

# METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE ENGENHARIA NATURAL EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA

---

*Charles Rodrigo Belmonte Maffra  
Fabrício Jaques Sutili*

A Engenharia Natural, assim como outras disciplinas da Engenharia, dispõe de um conjunto de procedimentos que servem para auxiliar a tomada de decisão do engenheiro durante a elaboração de um projeto. Esses procedimentos são semelhantes aos empregados em projetos convencionais de Engenharia Civil, diferindo apenas por peculiaridades intrínsecas à vegetação, da qual se obtém os materiais construtivos vivos, principal diferencial das obras biotécnicas. O procedimento de projeto de Engenharia Natural para aplicação em obras de infraestrutura aqui apresentado é constituído por três etapas: a conceitual, a básica e a executiva. Para que essas três etapas sejam plenamente desenvolvidas, existem objetivos específicos para cada uma delas. Tais objetivos, quando observados, servem de orientação segura e objetiva no processo decisório do projetista.

## Introdução

<sup>1</sup> **Engenharia** – enquanto são utilizados dados técnicos e científicos com fins construtivos, de consolidação e anti-erosivos; **Natural** – enquanto são utilizados materiais vivos, predominantemente plantas de espécies locais, com a finalidade de reconstrução do ecossistema natural próximo do original e o aumento da biodiversidade – também se considera o emprego de materiais mortos de origem vegetal (MENEGAZZI, G. & PALMERI, F. *Il dimensionamento delle opere di ingegneria naturalistica*. Direzione Regionale Infrastrutture, Ambiente e Politiche abitative – Regione Lazio, Roma, 2013.).

A aplicação das soluções de Engenharia Natural<sup>1</sup> em obras de infraestrutura precisa, indispensavelmente, de um projeto para definir e hierarquizar as etapas e atividades em uma sequência analítica de desenvolvimento. A quantidade de informações geradas em empreendimentos de infraestrutura é muito grande, o que torna praticamente impossível manter o controle de qualidade – segurança econômica e ambiental – sem lançar mão de um documento escrito que sirva como referência a ser seguida. A falta de um documento desse tipo pode aumentar a chance de equívocos, além de reduzir a qualidade das obras como um todo, pois fomenta a tomada de decisões subjetivas e, geralmente, o emprego de procedimentos de implantação com base em conclusões precipitadas.

Para evitar esses problemas, a Engenharia Natural, assim como outras disciplinas da Engenharia, dispõe de um conjunto de procedimentos que servem para auxiliar o processo decisório do engenheiro durante a elaboração de um projeto. Esses procedimentos são semelhantes aos empregados em projetos convencionais de Engenharia Civil, diferindo apenas por peculiaridades que dizem respeito à vegetação, da qual se obtém os materiais construtivos vivos, que são o principal diferencial das obras biotécnicas.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> SCHIECHTL, H. M. & STERN, R. *Ground Bioengineering Techniques for Slope Protection and Erosion Control*. Oxford: Blackwell Science Publications, 1996. MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. (Ed.). *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. London: E & FN SPON, 1995. 274 p.

O procedimento de projeto de Engenharia Natural para a aplicação em obras de infraestrutura aqui apresentado é constituído por três etapas: a conceitual, a básica e a executiva.

Para que essas três etapas sejam plenamente desenvolvidas, existem objetivos específicos para cada uma delas, os quais, quando observados, constituem orientação objetiva e analítica no processo decisório do projetista.

No presente artigo, as fases de projeto mencionadas são apresentadas em ordem de desenvolvimento. Inicialmente são descritos os objetivos que devem ser alcançados em cada uma das três fases de projeto. Após, são definidas e descritas, em tópicos, as atividades que devem ser realizadas para atingir os objetivos de cada fase. Ao longo da seção, os tópicos principais são organizados em esquemas, e ao seu término, é apresentado um fluxograma que condensa a sequência do método de abordagem.

## Fases de um projeto de Engenharia Natural

Cada uma das fases de um projeto de Engenharia Natural tem o objetivo de responder a diferentes questões

durante o processo decisório envolvido na prática de Engenharia Natural aplicada em obras de infraestrutura. Desses objetivos resultam características específicas que podem ser resumidamente explicadas da seguinte maneira:

*Fase conceitual* – são identificados os problemas e os objetivos do projeto; as alternativas de tratamento são formuladas e é prescrita a aquisição de informações específicas e necessárias para a elaboração das fases subsequentes.

*Fase básica* – são selecionadas as intervenções mais adequadas; a fenomenologia do problema é estudada e considerada no dimensionamento das intervenções; os riscos são analisados e as considerações estéticas e ecológicas das intervenções são feitas.

*Fase executiva* – abordam-se as informações necessárias para a implantação da obra; para isso, as atividades e serviços são descritos minuciosamente. Nessa fase é especificada a forma como as estruturas devem ser construídas, incluindo-se os desenhos detalhados e as plantas de projeto; seguem-se o cronograma executivo e as formas de monitoramento e manutenção da obra; além disso, são elencados, quantificados e orçados os materiais e a mão-de-obra necessários para tal.

## 1 *Objetivos de projeto*

### 1.1 *Fase conceitual*

A fase conceitual busca atingir três objetivos: identificar os objetivos do projeto, identificar as alternativas de tratamento e prescrever a aquisição de informações adicionais ao projeto.

#### I – Identificar os objetivos do projeto

O primeiro objetivo da fase conceitual é identificar, ou seja, nomear e classificar, bem como descrever qualitativamente as demandas da intervenção. É preciso considerar claramente quais requisitos técnicos (proteção, estabilização e/ou consolidação) são necessários ao sistema objeto do projeto, que, em se tratando de Engenharia Natural, quase sempre consiste de um sistema natural<sup>3</sup>.

#### II – Identificar as alternativas de tratamento

Depois de identificadas as necessidades para se alcançar a estabilidade do sistema, esse conjunto de informações constitui a base para iniciar a identificação e a escolha das alternativas viáveis de Engenharia Natural, que atendam aos objetivos requeridos pelo projeto. Nesta fase, a viabilidade das alternativas é analisada, contudo, apenas qualitativamente.

<sup>3</sup> Como sistema natural entende-se os locais de interesse de um determinado projeto, bem como suas feições, elementos inertes e vivos e sua interação com o entorno. Podem ser citados como exemplo de sistemas naturais, ecossistemas em geral, sistemas fluviais, bacias hidrográficas, encostas ou vertentes, fundos de vales e qualquer um de seus subsistemas em qualquer nível desejado.

te, uma vez que neste estágio ainda são incipientes as informações quantitativas sobre os processos em questão. Quando apropriado ou necessário, também podem ser formuladas novas sugestões de intervenção de modo empírico e qualitativo, principalmente quando a situação analisada tiver peculiaridades cujos requisitos não são plenamente atendidos pelos métodos de Engenharia Natural já estabelecidos.

### III– Prescrever a aquisição de informações adicionais ao projeto

Para que se possa tornar analítico, o estudo preliminar de viabilidade feito quando se identificam, de modo qualitativo, as alternativas com viabilidade de aplicação, é necessária a prescrição de aquisição de informações que propiciem, nas próximas etapas do projeto, uma precisa fundamentação teórica. Essa prescrição constitui o terceiro objetivo da fase conceitual e compreende a descrição das informações a serem obtidas, os métodos para sua obtenção, as quantidades necessárias de dados, de ensaios, e as formas de apresentação dos seus resultados. De modo geral, esse conjunto de prescrições engloba os seguintes dados: levantamentos e ensaios de campo, laboratório, informações documentais e outros dados que se entendam necessários de acordo com a tipologia da área e as especificidades do problema.

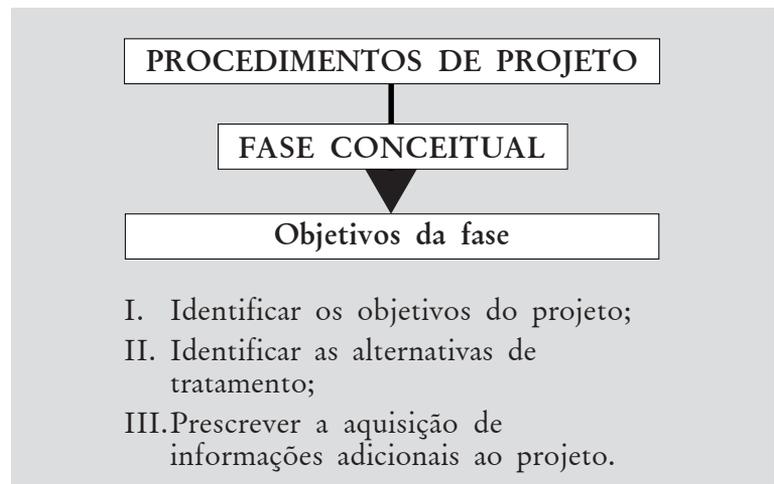


Figura 1: Objetivos da fase conceitual de projeto.

#### 1.2 Fase básica

A fase básica busca atingir cinco objetivos principais: escolher a abordagem de projeto, dimensionar as interven-

ções, estimar os custos, analisar os riscos associados e avaliar estética e ambientalmente as intervenções.

### I – Escolher a abordagem de projeto

A partir das soluções apontadas na fase conceitual, o primeiro objetivo da fase básica de projeto é escolher aquela que seja a mais viável quanto aos critérios técnicos, econômicos, de exequibilidade, ecológicos, estéticos, de manutenção e de segurança. Nesta fase, o processo é conduzido analiticamente, ou seja, as inferências feitas na fase conceitual são fundamentadas por informações numéricas obtidas por cálculos específicos, baseadas em leis empíricas ou formulações analíticas que descrevam a fenomenologia identificada. O processo que envolve essa tomada de decisão é flexível e, por isso mesmo, novas análises quantitativas (principalmente os dimensionamentos da fase posterior) são realizadas e diferentes condições são constatadas, de modo que a definição das alternativas pode ser adaptada ou substituída para melhor atender às necessidades de projeto.

### II – Dimensionar as intervenções

O segundo objetivo da fase de projeto básico é determinar a forma de intervenção, o tipo de material (vivo e/ou inerte), as dimensões, as configurações e o conjunto de todos os elementos constituintes da intervenção. A determinação desse conjunto de informações é comumente chamada de dimensionamento. É nesta etapa, portanto, que são realizados os dimensionamentos hidrológico, hidráulico, estrutural, geotécnico e vegetacional (escolha e uso de plantas com as características biotécnicas adequadas para cada tipo de intervenção em específico). Os resultados do dimensionamento também podem apontar que uma alternativa já escolhida não é a mais adequada para a correção do problema, e a necessidade de reconsideração da abordagem de projeto – adaptar ou substituir a técnica interventiva.

### III – Estimar os custos

A estimativa de custos tem por finalidade atestar a viabilidade econômica da solução tecnicamente dimensionada. Nesta fase, a questão econômica é ainda avaliada de modo aproximado, sendo por essa razão denominada estimativa de custos, uma vez que somente o detalhamento executivo fornece a informação essencial para uma análise de viabilidade econômica mais precisa. Contudo, essa estimativa é suficiente para orientar e confirmar, ou não, a escolha da(s) alternativa(s) cuja viabilidade técnica já está confirmada.

<sup>4</sup> Na Engenharia Natural essas considerações são mais acentuadas, uma vez que o material construtivo, por ser vivo, traz mais incertezas do que as aplicações puramente com materiais inertes, tais como as realizadas em técnicas tradicionais de engenharia. Os materiais inertes manufaturados têm suas propriedades intrínsecas, principalmente de resistência, bem determinadas, e por essa razão, cálculos acurados para o dimensionamento de estruturas podem ser realizados. O conhecimento das propriedades técnicas da vegetação ainda não está nesta fase analítica, portanto, não permite exatamente as mesmas descrições e aplicações quantitativas.

<sup>5</sup> Os princípios orientadores da Engenharia Natural também apresentam finalidades não técnicas, as quais estão ligadas à composição da paisagem e contribuição aos aspectos ambientais.

<sup>6</sup> O ecossistema é a unidade funcional básica da ecologia, incluindo tanto os organismos vivos quanto o ambiente abiótico onde sobrevivem (ODUM, E. P. *Ecologia*. Rio de Janeiro: Interamericana, 434 p., 1985). Nesse âmbito, a Engenharia Natural projeta fitocenoses que gradualmente são incorporadas ao ecossistema local, possibilitando a união dos pontos fragmentados e as condições necessárias para o aumento da biodiversidade florística e faunística. Para Cornellini & Sauli (CORNELINI, P. & SAULI, G. *Manuale di indirizzo delle scelte progettuali per interventi di ingegneria naturalistica*. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio – Direzione Generale per la Difesa del Suolo – PODIS, Roma, 389 p., 2005), a Engenharia Natural projeta ecossistemas paranaturais mediante o emprego de espécies vegetais de ocorrência local.

<sup>7</sup> Conjunto de espécies vegetais que ocupam um determinado habitat.

#### IV – Analisar os riscos associados

Mesmo que analítico, o dimensionamento de obras em sistemas naturais envolve incertezas, uma vez que os mesmos são regidos por fenômenos complexos, erráticos e randômicos.<sup>4</sup>

Assim, deve-se avaliar quantitativamente o risco associado a essas incertezas, ou seja, quais as possibilidades de a obra vir a falhar no caso de uma solicitação predeterminada (solicitação tomada com base nos dimensionamentos). Tais informações remetem à segurança da obra e ao custo financeiro necessário para sua implantação; por essa razão, revertem-se de importância no processo que define a escolha de uma configuração em detrimento de outra.

#### V – Avaliar estética e ambientalmente as intervenções

Por fim, é necessário avaliar estética e ambientalmente as intervenções<sup>5</sup>, estimando-se os ganhos advindos de sua implementação. Além disso, deve-se analisar os impactos para além do ponto de intervenção e descrever a evolução da obra com o tempo e sua integração ao ecossistema<sup>6</sup> e a paisagem. Deve-se ter em mente que, mesmo nos casos em que as funções estéticas e ecológicas não são tratadas prioritariamente como objetivo do projeto, em maior ou menor medida uma composição vegetal ou fitocenose<sup>7</sup>, que evoluirá e será integrada aos poucos ao ecossistema, está sendo projetada<sup>8</sup>. Ecossistemas paranaturais (ou seja, que são semelhantes ao original), tais como os projetados pela Engenharia Natural, são sistemas dinâmicos que se desenvolvem ao longo do tempo e, por isso, previsões de sua formação e desenvolvimento devem ser realizadas.

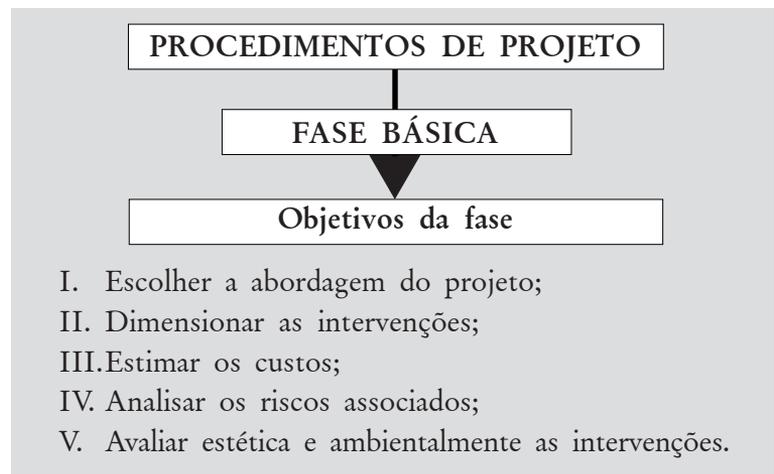


Figura 2: Objetivos da fase básica de projeto.

<sup>8</sup> MORGAN, R. C. & RICKSON, R. J. (Ed.). *Op. cit.*

### 1.3 Fase executiva

A fase executiva é a última fase de projeto e busca atingir sete objetivos principais: otimizar as intervenções, detalhar as soluções, especificar os materiais, descrever os serviços, elaborar o cronograma executivo, especificar o monitoramento e a manutenção das intervenções.

#### I – Otimizar as intervenções

Uma vez dimensionadas as intervenções, o primeiro objetivo da fase executiva concentra-se na otimização das mesmas. O detalhamento torna possível que o gasto de materiais, o impacto da execução e os demais recursos envolvidos sejam minimizados. Deve-se atentar para que sejam aplicados apenas os recursos necessários para a mitigação e/ou solução dos problemas encontrados.

#### II – Detalhar as soluções adotadas

O detalhamento minucioso das soluções adotadas compreende as descrições tipológica, de material e geométrica dos arranjos, elementos conjuntos e individuais. Essas informações também são sintetizadas em desenhos e plantas detalhadas e precisas, que constituem uma ferramenta indispensável de consulta a campo no momento da implantação. O detalhamento torna possível a interpretação das intervenções planejadas e dimensionadas durante as fases anteriores, e possibilita que as soluções sejam descritas, orçadas e finalmente executadas.

#### III – Especificar os materiais

Este objetivo consiste na listagem das propriedades físicas, químicas e biológicas, bem como dos requisitos mínimos de desempenho, dos critérios de aceitação, estocagem, manuseio e emprego na obra de acordo com o tipo de material – vivo e/ou inerte – a ser empregado.

#### IV – Descrever os serviços

A descrição dos serviços compreende tanto as atividades em si, quanto a sequência cronológica de cada etapa dos serviços. Abrange todas as etapas das obras de implantação de uma intervenção e geralmente são apresentadas na forma de um documento denominado Memorial Descritivo.

#### V – Elaborar o cronograma e o orçamento

A descrição dos serviços constitui a base para a elaboração do cronograma de atividades e também de orçamento que inclua os custos dos materiais e das atividades necessárias para a implantação das obras. O cronograma planifica o tempo necessário para elaboração das atividades que com-

preendem a execução dos trabalhos, bem como define a época do ano mais apropriada para a implantação, considerando as necessidades fisiológicas dos materiais vivos utilizados. No orçamento são especificados os custos e valores unitários e totais de todas as atividades, serviços e materiais que a obra necessita para ser executada.

#### VI – Especificar o monitoramento

A especificação do monitoramento se constitui em mais um objetivo relacionado à dinâmica do ecossistema. Essa etapa tem a função de garantir que o conjunto de estruturas constituídas pela associação de elementos estruturais inertes e vivos evolua conforme o esperado. Deve-se assegurar que as estruturas inertes (que conferem a estabilidade inicial ao terreno e suporte à vegetação) mantenham sua integridade, no mínimo, por tempo suficiente ao estabelecimento do material vivo, que passa, então, a assumir a função de estabilização e/ou consolidação da área afetada. Assim, a importância do monitoramento reside no diagnóstico das inconformidades encontradas imediatamente após a instalação das intervenções, bem como as encontradas ao longo do processo de estabelecimento do sistema dinâmico implantado. O atendimento desses requisitos fornece as bases necessárias para que as atividades de manutenção possam ser planejadas, seja em caráter emergencial ou de rotina periódica e pré-programada. Para isso são definidos prazos, periodicidade e as ações que devem ser realizadas durante as verificações *in situ*.

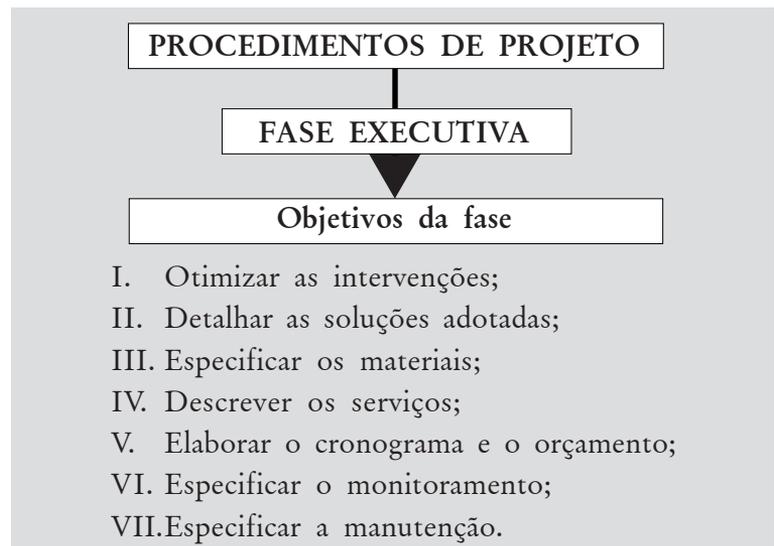


Figura 3: Objetivos da fase executiva de projeto.

## VII – Especificar a manutenção

A manutenção tem o objetivo de garantir que todos os trabalhos planejados e executados mantenham sua qualidade no período imediatamente posterior às obras, bem como mantenham ou mesmo propiciem o aumento gradual das qualidades do sistema dinâmico implantado.

### 2 Atividades de projeto

A identificação da relação entre atividades e ações práticas das fases de projeto e os seus objetivos é indispensável para a elaboração de uma metodologia hierarquizada de projeto. Portanto, uma vez que os objetivos específicos de cada fase estejam definidos, é necessário analisar quais atividades devem ser desenvolvidas para que os mesmos sejam alcançados. Com esse intuito, as atividades correspondentes aos objetivos das três fases de projeto – conceitual, básica e executiva – são detalhadas e, ao final de cada uma, são identificados os respectivos produtos gerados, ou seja, as informações resultantes.

#### 2.1 Conceitual

Para atender aos objetivos dessa fase, as seguintes atividades são desenvolvidas: visita de avaliação em campo, medições expeditas de campo, análise de informações de escritório, análise qualitativa da fenomenologia, identificação e formulação das intervenções e especificação dos mecanismos de aquisição de informações detalhadas.

##### I – Avaliação inicial em campo

Observar as feições do problema, as características do local e do entorno, perceber as interações dessas características com os processos desencadeados, bem como avaliar as condições da bacia hidrográfica ou da área de contribuição que o problema envolve. Observar as características da vegetação local buscando identificar, ou não, a ocorrência de espécies com propriedades biotécnicas comprovadas ou com características potenciais para a aplicação em obras de Engenharia Natural. Caso sejam encontradas, verificar a possibilidade de coleta de material vegetativo em quantidade suficiente para a aplicação direta, ou se existe necessidade de propagar maior quantidade em local apropriado. Caso não sejam identificadas *in situ* espécies com atributos biotécnicos necessários para as aplicações, devem ser buscadas informações sobre espécies regionais nativas e que ocorram preferencialmente na mesma região fitoecológica e/ou bioma.

Observar também se nas proximidades existe a disponibilidade de materiais inertes (madeira, rochas, cascalho etc.) que prontamente possam ser utilizados nas intervenções. Informações preliminares como essas fornecem indicadores de quais intervenções podem ser feitas e que recursos necessariamente devem ser mobilizados para a realização da obra.

## II – Medições expeditas de campo

Embora a fase conceitual seja essencialmente qualitativa, medições expeditas realizadas em campo constituem uma orientação inicial para o engenheiro compreender a fenomenologia e as relações que são responsáveis pelos processos desencadeados. Como medições expeditas citam-se, por exemplo, as avaliações de gradientes de margens de rios e encostas, estimativas de velocidades e vazões de escoamento, medições das feições erosivas e a caracterização tátil-visual da textura dos solos.

## III – Análise de informações documentais

Essa atividade consiste em coletar e reunir informações em documentos existentes que auxiliem na caracterização dos processos e também da área e seu entorno, tais como: relatórios prévios, imagens de satélite, bases cartográficas, dados climáticos e bancos de dados de órgãos públicos e/ou privados. Também podem ser reunidas – se disponíveis – informações de séries históricas de dados hidrológicos, uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica, bem como de geologia, geomorfologia, sedimentologia do curso de água e informações prévias sobre a vegetação local com potencial biotécnico (espécies ocorrentes e localização). Informações que não são séries históricas, e que não estão disponíveis, devem ser obtidas em atividades específicas *in situ*.

## IV – Análise qualitativa da fenomenologia

Com base nas informações obtidas nas atividades anteriores, são identificados os objetivos técnicos do projeto, ou seja, são definidas as propriedades de engenharia do sistema natural envolvido que precisam ser corrigidas por meio de proteção, estabilização e/ou consolidação. Como exemplos dessas propriedades podem ser destacados os aspectos relativos ao solo (o tipo de textura, a desagregação, a cobertura superficial, diagnóstico visual da estabilidade etc.), ao escoamento (o regime de fluxo e os pontos onde este afeta a estabilidade das margens) e ao transporte de sedimentos (dimensão das partículas transportadas). A aná-

lise conjunta dessas propriedades propicia as bases necessárias para descrição qualitativa do problema encontrado e é indispensável para a formulação inicial das intervenções que possam atender às necessidades diagnosticadas.

#### V – Identificação e formulação das intervenções

Com base nas necessidades identificadas na análise qualitativa da fenomenologia, podem ser listadas as possíveis formas de tratamento utilizando-se técnicas de Engenharia Natural para tratar o problema. Para isso, são levados em conta os seguintes fatores:

- Atendimento aos requisitos técnicos – procurar esquemas construtivos constituídos por materiais inertes e vivos cuja associação responda às necessidades requeridas, com a mínima alteração possível do ambiente;
- Atendimento aos requisitos não técnicos – considerar as funções ecológicas e estéticas que devem ser agregadas ao projeto de acordo com a área de implantação (zona rural ou urbana, ambiente natural ou alterado);
- Restrições quanto aos materiais – identificar a disponibilidade local de materiais inertes e vivos, bem como a interação entre eles (como podem ser utilizados em conjunto). Sempre que possível, utilizar materiais de ocorrência local ou regional (um dos princípios guia da Engenharia Natural), recorrendo-se a fontes externas apenas em situações necessárias (ausência local de materiais vivos ou inertes).
- Restrições quanto ao ambiente – condições de desenvolvimento do material vivo, conservação dos materiais inertes e vivos e manutenção das combinações entre estes;
- Restrições econômicas – avaliação da mão de obra, dos materiais, da execução, da manutenção – a partir dessa avaliação prévia, optar por soluções economicamente justificáveis;
- Restrições de impacto ambiental – avaliação dos impactos dentro e fora dos limites do local de intervenção, limitando-se à escolha das alternativas qualitativamente definidas como menos impactantes;
- Restrições locais – existência de infraestrutura ou benfeitorias, ocupação humana, e quaisquer outros objetos ou condições locais que limitem as intervenções previstas.

#### VI – Especificação dos mecanismos de aquisição de informações detalhadas

O último objetivo da fase conceitual diz respeito à prescrição específica dos métodos de aquisição de informações em nível quantitativo que são utilizadas nas próximas

fases de projeto. Essas informações devem ser listadas em conformidade e em complemento às informações qualitativas já obtidas; também devem ser evidenciados o grau de exatidão e detalhamento, suas quantidades, locais e formas de obtenção. De modo geral, a prescrição quantitativa abrange levantamentos topográficos, ensaios geotécnicos, levantamentos florísticos, fitossociológicos e faunísticos (quando for o caso), análises químicas e físicas do solo, obtenção de séries históricas de dados hidrológicos etc.

#### VII – Produtos da fase conceitual

Ao final da fase de projeto conceitual, são geradas as seguintes informações: relatório conceitual com fotografias, esquemas e descrição dos objetivos, descrição qualitativa dos fenômenos e apresentação e descrição das possíveis alternativas de correção dos problemas fazendo uso de imagens e/ou plantas esquemáticas.

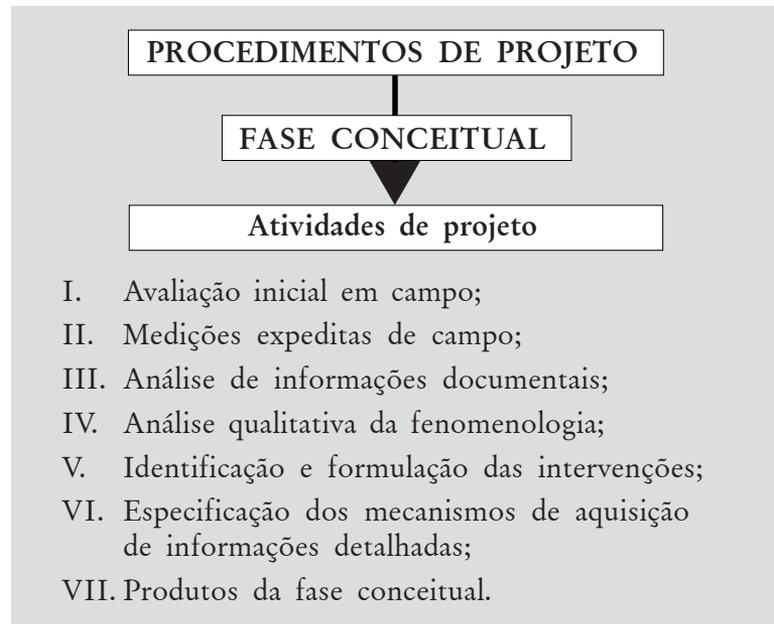


Figura 4: Atividades da fase conceitual de projeto.

#### 2.2 Fase básica

Para atender aos objetivos dessa fase, as seguintes atividades são desenvolvidas: análise quantitativa da fenomenologia, definição das medidas de tratamento, dimensionamentos, consideração e avaliação dos critérios ambientais e estéticos.

## I – Análise quantitativa da fenomenologia

A partir das informações adquiridas nos levantamentos quantitativos são realizadas as análises específicas do local e dos problemas encontrados para a obtenção de modelos que expliquem o comportamento e levem a um entendimento das causas dos problemas. Os principais agentes e suas propriedades, bem como os processos em que estes atuam, precisam ser identificados e caracterizados. Para isso, as condições hidrológicas da bacia hidrográfica são consideradas para um tempo de retorno consistente aos objetivos do projeto e associadas às suas condições físicas também determinadas. Determinam-se as condições hidráulicas do canal, bem como as condições geotécnicas<sup>9</sup> e edafológicas<sup>10</sup> do solo local. Tais fatores são associados e analisados conjuntamente, e, então, são realizadas as inferências acerca da fenomenologia, da criticidade e da evolução dos processos desencadeados. Por meio da análise explicitada, alcança-se o entendimento das causas do problema, e pode-se então definir as soluções tecnicamente mais apropriadas e as variáveis para atender os objetivos de correção requisitados.

## II – Definição das medidas de tratamento

A compreensão analítica da fenomenologia, da criticidade e da evolução dos processos desestabilizantes do sistema natural objeto do projeto possibilita a escolha definitiva das soluções de tratamento, pois fornece critérios de escolha. A definição das medidas de tratamento deve ser fundamentada nas informações qualitativas obtidas na fase conceitual, mas, principalmente, nos parâmetros quantitativos reunidos durante as atividades de projeto básico. As informações específicas advindas de análise quantitativa quanto a aspectos hidrológicos e hidráulicos, condições do solo (estabilidade mecânica e suporte para as plantas), diagnóstico de recomposição e estabilização de leito e/ou taludes, somadas ao conhecimento da disponibilidade regional de materiais inertes e vivos adequados, informações qualitativas da ecologia da paisagem (florística, fitossociologia e fauna quando for o caso), bem como a estimativa prévia dos custos associados, compõem as medidas gerais para a escolha definitiva dos tratamentos que serão implantados. Em resumo, todas as informações levantadas na fase qualitativa (conceitual) são complementadas pelas informações da fase quantitativa (básica), constituindo os fundamentos necessários para a escolha da(s) medida(s) mais adequada(s) de tratamento dos problemas conforme as exigências ambientais, econômicas e de segurança de cada projeto.

<sup>9</sup> Geotécnica é o ramo da engenharia que faz uso da mecânica de solos e das rochas (descreve a resposta das massas aos sistemas de força) para encontrar soluções de planejamento, projeto, construção e operação de obras que envolvem fundação de construções sobre materiais inalterados (escavações e cortes), ou ainda, o uso dos materiais terrosos e rochosos como matérias-primas para a construção (preenchimentos e aterros) – SOWERS, F. G. *Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering*. Fourth edition. New York: Macmillan Publishing Co., Inc, 1979.

<sup>10</sup> O termo edafologia (do grego *edaphos* = terra ou terreno) é por vezes usado como sinônimo de pedologia aplicada ao estudo do solo, sendo este entendido como o meio onde se cultivam as plantas (LEPSCH, I. F. *Formação e conservação dos solos*. São Paulo: Oficina de Texto, 2010.). Tem, por essa razão, relação direta com as disciplinas que tratam dos cultivos florestais e agrícolas.

### III – Dimensionamento

Nesta etapa determinam-se as solicitações para possibilitar o dimensionamento das estruturas, dos elementos e de seus arranjos, inclusive considerando-se as estimativas de custos, níveis de segurança e desenvolvimento da vegetação e seus efeitos. As intervenções são dimensionadas e modeladas de acordo com as solicitações mais desfavoráveis encontradas tanto na situação atual quanto nos cenários de evolução durante toda a vida útil do sistema natural projetado.

A partir do momento em que a demanda crítica (solicitação mais desfavorável) for determinada, têm-se então, as bases para o dimensionamento das estruturas interventivas, respeitando-se que os esforços máximos<sup>11</sup> nas estruturas, elementos e arranjos utilizados devem ser menores ou iguais aos esforços admissíveis. Para isso, são necessárias análises hidrológica, hidráulica, geotécnica e da vegetação. São essas informações que possibilitam projetar estruturas e configurações compatíveis com a resolução do problema. É ainda por meio dessa atividade que se alcança o objetivo de estimar os riscos, quer pelos tempos de retorno, probabilidades de falha ou fatores de segurança para todos os períodos representativos da vida útil de uma estrutura<sup>12</sup>.

O dimensionamento, neste caso, resulta da aplicação das leis de equilíbrio para um sistema dinâmico. As combinações de solicitações que refletem situações de instabilidade podem ser diversas. Deste modo, procura-se dimensionar não somente estruturas resistentes aos estágios em que as solicitações são as mais desfavoráveis, como também que tenham graus de liberdade<sup>13</sup> suficientes para acomodar apropriadamente as configurações de equilíbrio que um sistema dinâmico apresenta ao longo do tempo.

Por fim, com os dimensionamentos realizados, os custos da obra podem ser estimados e a solução adotada pode ser avaliada quanto a sua viabilidade econômica. Além disso, torna-se possível definir se os níveis de segurança são aceitáveis ou não, bem como realizar previsões da ação da vegetação ao longo do tempo.

### IV – Consideração e avaliação dos critérios ambientais e estéticos

As obras de Engenharia Natural, além de corrigirem a instabilidade dos solos pelo aumento da sua resistência e redução do impacto das solicitações sobre os mesmos, também proporcionam o aumento gradual da qualidade ambiental da área tratada. Para amplificar as qualidades da obra para além dos aspectos econômicos e de segurança, os critérios ambientais e estéticos devem ser considerados.

<sup>11</sup> Descreve-se aqui, de modo generalizado, os esforços, não só puramente mecânicos, ou mesmo hidromecânicos, mas sempre as solicitações que os processos naturais extremos (normalmente chuvas intensas) impõem aos sistemas naturais (sistemas fluviais representados pelo curso de água e seus componentes ecossistêmicos bióticos e abióticos), o que os obriga a encontrar novas configurações de equilíbrio (novos leitos de fluxo onde prevaleça a menor quantidade de energia).

<sup>12</sup> A vida útil de uma intervenção de Engenharia Natural é indeterminada, pois a vegetação se estabelece e continua a se desenvolver ao longo dos anos e a proporcionar melhorias às condições que fornecem proteção aos sistemas naturais. Determinável ou estimável, através de um tempo de retorno (TR), por exemplo, é a vida útil de estruturas inertes que complementam as intervenções fornecendo as condições necessárias de estabilidade enquanto as plantas estão em processo de desenvolvimento. As estruturas associadas que são protegidas pelas intervenções de Engenharia Natural, tais como estradas, pontes, gasodutos etc., também são construídas com base em uma estimativa de durabilidade.

<sup>13</sup> Trata-se de um acréscimo de segurança flexível às condições de equilíbrio que normalmente ocorrem ao longo do tempo em sistemas dinâmicos, tais como os cursos de água e suas áreas de influência.

<sup>14</sup> Vegetação que tem sua origem na região onde é encontrada (HOUISS, A. *Dicionário da língua portuguesa*. 2<sup>a</sup> ed. rev. e aum.. Rio de Janeiro: Objetiva, 2004).

<sup>15</sup> Reduzir a biodiversidade do ambiente significa reduzir os graus de liberdade na manutenção do equilíbrio dinâmico.

Os projetos precisam satisfazer condições que vão desde o uso preferencial de um conjunto diversificado de espécies vegetais autóctones<sup>14</sup> da região de intervenção, até à formulação de combinações que se assemelhem, ou muito se aproximem, da paisagem potencial do local, fornecendo as condições iniciais necessárias para o aumento da biodiversidade natural. Em larga medida, deve-se evitar o que é estranho ao ambiente local e que, segundo os preceitos ecológicos, pode ser prejudicial às interações ocorrentes no meio, como por exemplo, o uso de espécies vegetais invasoras (normalmente exóticas) que podem reduzir a biodiversidade do ambiente<sup>15</sup> tratado. Em Engenharia Natural, os aspectos técnicos, ambientais e estéticos não se dissociam e, portanto, a avaliação das obras deve atentar para a constituição de um ambiente que possibilite o desenvolvimento e a diversidade da biocenose (flora e fauna).

#### V – Produtos da fase básica

Ao final da fase de projeto básico, são geradas as seguintes informações: memorial de cálculo que descreve os fenômenos e o ecossistema envolvido de modo quantitativo (aspectos morfométricos da bacia hidrográfica, hidrologia, hidráulica do canal e vegetação), apresentação dos modelos de intervenção e dos cálculos de dimensionamento (hidráulico, geotécnico, estrutural, riscos associados, configuração e fatores de segurança das estruturas) acompanhados das plantas esquemáticas das intervenções (somente a forma inicial e parcialmente desenvolvida, uma vez que plantas e desenhos detalhados e com especificações fazem parte do projeto executivo).

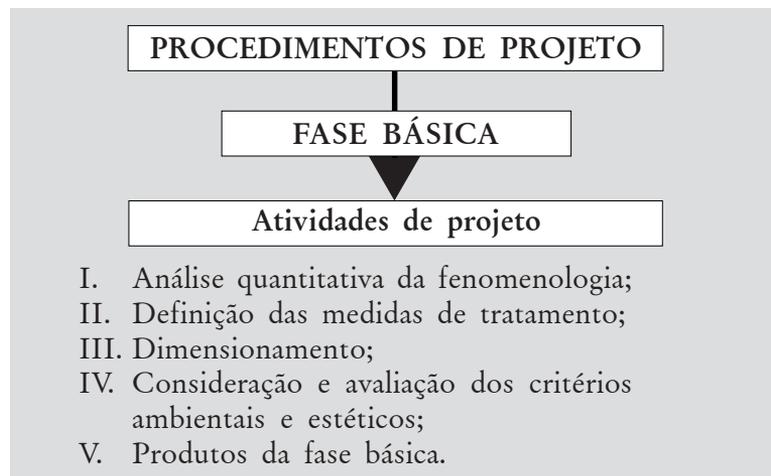


Figura 5: Atividades da fase básica de projeto.

### *2.3 Fase executiva*

Para atender aos objetivos dessa fase, desenvolvem-se as seguintes atividades: detalhamento das soluções, serviços, cronograma de implantação e orçamento, monitoramento e manutenção.

#### I – Detalhamento das soluções

Definidas e dimensionadas as estruturas que compõem as intervenções de Engenharia Natural, pode-se, então, realizar o detalhamento de cada uma delas, atentando para a otimização, especificação e quantificação dos materiais necessários para que sejam construídas. Nesta etapa é realizada a descrição minuciosa de cada estrutura, especificando-se cada tipo de material que a compõe (ex.: madeira, vergalhões de aço, pregos, grampos, material vegetal [estacas, mudas, estolões, rizomas, bulbos, sementes] etc.), e ao mesmo tempo, descrevendo como exatamente cada uma deve ser implantada, indicando-se sequencialmente o procedimento de instalação, inclusive com a elaboração de desenhos e plantas com as medidas e localização detalhadas e em escala de cada intervenção na área de trabalho.

Esse detalhamento fornece as bases necessárias para que as intervenções sejam orçadas e o cronograma para sua implantação seja constituído (pois se identifica o tamanho e o grau de complexidade que influenciam diretamente no tempo dispensado à construção). Do mesmo modo, são fornecidas as informações necessárias à execução e à posterior fiscalização da obra. O detalhamento das intervenções ao nível em que técnicos alheios ao processo de elaboração do projeto possam compreendê-lo e realizá-lo autonomamente, reveste-se de fundamental importância para a execução bem sucedida de uma obra, pois nem sempre o projetista (que participa de todas as fases de elaboração do projeto) pode estar presente para prestar esclarecimentos durante as atividades de execução.

#### II – Serviços

Os serviços são listados por categorias, abordando-se os materiais, as atividades e equipamentos que são utilizados na execução. São apresentados e descritos os serviços iniciais (preparo e limpeza da área, canteiro e atividades de apoio, obras provisórias de controle de erosão e sedimentos), serviços auxiliares (terraplanagem, desmonte de rochas etc.), serviços de implantação das intervenções propriamente ditas, serviços complementares às estruturas principais de estabilização (tal como estruturas de drena-

gem), serviços finais (limpeza final, recomposição de áreas afetadas pelo trânsito de veículos e equipamentos de construção, e do canteiro de obra), plano de monitoramento e manutenção de estruturas inertes e material vivo.

### III – Cronograma de implantação e orçamento

Na definição do cronograma são previstas todas as atividades relacionadas à execução da obra, considerando-se o período mais adequado para cada atividade e o tempo de duração das mesmas. Como as intervenções são realizadas com material vivo – muitas vezes estacas de plantas – deve-se ter especial atenção, sempre que possível, para realizá-las durante o período de dormência vegetativa, pois assim o índice de pega e enraizamento pode alcançar maior êxito<sup>16</sup>. Quando não realizadas com estacas, mas com mudas ou sementes, a amplitude temporal de execução das intervenções pode ser um pouco maior, especialmente se houver recurso à irrigação.

Todos os serviços apresentados no item anterior devem ser organizados sequencialmente de acordo com as atividades que são pré-requisitos para outras, de modo a facilitar o processo e evitar erros grosseiros de logística e/ou implantações em períodos desfavoráveis. No que diz respeito ao orçamento, o cômputo minucioso de valores reais de mercado deve ser condizente a tudo o que for mobilizado para a realização da obra, seja material, maquinário ou pessoal. Esse conhecimento é imprescindível para verificar a viabilidade financeira da execução, bem como para realizar a programação financeira do órgão responsável pela contratação dos serviços e evitar inconformidades que podem interromper o bom andamento da obra. O licenciamento ambiental e demais trâmites legais junto aos órgãos competentes são imprescindíveis para que as datas de execução das atividades sejam estabelecidas e, portanto, devem ser realizados com antecedência. Os pedidos de licença devem ser encaminhados já nas primeiras fases de projeto. Normalmente o projeto conceitual é suficiente para os esclarecimentos exigidos pelos órgãos ambientais.

### IV – Monitoramento e manutenção

Ambas as atividades são interdependentes e realizadas *in situ*. O monitoramento avalia as condições da obra como um todo, a partir da análise individual e conjunta dos componentes inertes e vivos, sendo que sua periodicidade de realização é consistente aos objetivos da obra. As atividades de manutenção, por sua vez, dependem dos diagnósticos

<sup>16</sup> O maior índice de pega pode ser explicado pelo fato de as reservas nutricionais de uma planta, no período de dormência, estarem disponíveis, ao mesmo tempo e em maior quantidade, para a emissão de raízes e brotos. O contrário ocorre com as estacas coletadas na primavera, quando parte das reservas da planta já foram disponibilizadas para a emissão de novas raízes, brotos e floração.

realizados durante os monitoramentos para constituir as diretrizes de abordagem das inconformidades (se estas existirem) e correção das mesmas, buscando retornar as condições previstas em projeto.

A periodicidade de monitoramento da obra geralmente deve ser ajustada ao atendimento das necessidades das plantas utilizadas nas intervenções. Isso ocorre porque as plantas dependem de maiores cuidados iniciais para garantir o seu estabelecimento do que as estruturas inertes que, ao serem implantadas, têm condições praticamente imediatas de atender às solicitações para que foram dimensionadas.

No primeiro mês pós-implantação, a vegetação encontra-se em processo de adaptação ao novo ambiente ao qual foi inserida e, por isso, os monitoramentos necessariamente devem ter frequência semanal (uma ou mais vezes). O período inicial é o mais crítico ao estabelecimento da vegetação. Uma vez constatada a pega da vegetação e também sinais de seu desenvolvimento (normalmente no segundo mês isso é bastante visível), o monitoramento pode ter sua frequência reduzida (mas não suspensa) a um número que corresponda ao comportamento da vegetação ou aos acontecimentos que podem interferir em seu estabelecimento (no mínimo duas visitas ao ano, uma na estação seca e outra na estação das chuvas). Sempre que ocorrer um evento climático extremo (evento pluviométrico intenso, seca etc.) ou ataque de insetos (formigas, em especial) o monitoramento deve ser imediatamente reajustado (antecipado e intensificado). Deve-se ter em mente que os monitoramentos são realizados simultaneamente para os elementos vivos e inertes que compõem as intervenções.

No monitoramento das estruturas inertes, avalia-se a integridade estrutural, o aparecimento de sinais e pontos de fraqueza que antecedem ou indicam uma ruptura, a ruptura propriamente dita, o surgimento de processos erosivos ou qualquer inconformidade capaz de enfraquecer a estrutura tornando-a instável ou que inviabilize o seu funcionamento conforme a finalidade para qual foi projetada. Quanto à vegetação, todas as espécies plantadas ou semeadas devem ser verificadas em termos de sobrevivência, sanidade (alterações fisiológicas causadas por pragas, deficiência nutricional ou hídrica) e desenvolvimento (avaliação do diâmetro de caule e ramos e altura total por meio de procedimentos de amostragem que represente todo o plantio, ou seja, apenas parte das plantas são medidas). Com base nessas informações são realizadas as devidas apurações e registros manus-

critos e fotográficos das inconformidades para possibilitar o planejamento das atividades de manutenção. Os registros fotográficos devem ser realizados sempre a partir de pontos fixos da obra, para possibilitar comparações cronológicas e se poder avaliar a evolução das intervenções e a interação entre elementos inertes e vivos. As inconformidades diagnosticadas devem ser fotografadas em detalhes de modo a representar as características do problema.

Na manutenção, quaisquer inconformidades que possam resultar na instabilidade das estruturas inertes devem ser corrigidas, assim como devem ser devidamente tratadas as plantas que morrem (novo plantio ou semeadura), as que não se desenvolvem (correção na irrigação, adubação de manutenção, cuidado com as pragas) ou que se desenvolvem excessivamente (raleio ou poda).

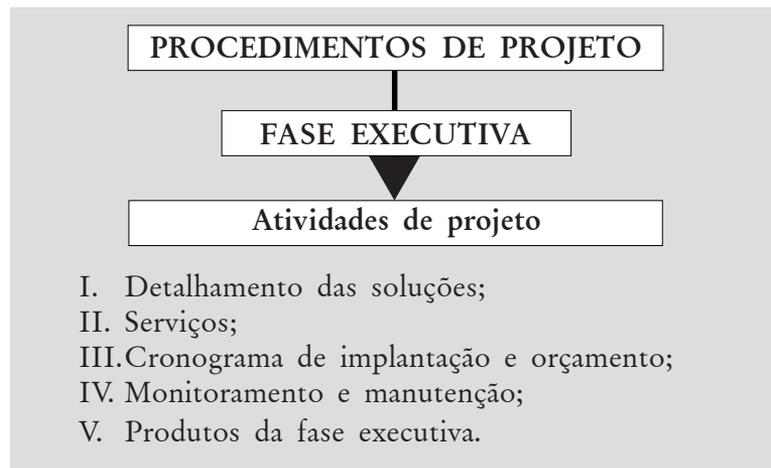


Figura 6: Atividades da fase executiva de projeto.

#### V. Produtos da fase executiva

Ao final da fase de projeto executivo é gerado o documento denominado Memorial Descritivo, no qual devem constar as seguintes informações: atividades auxiliares, materiais utilizados, forma como devem ser construídas as estruturas, diretrizes do monitoramento e ações de manutenção, previsão de execução das atividades, custos unitários e totais de materiais e atividades, desenhos explicativos e plantas executivas.

### Considerações finais

Ao longo das seções anteriores, os tópicos principais compostos por objetivos e atividades foram apresentados,

sendo agora possível formar um fluxograma que condensa a sequência da metodologia de projeto. A compilação dos procedimentos gerais de projeto é apresentada na figura 7.

As soluções técnicas propostas pela Engenharia Natural para a prevenção e/ou correção de problemas decorrentes da perda de estabilidade de sistemas naturais, começam, aos poucos, a ser adotadas no Brasil. Trata-se do reconhecimento de que estas soluções são alternativas viáveis ao complemento ou substituição daquelas já consolidadas pela engenharia tradicional.



Figura 7: Fluxograma dos procedimentos gerais de projeto.

A evolução desse processo de reconhecimento e adoção depende de um desenvolvimento mais técnico e analítico da disciplina. Essa necessidade vem sendo atendida na Engenharia Natural, para permitir que o engenheiro empregue uma abordagem de projeto semelhante àquela que já se usa na engenharia tradicional.

No caso de obras de infraestrutura, a abordagem analítica é ainda mais importante que no caso de pequenas intervenções rurais e urbanas, em que a abordagem descritiva ou mesmo artesanal pode ser perfeitamente justificável. Isso ocorre porque as obras de infraestrutura têm elevados níveis de exigência de mitigação de riscos a elas associados, bem como requisitos legais decorrentes de possíveis consequências de caráter social, econômico e ambiental na eventualidade de uma falha dessas estruturas. No entanto, a metodologia também pode ser empregada nas obras de menor exigência técnica e porte, sempre que a melhor compreensão das características dos problemas e das operações for considerada importante e viável.

O emprego da metodologia aqui apresentada é útil na concepção de projeto pelo fato de propiciar a organização das informações em uma sequência racionalizada de obtenção e análise. Tal organização torna mais fácil a compreensão da fenomenologia dos problemas envolvidos, levando o engenheiro às soluções mais apropriadas do ponto de vista técnico, econômico e ecológico.

Por fim, as indicações de organização e apresentação de requisitos indispensáveis fazem da metodologia uma ótima ferramenta para a uniformização<sup>17</sup> e universalização<sup>18</sup> das atividades de projeto. Essa característica é muito importante para disciplinas que ainda estão em estágio de desenvolvimento analítico, como é o caso da Engenharia Natural.

<sup>17</sup> Significa tomar por base os mesmos princípios para a elaboração de um projeto.

<sup>18</sup> Ser aplicada por qualquer engenheiro ou pessoa responsável por projeto, chegando a resultados semelhantes.

**Charles Rodrigo Belmonte Maffra** é graduado em Engenharia Florestal, mestre em Engenharia Florestal e doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

charles.maffra@gmail.com

**Fabrício Jaques Sutili** é graduado em Engenharia Florestal, doutor em Engenharia Natural pela Universidade Rural de Viena e professor do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

fjsutili@gmail.com