

# Cadeias de suprimentos na construção civil: análise e simulação computacional

*Construction supply chains: analysis and computational simulation*

Thaís da Costa Lago Alves  
Iris Denise Tommelein

## Resumo

**E**ste artigo discute a importância do gerenciamento da cadeia de suprimentos da construção civil bem como conceitos que podem contribuir para a melhoria de seu desempenho. De modo a ilustrar os conceitos discutidos e a sua relevância para o tema, as autoras apresentam um modelo de simulação desenvolvido com base em dados da cadeia de suprimentos de dutos de ar-condicionado. Experimentos com cadeias de suprimentos podem demandar muito tempo e esforço para serem realizados. Dessa forma, a simulação computacional tem grande potencial para o estudo de cadeias de suprimentos, pois pode ser empregada com baixo custo e gerar modelos e conclusões que representem uma realidade controlada na qual experimentos podem ser realizados. Quatro cenários foram simulados para avaliar o impacto que variações nas durações das atividades da cadeia de suprimentos e a definição de grandes lotes têm no tempo de entrega (*lead time*) de um projeto. Como conclusões, destacam-se o uso de simulação computacional para o projeto de sistemas produtivos e cadeias de suprimentos, a necessidade de melhorar a comunicação entre partes da cadeia como forma de reduzir seus estoques, e o aumento do tempo de entrega do projeto à medida que a variabilidade das durações e o tamanho do lote aumentam.

**Palavras-chave:** Cadeia de suprimentos. Gerenciamento da construção. Simulação computacional. Dutos metálicos de ar-condicionado.

## Abstract

*This paper discusses the importance of managing supply chains in the construction industry as well as concepts that may contribute for the improvement of their performance. In order to illustrate the concepts discussed and their importance, the authors present a simulation model developed using data from the HVAC sheet metal ductwork supply chain. Conducting experiments on supply chains can be rather costly and time consuming. Therefore, simulation tools can be employed to carry out low cost studies of supply chains. Those tools can be used for generating models that mimic a controlled environment in which experiments can be carried out. Four scenarios were studied to evaluate the impact that variations on activity durations and batching have on the project lead time. The conclusions highlight the use of simulation as a tool for supply chain and production system design, the need to improve communication channels between different parts of the supply chain aiming to reduce inventories, and the impact that variability and batching have on the project lead time.*

**Keywords:** Supply chain. Construction management. Simulation. HVAC sheet metal ductwork.

Thaís da Costa Lago Alves  
Departamento de Engenharia  
Estrutural e Construção Civil  
Universidade Federal Ceará  
Campos do Pici, s/n, bloco 710,  
Pici  
Fortaleza - CE - Brasil  
CEP 60455-760  
Tel.: (85) 3366-9607  
E-mail: thaiscla@yahoo.com

Iris Denise Tommelein  
Project Production Systems  
Laboratory  
Civil and Environmental  
Engineering Department  
University of California  
Department, 215-A McLaughlin  
Hall, Berkeley, CA 94720-1712,  
Phone +1 510/643-8678, FAX  
510/643-8919  
E-mail:  
tommelein@ce.berkeley.edu

Recebido em 07/08/06  
Aceito em 25/06/07

## Introdução

O estudo das cadeias de suprimentos da construção civil tem crescido em importância ao longo dos anos. Acadêmicos e praticantes têm dado crescente importância para a integração entre as atividades realizadas no canteiro de obras e para a relação dessas com seus fornecedores, sejam eles de projeto, materiais e equipamentos, documentação legal, entre outros (LONDON; KENLEY, 2001). De acordo com Tommelein (2004), as empresas hoje competem com base nas suas cadeias de suprimento como um todo, e não mais como entidades isoladas.

A construção civil e suas cadeias produtivas desempenham um importante papel dentro da economia brasileira. O *construbusiness* (conjunto de atividades e fornecedores ligados à construção civil) movimenta 15,5% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Desse valor 5,9% são referentes a materiais e equipamentos de construção, 9,1% são referentes à construção em si, e 0,5% é relativo a atividades imobiliárias e de manutenção (ABIKO *et al.*, 2005). Desse modo, verifica-se que o gerenciamento adequado da cadeia de suprimentos da construção pode ter grande impacto em economias locais e nacionais, dado o elevado volume de negócios que movimenta.

No entanto, a realização de estudos sobre cadeias de suprimentos pode tornar-se um problema bastante complexo, visto que diferentes empresas e participantes estão envolvidos e, em geral, encontram-se geograficamente dispersos. A realização de estudos de caso e de experimentos torna-se difícil, pois empresas em uma mesma cadeia de suprimentos têm objetivos conflitantes (SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2003) e a implementação de mudanças envolveria muitos agentes e fatores a ser observados.

Consideradas essas dificuldades, este artigo discute conceitos importantes para o gerenciamento de cadeias de suprimentos da construção civil e ilustra por meio de simulação computacional como esses conceitos podem ser empregados para a realização de análises sobre cadeias de suprimento na construção. Dado que experimentos com cadeias de suprimentos podem ser complexos, a simulação computacional torna-se uma ferramenta com grande potencial de uso para o estudo delas. Diversos autores já empregaram a simulação computacional para o estudo das inter-relações entre participantes de cadeias de suprimentos na construção civil (ARBULU, 2002; TOMMELEIN, 1998; WALSH *et al.*, 2004).

Este artigo está estruturado em quatro grandes partes. Primeiramente, as autoras discutem a importância do gerenciamento da cadeia de suprimentos na construção civil, além de conceitos relevantes para o seu estudo. Em seguida, o método e a ferramenta empregados para a elaboração do modelo são apresentados. Por fim, o modelo empregado para a realização da simulação computacional é apresentado, e as principais conclusões sobre ele são apresentadas.

## Gerenciamento de cadeias de suprimentos

Neste artigo, considera-se que “(o) gerenciamento da cadeia de suprimentos é um conjunto de abordagens utilizadas para integrar de forma eficiente fornecedores, produtores, depósitos e lojas, de modo que o produto seja produzido e distribuído nas quantidades certas, nos locais certos, no tempo certo, de forma a minimizar os custos globais do sistema enquanto se satisfazem os níveis de serviço definidos” (SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2003, p. 1). De acordo com Simchi-Levi, Kaminsky e Simchi-Levi (2003), o gerenciamento das cadeias de suprimentos tem papel fundamental no alcance de objetivos comuns às suas empresas e na geração de riquezas para elas. Porém, torna-se difícil o alcance desses objetivos devido à complexidade das cadeias de suprimentos, aos interesses conflitantes de seus participantes e às interações entre os participantes da cadeia através dos fluxos de informação, dinheiro, produtos e serviços.

Um importante marco para o estudo das cadeias de suprimentos foi o trabalho de Forrester (1958) sobre a dinâmica da indústria (*Industrial Dynamics*). Nesse trabalho, Forrester simulou uma cadeia de suprimentos que era formada por uma fábrica com seu depósito, um grupo de distribuidores e as lojas que vendiam determinado produto. Nessa simulação, os atrasos no compartilhamento de informações, a incerteza e as distorções na demanda real causaram flutuações que se desencadearam por todos os níveis da cadeia estudada. Essas flutuações afetaram as ordens de compra e os níveis de produção de todos os participantes da cadeia, e permaneceram por meses até que a cadeia retornasse para a sua demanda e níveis de produção regulares.

Com essa simulação, Forrester chamou a atenção, entre outras coisas, para a necessidade de colaboração e de troca de informações confiáveis entre participantes de uma mesma cadeia de suprimentos como uma forma de evitar variações

em sua demanda. Forrester também ressaltou a importância de se entender como os fluxos de mão-de-obra, materiais, informação e capital interagem e causam variações em uma cadeia de suprimentos.

Atualmente, diversas empresas trabalham de forma integrada com as suas cadeias de suprimentos (e.g., Dell, Toyota, Wal-Mart, Benneton) (LIKER, 2004; SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2003). A Toyota Motor Company representa um exemplo de empresa que ao longo dos anos tem trabalhado com os seus fornecedores de modo a desenvolver acordos de longo prazo e a garantir o fornecimento ininterrupto de suprimentos para as suas fábricas. Esse bom relacionamento da Toyota com os seus fornecedores também resulta em produtos com elevados níveis de qualidade e, conseqüentemente, com maiores níveis de confiança na marca e satisfação de seus clientes (LIKER, 2004).

Porém, passados quase 50 anos da publicação dos resultados da pesquisa de Forrester, os seus resultados continuam a ter relevância para o entendimento e gerenciamento de cadeias de suprimentos. Contudo, esse entendimento de como funcionam as cadeias de suprimento parece ainda não ter permeado a indústria da construção.

O estudo realizado para o desenvolvimento do modelo discutido neste artigo foi realizado com empresas responsáveis pelo projeto, fabricação e instalação de dutos de ar-condicionado. Essas empresas podem ser responsáveis por todos esses serviços para determinada obra, e ainda assim existem falhas na comunicação entre os seus funcionários. Em outras palavras, mesmo dentro de uma só empresa, a comunicação das necessidades de suas diferentes partes é deficiente. Discutem-se mais adiante, neste artigo, falhas na comunicação que causam acúmulo de estoques ou paradas em serviços devido à falta de materiais para a sua execução.

## Gerenciamento de cadeias de suprimentos na construção civil

De acordo com London e Kenley (2001, p. 777), “Faltam pesquisas teóricas e empíricas dentro da comunidade da construção que considerem aspectos fundamentais, estruturais, econômicos e organizacionais das cadeias de suprimento dessa indústria”. Os autores também destacam que o entendimento dessas cadeias é limitado e que pouco se conhece sobre os seus diferentes tipos, níveis de complexidade e comportamento (LONDON; KENLEY, 2001, p. 777).

O conceito de cadeia de suprimentos passou a fazer parte das pesquisas de gerenciamento da construção civil (GCC) em meados dos anos 1990. Até então, o foco principal das pesquisas em GCC com relação às interações entre participantes era direcionada para o escopo de um mesmo empreendimento ou projeto, e não do empreendimento com os seus fornecedores e entre empreendimentos de uma mesma empresa (LONDON; KENLEY, 2001). Esse foco permaneceu por um longo tempo, apesar de pesquisas sobre desperdícios em canteiros de obras terem apontado fatores externos ao canteiro como parte das fontes causadoras de problemas que geravam problemas no canteiro de obras (AGAPIOU *et al.*, 1998; EGAN, 1998; FORMOSO *et al.*, 2002).

No final dos anos 1990 e início dos anos 2000, aplicações do conceito de gerenciamento de cadeias de suprimento passaram a ocupar mais espaço na literatura, indicando um crescente interesse pelo tópico e suas aplicações potenciais à construção – ver, por exemplo, os trabalhos de Vrijhoef e Koskela (2000), Azambuja (2002), O’Brien *et al.* (2002) e Walsh *et al.* (2004). A partir desse período, o foco das pesquisas passou a dar mais ênfase ao gerenciamento da cadeia de suprimentos da construção como um todo e a considerar as suas peculiaridades. No Brasil, outros estudos sobre as cadeias de suprimentos nos anos 90 tinham como foco a questão econômica do macrocomplexo da construção – por exemplo, Silva e Souza (1993) –, bem como a questão logística e de gestão de materiais de construção – por exemplo, Cardoso (1998).

As características da cadeia de suprimentos da construção estão fortemente ligadas a algumas características dessa indústria. A indústria da construção é caracterizada pela fragmentação, por organizações baseadas em projetos, instabilidade, projetos únicos, alta dependência da mão-de-obra, desconsideração dos níveis de incerteza, entre outras (LAUFER; TUCKER, 1987; KOSKELA, 1992). A combinação dessas idiosincrasias resulta em características que definem as cadeias de suprimento da construção como (VRIJHOEF; KOSKELA, 2000, p. 171):

- (a) convergentes: os suprimentos convergem para o canteiro de obras onde são montados;
- (b) temporárias: organizações temporárias são formadas para suprir e construir um projeto de cada tipo. Essas organizações são definidas para um projeto específico e podem não atuar em um projeto seguinte em seu formato original; e

(c) produtos feitos a partir de uma solicitação/ordem (*make-to-order*): “Cada projeto cria um novo produto ou protótipo”.

Dada a estrutura de cadeias de suprimento na construção, estudos que objetivam a melhoria do seu desempenho devem considerar suas especificidades e as características dos mercados dos quais essas cadeias fazem parte (LONDON; KENLEY, 2001). De modo a contribuir para o entendimento de como as cadeias de suprimento da construção funcionam, Koskela e Vrijhoef (2000) sugerem quatro focos para elas (Figura 1):

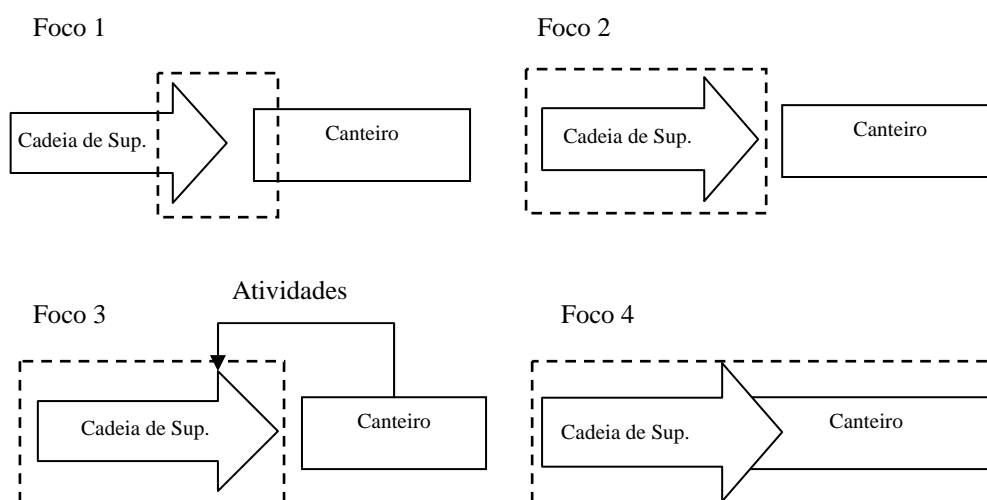
(a) foco 1 – interação entre o canteiro de obras e seus fornecedores imediatos: o objetivo é reduzir os custos e as durações das atividades através da cooperação entre empresas construtoras, empreiteiras e fornecedores. Esse foco é considerado por Vrijhoef e Koskela como específico, visto que almeja a redução de custos sem se preocupar muito com os efeitos (variabilidade) que a cadeia de suprimentos pode causar nas atividades do canteiro;

(b) foco 2 – foco na cadeia que fornece suprimentos ao canteiro de obras: o objetivo é alcançar a redução de custo por meio de melhorias na logística, tempo de fornecimento (*lead time*) e redução de estoques. Fornecedores da cadeia devem trabalhar de forma conjunta, de modo a definir uma cadeia de suprimentos otimizada, a qual considera diversos fatores relativos aos custos logísticos e de produção. Vrijhoef e Koskela ressaltam que, devido às demandas erráticas definidas pelos clientes, a cadeia de suprimentos

pode ter seu desempenho afetado. Desse modo, a cadeia deve ser projetada para lidar com tais problemas sem incorrer em perdas para os seus participantes;

(c) foco 3 – transferência de atividades do canteiro para outras localidades: o objetivo é tirar vantagem de ambientes mais controlados, fora do canteiro de obras. A implementação desse foco requer maior planejamento em termos de projeto e operação do canteiro. Nesse caso, por exemplo, os participantes da cadeia de suprimentos devem definir onde será colocada a interface entre a parte do sistema que emprega um sistema empurrado (i.e., sistema baseado em previsões de demanda em longo prazo sem avaliação da demanda atual quando da produção) e o sistema puxado (i.e., sistema que produz de acordo com a demanda real por seus produtos e serviços); e

(d) foco 4 – gerenciamento integrado da cadeia de suprimentos com o canteiro de obras: o objetivo é fazer com que fornecedores, empresas construtoras, clientes e empreiteiros trabalhem de forma conjunta para melhorar o desempenho da cadeia de suprimentos como um todo. Vrijhoef e Koskela discutem alternativas para o gerenciamento da cadeia de suprimentos na construção (construção aberta – *open building*, projeto e produção realizados por uma única entidade – *design-build*), porém destacam que essas alternativas têm tido resultados limitados devido à falta de uma completa integração entre os participantes da cadeia de suprimentos.



Fonte: Adaptado de Vrijhoef e Koskela (2000)

Figura 1 - Os focos do gerenciamento da cadeia de suprimentos na construção

## Método de pesquisa

Neste item são apresentados o objeto de estudo da presente pesquisa, a forma como foi desenvolvido o modelo de simulação e suas limitações, bem como os cenários que foram simulados.

### Objeto de estudo

Neste artigo, o termo “cadeia de suprimentos” se refere a um grupo de empresas que trabalham juntas para produzir um produto ou serviço. O termo “sistema de produção” se refere a um grupo de recursos de uma mesma empresa (por exemplo, projetistas, oficina de fabricação, trabalhadores que fabricam e/ou instalam produtos).

Para o desenvolvimento deste artigo, as autoras utilizaram dados da cadeia de suprimentos de fabricação de dutos de ar-condicionado. Essa cadeia de suprimentos lida com produtos fabricados em largas quantidades para serem mantidos em estoque, bem como com produtos fabricados sob encomenda. Desse modo, ela se assemelha a outras cadeias de suprimentos da construção civil tais como a de elementos pré-moldados, peças de arquitetura e arte, e componentes elétricos tais como transformadores.

A cadeia de suprimentos de dutos de ar-condicionado é composta de projetistas e consultores de sistemas mecânicos, fabricantes e empresas contratadas para a instalação dos sistemas de ar-condicionado. Eventualmente, uma só empresa pode projetar, fabricar e instalar os dutos metálicos de ar-condicionado. Desse modo, uma só empresa pode ser responsável por grande parte da cadeia de suprimentos em questão.

### Desenvolvimento do modelo de simulação

O modelo desenvolvido representa um projeto que requer a instalação de 1.850 dutos de ar-condicionado (valor escolhido arbitrariamente para representar um projeto). Os dados utilizados para o desenvolvimento do modelo foram obtidos mediante a realização de estudos de tempo e entrevistas com chefes de equipe de fabricação e instalação dos dutos de ar-condicionado. A forma de coleta dos dados encontra-se descrita em maior detalhe no trabalho de Alves (2005).

As durações das atividades e as quantidades são aproximações baseadas nos dados coletados e são expressas respectivamente em horas e unidades. Com esse modelo, as autoras não pretendem apresentar números precisos sobre a instalação dos dutos em um projeto específico. Porém, o modelo representa de forma geral como uma cadeia de

suprimentos trabalha de forma coletiva e busca servir de base para inferências (*insights*) sobre como variações nas diferentes partes da cadeia de suprimentos afetam o desempenho do sistema. Essas inferências podem auxiliar engenheiros e administradores na definição de estoques de segurança para os seus sistemas e como estes podem ser organizados (por exemplo, produção empurrada, puxada, híbrida).

O modelo foi desenvolvido com o software de simulação STROBOSCOPE (MARTINEZ 1996). Essa é uma linguagem de simulação de eventos discretos especificamente desenvolvida para modelar operações da construção e tem sido utilizada por diferentes autores para essa função (ARBULU *et al.*, 2002; TOMMELEIN, 1998). Essa linguagem também pode ser empregada para aplicações em outras áreas fora da construção civil, conforme indicado por Martinez (1996).

STROBOSCOPE “é uma linguagem de programação que representa recursos como objetos que têm propriedades atribuídas, persistentes e dinâmicas; e que podem levar em consideração de forma ativa e dinâmica o estado do processo simulado” (MARTINEZ, 1996, p. 406). De acordo com Martinez (1996, p. 1), “sistemas de simulação genéricos [...] não podem modelar os múltiplos requisitos e a complexidade dinâmica dos processos da construção”. Por outro lado, o STROBOSCOPE pode avaliar de forma contínua o estado e as propriedades dos recursos no modelo de simulação e agir de forma apropriada. Deve ser ressaltado que o modelo apresentado neste artigo não é restrito ao STROBOSCOPE e pode ser replicado em outras linguagens de simulação.

Os símbolos e comandos indicados na Figura 2 são específicos do STROBOSCOPE e podem ser diferentes daqueles utilizados por outras linguagens de simulação. Os retângulos representam atividades, e os círculos representam as filas (*queues*) que abrigam os recursos empregados para a realização das atividades. As setas representam a transferência de recursos entre as filas e as atividades. Para facilitar a leitura dos elementos do modelo, no texto os nomes das atividades estão indicados em *itálico* e os das filas estão *sublinhados*.

### Descrição do modelo e limitações

No modelo indicado na Figura 2 todos os dutos são considerados iguais. Conseqüentemente, problemas relacionados à seqüência de instalação e à coordenação de diferentes tipos de partes não são levados em consideração. Os dados obtidos pelas autoras para o planejamento, transporte e instalação são médias definidas conforme prática

da indústria norte-americana. Dessa forma, as autoras decidiram simplificar o modelo, uma vez que elas não possuíam dados precisos para as atividades modeladas. Visto que as empresas visitadas para o estudo não possuíam grande número de dados coletados, as autoras não buscaram moldá-los em distribuições probabilísticas específicas. Elas assumiram que as durações das atividades eram normalmente distribuídas. Uma análise de sensibilidade não foi realizada para avaliar as implicações que o uso de diferentes distribuições probabilísticas traria para o modelo. Essas são as limitações do modelo.

Com relação à descrição física desse modelo, buscou-se representar a forma como ocorrem as trocas de informações e o repasse de produtos entre as partes integrantes de uma mesma empresa que fabrica e instala dutos de ar-condicionado. Porém, o mesmo poderia ser usado para representar diferentes tipos de empresas na construção. A atividade de planejamento representa no modelo a atividade que define a demanda do sistema como um todo ao liberar ordens para fabricação, realização de transporte e áreas que estão prontas para a instalação. O planejamento, nesse caso, define um ritmo de produção ao liberar certo número de ordens em intervalos de tempo. O modelo também indica que a fabricação dos dutos em questão ocorre de forma mais rápida do que a sua instalação, devido a diversos fatores que podem tornar lento o trabalho das equipes no canteiro de obras (e.g., interferências entre equipes, mudança de planos, trabalho em altura, etc.). Isso ilustra as facilidades encontradas no trabalho em ambientes controlados, como as oficinas de fabricação, quando comparados àqueles desenvolvidos em canteiros de obras.

O modelo busca representar a importância da comunicação entre as partes de uma empresa e os participantes de um projeto como forma de melhor gerenciar estoques em seu sistema produtivo e garantir a continuidade do fluxo de trabalho de suas equipes. A relevância do uso de ferramentas como o *kanban* para “puxar” produtos e auxiliar na manutenção de baixos níveis de estoque no sistema também é demonstrada no modelo. Por fim, o sistema modelado representa os efeitos práticos que se originam dos grandes lotes. No caso exposto, indicadores relativos ao tempo de conclusão do projeto e aos estoques mantidos no sistema atestam a importância de definição de pequenos lotes adequados ao ritmo e taxas de produção do sistema.

O modelo simulado é iniciado pela atividade de *Planejamento*, a qual processa as tarefas da fila *Planos*. A atividade de *Planejamento* avalia as

atividades programadas e seus pré-requisitos antes de liberá-las para *Fabricação* e *Instalação*. No modelo, quando o *Planejamento* termina, ele gera um grupo de ordens e áreas que são abrigadas nas filas *Ordens* e *Áreas*. A atividade de *Fabricação* processa uma ordem de cada vez, vinda da fila *Ordem*, e emprega um trabalhador (da fila *Trab1*) para gerar um lote de 25 dutos. O lote de dutos é enviado para a fila *Dutos* e espera para ser transportado pela atividade *Transporte*. A atividade *Transporte* emprega um caminhão, da fila *Transp*, para transportar um lote de dutos para o estoque do canteiro de obras, representado pela fila *Canteiro*. Por fim, a atividade *Instalação* retira um lote de dutos da fila *Canteiro* e dois trabalhadores da fila *Trab2*, e libera uma área de trabalho da fila *Área*. A atividade *Instalação* conclui um ciclo ao gerar um lote de dutos instalados, que são enviados para a fila *DutosInst*.

As filas *Trab1*, *Transp* e *Trab2* foram iniciadas com recursos para garantir que as atividades possam ser realizadas desde o início da simulação. Essa definição também faz parte das limitações do modelo e foi estabelecida de acordo com os dados empregados no desenvolvimento dele.

As filas *Ordem*, *Área* e *Canteiro* foram iniciadas para auxiliar no “aquecimento” (*warm-up*) do modelo e na consistência entre os diferentes cenários estudados. Dessa forma, todas as atividades têm recursos para processar, e as atividades sucessoras não precisam esperar até que os recursos sejam processados pelas atividades predecessoras. Esse aquecimento do modelo representa uma situação da vida real na qual o trabalho (produtos) é realizado e acumulado nos fornecedores e no canteiro de obras ao final de cada dia de trabalho. Dessa forma, quando a simulação é iniciada, todas as filas, com exceção do *DutosInst*, têm um estoque de recursos para ser empregados na realização das atividades indicadas no modelo.

O tamanho do lote foi escolhido com base em um estudo de tempo descrito em Alves (2005). Desse estudo de tempo, as autoras obtiveram o tempo que a oficina de fabricação estudada levava para fabricar um lote de dutos do mesmo tamanho. A duração da atividade de *Fabricação* foi definida com base no mesmo estudo de tempo. As durações das atividades de *Planejamento*, *Transporte* e *Instalação* foram obtidas de entrevistas com chefes de equipes. No modelo, um trabalhador da oficina de fabricação supre os dutos que são instalados por dois trabalhadores no canteiro de obras. O *Planejamento* gera 4 áreas e 4 ordens a cada 40 horas (5 dias) aproximadamente para ser processadas, respectivamente, pelas atividades de *Instalação* e *Fabricação*. A cada 10 horas,

aproximadamente, o trabalhador da oficina de fabricação completa a produção de 25 dutos (1 lote), os quais levam aproximadamente 4 horas para ser entregues ao canteiro pela atividade de *Transporte*. Cada equipe da atividade de *Instalação* tem dois trabalhadores e leva aproximadamente 32 horas (4 dias) para instalar um lote de dutos, incluídos os tempos de supervisão e de movimentação de materiais pelas equipes.

## Cenários simulados

Quatro cenários são apresentados para avaliar os resultados do modelo considerando-se diferentes situações (Tabela 1). O indicador adotado para avaliar o modelo é o tempo que a cadeia de suprimentos leva para completar o projeto, que consiste na instalação de 1.850 dutos de ar-condicionado. O tamanho do lote é considerado constante para todos os cenários. O número empregado para dar início à simulação (*seed*) é 82.6375.124 para todos os modelos, de modo que eles possam ser comparados ao serem simulados. Caso esse número não tivesse sido definido, o STROBOSCOPE iria escolher um número de forma aleatória para iniciar a simulação, e os resultados iriam diferir de uma simulação para a outra.

De modo a coletar os resultados para diferentes interações (*runs*) de um mesmo modelo, o comando COLLECTOR do STROBOSCOPE foi empregado (MARTINEZ, 1996). Dados para as filas foram armazenados para múltiplas interações do modelo. Para cada fila, o STROBOSCOPE calculou a média ( $\mu$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ) e os valores mínimos e máximos, com base na definição de que os resultados são normalmente distribuídos. Esses valores podem ser utilizados para analisar o tamanho dos estoques em cada fila até que o projeto seja concluído.

De modo a facilitar a coleta de dados e a geração dos gráficos para múltiplas interações, incluiu-se no código da simulação um comando para coletar dados em intervalos de 50 horas, ao invés de dados coletados a cada avanço do relógio da simulação, o que geraria uma enorme quantidade de dados. A escolha desse intervalo de tempo não altera o objetivo das autoras de ilustrar como variações

afetam o sistema modelado, pois o objetivo principal do modelo não é a obtenção de números precisos, mas sim de se ter uma melhor idéia sobre o comportamento do sistema ante as variações na sua cadeia de suprimentos.

O cenário A tem durações determinísticas representadas pela duração média das atividades representadas na Figura 1. O cenário B tem durações probabilísticas como indicado na Figura 1. Os cenários C e D representam, respectivamente, a forma determinística e a probabilística do caso em que a fabricação dos dutos é realizada em grandes lotes antes que eles sejam solicitados no canteiro. Nesse caso, assim que o projeto dos dutos é definido, o mesmo é enviado pelo *Planejamento* para a *Fabricação*. Os lotes de dutos fabricados são estocados na fila Dutos, que representa o estoque na oficina de fabricação. Uma atividade de formação de lotes foi incluída no sistema modelado entre a atividade de *Fabricação* e a fila Dutos, de modo que o sistema acumule 10 lotes de dutos antes que o *Transporte* os leve para o canteiro de obras onde serão instalados. Essa atividade de acúmulo de lotes representa o *Transporte* dos dutos em contêineres. Nesse cenário, foi assumido, com base em entrevistas, que um contêiner pode armazenar duas semanas e meia de trabalho da *Fabricação* (100 horas da atividade de *Fabricação* = 2,5 semanas).

Por fim, cabe ressaltar que os cenários A e B representam casos em que a atividade de *Planejamento* atua como um mecanismo que “puxa” os dutos da *Fabricação* somente quando a *Instalação* está pronta para a realização do seu trabalho. O *Planejamento* envia Ordens para a *Fabricação* e libera Áreas prontas para a *Instalação* proceder com o seu trabalho. Já os cenários C e D representam o caso em que a atividade de *Planejamento* libera as Ordens para a *Fabricação* sem avaliar a capacidade e as restrições que a atividade de *Instalação* tem. Desse modo, os cenários C e D representam um sistema empurrado no qual os dutos são fabricados antes que sejam necessários pela *Instalação* no canteiro.

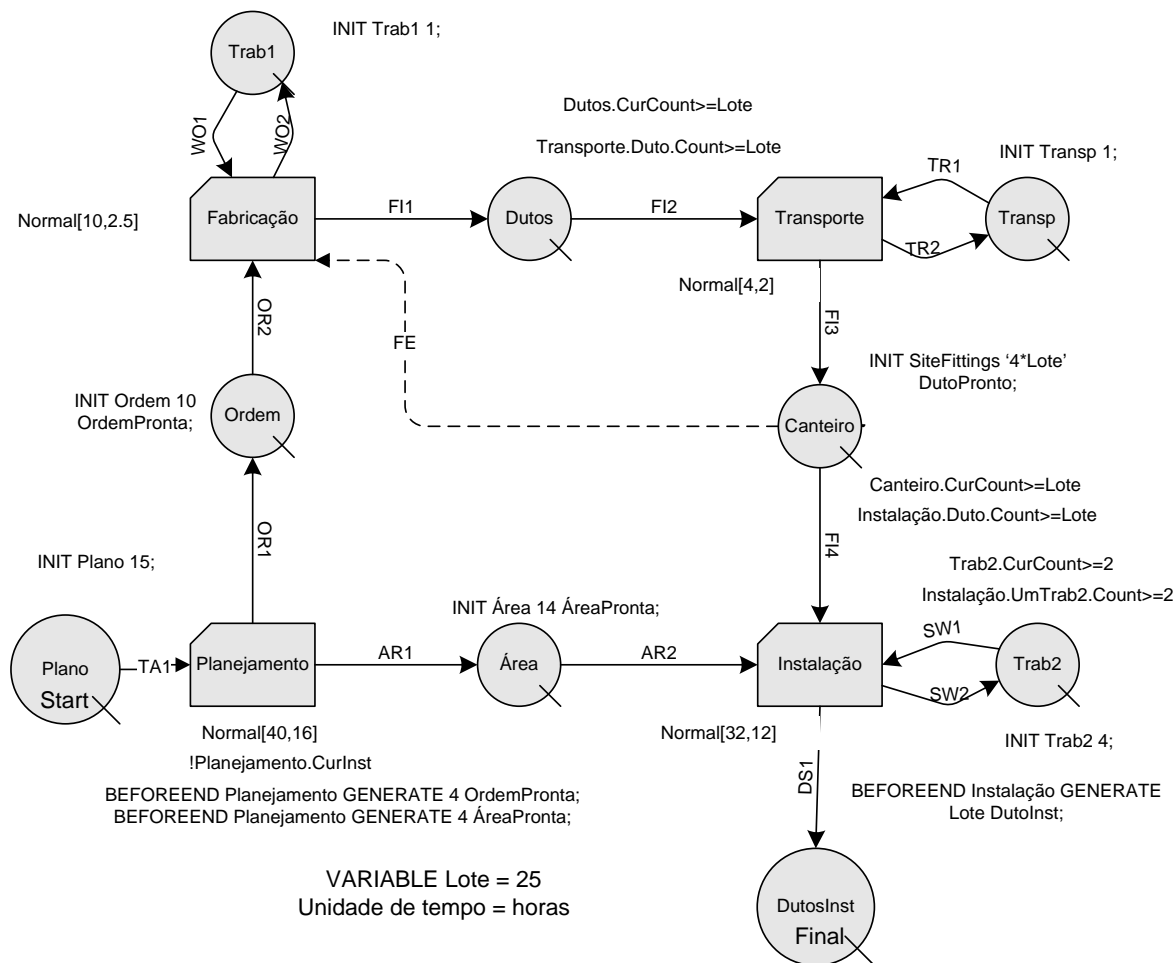


Figura 2 - Modelo da cadeia de suprimentos de dutos de ar-condicionado

Cenários	Durações		Grandes lotes	
	Determinísticas	Probabilísticas	Sim	Não
A	✓			✓
B		✓		✓
C	✓		✓	
D		✓	✓	

Tabela 1 - Cenários simulados

## Resultados e análise do Modelo

Nesse item, os resultados obtidos com a simulação são apresentados, e uma análise de seus resultados é realizada.

### Cenário A - Determinístico

No cenário A, as durações determinísticas representam o cenário ideal no qual as quatro atividades representadas no modelo (Figura 2) sempre levam o mesmo tempo para serem



realizadas. As atividades são realizadas sem interrupção e não existe variabilidade nos fluxos de suprimento e de produção. Em um canteiro de obras, isso significa que todos os recursos necessários para a realização das atividades estão disponíveis. Além disso, não existem fatores internos (variação na produtividade dos trabalhadores) ou externos (variações no suprimento de materiais, interferência com outras equipes) afetando a realização das atividades pelos participantes da cadeia de suprimentos. O cenário A não é realístico, porém é útil para se ter uma idéia de como o sistema funciona. O tempo levado pelo cenário A para completar o projeto é considerado um *benchmark* para a análise dos outros cenários modelados.

A Figura 3(a) representa o resultado da simulação para o cenário A. Os lotes de dutos são fabricados e enviados para o canteiro de obras um a um pelo *Transporte*. Desse modo, o estoque na fila Dutos é no máximo de 25 dutos, que é o tamanho do lote de fabricação. O estoque de dutos na fila Canteiro cresce até 750 no tempo 704 e começa a diminuir de forma constante, pois a partir desse ponto a *Fabricação* conclui todas as ordens enviadas pelo Planejamento. No cenário A o projeto é finalizado após 1.184 horas.

O volume de dutos que se acumula no estoque do canteiro de obras (Canteiro) não é realístico, visto que canteiros de obras, em geral, não têm espaço suficiente para essa elevada quantidade de dutos. Porém, o modelo ilustra que, se não existe comunicação entre o pessoal da Instalação e o da Fabricação, o estoque de material no canteiro pode crescer de forma significativa. Os dutos também se acumulam porque a *Fabricação* leva 10 horas para fabricar um lote, enquanto a Instalação leva 32 horas para realizar a instalação do mesmo lote. Isso sugere que a *Instalação* pode tirar vantagem do ambiente mais controlado na *Fabricação* e de seu ritmo mais acelerado, e transferir algumas atividades do canteiro para a oficina de fabricação. Isso está de acordo com o foco 3, sugerido por Vrijhoef e Koskela (2000) e apresentado no item 2 deste artigo.

De modo a reduzir o tamanho do estoque na fila Canteiro, as autoras introduziram uma ligação de comunicação entre o estoque de materiais no Canteiro e a *Fabricação* (FE na Figura 2). Essa ligação objetiva melhorar a comunicação entre essas duas partes e serve para autorizar a fabricação de dutos quando o estoque mínimo no Canteiro atinge um número menor ou igual a 50 dutos. A ligação FE pode representar a figura de um *kanban* que solicita (“puxa”) a produção de novos dutos toda a vez que o estoque mínimo é atingido e regula a quantidade máxima de estoque

no sistema produtivo sem causar prejuízos ao fluxo de produção.

A Figura 3(b) revela que, com a ligação entre Canteiro e *Fabricação*, o estoque máximo na fila Canteiro é de 100 dutos, em vez de 750, como no caso sem comunicação, e o projeto é finalizado no mesmo tempo em que no caso sem a ligação (1.184 horas). Nesse caso, não faltou material para a Instalação, apesar da redução do estoque no Canteiro.

A ligação introduzida é importante porque regula a *Fabricação* e só permite a produção de dutos quando o estoque no Canteiro atinge um valor mínimo (50 dutos) A definição de mecanismos como o representado pela ligação FE define como o sistema é regulado. Esse exemplo ilustra a importância da comunicação entre as diferentes atividades de uma cadeia de suprimentos.

## Cenário B - Probabilístico

No cenário B, as atividades têm durações probabilísticas para representar os efeitos da variabilidade na duração das tarefas. Todas as atividades resultam na mesma quantidade de produtos do cenário anterior, porém o tempo que levam para ser concluídas segue uma distribuição normal. Em canteiros de obras, variações na duração das atividades têm diferentes causas. Uma causa é a variação no tempo que o planejamento leva para analisar e remover as restrições para que as atividades ocorram; por exemplo, avaliação da disponibilidade de materiais e áreas para instalação. Outras causas estão relacionadas ao nível de dificuldade das diferentes tarefas alocadas para as equipes de fabricação e instalação e os diferentes níveis de habilidades dos trabalhadores. Essas variações afetam o tamanho dos estoques necessários para manter o fluxo de trabalho contínuo nos sistemas de produção, pois o tempo de processamento é variável.

Os cenários probabilísticos foram avaliados em uma só interação e em múltiplas interações, de modo que pudessem ser comparados entre si e ter as médias e desvios padrão do número de dutos instalados avaliados. A Figura 4(a) apresenta os resultados para as três filas, Dutos, Canteiro e DutosInst.

A Figura 4(a) revela que o projeto foi concluído em 1.220 horas. O estoque na oficina de fabricação (Dutos) é de 25 dutos ou menos, visto que os dutos são transportados para o canteiro logo após a *Fabricação* (como no cenário A). O estoque máximo no Canteiro chega a 600 dutos em diferentes tempos da simulação, entre 616 e 783 horas.

Com relação aos resultados obtidos para múltiplas interações, 100 no total, o cenário B conclui o projeto em um tempo médio de  $1,184 \pm 50$  horas. Considerando-se os valores contidos em até dois desvios padrão, o projeto poderia ter sido concluído em 1.084 horas ou até 1.284 horas. A diferença entre o tempo de conclusão do projeto para múltiplas interações do cenário B, quando comparado ao cenário A, revela o impacto que a variabilidade tem nessa cadeia de suprimentos. Deve-se ressaltar que a manifestação da variabilidade poderia ter resultado num tempo de conclusão do projeto bem inferior ou bem superior àquele do cenário A.

As autoras também investigaram a implementação da ligação FE (Figura 2) no cenário B. A Figura 4(b) indica que o projeto foi finalizado no tempo 1.304. Essa duração mais longa no cenário B modificado, quando comparado à sua versão original, foi observada, pois no tempo 76 horas o estoque do Canteiro chega a zero, parando a Instalação e atrasando o projeto. Esse exemplo ilustra a importância da definição dos estoques mínimos em uma cadeia de suprimentos com base no grau de variabilidade encontrado no sistema. A definição do estoque mínimo de 50 dutos para o Canteiro foi apropriada para o cenário determinístico (A), mas não para o cenário probabilístico (B), que sofreu influência da variabilidade.

### Cenário C - Determinístico e Grandes Lotes

O cenário C emprega as mesmas durações determinísticas usadas no cenário A. Porém, nesse cenário os dutos são transportados para o canteiro de obras em lotes de 250 dutos (10 vezes o tamanho dos lotes dos cenários A e B). O *Planejamento* se utiliza do projeto do sistema a ser instalado para solicitar os dutos antes mesmo que eles sejam necessários no canteiro. Uma vez que o detalhamento dos dutos para fabricação está pronto, eles são enviados para a *Fabricação*.

A Figura 5 mostra os resultados obtidos para o cenário C. Nesse caso, as empresas que fabricam e instalam os dutos devem ter bastante espaço para estocar os grandes lotes de dutos que se acumulam em Dutos e Canteiro. O tamanho máximo do estoque na oficina de fabricação (Dutos) é de 250 dutos, dez vezes maior do que nos cenários A e B, devido à definição do envio de grandes lotes de dutos para o canteiro, de modo que se obtenham ganhos no transporte do material. O estoque

máximo no Canteiro chega a 800 dutos no tempo 704 horas. O estoque diminui na medida em que todas as ordens são enviadas para o canteiro e a Instalação dos dutos prossegue de forma contínua.

O projeto é concluído no tempo 1.224 horas, o qual é maior do que aquele obtido para o cenário A. O cenário C ilustra um dos efeitos que grandes lotes têm nas cadeias de suprimentos, o aumento do tempo de entrega (*lead time*). A definição dos grandes lotes resultou em um atraso na conclusão do projeto, apesar de a duração da atividade de Transporte para um lote grande de dutos ter permanecido a mesma do cenário A.

Além de gerar problemas relativos ao aumento do nível de estoques no sistema, o emprego de grandes lotes pode gerar outros efeitos colaterais, não modelados, relativos ao aumento do tempo para detecção de problemas, omissão de problemas relativos à real capacidade dos sistema e sua eficiência, superprodução, acúmulo de capital empatado e obsolescência, entre outros. O emprego de pequenos lotes de fabricação, transporte e instalação, aliado ao uso de *kanbans* para a sua solicitação, podem garantir o trabalho contínuo sem prejudicar indicadores de produção (e.g., tempo de produção, estoques, taxa de fabricação) e financeiros (e.g., custos diretos e indiretos para fabricação antecipada e manutenção de estoques) do sistema. Dessa forma, o sistema passa a trabalhar como um sistema puxado operado com base nas suas reais necessidades.

### Cenário D - Probabilístico e Grandes Lotes

O cenário D tem as mesmas características do cenário C, exceto que aquele usa durações probabilísticas para as atividades. A Figura 6 apresenta os resultados para uma única interação do cenário D. O tamanho máximo do estoque na oficina de fabricação (Dutos) chega a 250 dutos, e no canteiro de obras (Canteiro) chega a 700 dutos no tempo 740 horas. O projeto é concluído no tempo 1.275 horas, aproximadamente 50 horas depois da sua versão determinística. Em múltiplas interações do cenário D, obteve-se que o projeto foi concluído em média em  $1,243 \pm 52$  horas. Esse modelo ilustra o efeito que a variabilidade, aliada aos grandes lotes, tem no tempo de entrega (*lead time*) dos projetos. O cenário D levou mais horas para ser concluído do que os outros cenários e ainda pode apresentar os problemas relacionados ao emprego de grandes lotes indicados no item anterior.

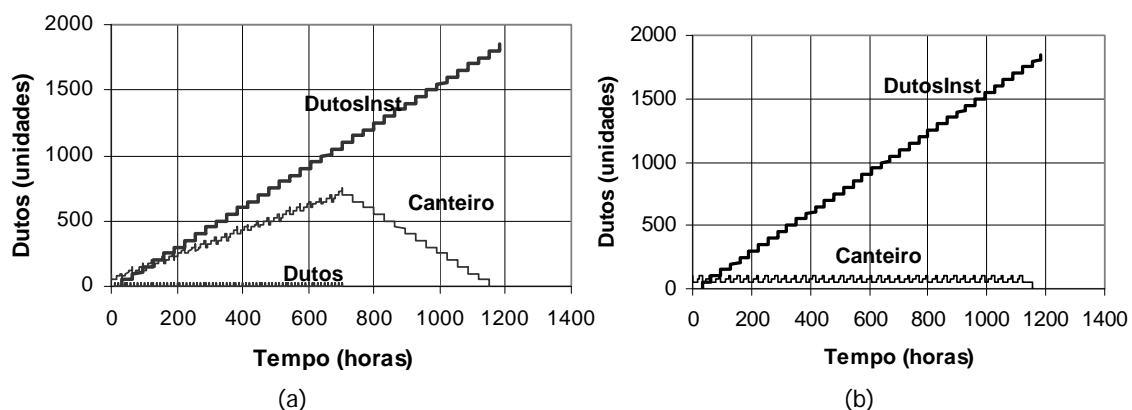


Figura 3 - Cenário A (única interação): (a) durações determinísticas e (b) durações determinísticas e comunicação entre Canteiro e Fabricação

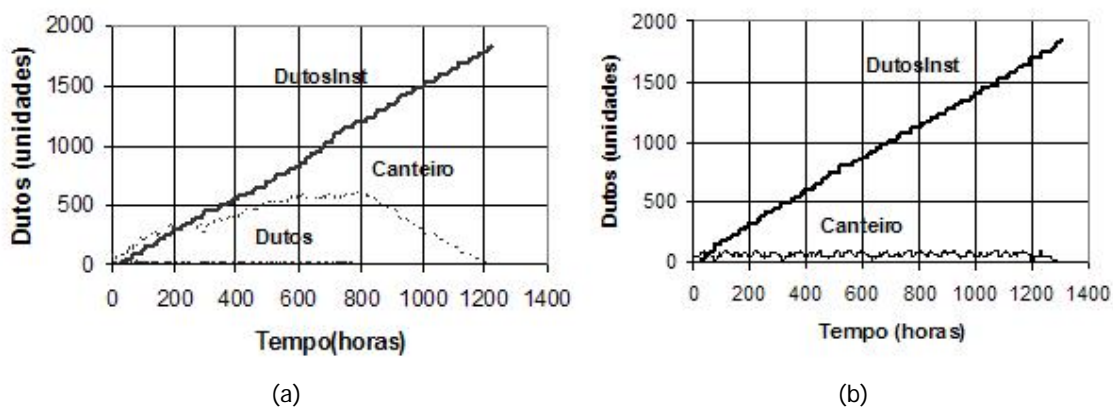


Figura 4 - Cenário B (única interação): (a) durações probabilísticas e (b) durações probabilísticas e comunicação entre Canteiro e Fabricação

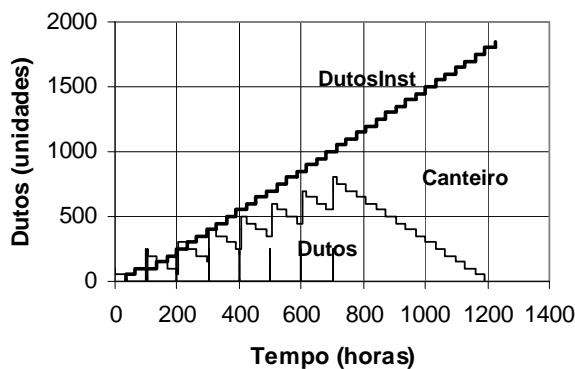


Figura 5 - Cenário C - durações determinísticas e grandes lotes (única interação)

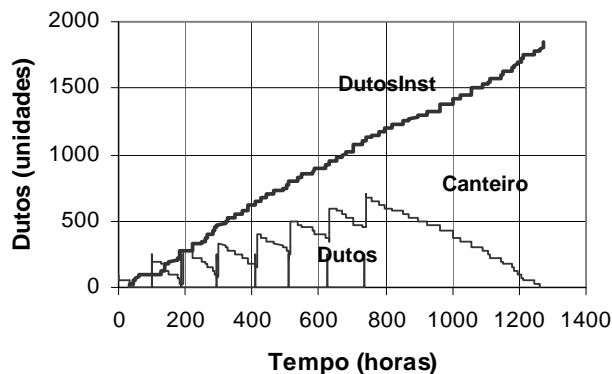


Figura 6 - Cenário D - durações probabilísticas e grandes lotes (única interação)

## Discussão

A análise dos cenários de A a D revela os efeitos que a variabilidade na duração das atividades bem com os grandes lotes têm na duração dos projetos. O cenário A representou o comportamento do sistema na ausência de variabilidade e resultou no menor tempo de conclusão do projeto analisado (o projeto foi concluído em 1.184 horas). Na medida em que a variabilidade e a definição de grandes lotes são adicionadas ao projeto, o tempo de conclusão do projeto e a incerteza nos tempos de conclusão (representada pelo desvio padrão  $\sigma$ ) aumentam.

Esses modelos não investigaram os problemas de seqüenciamento e coordenação de produtos a serem instalados em áreas distintas e o impacto que a padronização dos produtos tem no desempenho do projeto. Conforme discutido por Tommelein (1998), esses problemas podem mudar o nível de complexidade dos projetos e impactar no tempo de conclusão dos projetos.

Os cenários ilustraram o impacto da variabilidade em cadeias produtivas e a importância da comunicação entre diferentes partes de uma cadeia de suprimentos para evitar o acúmulo de estoques. O estudo desses diferentes cenários com/sem possibilidade de comunicação entre as partes da cadeia de suprimentos e com/sem variabilidade reforça o que foi discutido por Forrester (1958). A comunicação entre as diferentes partes de cadeias produtivas na construção civil é fundamental para que se alcance a integração entre essas partes e se alcance o que Vrijhoef e Koskela (2000) definem como o foco 4, discutido anteriormente, no gerenciamento de cadeias da construção. No foco 4, para que a integração aconteça, faz-se necessária a existência de intensa colaboração e coordenação entre as partes da cadeia.

O modelo também ilustrou os efeitos práticos do uso de um sistema puxado, baseado na definição

de estoques mínimos para a solicitação de materiais. *Kanbans* poderiam ser empregados para solicitar a fabricação e o envio ao canteiro dos materiais requeridos para a instalação em pequenos lotes, evitando, assim, altos níveis de estoque, superprodução e paralisação do fluxo de trabalho das equipes. Ficou evidenciado também, pela análise dos resultados, os efeitos nocivos causados pelo aumento de variabilidade e o emprego de grandes lotes, os quais, além de aumentar o tempo de conclusão dos projetos, causam efeitos indesejados nos campos da qualidade, do funcionamento global do sistema e no financeiro, entre outros.

A análise dos cenários simulados possibilita o melhor entendimento de como funcionam as cadeias produtivas e a definição dos estoques necessários para o funcionamento das suas atividades. O desenvolvimento desse modelo também ressalta a importância de se terem dados confiáveis disponíveis para a modelagem. Somente com dados confiáveis pode-se realizar o planejamento das cadeias de suprimentos e seus sistemas produtivos. Para o desenvolvimento do modelo, as autoras necessitaram de informações básicas sobre as atividades modeladas. A indústria da construção e seus pesquisadores devem se esforçar mais para a obtenção de dados mais representativos que possam ser utilizados para o projeto de cadeias de suprimentos e sistemas produtivos.

## Conclusões

O entendimento de como cadeias de suprimento funcionam, de características intrínsecas das suas atividades componentes e de seus produtos, é fundamental para o projeto de cadeias produtivas mais eficientes. O presente artigo utilizou um modelo de simulação com base na cadeia de suprimentos de dutos de ar-condicionado para ilustrar o funcionamento de uma cadeia de

suprimentos e o impacto que a variabilidade e a definição de grandes lotes têm no seu desempenho.

Com este artigo, as autoras esperam que o uso de simulação computacional seja mais difundido entre estudantes, pesquisadores e na indústria da construção civil brasileira em geral. Conforme apresentado, a simulação pode auxiliar no melhor entendimento de conceitos e suas aplicações na construção civil, bem como ajudar no planejamento e projeto de cadeias de suprimentos e sistemas produtivos. Os testes feitos com modelos de simulação custam uma fração do tempo e do dinheiro daqueles que seriam obtidos com experimentos no mundo real e, se elaborados de forma criteriosa, representam uma realidade controlada para o estudo de objetivos específicos.

## Referências

- ABIKO, A. K.; MARQUES, F. S.; CARDOSO, F. F.; TIGRE, P. B. **Setor de Construção Civil:** segmento de edificações. Brasília, SENAI/DN, 2005. 159 p. il. (Série Estudos Setoriais, 5)
- ALVES, T. C. L. **Buffering practices in HVAC Ductwork Supply Chains.** Berkeley, CA. 2005. 286 f. Ph.D. Dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 2005.
- ARBULU, R. **Improving construction supply chain performance:** case study on pipe supports used in power plants. Berkeley, CA. 2002. 108 f. Master of Engineering Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 2002.
- AZAMBUJA, M. M. B. **Processo de projeto, aquisição e instalação de elevadores em edifícios:** diagnóstico e propostas de melhoria. 2002. 149 f., il. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.
- CARDOSO, F. F. Importância dos estudos de preparação e da logística na organização dos sistemas de produção de edifícios: alguns aprendizados a partir da experiência francesa. Brasil - São Paulo, SP, 1996. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL LEAN CONSTRUCTION, 1996. **Painel V.** São Paulo, Artigo técnico. p. 1-24.
- EGAN, J. **Rethinking construction.** London: Department of Trade and Industry, 1998. 37 p.
- FORMOSO, C. T.; SOIBELMAN, L.; DE CESARE, C.; ISATTO, E. L. Material Waste in Building Industry: Main Causes and Prevention. ASCE, **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 128, n. 4, p. 316-325, 2002.
- FORRESTER, J. W. Industrial Dynamics: a major breakthrough for decision makers. **Harvard Business Review**, p. 37-66, July/Aug. 1958.
- HONG-MINH, S. M.; BARKER, R.; NAIM, M. M. Construction Supply Chain Trend Analysis. In: TOMMELEIN, I. D. (Ed.). In: PROC. SEVENTH ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 7., Berkeley, **Proceedings...** 26-28 July, 1999. p. 86-96.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory Physics.** 2nd Ed. Boston: McGraw-Hill International, 2000. 698 p.
- KOSKELA, L. **Application of the new production philosophy to construction.** Stanford University, CIFE Technical Report # 72, 1992. 87 p.
- LAUFER, A.; TUCKER, R. L. Is construction project planning really doing its job? A critical examination of focus. **Construction Management and Economics**, v. 5, p. 243-266, 1987.
- LIKER, J. K. **The Toyota way:** 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer. New York, NY: McGraw-Hill, 2004. 330 p.
- LONDON, K. A.; KENLEY, R. An industrial organization economic supply chain approach for the construction industry: a review. **Construction Management and Economics**, v. 19, p. 777-788, 2001.
- MARTINEZ, J. C. **STROBOSCOPE:** State and Resource Based Simulation of Construction Processes. 1996. 518 f. Ph.D. Dissertation - Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 1996.
- O'BRIEN, W.; LONDON, K.; VRIJHOEF, R. Construction supply chain modeling: a research review and interdisciplinary research agenda. In: PROC. TENTH ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, Gramado, 10., Gramado, **Anais...** August 6-8, 2002. p. 129-148.
- OHNO, T. **Toyota Production System:** beyond large-scale production. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988. 142 p.

SHINGO, S. **Non-Stock Production**: the Shingo System for Continuous Improvement. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988. 454 p.

SILVA, M.; SOUZA, R. Estudo da competitividade do complexo industrial de materiais de construção. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC/USP, 1993. v. 2, p. 601-610.

SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. **Designing and managing the supply chain**: concepts, strategies and case studies. 2nd Ed. Boston, MA: McGraw-Hill Irwin, 2003. 354 p.

TOMMELEIN, I. D. Pull-driven scheduling for pipe-spool installation: simulation of a Lean Construction Technique. **Journal of Construction Engineering and Management**, ASCE, v. 124, n. 4, p. 279-288, 1998.

TOMMELEIN, I. D. **The value chain**: adding value to the supply chain. Mechanical Contracting Education and Research Foundation (MCERF), Rockville, MD, USA, 2004. 28 p.

VRIJHOEF, R.; KOSKELA, L. The Four roles of supply chain management in construction. **European Journal of Purchasing & Supply Management**, n. 6, p. 169-178, 2000.

WALSH, K. D.; HERSHAUER, J. C.; TOMMELEIN, I. D.; WALSH, T. A. A strategic positioning of inventory to match demand in a capital projects supply chain. **Journal of Construction Engineering and Management**, ASCE, p. 818-826, Nov./Dec. 2004.

## Agradecimentos

As autoras agradecem à CAPES, pela bolsa de estudos concedida à primeira autora do artigo para a realização do seu doutorado, às empresas que participaram desta pesquisa e à Mechanical Contractors Education Foundation, pelo suporte financeiro concedido às pesquisas das autoras. Quaisquer conclusões e opiniões expostas neste artigo são de responsabilidade das autoras e não refletem a visão das entidades e empresas que de alguma forma apoiaram ou participaram desta pesquisa.