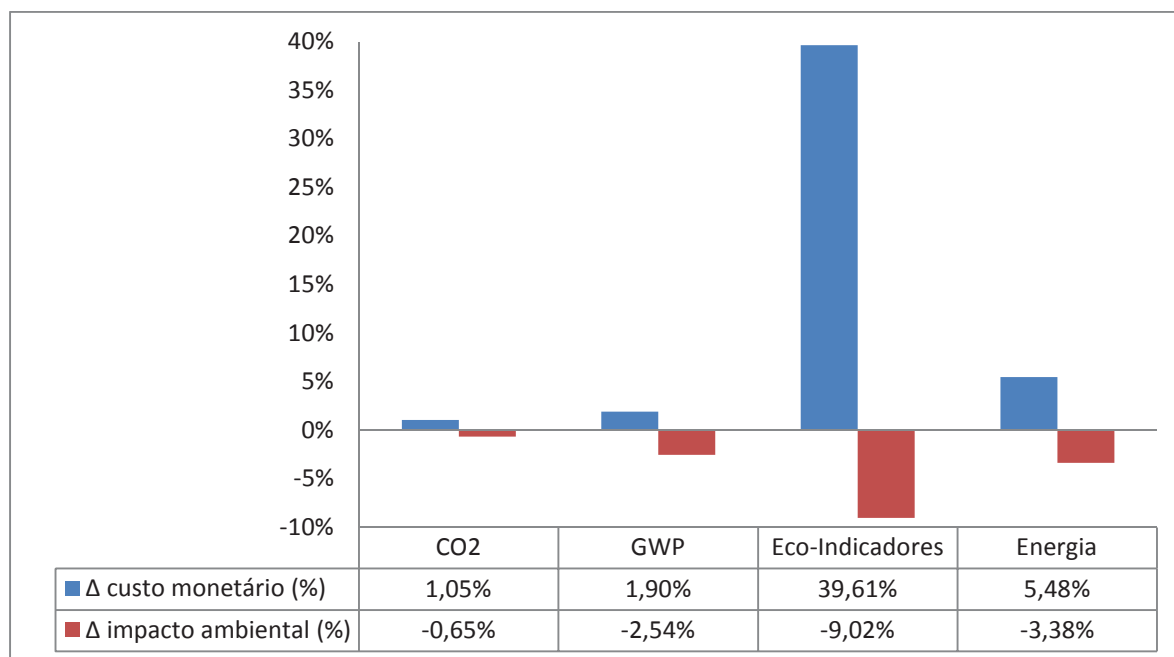


Figura 31: Desempenho das soluções ambientais ótimas em relação a melhor solução monetária, quanto ao ganho ambiental e ao acréscimo no custo monetário, para o exemplo IX.

A partir do gráfico da Figura 31 é possível verificar que o maior ganho ambiental (9,02%) seria possível adotando-se a solução por Eco-Indicadores, porém o custo monetário sofreria um acréscimo de 39,61%. De acordo com as demais soluções propostas, uma economia de 3,38% no consumo de energia poderia ser alcançada com um acréscimo de 5,48% no custo, uma redução no Potencial de Aquecimento Global (GWP) de 2,54% estaria ligado a um aumento de 1,9% nos custos monetários, bem como poderia haver uma redução de 0,65% na emissão de dióxido de carbono (CO₂) com custo 1,05% maior. Nos três últimos casos, portanto, em especial para GWP e CO₂, as soluções ótimas ambientais propostas ficam muito próximas da solução ótima monetária, tendência já indicada nos trabalhos de Payá-Zaforteza (2009) e Yepes et al. (2012).

Na sequência, as Figuras 32, 33 e 34 mostram a variação no consumo de materiais para cada custo ambiental avaliado, em relação à solução ótima monetária, em termos de concreto, aço e fôrmas. Para todos os casos, houve uma diminuição no consumo de concreto, um aumento no consumo do aço, enquanto que o consumo de fôrmas apresentou um leve acréscimo para as seções otimizadas em termos de CO₂ e GWP, e uma diminuição para as seções otimizadas por Eco-Indicadores e consumo de energia.

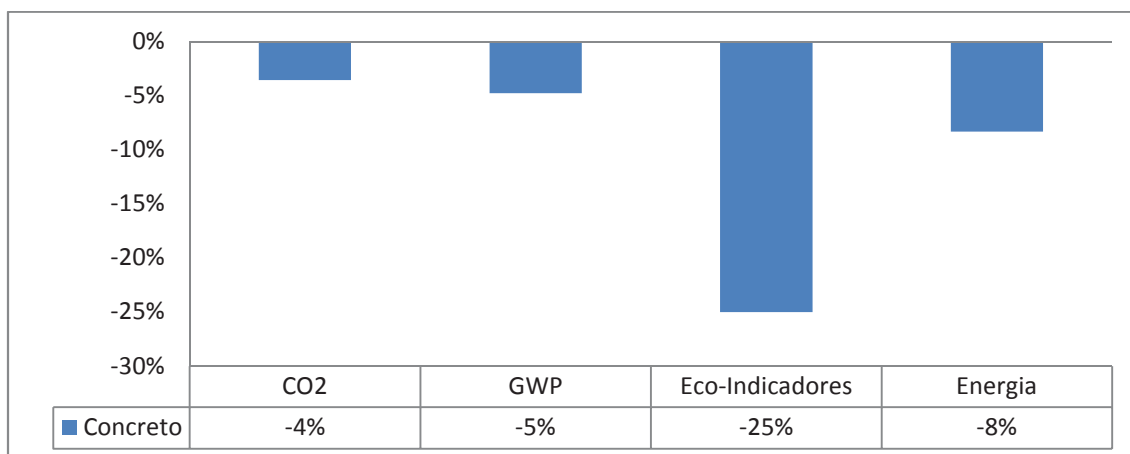


Figura 32: Variação no consumo de concreto nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo IX.

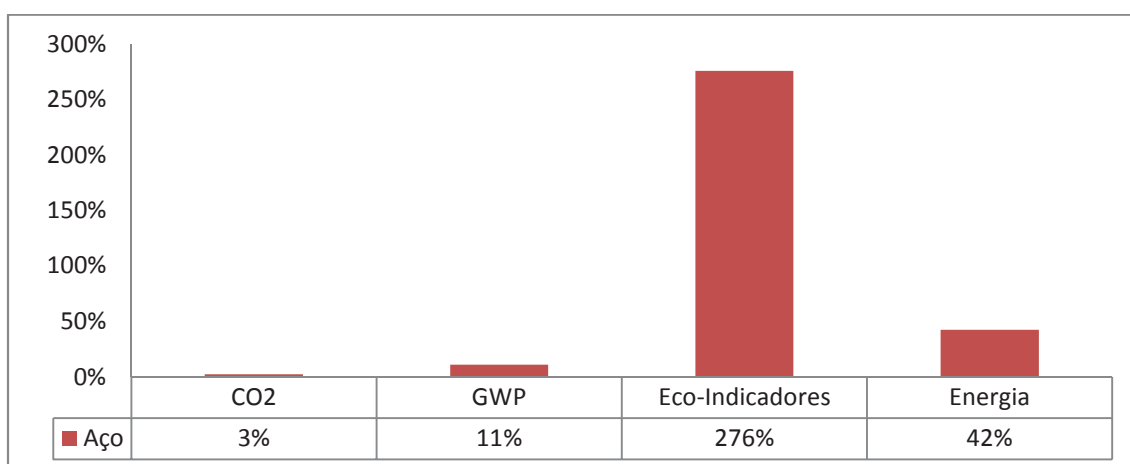


Figura 33: Variação no consumo de aço nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo IX.

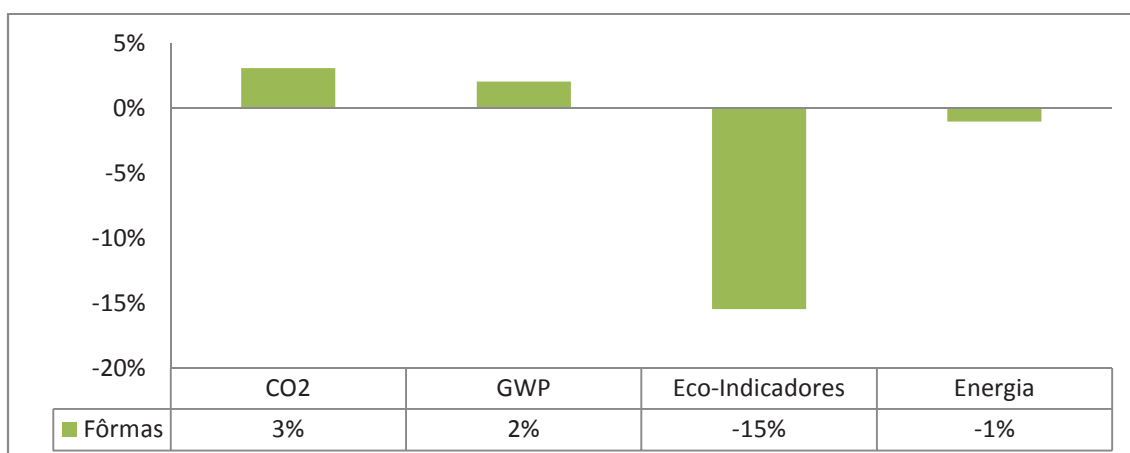


Figura 34: Variação no consumo de fôrmas nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo IX.

A participação percentual de cada material (concreto, aço e fôrmas) na composição dos custos, para cada natureza de custo avaliado, é mostrada na Figura 35, assim como os valores médios obtidos considerando os custos ambientais. Como se vê, a participação das fôrmas nos custos ambientais é bastante reduzida em relação ao alcançado nos custos monetários. Em geral, o concreto responde por 74% dos custos ambientais, seguido do aço (18%) e das fôrmas (7%). As fôrmas, no caso dos indicadores ambientais, não causam uma influência tão significativa no custo das seções ótimas, quando comparada a participação das mesmas nos custos monetários. Entretanto, o aumento da área de fôrmas está diretamente associado ao aumento na área de concreto da seção, material de maior impacto ambiental.

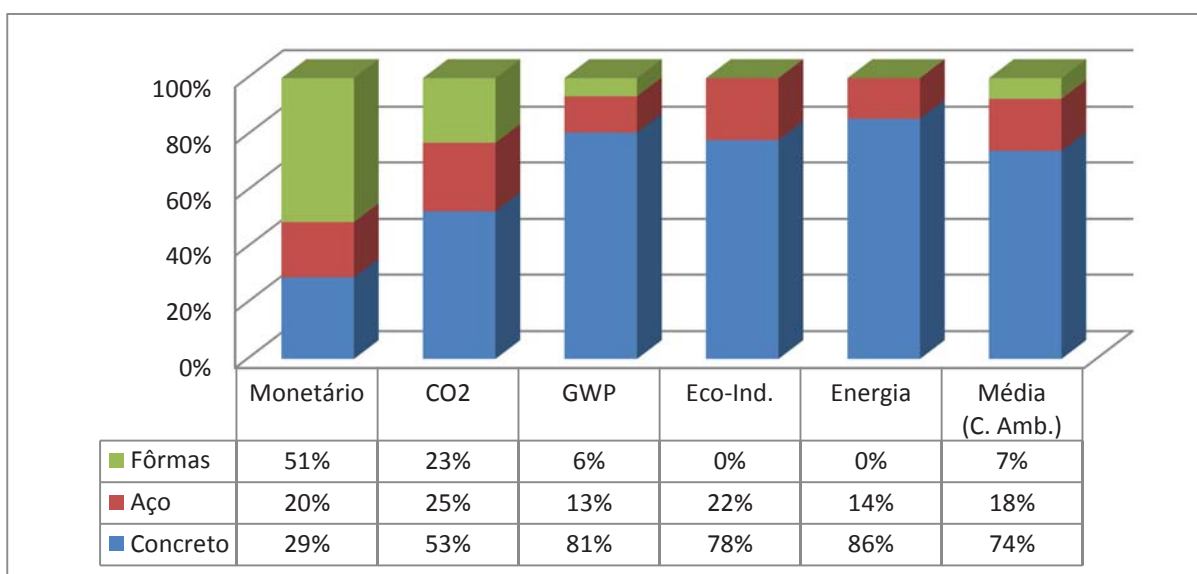


Figura 35: Participação dos materiais no custo total das seções considerando os diferentes indicadores de custos avaliados no exemplo IX.

4.4.3 Exemplo X

Neste próximo exemplo, repetiu-se a aplicação numérica anterior, porém alterou-se classe de resistência do concreto (f_{ck}), a fim de se verificar a influência da mesma em relação à obtenção das soluções ótimas. Foi adotado f_{ck} de 20 MPa. Os custos unitários dos materiais para este exemplo são apresentados na Tabela 43. A categoria de custo ambiental referente ao consumo de energia foi excluída deste exemplo, por faltarem dados para a classe de resistência (f_{ck}) adotada.

Tabela 43: Custos dos insumos do concreto armado para o exemplo X.

Material	Custo Monetário (R\$)	Custos Ambientais		
		CO ₂ (kg)	GWP (kg CO ₂ e)	Eco-Indicadores
Concreto 20 MPa (m ³)	255,00	224,34	256,88	39100
Aço (kg)	5,57	3,02	1,241	61
Fôrmas (m ²)	45,69	8,9	2,153	-

As seções obtidas são mostradas na Figura 36. A Figura 36 (a) refere-se à solução ótima monetária, a Figura 36 (b) está relacionada à seção obtida minimizando-se a emissão de dióxido de carbono (CO₂), a Figura 36 (c) apresenta a solução ótima para o mínimo Potencial de Aquecimento Global (GWP), enquanto que a solução da Figura 36 (d) foi obtida por meio da minimização dos Eco-Indicadores.

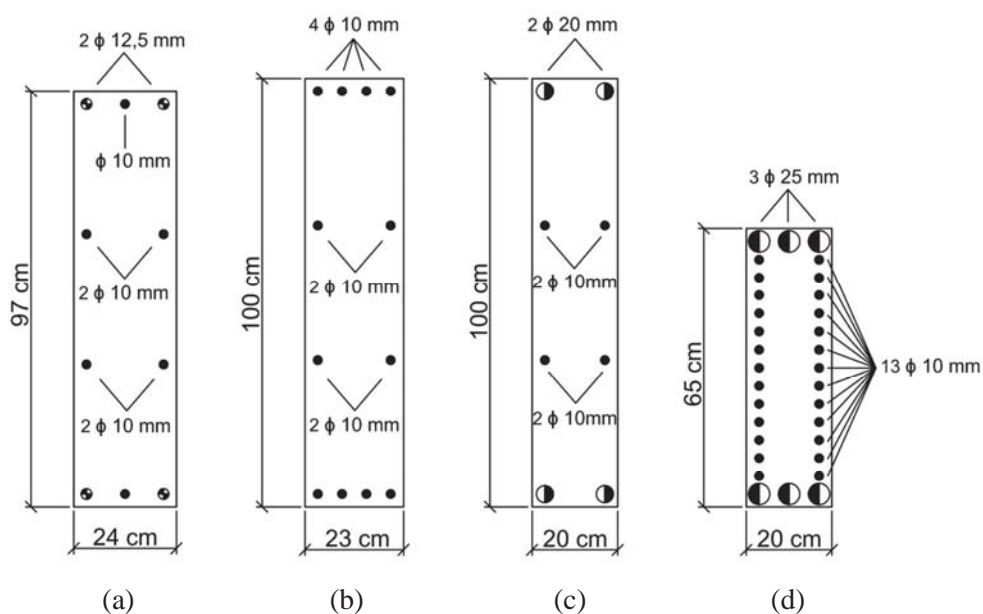


Figura 36: Detalhamento das seções otimizadas para o exemplo X: (a) Custo monetário; (b) Dióxido de carbono emitido; (c) Potencial de Aquecimento Global; (d) Eco-indicadores.

Como é possível verificar, as seções novamente apresentaram desenhos muito semelhantes, com exceção da solução referente à minimização dos Eco-Indicadores, devido a maior custo ambiental do concreto para este caso. Os resultados para o exemplo, em termos de consumo de materiais, bem como referentes aos custos obtidos, são apresentados nas Tabelas 44 e 45, respectivamente. Na Figura 37 é indicada a redução no impacto ambiental que cada solução ótima ambiental é capaz de proporcionar, em termos percentuais, assim

como apresentado o acréscimo de custo monetário que as mesmas trariam, tomando como referência a solução ótima monetária.

Tabela 44: Quantidades de materiais empregados nas soluções ótimas do exemplo X.

Custo Otimizado	Concreto (cm ²)	Aço (cm ²)	Fôrmas (cm)	ρ (%)
Monetário	2328,00	9,62	242,00	0,41%
CO ₂	2300,00	9,42	246,00	0,41%
GWP	2000,00	15,71	240,00	0,79%
Eco-Indicadores	1300,00	49,87	170,00	3,84%

Tabela 45: Custos obtidos para as soluções ótimas do exemplo X.

Custo Otimizado	Unidade	Concreto	Aço	Fôrmas	Custo Total
Monetário	R\$	59,36	42,06	110,57	212,00
CO ₂	Kg	51,60	22,33	21,89	95,84
GWP	Kg CO ₂ e	51,38	15,30	5,17	71,85
Eco-Indicadores	-	5083,00	2388,02	0,00	7471,16

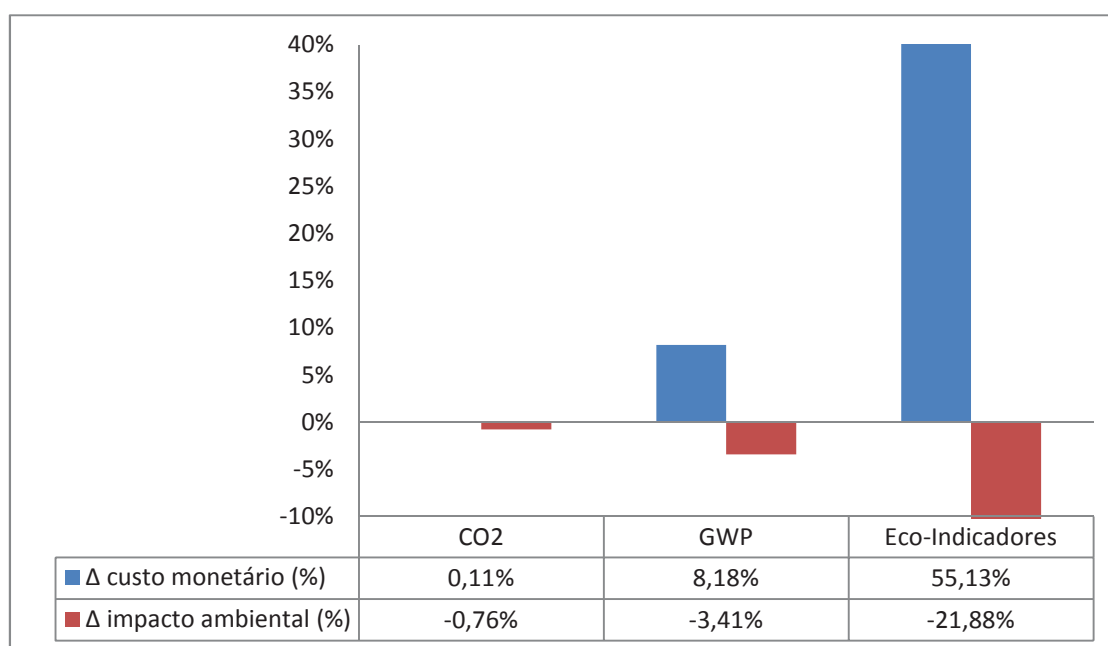


Figura 37: Desempenho das soluções ambientais ótimas em relação a melhor solução monetária, quanto ao ganho ambiental e ao acréscimo no custo monetário, para o exemplo X.

Na Figura 37 é possível verificar que o maior ganho ambiental (21,88%) seria possível adotando-se a solução por Eco-Indicadores, porém o custo monetário sofreria um acréscimo de 55,13%. Segundo as demais soluções propostas, uma redução no Potencial de Aquecimento Global (GWP) de 3,41% estaria ligada a um aumento de 8,18% nos custos monetários, bem como poderia haver uma redução de 0,76% na emissão de dióxido de

carbono (CO₂) com custo 0,11% maior. Novamente, verificou-se, para GWP e emissão de CO₂, uma ligação íntima entre os resultados da otimização ambiental e da otimização monetária.

As Figuras 38, 39 e 40 mostram a variação no consumo de materiais para cada custo ambiental considerado, em relação à solução ótima monetária, em termos de concreto, aço e fôrmas. Para todos os casos, houve uma diminuição no consumo de concreto. O consumo de aço sofreu acréscimo para as soluções em GWP e Eco-Indicadores, ao mesmo tempo em que o consumo de fôrmas sofreu decréscimo. A solução que minimizou a emissão de CO₂ diminuiu o consumo de aço, em relação à melhor solução monetária, ao mesmo tempo em que aumentou o consumo de fôrmas.

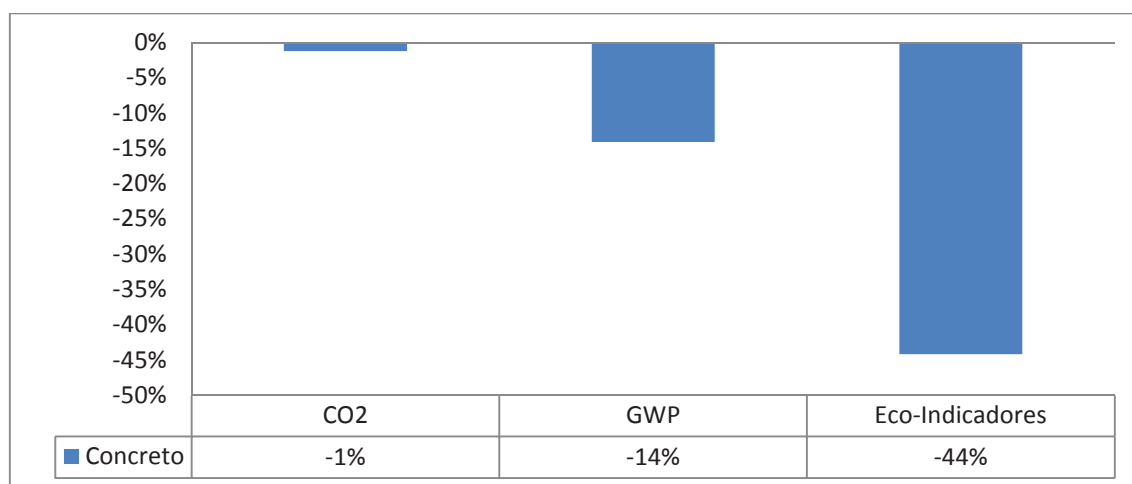


Figura 38: Variação no consumo de concreto nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo X.

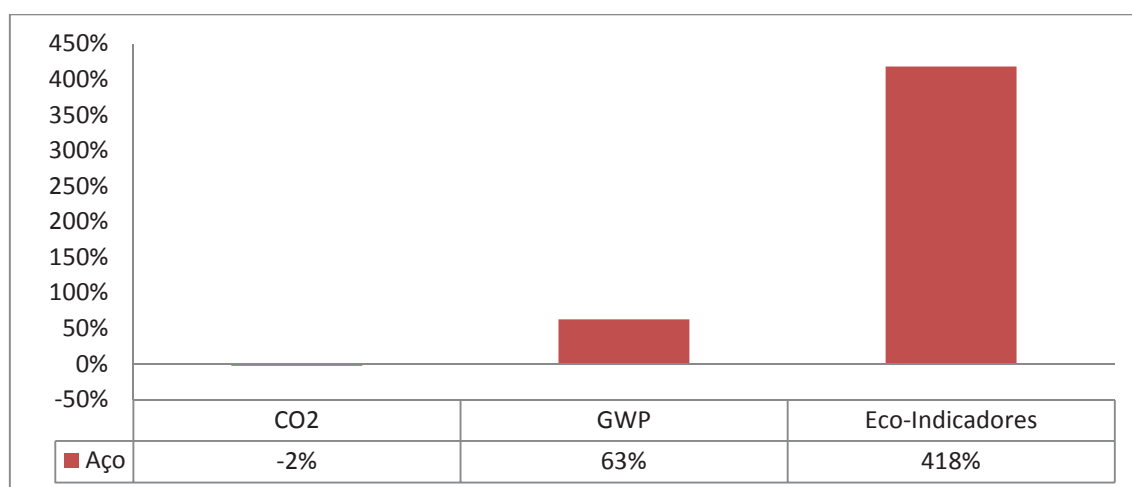


Figura 39: Variação no consumo de aço nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo X.

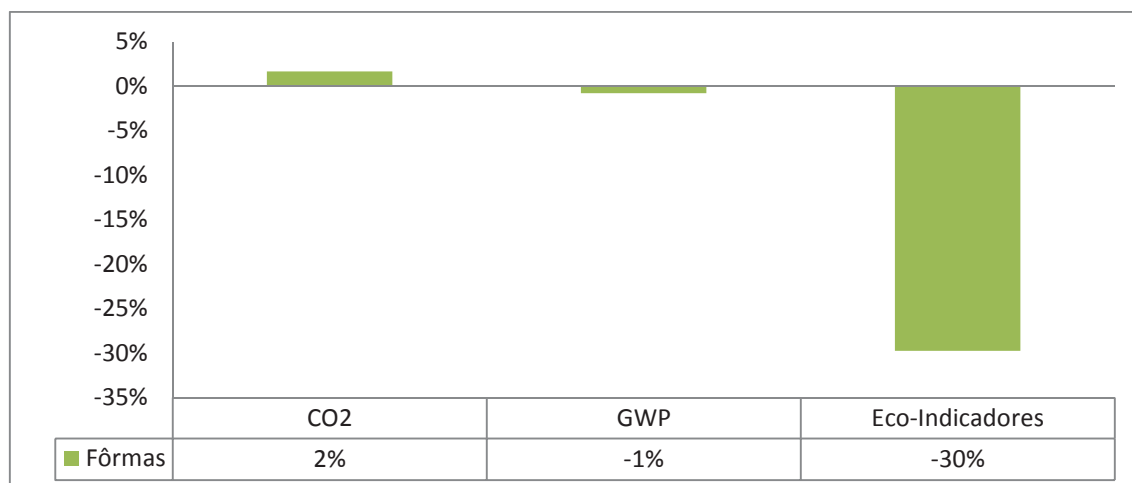


Figura 40: Variação no consumo de fôrmas nas soluções ótimas ambientais em relação à solução ótima monetária do exemplo X.

A participação percentual de cada material (concreto, aço e fôrmas) na composição dos custos, para cada natureza de custo avaliado, é mostrada na Figura 41, assim como os valores médios obtidos considerando os custos ambientais. Novamente, é possível verificar uma participação muito menor das fôrmas na composição dos custos ambientais do que nos custos monetários. De maneira geral, o concreto responde por 64% dos custos ambientais, seguido do aço (26%) e das fôrmas (10%).

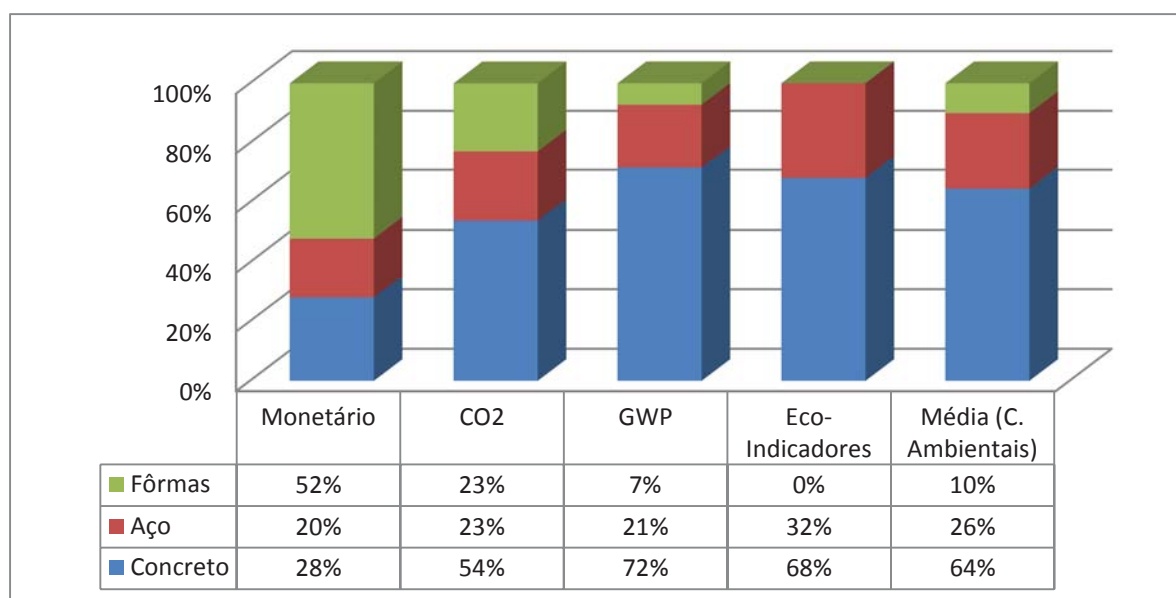


Figura 41: Participação dos materiais no custo total das seções considerando os diferentes indicadores de custos avaliados no exemplo X.

A seguir é apresentado um paralelo entre os resultados obtidos no exemplo IX, para f_{ck} igual a 35 MPa, e para o exemplo X, onde o f_{ck} adotado foi de 20 MPa. Na Tabela 46 é

mostrada a variação no consumo dos materiais obtido para o f_{ck} de 35 MPa em relação ao resultado alcançado com 20 MPa. Como se vê, há uma redução no consumo de todos os materiais utilizando concreto de maior resistência, para todas as modalidades de custos avaliadas. Conseqüentemente, isso refletiu em custos inferiores para o f_{ck} de 35 MPa, como mostrado na Tabela 47. Dessa forma, é possível verificar que, assim como para os custos monetários, os custos ambientais são menores para os pilares onde é empregado concreto de maior resistência f_{ck} .

Tabela 46: Variação percentual nas quantidades de material empregadas nas seções ótimas monetárias e ambientais dos exemplos IX e X, considerando aumento do f_{ck} de 20 MPa para 35 MPa.

Custo Otimizado	Concreto	Aço	Fôrmas
Monetário	-31%	-18%	-20%
CO ₂	-33%	-15%	-19%
GWP	-24%	-44%	-18%
Eco-Indicadores	-8%	-41%	-4%

Tabela 47: Variação percentual nos custos monetários e ambientais ótimos dos exemplos IX e X, considerando aumento do f_{ck} de 20 MPa para 35 MPa.

Custo Otimizado	Concreto	Aço	Fôrmas	Custo Total
Monetário	-16%	-18%	-20%	-18%
CO ₂	-21%	-15%	-19%	-19%
GWP	4%	-44%	-18%	-8%
Eco-Indicadores	-1%	-41%	0%	-14%

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs a minimização do custo monetário e ambiental das seções de pilares retangulares de concreto armado, submetidos à flexocompressão reta, através do processo heurístico de otimização conhecido como Busca Harmônica (*Harmony Search*). A norma brasileira ABNT NBR 6118 (2007) foi empregada na verificação da capacidade resistente das seções.

Inicialmente, foi desenvolvida a formulação do problema de otimização, a qual foi implementada em um algoritmo em linguagem *Fortran 90*. Para a validação da formulação proposta, bem como da utilização do método da Busca Harmônica como método de otimização, foi desenvolvida uma série de aplicações numéricas.

Os primeiros exemplos visaram à otimização dos custos monetários das seções de concreto, pelos quais se alcançaram uma série de conclusões. De forma geral, o Método da Busca Harmônica obteve soluções ótimas melhores, ou pelo menos iguais, aos resultados alcançados por dimensionamento convencional, otimização matemática (Método de Powell e Programação Quadrática Sucessiva), Algoritmos Genéticos e *Simulated Annealing* nos exemplos analisados. É importante frisar, no entanto, que o desempenho de cada método de otimização utilizado nas comparações é extremamente dependente da forma como seus parâmetros são calibrados. Em relação ao *Simulated Annealing*, apesar de não conseguir soluções ainda melhores, o Busca Harmônica mostrou-se bastante competitivo, por reduzir substancialmente o número de iterações para a convergência, bem como apresentar uma frequência de repetição das soluções ótimas (taxa de sucesso) maior para grande parte dos exemplos verificados. As taxas de armadura das soluções ótimas dos custos monetários tenderam à mínima quando isso foi possível, as dimensões da base tenderam a ficar acima de 19 cm (não sendo vantajoso utilizar dimensões de seções entre 12 e 19 cm), assim como quanto maior o f_{ck} maior foi a economia obtida. O custo das soluções ótimas no caso de se trabalhar apenas com seções múltiplas de 5 cm não sofreu um incremento muito significativo, porém as seções ótimas nem sempre correspondem a um simples arredondamento das soluções ótimas para dimensões múltiplas de 1 cm.

Alguns dos exemplos de otimização dos custos monetários serviram de instrumento para a calibração dos parâmetros do algoritmo do método da Busca Harmônica, bem como para a proposta de melhoramentos na estrutura original do método. Além da utilização de parâmetros variáveis, conforme proposta do trabalho de Mahadavi et al. (2007), foram

propostas e incorporadas outras alterações no algoritmo original desenvolvido por Geem, Kim e Loganathan (2001), das quais se citam a reinicialização da memória harmônica, quando todas as soluções convergem para o mesmo valor, bem como a inclusão de um critério adicional de parada. As alterações desenvolvidas se mostraram válidas para a obtenção das melhores soluções com menor número de iterações e maior taxa de sucesso. Cabe também destacar, que o algoritmo se mostrou capaz de convergir para as soluções ótimas em todos os exemplos desenvolvidos, independente do ponto de partida para os valores das variáveis.

E, finalmente, foram efetuados exemplos referentes à otimização dos custos ambientais das seções dos pilares, tomando-se como referência valores de pontuação ambiental para cada insumo do concreto armado. Devido a uma série de dificuldades, utilizaram-se os custos ambientais de outros trabalhos retirados da literatura, ao invés de se optar pela obtenção dos próprios valores por meio de alguma metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV). Citam-se como entraves encontrados a não disponibilidade de bancos de dados nacionais contendo informações sobre a ACV de insumos básicos como energia, aço, cimento, combustíveis, entre outros, bem como a falta de uma total adaptação das metodologias estrangeiras ao caso do Brasil.

No primeiro exemplo de custos ambientais apresentado, concluiu-se que a otimização de custos monetários relaciona-se diretamente com a redução de custos ambientais, tendo em vista que, à medida que os diferentes métodos de otimização foram propondo melhores soluções monetárias, esses resultados também se mostraram mais vantajosos em termos ambientais. Por meio das outras duas aplicações numéricas desenvolvidas envolvendo custos ambientais, verificou-se também que as soluções ótimas em custos monetários apresentam desempenho ambiental muito satisfatório, pouco se distanciando, para a maioria dos custos ambientais verificados (Potencial de Aquecimento Global – GWP, emissão de CO₂ e consumo de energia), da melhor solução ambiental possível. A maior variação se deu apenas para o custo ambiental em termos de Eco-Indicadores. De forma geral, as melhores soluções ambientais procuram empregar menores quantidades de concreto, maiores quantidades de aço e permitem maior uso de fôrmas, desde que isso não acarrete em grande aumento na área de concreto. E assim como na otimização de custos monetários, a utilização de concreto de maior f_{ck} leva a soluções mais interessantes também em relação aos custos ambientais.

Ao final desta dissertação, sugere-se também uma série de recomendações para trabalhos futuros:

- a) Estender a análise para seções submetidas à flexocompressão oblíqua;
- b) Ampliar a formulação desenvolvida para o dimensionamento de pilares considerando efeitos de segunda ordem, relacionados às condições de apoio e comprimento do pilar, partindo também para a otimização de pórticos de concreto armado;
- c) Prosseguir estudos dos parâmetros do método da Busca Harmônica, melhorando ainda mais o desempenho do método;
- d) Obter valores de custos ambientais mais adequados à realidade local, por meio da utilização das ferramentas computacionais disponíveis para Análise do Ciclo de Vida (ACV), bem como com a utilização de bancos de dados com informações nacionais sobre os insumos do concreto armado;
- e) Desenvolver a otimização dos custos ambientais para outros elementos de estruturas de concreto armado, como, por exemplo, vigas.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. 2. ed. Rio Grande: Dunas, 2003. 3 v. 244 p.
- ARGOLO, W. P. **Otimização de seções de concreto armado submetida à flexocompressão reta utilizando algoritmos genéticos**. 2000. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro: 2009.
- BARBOSA JÚNIOR, A. F.; MORAIS R. M. de; EMERENCIANO, S. V.; PIMENTA, H. C. D.; GOUVINHAS, R. P. Conceitos e Aplicações de ACV no Brasil. IN: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2007, Foz do Iguaçu. **Anais do XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Foz do Iguaçu, 2007.
- BASTOS, E. A. **Otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexo-compressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos**. 2004. 168 f. Tese (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- BORDIGNON, R. **Otimização de pilares retangulares em concreto armado submetidos à flexocompressão reta**. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010.
- BREMNER, T. W. Environmental aspects of concrete: problems and solutions. In: FIRST ALL-RUSSIAN CONFERENCE ON CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE, 2001, Moscou. **Proceedings of First All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete**. Moscou, 2001.
- CAMP, C. V.; PEZESHK, S.; HANSSON H. Flexural Design of Reinforced Concrete Frames Using a Genetic Algorithm. **Journal of Structural Engineering**, v. 129, n. 1, p. 105-115, fev. 2003.

CHAVES, I. A. **Otimização de pilares de concreto armado mediante uniformização do índice de confiabilidade**. 2004. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DEGERTEKIN, S. O. A comparison of simulated annealing and genetic algorithm for optimum design of nonlinear steel space frames. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 34, p. 347–359, 2007.

DEGERTEKIN, S. O. Optimum design of steel frames using harmony search algorithm. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 36, p. 393–401, 2008.

DEGERTEKIN S. O; HAYALIOGLU, M. S. Harmony search algorithm for minimum cost design of steel frames with semi-rigid connections and column bases. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 42, p. 755-768, 2010.

DENILSON J.; HALLIGAN C. **Building Materials and the Environment**. Leicester: Stephen George & Partners LLP, 2010.

DORIGO, M., STULTZE, M. **Ant Colony Optimization**. Cambridge: MIT Press, 2004. 305 p.

EDVARDSSEN, C.; TOLLOSE, K. Environmentally “Green” Concrete Structures. In: FIB SYMPOSIUM "CONCRETE AND ENVIRONMENT", 2001, Berlin. **Proceedings of FIB Symposium "Concrete and Environment"**. Berlin, 2001.

FERREIRA, J. V. R. **Análise de ciclo de vida dos produtos**. Viseu: Instituto Politécnico de Viseu, 2004.

FIALA, C; HÁJEK, P. Environmentally based optimisation of RC slabs with lightening fillers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE "ADVANCED ENGINEERING DESIGN (AED) 2006", 2006, Praga. **Proceedings of International Conference "Advanced Engineering Design (AED) 2006"**. Praga, 2006.

GARCIA, D. B.; RODRIGUES F. C.; AGUILAR, M. T. P. Avaliação de Ciclo de Vida de um elemento estrutural pilar em aço X pilar em concreto armado. In: 2º CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DE CICLO DE VIDA DE PRODUTOS E SERVIÇOS, 2010, Florianópolis. **Anais do 2º Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida de Produtos e Serviços**. Florianópolis, 2010.

GEEM, Z. W.; KIM J. H.; LOGANATHAN G. V. A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. **Simulation**, v. 76, n. 2, p. 60-68, fev. 2001.

GIONGO, J. M. **Concreto Armado**: Introdução e propriedade dos materiais. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007.

GLOVER, F., LAGUNA, M. **Tabu Search**. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1997. 408 p.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison-Wesley Professional, 1989. 432 p.

GONZÁLEZ-VIDOSA F.; YEPES V.; ALCALÁ J.; CARRERA, M.; PEREA, C.; PAYÁ-ZAFORTEZA, I.; Optimization of Reinforced Concrete Structures by Simulated Annealing. In: TAN, C. M. **Simulated Annealing**. I-Tech Education and Publishing, 2008. p. 307-320.

GUIA DA CONSTRUÇÃO. **Índices e Custos**. São Paulo: Pini, ed. 130, maio 2012.

HÁJEK, P. Integrated environmental design and optimization of concrete floor structures for buildings. In: THE 2005 WORLD SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE, 2005, Tóquio. **Proceedings of The 2005 World Sustainable Building Conference**. Tóquio, 2005.

HASANÇEBI, O; ERDAL, F. SAKA, M. P. Adaptive Harmony Search Method for Structural Optimization. **Journal of Structural Engineering**, v. 136, n. 4, p. 419-431, abr. 2010.

HSU, S. L. **Improving the Quality and Transparency of Building Life Cycle Assessment**. 2011. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Tecnologia de Construção) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2011.

INTERCEMENT. **Relatório Anual 2010**: Como funciona o mercado cimenteiro. Disponível em: <<http://www.intercement.com/RS2010/pt/como-funciona-o-mercado-cimenteiro/>>. Acesso em: 19 nov. 2011.

JOHNSON, T. W. **Comparison of environmental impacts of steel and concrete as building materials using the Life Cycle**. 2006. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2006.

KENNEDY J.; EBERHARDT R. C. Particle swarm optimization. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 1995, Perth. **Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks**. Perth, 1995.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C.D.; VECCHI, M.P. Optimization by Simulated Annealing. **Science**, Nova York, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983.

LEE K. S.; GEEM, Z. W. A new structural optimization method based on the harmony search algorithm. **Computers and Structures**, v. 82, p. 781-798, 2004.

MAHDAVI M.; FESANGHARY M.; DAMANGIR E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 188, n. 2, p. 1567-1579, 2007.

MAIA, J. P. R. **Otimização estrutural: estudo e aplicações em problemas clássicos de vigas utilizando a ferramenta Solver**. 2009. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MARTÍNEZ-MARTÍN, F. J. **Optimización heurística de pilas rectangulares huecas de hormigón armado**. 2008. 327 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2008.

MEHTA, P. K. Reducing the Environmental: Concrete can be durable and environmentally friendly. **Concrete International**, p. 61-66, out. 2001.

MONTOYA, P. J.; MESEGUER, A. G.; CABRÉ, F. M. **Hormigón Armado**. 12. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1987. 2 v. 456 p.

NINA, T. C. **Otimização de seções transversais de concreto armado: aplicação a pórticos planos**. 2006. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

NOGUEIRA, C. G. **Um modelo de confiabilidade e otimização aplicado às estruturas de barras**. 2005. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

OCHSENDORF, J.; NORFORD, L. K.; BROWN, D.; DURSCHLAG, H.; HSU, S. L.; LOVE, A.; SANTERO, N.; SWEI, O.; WEBB, A.; WILDNAUER, M. **Methods, Impacts, and Opportunities in the Concrete Building Life Cycle**. Cambridge: Department of Civil and Environmental Engineering of Massachusetts Institute of Technology, 2011.

OLIVEIRA, A. S. **Análise ambiental da viabilidade da seleção de produtos da construção civil através da ACV e do software BEES 3.0.** 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

OMETTO, A. R. Avaliação do Ciclo de Vida. IN: I SIMPÓSIO SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS DA USP, 2009, São Carlos. **Anais do I Simpósio sobre Resíduos Sólidos da USP.** São Carlos, 2009.

PAYÁ-ZAFORTEZA, I., YEPES V.; CLEMENTE, J. J.; GONZÁLEZ-VIDOSA F. Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 22, n.3, p. 241-259, 2006.

PAYÁ-ZAFORTEZA I. **Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado.** 2007. 325 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Politécnica de Valencia, Valencia, 2007.

PAYÁ-ZAFORTEZA, I., YEPES V.; GONZÁLEZ-VIDOSA F.; HOSPITALER. A. Multiobjective Optimization of Concrete Frames by Simulated Annealing. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 23, p. 596-510, 2008.

PAYÁ-ZAFORTEZA, I, YEPES V.; HOSPITALER. A; GONZÁLEZ-VIDOSA F. CO₂-Optimization of Reinforced Concrete Frames by Simulated Annealing. **Engineering Structures**, v. 31, p. 1501-1508, 2009.

PAYÁ-ZAFORTEZA, I., YEPES V.; GONZÁLEZ-VIDOSA F.; HOSPITALER. A. On the Weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing. **Meccanica**, v. 45, p. 693-704, 2010.

PEREA C.; BAITSCH M.; GONZÁLEZ-VIDOSA F.; HARTMANN, D. Optimization of reinforced concrete frame bridges by parallel genetic and memetic algorithms. In: ZINGONI A. **Structural Engineering, Mechanics and Computation 3.** Millpress, 2007. p. 1790-1795.

PEREA C.; ALCALÁ, J.; YEPES, V.; GONZÁLEZ-VIDOSA F.; HOSPITALER. A. Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization. **Advances in Engineering Software**, v. 39, n. 8, p. 676-688, ago. 2008.

PEYROTEO, A.; SILVA M.; JALALI, S. Life cycle assessment of steel and reinforced concrete structures: a new analysis tool. In: BRAGANÇA L. et al. (Org.). **Portugal SB' 07: Sustainable, Materials and Practices: Challenges for the New Millennium.** IOS Press, 2007. p. 397-402.

PHAM D. T.; GHANBARZADEH A.; KOÇ E.; OTRI S.; RAHIM S.; ZAIDI M. The Bees Algorithm - A Novel Tool for Complex Optimisation Problems. In: PHAM D. T.; ELDUKHRI, E. E.; SOROKA, A. J (Org.). **Intelligent Production Machines**. Elsevier Science, 2006. p. 397-402.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO C. D.; SANTOS, S. P. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2005.

RODRIGUES JÚNIOR, S. J. **Otimização de pilares de edifícios altos de concreto armado**. 2005. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SAKA, M. P. Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 65, p. 36-43, 2009.

SAKA, M. P.; ERDAL, F. Harmony search based algorithm for the optimum design of grillage systems to LRFD-AISC. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 38, p. 25-41, 2009.

SALLABERRY, R. R. **Emprego da Avaliação do Ciclo de Vida para levantamento dos desempenhos ambientais do biodiesel de girassol e do óleo diesel**. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SANTOS, R. E. dos; OLIVEIRA, B. J. A armação do concreto no Brasil: história da difusão da tecnologia do concreto armado. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, Belo Horizonte, v.15, n.16, p. 48-59, 1. sem. 2008.

SILVA, E. E. da. **Otimização de estruturas de concreto armado utilizando algoritmos genéticos**. 2001. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

STRUBLE, L.; GODFREY, J. How sustainable is concrete? In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND CONCRETE TECHNOLOGY, 2004, Pequim. **Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology**. Pequim, 2004.

SUJI D.; NATESAN S. C.; MURUGESAN, R.; PRABHUD, R. S. Optimal design of fibrous concrete beams through simulated annealing. **Asian Journal of Civil Engineering: Building and Housing**, v. 9, n. 2, p. 193-213, 2008.

TAKEDA, A. **Levantamento de métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) e análise comparativa dos métodos mais utilizados**. 2008. 129 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

UDO de HAES, H.A.; FINNVEDEN G.; GOEDKOOP M.; HAUSCHILD, M.; HERTWICH, E.; HOFSTETTER, P.; JOLLIET, O.; KLÖPFFER, W.; KREWITT, W.; LINDEIJER, E.; MUELLER-WENK, R.; MUELLER-WENK, I.; PENNINGTON, D.; POTTING, J.; STEEN; B. **Life-Cycle Impact Assessment – Striving towards best practice**. US: SETAC Press, 2002.

USEPA. **Life Cycle Assessment: Principles and Practice**. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2006.

VALLE F. J. C del; LÓPEZ, C. A. E. **Análisis de Ciclo de Vida del concreto en México**. Monterrey: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2005.

VIANNA, L. C. C. **Otimização de seções transversais de concreto armado: aplicação a pórticos**. 2003. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

YEO, D.; GABBAI R. D. Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 2028–2033, 2011.

YEPES, V.; GONZÁLEZ-VIDOSA F; ALCALÁ, J.; VILLALBA, P. CO₂-Optimization Design of Reinforced Concrete Retaining Walls Based on a VNS-Threshold Acceptance Strategy. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 26, n. 3, p. 378–386, 2012.

ZIELINSKI Z. A.; LONG W.; TROITSKY M. S. Designing Reinforced Concrete Short-Tied Columns Using the Optimization Technique. **ACI Structural Journal**, v.92, n. 5, p. 619–625, 1995.