

3 Metodologia de pesquisa

Baseado na revisão bibliográfica apresentada, bem como nas discussões estabelecidas ao final de cada item da revisão, estabeleceu-se a metodologia da presente pesquisa. Conforme apresentado no objetivo principal desta Tese, o desafio a ser vencido é a avaliação dos efeitos geomecânicos devidos ao desenvolvimento de um reservatório sobre a integridade de poços presentes no sistema. Neste capítulo estão organizados os estudos desenvolvidos na Tese, onde o primeiro item se refere ao planejamento em termos do acoplamento fluido-mecânico no reservatório, e o segundo item se dedica à abordagem multi-escala realizada para a análise da integridade de poços. Ao longo de toda a construção metodológica serão feitas referências aos conteúdos mencionados nos objetivos secundários, estabelecidos no Capítulo 1, bem como a estudos importantes relatados na revisão bibliográfica, detalhadamente descritos no Capítulo 2.

3.1 Cenário relacionado ao acoplamento fluido-mecânico

A Figura 3.1 apresenta um diagrama ilustrativo dos pontos chave ao estudo dos efeitos de acoplamento geomecânico sobre um sistema poço-reservatório, a partir dos quais foi delineada a metodologia desta Tese. As informações contidas no diagrama, bem como as análises nele mencionadas, não abrangem todas as etapas inerentes a um modelo mecânico terrestre completo; todavia, por conter os itens especificamente relacionados à análise geomecânica realizada neste estudo, optou-se por esta representação simplificada.

O primeiro quadro do diagrama, denominado *Acoplamento Fluido-mecânico Parcial*, indica a troca de informações entre simuladores de fluxo e tensões. O código de acoplamento desenvolvido pelo Grupo de Geomecânica Computacional ATHENA/ GTEP/ PUC-Rio apresentava na sua configuração original o programa de diferenças finitas ECLIPSE, para a análise de fluxo, e o programa de elementos finitos ABAQUS, para a análise de tensões. A fim de se ampliar o espectro de aplicação do código de acoplamento, optou-se por empregar na presente Tese o simulador de fluxo IMEX. A implementação deste novo

simulador corresponde ao segundo objetivo secundário deste estudo. A abordagem compreendeu inicialmente um estudo comparativo do simulador IMEX com o simulador ECLIPSE, seguido do estudo da estrutura do código de acoplamento ABAQUS-ECLIPSE. Baseado nesta abordagem inicial, foi desenvolvida uma estratégia para implementação do acoplamento ABAQUS-IMEX, utilizando a linguagem de programação C++. Após concluída, a nova implementação passou por processo de validação empregando modelos simplificados.

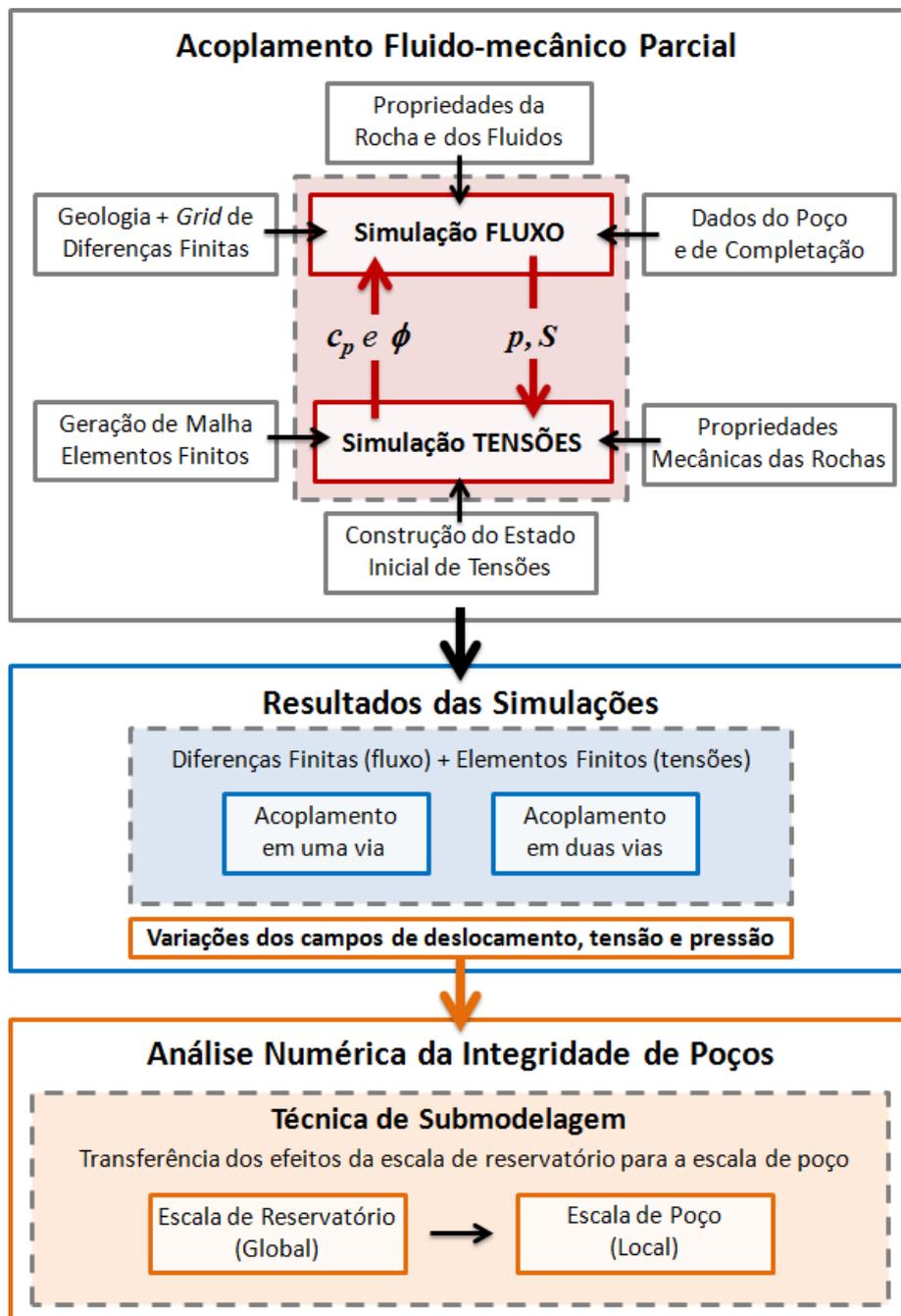


Figura 3.1. Diagrama ilustrativo dos pontos-chave ao estudo dos efeitos geomecânicos

A geometria e as propriedades dos modelos simplificados utilizados para a validação da implementação ABAQUS-IMEX foram baseadas nos trabalhos de Dean et al.(2006) e Inoue e Fontoura(2009b), mencionados no item 2.2 da revisão bibliográfica. Os modelos construídos nesta Tese estão apresentados detalhadamente no Capítulo 4, juntamente com os resultados da validação.

Para a realização de uma análise geomecânica em modelos com geometria real, o uso de uma malha de elementos finitos que honre as feições presentes no sistema é fundamental no processo, embora a sua geração ainda seja um dos principais elementos dificultadores das análises desta natureza. Visando superar esta dificuldade, foi desenvolvido no Grupo de Geomecânica Computacional ATHENA/ GTEP/ PUC-Rio um *plug-in* ao software de modelagem geológica GOCAD, o qual é capaz de construir a malha de elementos finitos do reservatório, a partir de um modelo de diferenças finitas, bem como gerar a malha referente às rochas adjacentes, honrando as fácies geológicas presentes, conforme descrito em Albuquerque(2013). Nesta Tese, foi adotado o Campo de Namorado (Bacia de Campos) como estudo de caso em geometria real, cujo modelo de diferenças finitas utilizado como base na modelagem foi fornecido pela Agência Nacional do Petróleo. As malhas de elementos finitos empregadas nas análises globais realizadas nesta Tese foram construídas a partir do *plug-in* geomecânico implementado no GOCAD. Os modelos gerados bem como os resultados relativos ao Campo de Namorado estão apresentados no Capítulo 5 desta Tese.

Outro importante gargalo relativo às análises geomecânicas consiste na complexidade da construção de estados de tensão iniciais. A dificuldade deste tópico se encerra principalmente: na necessidade de compilação de dados provenientes de uma variada gama de fontes, relacionadas às magnitudes e orientação das tensões, e na população destas informações em um modelo numérico respeitando as relações de dependência entre tensões. Conforme mencionado na revisão da literatura, os meios para construção de um estado inicial de tensões ainda não apresentam consenso acadêmico, e por esta razão adotou-se nesta Tese o princípio das tensões virtuais, conforme relatado em Herwanger e Koutsabeloulis (2011). Este método foi julgado apropriado ao caso em estudo uma vez que assegura que as deformações iniciais nos modelos de elementos finitos sejam nulas, e que os estados de tensões ao longo de todo o modelo honrem as equações de equilíbrio e de continuidade.

De posse dos modelos em diferenças finitas e elementos finitos para os reservatórios simplificado e real, atendendo ao terceiro objetivo secundário desta Tese, partiu-se para a simulação parcialmente acoplada e geração de resultados. As simulações foram realizadas empregando o acoplamento em uma e duas vias. As respostas avaliadas no modelo simplificado, utilizado na validação da implementação ABAQUS-IMEX, foram: variação da pressão de poros instantânea segundo uma trajetória geométrica, bem como as variações de pressão de poros média, compactação do reservatório e subsidência do topo do *overburden* em relação ao tempo de produção. Na fase de validação, resultados de simulações parcialmente acopladas considerando fluido monofásico foram comparados a resultados totalmente acoplados, bem como resultados da implementação anterior ABAQUS-ECLIPSE. Ainda no modelo simplificado, simulações *blackoil* foram realizadas no intuito de verificar a aplicabilidade da implementação em casos multifásicos. Após a validação, no modelo de geometria real foram avaliadas as respostas em termos da compactação do reservatório, subsidência no topo do *overburden*, e variação da pressão de poros no reservatório durante o período de desenvolvimento do campo. Os resultados em termos das variações nos campos de deslocamento e de pressão dos modelos globais, ao longo da vida produtiva do reservatório, foram armazenados para o posterior uso nas análises locais.

Vencida esta etapa, partiu-se para a análise multi-escala, a qual se refere à análise da integridade de poços em um ambiente sujeito às ações geomecânicas decorrentes do desenvolvimento do reservatório. Os modelos em escala local foram avaliados utilizando a técnica de submodelagem, alimentados com os resultados das simulações globais em uma e duas vias. No item a seguir, será apresentada a metodologia desenvolvida para a modelagem e análise numérica multi-escala de poços de petróleo.

3.2 Cenário relacionado à simulação multi-escala

Para orientar as análises geomecânicas aplicadas ao problema do sistema poço-reservatório, foi desenvolvido um *workflow* para a modelagem numérica e análise dos efeitos do desenvolvimento de um reservatório sobre a integridade dos poços existentes. O desenvolvimento deste fluxo de trabalho atende ao quarto objetivo secundário estabelecido nesta Tese. A Figura 3.2 ilustra a sequência de

modelagem proposta (blocos azuis), grifando algumas entradas e/ou tarefas relacionadas a cada passo (círculos tracejados). Este fluxo de trabalho se refere especificamente à análise global-local do comportamento de poços em reservatórios à depleção, podendo ser encaixada no fluxo de trabalho de qualquer modelo mecânico terrestre que englobe análises geomecânicas. Na sequência, a importância dos tópicos destacados no diagrama será abordada, sendo realizadas ao longo do texto as devidas observações relacionadas ao estudo desenvolvido na presente Tese.

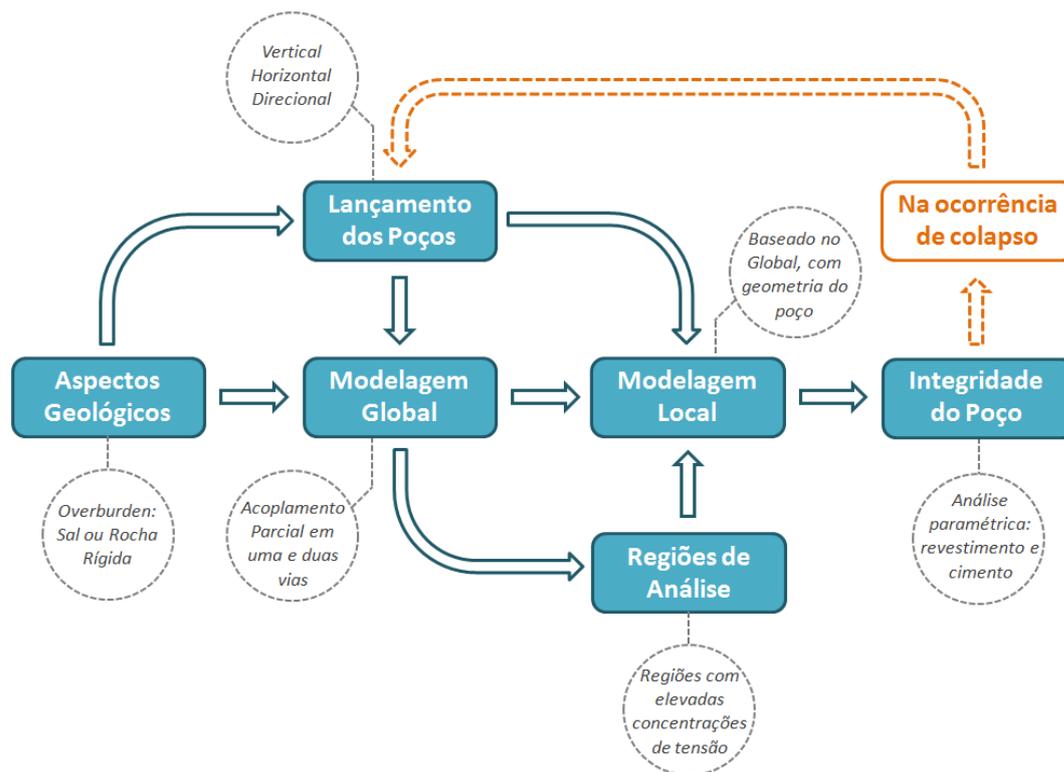


Figura 3.2. Fluxo de trabalho desenvolvido para a avaliação numérica da integridade de poços em virtude dos efeitos geomecânicos devidos à depleção de um reservatório

O levantamento dos aspectos geológicos consiste na primeira etapa do *workflow*. Do ponto de vista estrutural, a geologia pode apresentar grande influência sobre o comportamento geomecânico de um campo durante o seu desenvolvimento. Nesta fase, as entidades geológicas devem ser identificadas e associadas corretamente aos parâmetros obtidos na investigação, norteando a construção dos modelos de elementos finitos e diferenças finitas, assim como a adoção de modelos constitutivos adequados. Nos itens 2.1 e 2.2 da revisão bibliográfica foram relatados estudos que fortalecem a necessidade de se considerar as feições geológicas na modelagem numérica. Righetto (2012) aborda

o comportamento geomecânico de zonas de falha em plasticidade, evidenciando que no caso de falhas selantes um programa de injeção pode acarretar na sua reativação, e que a adoção de uma metodologia de acoplamento hidromecânico inadequada pode levar a estimativas tardias de colapso. Fjær et al. (2008) afirma que na proximidade de falhas, de poços ou do selo do reservatório em desenvolvimento, a direção das tensões principais irá diferir do estado de tensão geostático comumente atribuído como condição inicial aos modelos de tensão. Day-Lewis (2007) analisou o potencial de rotação de tensões em reservatórios a depleção, denotando que a região de abrangência dos efeitos de reorientação (e também de magnitude) se estende pelas rochas adjacentes em até 25% da extensão do reservatório, podendo até mesmo ser magnificada de acordo com parâmetros considerados na análise. Além da reorientação de tensões, a diferença de rigidez entre os estratos no *overburden* consiste em um fator fundamental na resposta geomecânica do sistema. Avaliando um modelo que honra geometria anticlinal do *overburden*, Herwanger e Horne (2009) denotam que as camadas mais rígidas são concentradoras de tensão, enquanto que camadas menos rígidas concentram deslocamentos, e que a resposta geomecânica do sistema está diretamente ligada à estimativa dos parâmetros elásticos atribuídos a estas camadas. Em presença de corpos de sal, o estado de tensões inicial apresenta regiões de descontinuidade, sendo estas mais críticas na proximidade da interface entre o sal (onde as tensões desviadoras são nulas) e rochas adjacentes. Orozco et al. (2013) ilustram a modelagem da descontinuidade de tensões em modelos de elementos finitos, através de subestruturação de um modelo global, onde se pode observar um padrão de reorientação de tensões segundo a interface considerada. O conhecimento de informações como estas é extremamente importante para a construção de um modelo global adequado, bem como para o planejamento da trajetória dos poços, bem como para a previsão do seu comportamento durante o desenvolvimento do campo.

Em relação ao lançamento dos poços, na atualidade as trajetórias já não são altamente limitadas pela falta de tecnologia na perfuração de poços direcionais, devendo-se conhecer criteriosamente os estados de tensão através dos quais os poços são construídos, e principalmente a suscetibilidade do meio às alterações devidas ao desenvolvimento do campo. Como exemplo, pode-se citar a prática cada vez mais comum da perfuração de poços horizontais em reservatórios,

visando o aumento nos volumes produzidos de hidrocarbonetos. Os trabalhos apresentados no item 2.3 da revisão bibliográfica denotam a importância deste tópico. Addis (1997) alertou para a sensibilidade da estabilidade de poços *openhole* aos efeitos combinados da sua orientação com o estado de tensões em que se encontra, em virtude da depleção. A vinculação realizada entre a acurácia da estimativa das alterações de tensão e o grau de conservadorismo no projeto de poços reforça a pauta da análise acoplada, empregada em todo este trabalho. A inclusão de um módulo de análise multi-escala em modelos mecânicos terrestres, como o que está sendo proposto nesta Tese, vem de encontro à necessidade levantada por Bérard et al. (2007), sobre a contribuição do uso destes modelos na otimização do lançamento de poços, bem como nas operações de estimulação ao longo do desenvolvimento da reserva. Assim, outras necessidades inerentes à fase de projeto de poços podem ser atendidas, como as abordadas por Shen et al. (2012), que sugerem a adoção de novos parâmetros para o lançamento de trajetórias otimizadas, como histórico de variação da pressão de poros à depleção, propriedades de *creep* das rochas, interação entre a rocha e o revestimento durante a produção, e sobre todas as análises, considerar o caráter triaxial das variações das tensões decorrentes do processo de produção.

Nesta Tese, os modelos desenvolvidos em todas as escalas são tridimensionais, impedindo que os efeitos da triaxialidade sejam ignorados. No reservatório de geometria real analisado nesta Tese, do Campo de Namorado, o modelo de diferenças finitas fornecido pela ANP já continha uma configuração de poços estabelecida, a qual foi mantida e utilizada ao longo de todo o estudo. Na aplicação do *workflow* proposto ao caso de geometria complexa, foram realizadas análises em poços com três direções distintas: vertical, horizontal e inclinada. Salienta-se que a trajetória destes poços está condicionada ao grau de refinamento do *grid* de diferenças finitas, já que os controles de produção/ injeção são aplicados no centro de cada célula. Portanto, no modelo global do reservatório, as trajetórias foram avaliadas a partir do modelo de fluxo, uma vez os efeitos são transferidos para o simulador de tensões através do código de acoplamento. No nível do submodelo, as informações acerca da geometria do poço, bem como dos dados de completação, foram detalhadamente modelados em elementos finitos, devido à possibilidade de aplicação de um grau de refinamento superior e o uso de materiais e modelos constitutivos apropriados em cada entidade do sistema.

A partir dos resultados da modelagem global, conforme abordado no item 3.1 deste capítulo, foram avaliadas as regiões que apresentavam os maiores gradientes de tensão e deslocamentos, elegendo-se três regiões para construção de submodelos que honrassem a geometria do poço e do revestimento nas três direções de análise pré-definidas. O conhecimento de alguns mecanismos esperados de colapso de poços, em virtude dos efeitos do desenvolvimento do reservatório, pode ser importante nesta etapa, auxiliando na escolha das regiões a serem detalhadamente analisadas. Conforme mencionado no item 2.3 da revisão bibliográfica, estudos de Bruno (1992) e Dusseault et al. (2001), a respeito dos efeitos da subsidência sobre a ruptura de poços e do acúmulo de tensões cisalhantes na região do *overburden*, identificaram como os principais mecanismos de colapso do revestimento a compressão, a flambagem, o cisalhamento e a flexão. Cabe salientar que a identificação da ocorrência de muitos destes mecanismos foi realizada a partir de simulações simplificadas em elementos finitos, indicando a improvável ocorrência isolada destes mecanismos em um caso geometricamente complexo, conforme será abordado ao longo das análises do Capítulo 5 desta Tese.

A análise local foi conduzida utilizando-se a técnica de submodelagem, a qual consiste na construção de modelos em escala detalhada que recebem informações de um modelo global, neste caso, do reservatório. Nesta Tese, adotou-se o software ABAQUS para o emprego da técnica de submodelagem. No modelo local, o contorno da região que se refere à rocha recebe as informações do modelo global, fazendo com que as entidades de completação do poço (revestimento e cimento) estejam sujeitas aos deslocamentos impostos pela rocha. É necessário realizar a compatibilização geométrica entre os modelos modelo global e local, de forma que a posição referente ao eixo do poço coincida nos dois ambientes. Ainda, para garantir a compatibilidade entre os modelos em termos das condições iniciais, o estado de tensões inicial do submodelo deve ser inicializado através do princípio das tensões virtuais, o mesmo empregado no modelo global. Todavia, para que o estado de tensões se aproxime da melhor forma possível à condição que se espera em campo, é necessário primeiramente simular no submodelo o processo de perfuração e completação, uma vez que estas atividades alteram localmente o estado de tensões. Nesta Tese, a simulação dos processos de perfuração e completação foi baseada ideologicamente nas análises realizadas por

Mackay (2011), em cujo trabalho estudou modelos bidimensionais para avaliação do efeito da cimentação em zonas de sal. Neste estudo, a metodologia proposta por Mackay (2011) foi expandida para a esfera tridimensional. Ao final da etapa de preparação dos submodelos, além das atividades já descritas, deve ser transferida a pressão interna ao poço (pressão de fluido) atuante no tempo de análise, proveniente do simulador de reservatórios.

Claramente, observa-se que uma série de dependências entre modelos deve ser levada em conta para que a resposta local possa ser considerada realística. A aplicabilidade do *workflow* proposto está sujeita a boa qualidade da transferência de informações entre modelos. Portanto, de forma a tornar tecnicamente viável o processo de submodelagem, e aplicá-lo ao escopo desta Tese, foi necessário implementar uma rotina computacional capaz de gerenciar as simulações locais, a fim de aplicar automaticamente algumas das restrições de modelagem inerentes ao caráter acoplado da análise. A construção deste gerenciador de submodelagem atende ao quinto objetivo secundário definido neste estudo.

Aplicando o *workflow* proposto, a formação passará pela reorganização de tensões devida à fase de perfuração e completção, assim como posteriormente o revestimento irá experienciar os deslocamentos provenientes do desenvolvimento do reservatório, gerados pelo simulador de tensões, bem como as variações de pressão interna a partir do simulador de fluxo. Desta forma, o modelo estará honrando as condições locais como poço, e estará levando em conta os efeitos do modelo global, possibilitando a geração de resultados coerentes e passíveis de análise de integridade.

Para atender ao sexto objetivo secundário definido para este estudo, foi construído um submodelo simplificado para validação do conceito de simulação multi-escala, bem como para validar as funcionalidades do gerenciador de submodelagem. O modelo local construído se refere ao poço produtor vertical presente no modelo global simplificado, construído com base nos estudos de Dean *et al.* (2006) e Inoue e Fontoura (2009b). Para o estudo de caso do Campo de Namorado, foram construídos três submodelos, referentes a trechos de poços com orientação vertical, horizontal e inclinado, sujeitos a elevados gradientes de tensão identificados nos resultados da modelagem global. Todas as simulações locais foram realizadas considerando os resultados do acoplamento parcial em uma e

duas vias, explicitando a importância de se considerar um acoplamento fluido-mecânico robusto em análises de integridade.

Ao final das simulações, de posse dos resultados provenientes dos modelos globais e locais, foram realizadas as análises multi-escala para a efetiva avaliação dos efeitos da depleção sobre a integridade dos poços avaliados. Estas análises representam o último item do *workflow* desenvolvido, e também atendem ao sétimo e último objetivo secundário estabelecido nesta Tese. Estas análises consistem na avaliação da influência paramétrica, em virtude da variação de propriedades elásticas e plásticas do revestimento e do cimento, sobre a proximidade do sistema ao colapso. Estas análises constam no Capítulo 5.

Seguindo as atividades descritas na presente metodologia, foi possível atingir o objetivo principal desta Tese. Os dois capítulos seguintes contemplam, respectivamente, as implementações e validações dos processos mencionados, utilizando os modelos simplificados, e a aplicação do *workflow* multi-escala ao modelo realista baseado no Campo de Namorado.