

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Redução do tempo de atravessamento através da redução do tempo de ciclo em programação por linha de balanço de edifícios mediante a escolha da unidade de repetição sobre influência da curva de aprendizado:
Uma visão enxuta**

MIGUEL TEIXEIRA GOMES PACHECO

Trabalho apresentado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Luiz Fernando M. Heineck.

Florianópolis
2006

MIGUEL TEIXEIRA GOMES PACHECO

**REDUÇÃO DO TEMPO DE ATRAVESSAMENTO ATRAVÉS DA
REDUÇÃO DO TEMPO DE CICLO EM PROGRAMAÇÃO POR LINHA
DE BALANÇO DE EDIFÍCIOS MEDIANTE A ESCOLHA DA UNIDADE
DE REPETIÇÃO SOBRE INFLUÊNCIA DA CURVA DE APRENDIZADO:
UMA VISÃO ENXUTA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em 03/02/2006 em sua forma final, pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Professor Dr. Glicério Trichês –
Coordenador do CPGEC

Professor Luiz Fernando Mahlmann Heineck, PhD. –
Orientador

Banca examinadora

Professor Dr. Luis Alberto Gómez. – ECV/UFSC

Professor Dr. Antonio Edésio Jüngles – ECV/UFSC

Professor Dr. Ricardo Luiz Machado – UCG

Professora Andrea Angela Panzeter, PhD. – PUC/PR

PACHECO, Miguel Teixeira Gomes

Redução do tempo de atravessamento através da redução do tempo de ciclo em programação por linha de balanço mediante a escolha da unidade de repetição sobre influencia do efeito aprendido: Uma visão enxuta; Miguel Teixeira Gomes Pacheco – Florianópolis, 2006

94p

Dissertação: Mestrado em Engenharia Civil (Construção Civil)

Orientador: Luiz Fernando Mahlmann Heineck

1. Construção Enxuta 2. Aprendizado 3. Tempo de Ciclo 4. Unidade de Repetição

I. Universidade Federal de Santa Catarina

II. Título

RESUMO

A construção enxuta surge pela transposição de uma filosofia da produção manufatureira para a construção. A filosofia de produção enxuta criou-se no chão de fábrica consistindo-se de uma série de princípios empiricamente testados. A falta de uma teoria de base que explique porque e como esses princípios funcionam levanta dúvidas sobre a aplicação integral dos mesmos para o ambiente da construção. Um dos princípios da produção enxuta consiste na redução do tamanho de lote como forma de reduzir o tempo de ciclo. A presente dissertação demonstra matematicamente como, em programação por linha de balanço de edifícios repetitivos em altura, a redução do tamanho de lote entendida como a escolha de uma menor unidade de repetição implica a redução do tempo de ciclo na presença do efeito aprendizado como corolário do mesmo. Prova-se desta forma a validade do princípio enxuto: redução do tamanho de lote para reduzir tempo de ciclo no contexto da construção em altura de edifícios repetitivos. Apresenta-se uma base teórica com uma fundação matemática, para explicar como e porque tal acontece.

Palavras chaves: 1.Construção Enxuta 2.Aprendizado 3. Tempo de Ciclo 4. Unidade de Repetição

ABSTRACT

Lean Construction consists on applying a production philosophy from manufacturing production to the construction environment. Lean Production creation took place on factory floor and it works by organizing production under a series of principles empirically tested. The lack of a base theory to explain how and why this principles work opens doubts on possibility of a integral application of this principles to the construction environment. One of the principles of lean production states the reduction of lot size to bring about a reduction of time cycle. The present thesis demonstrates mathematically that in line of balance programming of repetitive buildings reduction of lot size in the sense of the reduction of the repetition unit implies the reduction of time cycle as a corollary of the learning effect, proofing therefore the validity of the principle in this context and providing a theoretical base with a mathematical underpinning to explain how and why it works.

Key Words: 1.Lean Construction 2. Learning Effect 3. Time Cycle 4. Lot Size

Dedico esta dissertação ao meu Avô, Abel Teixeira (*in memoriam*), por persistir em me ensinar aquilo que só hoje começo a compreender e valorizar.

AGRADECIMENTOS

Nesta empreitada, começamos do início:

A Luciana De Moliner por me levar até à porta;

Ao Professor Heineck, por ter aberto a porta a mim, um estranho, contra tudo o que seria sensato;

Mais uma vez, ao Professor Heineck, por ter mantido a porta aberta até quando o sensato seria não o fazer;

Ainda ao Professor Heineck, por me ter ajudado mais do que seria sensato;

Enfim, ao Professor Heineck, por nunca ter agido de forma sensata.

A Edinaldo Favoreto Gonzalez, por sua dissertação;

Aos colegas de pós-graduação, por sua ajuda;

Ao programa de pós-graduação pela oportunidade deste mestrado;

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao contribuinte brasileiro;

A toda a minha família, a de lá e de cá, simplesmente por existirem;

E, *toujours*, à Giorgia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Contexto.....	14
1.2 Justificativa.....	17
1.3 Objetivos principais e secundários.....	20
1.3.1 Objetivo principal.....	20
1.3.2 Objetivo secundário.....	20
1.4 Resumo do método de pesquisa.....	20
1.5 Resumo da estrutura da dissertação.....	22
1.6 Delimitação do tema.....	23
2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA.....	24
2.1 Estrutura do capítulo.....	24
2.2 Linha de Balanço: Uma definição.....	24
2.3 Bibliografia sobre a linha de balanço e suas otimizações.....	27
2.4 Bibliografia sobre linha de balanço e outros métodos de programação: relações, diferenças e críticas.....	30
2.4.1 Método do Caminho Crítico.....	30
2.4.2 Método do Caminho Crítico e Linha de Balanço.....	30
2.4.3 Críticas ao Método do Caminho Crítico.....	34
2.5 Tamanho de lote e tempo de ciclo.....	36
2.6 Curva de aprendizado.....	38
2.6.1 História.....	38
2.6.2 Modelos para a curva de aprendizado.....	39
2.6.3 Considerações sobre os vários modelos.....	40
2.7 Curva de aprendizado e linha de balanço.....	41
2.8 Curvas de aprendizado, tamanho de lote e tempo de ciclo.....	43
3 METODOLOGIA.....	45
3.1 Introdução.....	45
3.2 Metodologia para a demonstração.....	46
3.3 Metodologia para os ensaios.....	47
3.4 Formulação do problema.....	48
3.5 Variáveis.....	48
3.6 Relação entre as variáveis.....	49
3.7 Explicitação dos conceitos.....	50
3.8 Demonstração.....	54

3.9 Caracterização da obra.....	58
3.10 Estratégia para a programação dos grupos I e II.....	61
4 ENSAIOS.....	64
4.1 GRUPO I.....	65
4.2 GRUPO II.....	67
4.3 Análise de resultados.....	69
4.3.1 Resultados do Grupo I.....	69
4.3.2 Resultados do Grupo II	73
4.3.3 Comparação dos resultados dos Grupos I e II.....	76
5 CONCLUSÕES.....	84
5.1 Conclusões.....	84
5.2 O paradigma enxuto e o trabalho.....	85
5.3 Recomendações para futuros trabalhos.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1	Quadro síntese dos modelos de aprendizado.....	39
QUADRO 3.1	Caracterização quantitativa do empreendimento.....	59
QUADRO 3.2	Definição de atividades e equipes.....	60
QUADRO 4.1	Tempos de atravessamento por unidades de repetição.....	69
QUADRO 4.2	Comparação das reduções de tempo de atravessamento.....	70
QUADRO 4.3	Dimensões relativas das unidades e tempos de atravessamento..	71
QUADRO 4.4	Comparação das dimensões das unidades e tempos de atravessamento.....	72
QUADRO 4.5	Número médio de homens/dia.....	73
QUADRO 4.6	Comparação do número médio de homens/dia por unidade.....	74
QUADRO 4.7	Dimensões relativas das unidades e número médio de homens/dia.....	75
QUADRO 4.8	Comparação das dimensões das unidades e do número médio de homens/dia.....	75
QUADRO 4.9	Comparação de resultados dos dois ensaios.....	76
QUADRO 4.10	Comparação entre diferenças relativas e dimensões de unidade...	79
QUADRO 4.11	Dimensões relativas das unidades e resultados por grupo.....	80
QUADRO 4.12	Correlação entre resultados, unidades e número de repetições.....	80
QUADRO 4.13	Quociente entre tempo de atravessamento e repetições.....	81

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1	Linha de Balanço e Método de Programação Linear.....	27
GRÁFICO 2.2	Visão diagonal.....	27
GRÁFICO 2.3	Visão transversal.....	28
GRÁFICO 2.4	Linha de balanço sem e com PLME.....	28
GRÁFICO 2.5	Determinação de pontos de controle em atividades convergentes e divergentes.....	32
GRÁFICO 2.6	Definição de uma seqüência de controle.....	32
GRÁFICO 2.7	Perdas de produtividade provocadas por interrupções.....	43
GRÁFICO 3.1	Relações entre tempo de ciclo de uma equipe e tempo de atravessamento de uma atividade.....	51
GRÁFICO 3.2	Ilustração da ação do corolário para atividades com mais de uma equipe.....	51
GRÁFICO 3.3	Tempo de atravessamento sem efeito aprendido.....	52
GRÁFICO 3.4	Tempo de atravessamento dividido por unidade de repetição sem efeito aprendido.....	52
GRÁFICO 3.5	Tempo de atravessamento sem efeito aprendido.....	53
GRÁFICO 3.6	Redução do tempo de atravessamento com efeito aprendido...	53
GRÁFICO 3.7	Tempo de atravessamento dividido por unidade de repetição sem efeito aprendido.....	53
GRÁFICO 3.8	Tempo de atravessamento dividido por unidades de repetição com efeito aprendido.....	53
GRÁFICO 3.9	Estratégia de programação para o grupo II.....	63
GRÁFICO 4.1	Ensaio comparados do Grupo I.....	66
GRÁFICO 4.2	Ensaio comparados do Grupo II	68
GRÁFICO 4.3	Tempo de atravessamento do grupo I	77
GRÁFICO 4.4	Número médio de homens/dia no canteiro do grupo II.....	77
GRÁFICO 4.5	Número médio de homens/dia no canteiro do grupo II.....	78

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ILUSTRAÇÃO 3.1	Implantação do empreendimento.....	58
----------------	------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

DEFG	Dissertação de Edinaldo Favareto Gonzalez
MCC	Método do Caminho Critico
TDR	Teoria das Restrições
QEM/QEE	Quantidade Economica de Manufatura/Quantidade Economica de Encomenda
LdB	Linha de Balanço
MPL	Método de Programação Linear
MPL	Método de Programação Vertical
PLME	Programação Linear de Múltipla Etapa
MCC/LdB	Método do Caminho Critico/Linha de Balanço
PLHV	Programação de Lógica Horizontal e Vertical
MPRER	Método de Programação por Restrições de Espaço e Recursos
MPR	Método de Programação Repetitiva
MPOOR	Método de Planejamento Orientado por Objetos e por Recursos
JIT	<i>Just in time</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A *Lean Construction* apresenta um novo paradigma para entender a construção civil. Este paradigma surge nas indústrias japonesas nos anos quarenta (durante a guerra) e cinquenta do século XX (KOSKELA, 1992). O sucesso de vendas e qualidade dos produtos de empresas como a Toyota, levantou o interesse em entender as causas dos mesmos. Entender, como um país, escasso em recursos materiais, saído de uma guerra a qual tinha perdido, conseguiu em poucas décadas recuperar a sua indústria de forma tão eficaz que ultrapassou o ocidente.

Essa pesquisa dos métodos de produção japoneses levou ao aparecimento, no ocidente, de uma série de nomes e siglas como Qualidade Total, *Just in Time*, Sistema Toyota de Produção e ao estudo de autores como Shingo (1998) e Ohno (1998A; 1998B). No ocidente, a partir da década de oitenta do século XX, surge a Teoria das Restrições (TDR) que defende alguns princípios paralelos aos apresentados pelos sistemas de produção japoneses (GOLDRATT & COX, 1986).

O sucesso que a transposição destes métodos de gerenciamento teve quando aplicados nas fábricas européias e americanas, (HOWELL & BALLARD, 1999, KOSKELA, 1992) demonstrou empiricamente a validade universal destes princípios.

Este sucesso motivou aplicar esses princípios à construção civil. Surge assim a *Lean Construction*, com o relatório técnico de Koskela (1992).

A partir deste relatório, vários pesquisadores da área de construção civil iniciam estudos sobre a ótica deste novo paradigma. A *Lean Construction* apresenta um novo paradigma diverso da produção artesanal e da produção em massa. Especificamente difere de outras formas de gerenciamento da construção por ter um conjunto claro de objetivos para o processo de entrega, com o propósito de maximizar o desempenho

para o cliente desde a fase de projeto, por desenhar simultaneamente produto e processo e pela aplicação de controle da produção durante todo o ciclo de vida do projeto (HOWELL, 1999).

A *Lean Construction* tornou-se Construção Enxuta quando a comunidade acadêmica brasileira de pesquisa em construção civil começou a enxergar a construção sobre esta nova ótica. Deste novo olhar surge um corpo de teses: Mendes Jr (1998) usou a linha de balanço para auxiliar o planejamento da produção de um edifício de unidades multi familiares, Santos (1999) estudou canteiros de obra sobre a ótica enxuta.

O paradigma enxuto não enxerga a produção como somente um conjunto de atividades de transformação. Desta forma, se presta muita atenção às atividades de fluxo e suas conseqüências para o decorrer da produção (KOSKELA, 1999). Este foco nas atividades de fluxo na construção civil levou à procura de métodos que permitissem ter a visão de fluxo da obra. A linha de balanço tem-se utilizado com esse fim. Esse uso comprova-se na pratica nacional (MENDES JR. & HEINECK, 1998) e internacional (KANKAINEN & SEPPÄNEN, 2003; SEPPÄNEN & KANKAINEN, 2004).

Para orientar a implementação de uma visão de fluxo na construção Koskela (1992) propôs onze princípios.

Na sua tese de doutorado Koskela (2000) trocou os onze princípios de controle do fluxo por três classes de princípios: a primeira classe consiste em um só princípio: redução de atividades que não agregam valor. A segunda classe de princípios, compõe-se de uma série de heurísticas que ajudam diretamente a conseguir avanços na implementação da qualidade. Como um exemplo, apresenta a redução de tempo de ciclo que motiva a eliminar atividades que não agregam valor. Os princípios de terceira classe referem-se a heurísticas que empiricamente se verificou auxiliarem a cumprir os princípios de segunda classe embora a sua relação com o princípio de primeira classe não se vislumbre com evidência.

Como exemplo tem-se o princípio de redução do tamanho de lote, que se verificou auxiliar a reduzir o tempo de ciclo (um princípio de segunda classe). Por outro lado, à

guisa de exemplo, uma relação direta entre redução do tamanho de lote e a redução de atividades de que não agregam valor resulta difícil de perceber.

Um ano depois, Koskela (2001) propõe outra visão do Sistema Toyota de Produção. Afirmando que a sua tese de doutorado analisa o Sistema Toyota de Produção do ponto de vista da produção, apresenta uma análise alternativa enxergando pela perspectiva do gerenciamento (entendido como gerenciamento das operações).

Koskela analisa duas interpretações do Sistema Toyota de Produção: Johnston (1995) e de Spear e Bowen (1999). Segundo Koskela, Johnston afirma que o pensamento convencional no gerenciamento se baseia numa representação do mundo e assim o gerenciamento se torna planejamento, ou seja, uma manipulação dessa representação. Por oposição, segundo o autor, o Sistema Toyota de Produção atua por gerenciamento-como-organização (*management-as-organizing*), assumindo um carácter inerentemente contextual para a atividade humana que responde às circunstâncias tais como elas se apresentam.

Por outro lado, Spear & Bowen (1999) defendem que o entendimento do Sistema Toyota de Produção passa pelo método científico. Ao estabilizar o processo de produção, estabiliza-se igualmente uma hipótese que se pode testar. Pode-se entender este sistema como gerenciamento-como-aprendizado (*management-as-learning*). Note-se que este entendimento do gerenciamento como hipótese-teste também está no cerne dos cinco passos que formam a teoria das restrições (GOLDRATT & COX, 1986)

Para melhor entender o raciocínio desta dissertação, interessa lembrar que a literatura de produção industrial procura um método para medir de forma objetiva o sucesso da implantação dos sistemas de qualidade. A curva de aprendizado é proposta como um indicador para tal medição. A escolha da curva de aprendizado resulta do fato da mesma medir o aprendizado coletivo, o conjunto de esforço de todos os níveis de uma organização, para conseguir alcançar um objetivo (JABERA & BONNEY, 2003).

Recentemente, no campo de pesquisa em construção civil, uma série de autores conjuga a linha de balanço com a curva de aprendizado (ARDITI, TOKDEMIR & SUH, 2001; LAM, LEE & HU, 2002; COUTO & TEIXEIRA, 2002; COUTO & TEIXEIRA, 2005). Segundo Lam, Lee e Hu (2002) não se pode programar uma obra sem incluir o efeito aprendizado. O aprendizado surgirá inerentemente do próprio processo de construção. Desta forma, a melhor política consiste em contabilizar os efeitos do aprendizado e integrá-los no planejamento e programação.

A curva de aprendizado, além de usada como medida numérica da implementação de programas de qualidade, aplica-se igualmente para um melhor entendimento do problema clássico da Quantidade Econômica de Manufatura / Quantidade Econômica de Encomenda (QEM/QEE) (*Economic Manufacturing Quantity/Economic Order Quantity*) que tenta definir o tamanho ótimo de lote, entre custos e otimização de produção. Este problema, abordado do ponto de vista do aprendizado, apresenta melhores soluções para lotes menores (JABERA & BONNEY, 1999) demonstrando assim válido o princípio de redução do tamanho de lote.

Por oposição, no campo da literatura enxuta, ainda se procura modos de conseguir uma implementação, em canteiro, do princípio de redução do tamanho de lote. Embora exista literatura sobre o tema (ALVES & TOMMELEIN, 2003; SANTOS & POWELL, 2001; TOMMELEIN, 1998), que apresente alguma evidência das vantagens da redução do tamanho de lote em canteiro (SANTOS & POWELL, 2001) ainda hoje a aplicação desta máxima não está dominada (NIELSSEN & THOMASSEN, 2004).

1.2 Justificativa

A linha de balanço tem vindo a estabelecer-se como ferramenta útil para o planejamento e programação de obra. (MENDES JR & HEINECK, 1998; KANKAINEN & SEPPÄNEN, 2003). Tal acontece por permitir uma visão de fluxo da obra ao contrário de métodos de programação como o Método do Caminho Crítico (MCC). Adicionalmente, permite programar a obra dentro de uma política de produção puxada

algo que o MCC não permite (KANKAINEN & SEPPÄNEN, 2003). A importância da visão de fluxo advém da divulgação e assimilação do paradigma enxuto como forma de entender a construção e a importância da visão de fluxo dentro do mesmo.

Uma vez que a validade da linha de balanço como método de programação está estabelecido, os esforços devem voltar-se para a sua otimização. A otimização da mesma, tratando-se de uma ferramenta para a explicitação e controle de fluxo e dentro do paradigma enxuto, deve surgir da aplicação dos princípios enxutos para controle de fluxo.

Koskela (1992) expôs onze princípios para controle do fluxo. A redução do tempo de ciclo encontra-se entre eles. Na indústria, a aplicação dos princípios de controle de fluxo levou a reduções de tempo de ciclo com menor consumo de mão de obra, equipamentos e insumos, gerando uma menor quantidade de estoque em processo, quando comparada com a produção gerenciada segundo os princípios de produção em massa.

A construção de edifícios multifamiliares requer prazos extensos. Em termos econômicos, no presente cenário nacional, tais prazos extensos somados a juros elevados aumentam o custo financeiro para a construção civil. Dado o elevado valor absoluto dos edifícios, comparado com a renda dos potenciais consumidores, mesmo pequenos aumentos percentuais têm impactos na demanda. A redução do tempo de ciclo reduziria o custo financeiro e os preços, sem necessidade do aumento do consumo de capital. Faria a economia girar mais depressa, aumentando a oferta de construção à sociedade como um todo.

A redução do tempo de ciclo encontra-se associada, na literatura, à redução do tamanho de lote, quer teoricamente para a indústria (OHNO 1988A; SHINGO, 1988), quer na prática, no chão de fábrica (JABERA & BONNEY, 1999). Na construção civil defende-se esse princípio igualmente na teoria (KOSKELA, 1992) e na prática (SANTOS & POWELL, 2001; KANKAINEN & SEPPÄNEN, 2003).

Na indústria produz-se em quantidades estando a definição de tamanho de lote bem estabelecida. No entanto, na construção civil produz-se frequentemente protótipos, um único objeto. A definição de tamanho de lote em construção não se encontra tão bem estabelecida (NIELSSEN & THOMASSEN, 2004). Uma definição possível de tamanho de lote na construção consiste na redução do tamanho dos lotes de insumos requeridos para a construção. Reduzindo a quantidade de material circulando em canteiro, a literatura aponta resultados similares aos verificados na indústria (SANTOS & POWELL, 2001).

A escolha da unidade de repetição, em programação por linha de balanço, também configura um problema de definição de um lote, um lote gerencial. Ao definir a unidade de repetição pode-se aumentar ou reduzir o tamanho de um lote gerencial.

Atualmente, a escolha da unidade de repetição pressupõe-se indiferente para a produtividade, embora tal assunção não tenha prova. Desta forma, pesquisar a influência da escolha da unidade de repetição em programação por linha de balanço no tempo de ciclo, supre uma lacuna teórica no conhecimento relativo à linha de balanço e permite uma implementação para a programação do princípio da redução do tamanho de lote.

Dentro do contexto acima exposto estabeleceram-se as seguintes questões de pesquisa:

- a) Que influência tem a escolha da unidade de repetição na produtividade dentro da programação por linha de balanço?
- b) Que aplicações se podem obter mediante a manipulação da variável unidade de repetição?
- c) O efeito aprendido pode explicar a relação entre redução de tamanho de lote e redução do tempo de ciclo?

1.3 Objetivos principais e secundários

1.3.1 Objetivo principal

O presente trabalho tem como principal objetivo contribuir para a otimização da técnica de programação de obra por linha de balanço quando aplicada à construção de edifícios multifamiliares, contabilizando o efeito integrado da ação da curva de aprendizado e da escolha da unidade de repetição.

1.3.2 Objetivo secundário

- a) Demonstrar que, como corolário do efeito aprendizado, a escolha de unidades de repetição de menor dimensão implica na redução de tempo de ciclo em programação por linha de balanço de edifícios multifamiliares.
- b) Demonstrar a relação entre os princípios enxutos de redução de tempo de ciclo e da redução do tamanho de lote, com a curva de aprendizado.
- c) Apontar as vantagens e desvantagens da escolha de diferentes unidades de repetição para o tempo de ciclo de uma obra.

1.4 Resumo do método de pesquisa

Segue-se um resumo do método de pesquisa utilizado no presente trabalho. No capítulo três, apresenta-se uma exposição mais detalhada do mesmo. A pesquisa organizou-se em três etapas.

A primeira etapa congrega a revisão bibliográfica e constitui o segundo capítulo. A revisão organiza-se seguindo uma lógica indutiva. Primeiro, revisou-se a bibliografia referente à linha de balanço, curva de aprendizado, redução de tamanho de lote e redução de tempo de ciclo. Em seguida, revisou-se a bibliografia relacionando estes itens dois a dois. Termina-se o segundo capítulo revisando bibliografia que relaciona três destes conceitos: curva de aprendizado, redução de tamanho de lote e redução de tempo de ciclo.

No terceiro capítulo, relaciona-se o item restante, linha de balanço, com os demais (curva de aprendizado, redução de tamanho de lote e redução de tempo de ciclo). Para tal, utiliza-se o método dedutivo, ao demonstrar matematicamente a relação entre redução de tamanho de lote (pela redução da dimensão da unidade de repetição na programação por linha de balanço) e o tempo de ciclo como corolário da curva de aprendizado. A aplicação do método dedutivo tem um caráter universal demonstrando a validade do corolário sempre que a presença do efeito aprendizado verificar-se.

No quarto capítulo, ao estabelecer a relação entre os quatro itens, utiliza-se novamente o método dedutivo para simular a amplitude dos efeitos do corolário. Desta forma dois grupos de programações de ensaio apresentam-se, baseadas nos dados fornecidos na dissertação de Edinaldo Favareto Gonzalez (2002) (designada posteriormente pela sigla DEFG). No entanto, não se aplica o método dedutivo com caráter universal neste caso. O objetivo metodológico está em ilustrar a amplitude do efeito a partir de dados colhidos em obra. Apresentam-se dois grupos diferentes de programações: um usa o corolário para reduzir o tempo de ciclo; o segundo grupo mantém o prazo original da obra e usa o corolário para reduzir o número médio de homens/dia. O primeiro grupo objetiva reduzir o custo financeiro reduzindo o tempo sobre o qual os juros incidem. O segundo grupo enfoca o fluxo de caixa aproveitando a produtividade acrescida do corolário para reduzir o número médio de homens/dia.

No quinto capítulo, analisam-se comparativamente os resultados das diversas programações. Primeiro, dentro de cada grupo em relação a elas e a programação original da DEFG depois, os dois grupos entre si. Posteriormente, apresentam-se as conclusões e sugerem-se futuros temas de pesquisa.

1.5 Resumo da estrutura da dissertação

A presente dissertação segue a seguinte estrutura:

O capítulo 1 consiste na introdução, onde se apresenta o contexto, a justificativa, os objetivos da dissertação e um resumo do método de pesquisa.

O capítulo 2 contém uma revisão da bibliografia referente à linha de balanço (conceito, origens e aplicações), ao efeito aprendido (origem e as suas diversas formulações), à relação entre os princípios de Produção Enxuta referentes à redução do tamanho de lote e redução de tempo de ciclo, a aplicação do efeito aprendido à linha de balanço e finalmente às relações conjugadas entre redução do tamanho de lote, efeito aprendido e redução do tempo de ciclo.

O capítulo 3 expõe com detalhe o método de pesquisa utilizado neste trabalho. Inclui a demonstração do corolário do efeito aprendido que fornece a base matemática para a prova da relação entre escolha da unidade de repetição e redução do tempo de ciclo.

O capítulo 4 apresenta dois grupos com quatro programações de ensaio de aplicação do corolário a um edifício. Cada grupo usa as mesmas quatro unidades: bloco e pavimento (unidade mista), pavimento, apartamento e meio apartamento.

No capítulo cinco apresentam-se as conclusões. Em seguida, enfoca-se as relações entre as conclusões de trabalho e o paradigma enxuto. Finalmente, lista-se as sugestões para futura pesquisa referente ao tema abordado.

1.6 Delimitação do tema

Embora a programação por linha de balanço se possa aplicar em múltiplos contextos, o presente trabalho realiza-se dentro de um programa de pós-graduação em engenharia civil, área de construção civil. Desta forma, o enfoque dado durante toda a pesquisa centra-se no setor de construção civil, sub setor de edificações. Mais especificamente, edifícios multifamiliares em altura com pavimentos repetitivos.

A presente dissertação pretende fazer uma exploração teórica. Essa exploração liga bibliografia e dedução matemática no intuito de apresentar uma teoria que explique porque e como funciona o paradigma da construção enxuta. Para tal, parte de certos pressupostos se tomam como verdadeiros e partindo deles extrapola as suas conseqüências. Os resultados apresentados partem dessas permissas e devem avaliar-se dentro destas limitações.

Os dados utilizados para os ensaios provêm de uma única fonte, a DEFG que programou e acompanhou a construção de nove blocos de habitação de quatro pavimentos no município de Biguaçu, região metropolitana de Florianópolis no ano de 2001. Especificamente, trata da programação de obra apresentada na DEFG para as atividades repetitivas constantes na mesma: fundação e caixa de água, estrutura, reboco de teto, alvenaria, reboco interno, reboco externo, telhado, pintura externa, pintura interna.

2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

2.1 Estrutura do capítulo

No presente capítulo, revê-se a bibliografia sobre linha de balanço. A revisão organiza-se em sete partes.

- Uma definição de Linha de Balanço e explicação da sua necessidade;
- A Linha de Balanço e suas otimizações;
- A Linha de Balanço e outros métodos de programação: relações, diferenças e críticas;
- Tamanho de lote e tempo de ciclo;
- Curva de Aprendizado;
- Curva de aprendizado e Linha de Balanço;
- Curvas de aprendizado, tamanho de lote e tempo de ciclo;

2.2 Linha de Balanço: Uma definição

Conceitualmente, a linha de balanço designa um sistema ortogonal bi dimensional de eixos coordenados. Um dos eixos representa a variável tempo. O outro eixo representa as unidades de repetição. A unidade de repetição designa a quantidade de trabalho contida numa subdivisão do edifício a construir. Neste plano programa-se o ritmo das várias atividades necessárias para a conclusão do edifício. O ritmo de cada atividade depende:

- da quantidade de trabalho prevista para essa atividade;
- da produtividade dessa atividade;
- da dimensão das equipes.

Por hipótese, a produtividade mantém-se. Com produtividade constante (e mantendo a dimensão das equipes) o gráfico resultante consiste num conjunto de linhas diagonais. Daí o nome de Linha de Balanço. Na programação por linha de balanço cada atividade gera uma linha. A inclinação dessa linha depende da produtividade. Com a produtividade variável, a linha de progresso da atividade deixa de ser reta, pois consoante o aumento e diminuição da produtividade, varia a inclinação da linha. Por isso, linha de balanço no sentido de (linha) reta de balanço implica produtividade constante.

As diversas atividades são colocadas no plano da linha de balanço respeitando as precedências de cada uma. As diversas atividades são normalmente conjuntos de atividades agregadas. Pela simplicidade do conceito, a programação aplica-se na programação de diversos tipos de projetos. Na construção civil utiliza-se para a programação de túneis, estradas, pontes e edifícios entre outros.

Esta definição ordena a bibliografia e classifica como linhas de balanço, alguns modelos para programação presentes na literatura com outros nomes. Tais modelos podem ter formulações gráficas diferentes e resultam da aplicação do conceito de linha de balanço a contextos específicos. Como exemplos, utiliza-se o Método de Programação Linear (MPL) para programação de rodovias e o Método de Produção Vertical (MPV) para a programação de edifícios.

A presente revisão bibliografia encontrou três versões para a origem histórica da linha de balanço:

Segundo (SUHAIL & NEALE, 1994) a linha de balanço surgiu em 1942, criada pela Marinha dos Estados Unidos. Na década de cinquenta do século XX a *Nacional Housing Authority* do Reino Unido, aplicou a linha de balanço para a programação da construção de projetos de habitação repetitiva.

Em outra versão, Lutz & Hijazi (1993) citando Turban (1968) atribui a criação da linha de balanço a Goodyear no início da década de 40 do século XX. Durante a segunda guerra mundial a Marinha dos Estados Unidos desenvolveu a técnica para

programação de projetos repetitivos e não repetitivos. A popularidade nos Estados Unidos, das programações de rede como o MCC cercearam a adoção da técnica nesse país. No entanto, na Europa, a técnica teve uma maior utilização na construção civil. Segundo os autores o método da linha de balanço consiste numa família de técnicas de programação lineares gráficas e/ou analíticas que inclui o Método de Agendamento Espaço Tempo (STRADAL & CACHA, 1982), Método Produção Vertical (O'BRIEN, 1975), Diagramas de Velocidade (ROESCH, 1972), Método de Programação Linear (MPL) (CHRZANOWSKI & JOHNSTON, 1986; JOHNSTON, 1981), Modelo de Projeto Repetitivo (REDA, 1990) e Linha de Balanço (CARR & MEYER, 1974; HALPIN & WOODHEAD, 1976).

O'Brien (1969) apresenta uma terceira versão. Segundo ele, citando outro autor (KANE apud O'BRIEN, 1969) a linha de balanço surgiu em 1951 como criação do *Naval Special Projects Office*, tomando a sua forma final em 1962.

No entanto, todos os modelos apresentados nesta seção reafirmam a definição de linha de balanço apresentada no início deste capítulo. Dividiram-se as várias denominações da linha de balanço em duas grandes famílias: Linha de Balanço (LdB) e Método de Programação Linear (MPL), seguindo a caracterização de El-Rayes e Moselhi (1998). Estas duas famílias aplicam o mesmo conceito a dois tipos de obra diferentes originando-se nesse fato a diferença entre elas.

Na família da LdB as atividades ocorrem em um espaço tridimensional podendo distintas atividades medir-se com diferentes unidades como o pavimento ou o metro quadrado. A unidade de repetição (e não o espaço linear) torna-se uma das variáveis. Segundo os autores, nestes tipos de obras o prazo de entrega da obra tem maior importância. Por este motivo o tempo torna-se a variável de controle. Por outro lado, a família MPL utiliza-se para a programação de estradas, túneis e pontes. Tais obras apresentam uma natureza linear. Várias atividades precisam ser realizadas numa mesma linha no terreno usando todas o metro ou quilometro lineares como unidade. O espaço torna-se a variável de enfoque principal para o controle do projeto. Ver figura 2.1 na página seguinte.

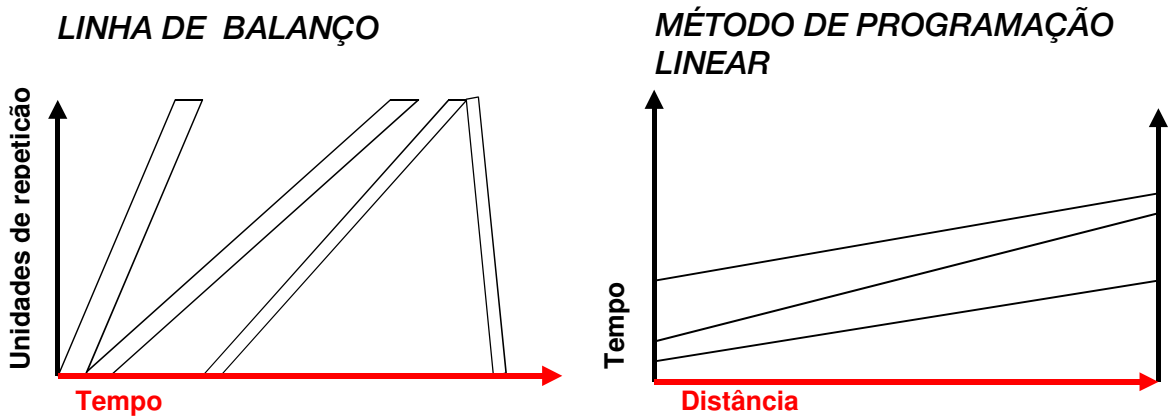


GRÁFICO 2.1: Linha de Balanço e Método de Programação Linear

2.3 Bibliografia sobre a linha de balanço e suas otimizações

Na linha de balanço o enfoque centra-se na progressão de uma atividade pelas várias unidades de repetição. Cada linha de balanço traça o progresso de uma atividade. Desta forma torna-se fácil entender como as várias atividades progridem e ajustar os seus ritmos. Designa-se este enfoque de visão diagonal.

LINHA DE BALANÇO
Visão diagonal

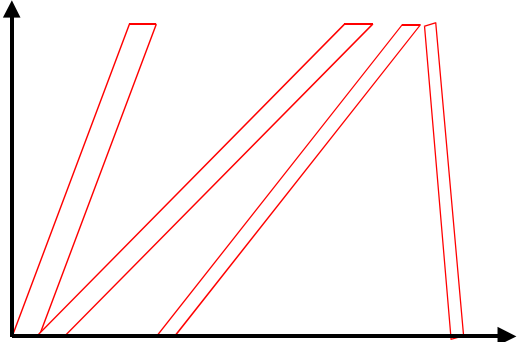


GRÁFICO 2.2: Visão diagonal

No entanto, pode-se ter outra visão. Pode-se enxergar a obra do ponto de vista da unidade de repetição.

Desta forma, traça-se uma linha paralela ao eixo do tempo através cada unidade de repetição. Este enfoque designa-se de visão transversal. Normalmente, cada corte transversal desenha uma linha tracejada. Essa linha tracejada significa que cada unidade de repetição alterna entre períodos em que uma atividade de produção acontece e pausas onde nenhuma produção ocorre. Tal deve-se a pulmões ou a diferentes inclinações de cada linha (diferentes produtividades de cada atividade).

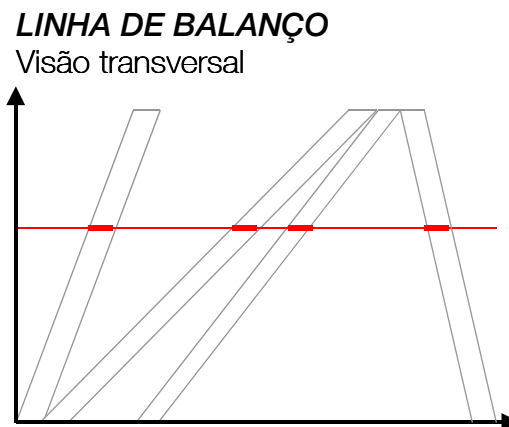


GRÁFICO 2.3: Visão transversal

Uma otimização da linha de balanço, Programação Linear de Múltipla Etapa (PLME), propõe transformar cada corte transversal de linhas tracejadas em linhas contínuas (WANG & HUANG, 1998). Tal transformação equivale a eliminar todos os pulmões e programar as atividades todas com uma mesma produtividade, correndo todas coladas em paralelo.

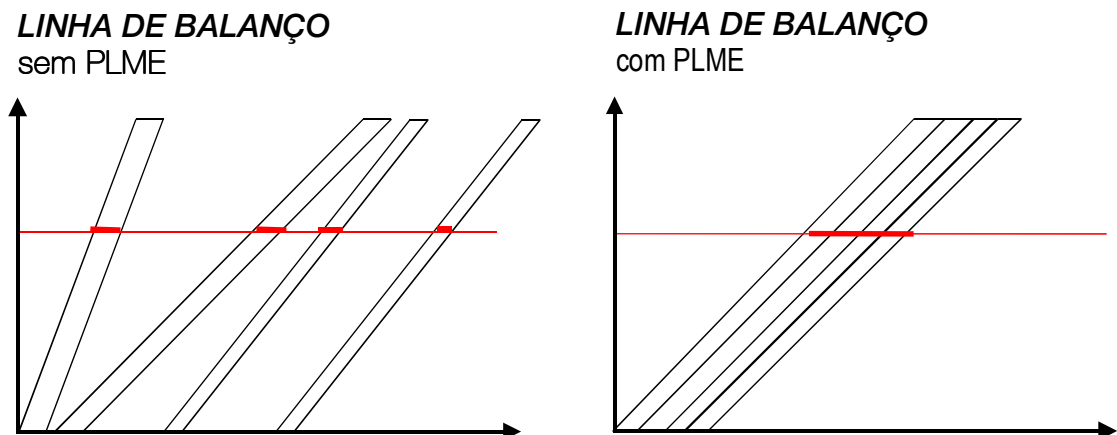


GRÁFICO 2.4: Linha de balanço sem e com PLME

Os autores apresentam uma demonstração provando que PLME garante um tempo de ciclo da obra sempre menor ou igual que qualquer programação por linha de balanço.

Dito de outra forma, o PLME consiste em um algoritmo de otimização da linha de balanço. Esse algoritmo afirma que para toda a programação por linha de balanço existe uma programação com todas as atividades correndo em paralelo e sem pulmões com um tempo de ciclo menor ou igual à programação de linha de balanço.

Enquanto Ballard defende pausas entre as atividades, alguns autores defendem pausas dentro da mesma atividade (RUSSEL & WONG, 1993) (EL-RAYES & MOSELHI, 1998).

A linha de balanço traça linhas contínuas. Tal concepção representa trabalho contínuo desde do início de uma atividade até ao fim da mesma, sem pausas. Tal programação parte do pressuposto que a redução do tempo ocioso das equipes resulta em redução do tempo de ciclo.

A literatura designa esta política de restrição de continuidade de trabalho das equipes. Esta restrição permitiria:

1. A maximização dos efeitos da curva de aprendizado;
2. Minimização de tempo ocioso das equipes;
3. A minimização dos tempos de preparação das equipes.

El-Rayes e Moselhi (1998) afirmam que a interrupção de algumas atividades pode reduzir a duração do projeto resultando em um menor custo indireto. No entanto, os autores também alertam que a interrupção das atividades pode levar a tempo ocioso das equipes que pode provocar um aumento do custo direto.

2.4 Bibliografia sobre linha de balanço e outros métodos de programação: relações, diferenças e críticas.

2.4.1 Método do Caminho Crítico

A programação por linha de balanço permite detectar atrasos no cumprimento de uma, ou várias, atividades. Permite quantificar esse atraso. No entanto, não permite estimar facilmente o impacto do atraso dessa atividade na data de conclusão do projeto. Por outro lado, o impacto do atraso de uma atividade na conclusão do projeto resulta claro numa programação por MCC.

2.4.2 Método do Caminho Critico e Linha de Balanço

Por este motivo Suhail & Neale (1994) apresentaram uma metodologia, MCC/LdB, que integra o MCC e a LdB. Desta forma conseguem as vantagens das duas metodologias, criando uma linha de balanço de repetidos e iguais MCC.

A nova metodologia permite gerir melhor os recursos humanos nas atividades em que as equipas integram especialidades diferentes. Quanto tal acontece, algumas dessas especialidades podem ser necessárias para a realização de outras tarefas. Na MCC/LdB o gerenciamento de tais recursos torna-se mais fácil, permitindo trabalhar com menos pessoas nessas atividades.

Da mesma forma Russel & Wong (1993) apresentam um software que permite a representar o projeto como MCC ou LdB. Uma expansão da metodologia MCC/LdB propõe contemplar interrupções de trabalho, restrições de recursos e permitir otimizações de custo, simultaneamente (HEGAZY & WASSEF, 2001). Esta nova metodologia pode utilizar-se para atividades repetitivas e não repetitivas. A otimização de custo faz-se através da utilização de algoritmos genéticos. Estes autores criticam

modelos que determinam soluções ótimas de custo através de programação linear e programação dinâmica. Segundo eles citando Li e Love (1997) estes métodos podem apontar ótimos locais.

Outra abordagem ao problema de determinar o atraso que uma atividade provoca ao prazo do projeto como um todo em uma LdB, fornece o Modelo de Programação Linear (HAMERLINK & ROWINGS, 1998).

O Modelo de Programação Linear designa um algoritmo para definição do caminho crítico para o MPL (O MPL, como mencionado na introdução deste capítulo, denomina uma formulação do conceito da linha de balanço utilizada para projetos de natureza linear como rodovias, túneis e pontes). Através do Modelo de Programação Linear torna-se possível desenhar o caminho crítico numa programação por MPL.

Harris e Ioannou (1998) apresentam uma abordagem similar com o Método de Programação Repetitiva (MPR). Este método integra MCC e LdB (quer no conceito de LdB quer no MPL). Através de notações gráficas, o método permite no próprio gráfico da linha de balanço, representar as precedências entre as várias atividades. Permite gerar uma linha de balanço partindo de um MCC. Permite igualmente gerenciar os diferentes ritmos de produção entre as diversas atividades de uma rede de precedências.

Segundo os autores, a necessidade de continuidade dos recursos implica que a duração do projeto não pode deduzir-se do caminho crítico, tal como este se define pelo MCC.

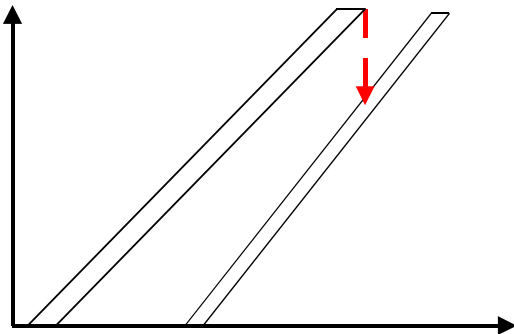
A necessidade de continuidade de recursos obriga a que atividades não críticas se incluam na cadeia de atividades que controla a duração do projeto. Esta nova cadeia, responsável pela duração do projeto e que inclui atividades críticas e não críticas, designa-se de seqüência de controle. A seqüência de controle garante o cumprimento de todas as precedências técnicas como a disponibilidade de recursos e a continuação da utilização dos recursos.

Goldratt (1998) apresenta igualmente um conceito análogo, denominado de Cadeia Crítica, formado igualmente por atividades críticas e não críticas que regula, do mesmo modo, a utilização de recursos para garantir que atrasos não ocorram por pausas surgidas da necessidade simultânea de um mesmo recurso por mais de uma atividade.

A seqüência de controle define-se como o conjunto dos pontos de controle. Os pontos de controle surgem entre atividades sucessivas. No caso das atividades divergirem, o ponto de controle localiza-se na primeira unidade de repetição da linha (atividade) mais avançada. Caso converjam, localiza-se na ultima unidade de repetição da linha mais recuada (entre as duas linhas).

Método de Programação Repetitiva

Determinação dos pontos de controle entre atividades convergentes



Método de Programação Repetitiva

Determinação dos pontos de controle entre atividades divergentes

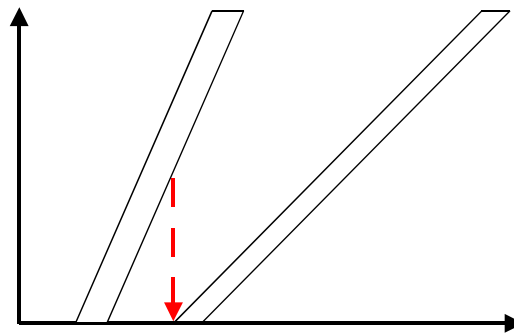


GRÁFICO 2.5: Determinação dos pontos de controle em atividades convergentes e divergentes

MPR

Pontos de controle e seqüência de controle

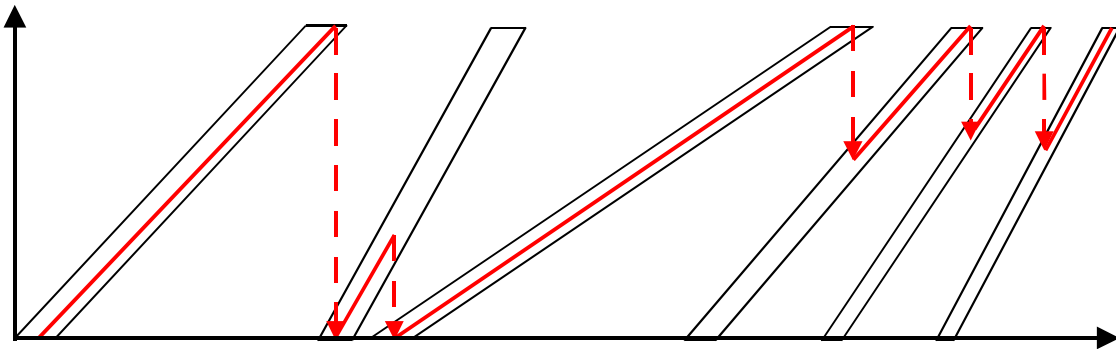


GRÁFICO 2.6: Definição de uma seqüência de controle

Note-se que segundo este paradigma nenhuma restrição de recursos se aponta quando as atividades correm em paralelo.

Os autores chamam a atenção para a diferença entre os conceitos de taxa de produção de um recurso e taxa de produção de unidades.

A primeira refere-se à quantidade de trabalho que um recurso realiza num determinado período. O segundo refere-se ao número de unidades de repetição que um recurso pode realizar num determinado período.

Segundo os autores, freqüentemente confundem-se estas duas taxas. Caso a quantidade de trabalho em cada unidade de repetição não varie, tal não causa problema. No entanto, nem sempre acontece e por isso não se pode presumir tal equivalência.

Tome-se, como exemplo, uma obra de terraplanagem. Na terraplanagem, uma retro escavadora, um recurso mecânico, tem uma capacidade de trabalho fixa por unidade de tempo. No entanto, cada metro linear a terraplanar contém uma quantidade variável e imprevisível de trabalho.

Admita-se que toda a terra a mover em uma obra tem a mesma densidade e a mesma operação se repete ao longo de toda a empreitada. Mesmo assim, dependendo que se verifique chuva no período e da intensidade da mesma, a quantidade de trabalho em cada metro linear – a unidade de repetição – varia, visto haver necessidade de mover um maior peso, num terreno mais difícil de trabalhar, para a mesma quantidade de terra caso a mesma esteja molhada.

Os autores advertem que não basta dividir uma tarefa em unidades iguais para garantir que as mesmas encerram quantidades de trabalho iguais. Desta forma, um erro conceitual invalida várias programações, pois unidades de repetição iguais acabam por conter diferentes quantidades de trabalho sem que tal esteja previsto.

2.4.3 Críticas ao Método do Caminho Crítico

No início desta seção afirmou-se que o MCC permite determinar o atraso no projeto provocado pelo atraso de uma atividade. No entanto, alguns autores (SHI, CHEUNG & ARDITI, 2001) afirmam que os atrasos e adiantamentos em relação às programações previstas podem alterar o estado de criticalidade das diversas atividades em prazos muito curtos (e.g. diariamente). Dito de outra forma, o caminho crítico pode variar diariamente devido aos atrasos e adiamentos das várias atividades. Isso implica um esforço gerencial diário de atualização dos dados para que o atraso de cada atividade na conclusão do prazo possa determinar-se com eficácia.

Para evitar essa carga gerencial, os autores sugerem um método – Método de Computação dos Atrasos para a Construção – que não necessita de atualizações constantes. O método consiste num conjunto de equações, facilmente codificadas para um sistema informático. O método não se baseia na criticalidade das atividades, não necessitando de atualização diária. O método permite, em comparação com a programação planeada, determinar o impacto do atraso numa atividade no prazo de conclusão previsto do Projeto. No entanto, as equações do método referem-se exclusivamente a relações início-fim, não se aplicando a relações início-início ou fim-fim. Os autores, não obstante afirmarem que o método pode facilmente incluir os dois tipos de relações faltantes, não apresentam tal extensão.

Jaafari (1996) propôs outra solução para as mudanças do caminho crítico, apresentando um sistema de planejamento onde todas as atividades têm a mesma prioridade exceto na presença de uma restrição de recursos.

Tal como a Linha de balanço, MCC recebe críticas por não permitir lidar com restrições de recursos. Com capacidade limitada de recursos em obra, calcular unicamente a duração de cada atividade pressupondo disponibilidade total dos mesmos, invalida o planejamento.

O MCC ignora que atividades paralelas podem necessitar do mesmo recurso. Mesmo quando a disponibilidade dos recursos se leva em conta no planejamento original, a variações que ocorrem na obra invalidam as programações (CHELAKA & ALIA, 2001)

O erro de ignorar restrições se expressa na formula da MCC (SHI & DENG, 2000):

$$T_f = T_i + d \quad (1)$$

O tempo final de uma atividade T_f se obtém somando o tempo de inicio de uma atividade T_i com a duração d da mesma. Esta equação pressupõe uma atividade ininterrupta, quando na prática de canteiro a atividade pode sofrer interrupções pela necessidade de utilizar os recursos necessários para o andamento da mesma para outra atividade. O MCC também não permite modelar o projeto como uma atividade de decisão dinâmica, tomada passo a passo.

Finalmente, os autores afirmam que o MCC reconhece unicamente que restrições lógicas afetam o processo construtivo excluindo a influência de outros tipos de restrições. Como exemplos, Shi & Deng (2000) mencionam métodos de programação que estendem o MCC para lidar com capacidade de recursos, restrições de projeto, redefinição e recomputação de folgas pela inclusão no MCC da previsão de conflitos de recursos (MATTHEWS, 1994; NKASU, 1994).

Desta forma, os autores apresentam o Método de Planejamento Orientado por Objetos e por Recursos (MPOOR). Neste método, propõe-se uma programação de obra por objetos e recursos. Cada objeto a produzir necessita que uma série de recursos estejam disponíveis para que a produção possa iniciar-se. Assim, a produção de cada objeto só se aciona após a confirmação que todos os pressupostos estão disponíveis.

2.5 Tamanho de lote e tempo de ciclo

Parte-se agora para uma revisão da bibliografia enfocada em tempo de ciclo, tamanho de lote e Construção Enxuta.

O paradigma da produção em massa defende a criação de grandes estoques e a produção em grandes lotes. Grandes inventários consideram-se como um ativo financeiro, pois podem-se vender sempre que necessário. Grandes lotes permitem produzir para estoque tendo o produto pronto para a entrega sempre que a demanda surja. Grandes lotes reduzem o tempo de atravessamento ao reduzir o tempo de preparação. Reduzem o tempo ocioso dos trabalhadores e máquinas, minimizando o custo indireto. Grandes lotes permitem a redução do preço de compra, por economias de escala.

A partir dos anos 80 do século XX, uma série de filosofias de produção, praticadas nas fábricas japonesas divulgam-se no ocidente, levando ao repensar das heurísticas expostas no parágrafo anterior (GOLDRATT & COX, 1986; SHINGO, 1988).

Essas filosofias de produção, mudam a perspectiva sobre as vantagens de trabalhar com grandes inventários. Os mesmos tornam-se um passivo ao obrigar pagar insumos antecipadamente e implicar em grandes custos de armazenamento sem a confirmação de uma encomenda (*JIT*) e por provocar a congestão do chão de fábrica, tornando difícil enxergar o estado da produção. Aboliu-se o conceito de estoque, passando a ter como meta produzir somente após encomenda (*JIT*). Pequenos lotes permitiram controlar melhor o processo de produção e produzir somente para encomendas feitas.

Adicionalmente, reduz o tempo de atravessamento, permitindo atender a demanda mais rapidamente que a concorrência. O novo modo de contabilizar custo faz repensar o aumento de horas ociosas da mão de obra como um maior custo indireto. Novas relações com fornecedores permitem preços de insumos baixos ao comprar lotes menores, com maior frequência, por mais tempo.

O sucesso da aplicação destas filosofias na indústria levou à tentativa de as aplicar na construção para melhoramento da mesma. Surge a Construção Enxuta. O relatório técnico de Koskela (1992) funciona como marco do início deste processo. O presente trabalho pesquisa a relação entre dois destes princípios importados da indústria: redução do tamanho de lote e redução do tempo de ciclo. O restante desta revisão segue o mesmo processo de importação de conceitos da Indústria para a Construção.

A verificação em campo parece comprovar a validade para a construção dessas máximas (SANTOS & POWELL, 2001). Os autores pesquisaram em seis canteiros de obra (No Brasil e no Reino Unido) os resultados da aplicação da redução do tamanho de lote na variação do tempo de ciclo. Apesar das dificuldades de provar conclusivamente qualquer hipótese em canteiro, os autores concluem pela verificação de algumas evidências das vantagens de redução do tamanho de lote e das desvantagens de trabalhar com lotes maiores.

Na obra que trabalhava com maiores lotes, dentro de um espírito de produção em massa, verificaram-se os piores resultados em tempo de ciclo. No entanto, os autores ressaltam que mesmo o tamanho dos lotes nos canteiros que implementavam uma política enxuta de produção, os mesmos continuavam maiores do que esperado quando comparados com a prática da indústria. Tal se deve a uma resistência por parte dos gestores das obras, que preferem ter grandes estoques como forma de lidar com a variabilidade encontrada em canteiro.

2.6 Curva de aprendizado

2.6.1 História

Segundo uma revisão extensa da bibliografia da curva de aprendizado (JABERA & BONNEY, 1999), literatura respeitante ao aprendizado pode encontrar-se desde o século XIX. No entanto, estas pesquisas enfocavam o aprendizado individual.

A primeira modelagem do aprendizado de grupos acontece com a formulação de Wright (1936). Este artigo começa com a curva de aprendizado tal como entendida hoje (também chamada de *start-up curves*, *progress functions* e *improvement curves*).

Esta formulação obteve-se a partir de dados provenientes de uma fábrica da força aérea dos Estados Unidos, onde se verificou uma queda do tempo de ciclo constante a cada novo lote dobrado de aviões produzidos.

A fórmula apresentada por Wright, embora resulte da modelagem do aprendizado coletivo, descreve igualmente o aprendizado individual. Descreve mais que a repetição de uma tarefa por um indivíduo, salienta o progresso do esforço coletivo de uma organização em que os seus membros, em diversos graus hierárquicos, colaboram para atingir um objetivo comum.

A simplicidade da formulação apresentada por Wright tornou o seu uso difundido, no entanto, propuseram-se outras formulações para modelar o efeito aprendizado.

2.6.2 Modelos para a curva de aprendizado

Uma revisão dos vários modelos de aprendizado pode-se encontrar na dissertação de Madalena Osório Leite (LEITE, 2002). Apresenta-se uma breve síntese dos modelos e suas características.

QUADRO 2.1: Quadro síntese dos vários modelos de aprendizado

Categoria	Nome do modelo	Características
Modelos de potência linear simples Taxa de aprendizado constante	(Wright, 1936)	O primeiro modelo. O mais usado.
	Stanford-B	Variação do modelo de Wright que permite contabilizar aprendizado anterior ou dificuldades gerenciais
Modelos exponenciais Taxa de aprendizado variável	Modelo exponencial básico, o modelo Norueguês	Pretende contabilizar a redução de custos com cada duplicação de lote
	DeJong	Pressupõe que maior percentagem de trabalho mecanizado numa tarefa implica menor redução de tempo de ciclo.
	Levy	Pressupõe um fim para o aprendizado.
Modelos algébricos	Pegel	Modela o aprendizado através de uma equação algébrica.
Modelo de curva S	Carr	Pressupõe um ciclo de vida para o crescimento.

2.6.3 Considerações sobre os vários modelos

Os modelos aqui apresentados partem de diferentes crenças sobre o fenômeno do aprendizado. O modelo de Levy pressupõe um limite para o aprendizado, mas Crossman apud Jabera e Bonney (1999) afirma que verificou a ocorrência de aprendizado em fábrica após dez milhões de repetições. A crença da gerência em um limite para o aprendizado pode impedir o mesmo segundo Hirschmann apud Jabera e Bonney (1999) que apresenta um caso de dois produtos cujo aprendizado tinha cessado numa fábrica e recomeçou após a transferência da produção para outra fábrica.

Os modelos de DeJong e de Carr pressupõem que os ganhos de tempo provenientes do aprendizado em uma atividade reduzem-se em razão direta à quantidade do trabalho realizado por máquinas. O nivelar do aprendizado parece mais provável em indústrias mais mecanizadas (BALLOFF apud JABERA & BONNEY, 1999). Os tempos de ciclo das máquinas, imunes ao fenômeno do aprendizado, limitariam a redução do tempo de ciclo às fases onde o trabalho humano estivesse presente. Assim, a amplitude para a redução do tempo de ciclo resultaria diminuída.

Desta forma esperar-se-ia que indústrias intensamente mecanizadas apresentassem uma taxa de aprendizado muito baixa ou nula. No entanto, verifica-se aprendizado na indústria, na destilação de petróleo, uma atividade totalmente mecanizada (HIRSCHMANN apud JABERA & BONNEY, 1999). Segundo o autor, tal se deve a um aprendizado da organização competindo para reduzir preço. Isto ilustra como o fenômeno descrito pela curva de aprendizado não se restringe à produtividade de um trabalhador ou de uma organização. Este fenômeno provoca mudança no consumo de insumos, nos processos de trabalho, no gerenciamento desde o chão de fábrica aos escalões mais altos da empresa.

Desde a década de oitenta do século passado, encontram-se na bibliografia nacional, referências ao efeito aprendizado na construção civil, começando na dissertação pioneira de Panzeter (1988) comprovando a ocorrência do efeito aprendizado em

campo, seguida posteriormente por outras dissertações (MARCHIORI, 1998; LEITE, 2002), até diversos artigos (HEINECK, 1990; HEINECK & PEIXE, 1990).

2.7 Curva de aprendizado e linha de balanço

A linha de balanço pressupõe que as atividades decorram continuamente num ritmo constante. Tais condições provocam o efeito aprendizado. Bibliografia recente pesquisa os efeitos do aprendizado na programação por linha de balanço.

A primeira questão que decorre de tal aplicação é a mudança do conceito de programação por linha de balanço para programação por curva de balanço: com efeito, a produtividade deixa de ser constante. Graficamente, isso implica que as atividades deixam de se representar por uma reta (produtividade constante) e passam a representar-se por curvas (produtividade variável).

Arditi, Tokdemir & Suh (2001) apresentam uma simulação dos efeitos do aprendizado na programação por linha de balanço. Os autores fazem uma revisão de várias formulações diferentes do efeito aprendizado. Na simulação apresentada, as atividades classificam-se em um processo de quatro passos para determinar taxas de aprendizado:

1. Definir número de operações;
2. Definir complexidade de operações;
3. Definir quociente de trabalho com ritmo definido por máquinas;
4. Combinar passos dois e três para determinar uma taxa de aprendizado.

Uma vez definida a taxa de aprendizado assume-se que a mesma permanece constante. Os autores sustentam tal opção na bibliografia (EVERETT & FARGHAL, 1994). Na simulação apresentada a redução do tempo de ciclo no exemplo estima-se em dezesseis por cento.

Noutra simulação apresenta-se o efeito na programação por linha de balanço de taxas de aprendizado variáveis (COUTO & TEIXEIRA, 2002). Neste artigo, os autores optaram por transformar as linhas de balanço em curvas de balanço. A redução de tempo de ciclo para uma única atividade estima-se em 18 por cento, após aplicação sucessiva de três taxas de aprendizado crescentes.

Da mesma forma que ocorre efeito aprendizado, ocorre efeito esquecimento (LAM, LEE & HU, 2001). Os autores fazem uma apresentação teórica da curva de aprendizado e da curva do esquecimento. Aplicam ambos os conceitos a um estudo de caso.

Os autores concluem pela impossibilidade de erradicar os efeitos aprendizado e esquecimento da construção. Portanto, torna-se mais produtivo incorporá-los ao planejamento e programação de obras. Concluem pelo alto benefício que a modelagem dos efeitos aprendizado e esquecimento traz à confiabilidade do planejamento e monitorização do progresso do processo construtivo. Alertam igualmente que o efeito das interrupções no processo construtivo prejudica a produção de três formas.

Primeiro, pela perda do aumento de produtividade que o efeito aprendizado provoca na ausência de interrupção à produção. Devido ao efeito aprendizado a produtividade aumenta até à interrupção. Caso tal interrupção não ocorresse a produtividade continuaria crescendo.

Segundo, porque o período de interrupção tem de se somar ao prazo, implicando um atraso relacionado com a duração do tempo de paralisação. Os dias de paralisação têm de adicionar-se ao prazo.

Terceiro, pois ao recomeçar a produção, a produtividade terá um valor mais baixo ao verificado na interrupção devido à influência do efeito esquecimento. Quanto maior a duração da paralisação, menor a produtividade no recomeço das atividades. (ver figura 2.7 na página seguinte).

PERDAS DE PRODUTIVIDADE CAUSADAS POR INTERRUPÇÕES

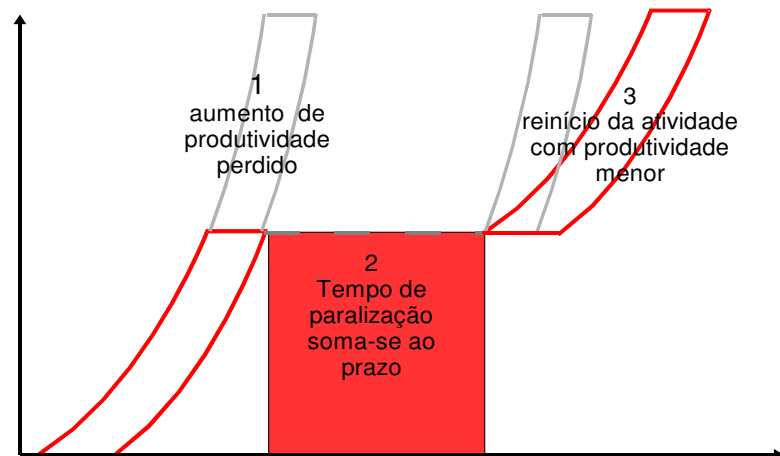


GRÁFICO 2.7: Perdas de produtividade causadas por interrupções

2.8 Curvas de aprendizado, tamanho de lote e tempo de ciclo

A bibliografia na área industrial tem apontado relações entre o aprendizado, tamanho de lote e tempo de ciclo. Tal bibliografia aponta que o efeito aprendizado atua não só nos períodos de produção, mas também no retrabalho e nos tempos de preparação. Segue-se a revisão de tais artigos.

Jabera & Bonney (2003) afirmam que o tempo de retrabalho reduz-se com um número crescente de repetições, por ação do efeito. Este fato ajudaria a reduzir o tempo de ciclo. Adicionalmente os autores afirmam: lotes menores garantem menor tempo de retrabalho para a mesma taxa de aprendizado. Tal dado parece fornecer na bibliografia suporte à tese que se visa demonstrar neste trabalho. Os autores apresentam um modelo matemático para provar a sua tese, validando o seu modelo com dados recolhidos numa linha de produção real, abrangendo um período de quatro anos.

Os autores também concluem que produzir em lotes pequenos reduz o tempo de preparação. O maior número de repetições aumenta o aprendizado no tempo de preparação, reduzindo o tempo total de preparação. Embora menores lotes provoquem

maior número de preparações, esse aumento no número de preparações aumenta o aprendizado. Esse aumento de aprendizado faz que a soma de todos os tempos de todas as preparações resulte menor que os casos de lotes maiores, mesmo tendo os lotes maiores que efetuar um menor número de preparações. Desta forma, segundo os autores, o tempo total de preparação com lotes menores tem uma duração menor que o tempo total de tempo de preparação resultante de produzir com lotes maiores.

Se o aprendizado e a qualidade apresentam uma ligação estreita, então a literatura deveria apontar uma relação entre qualidade, tamanho de lote e tempo de ciclo. Porteus (1986) defende que existe uma probabilidade cumulativa de perder controle do processo durante a produção de cada peça e que cada peça defeituosa implica custos de retrabalho e operações associadas. Desta forma, lotes menores reduzem esse risco. Segundo o autor, redução do tamanho de lote permite reduzir custos de preparação, aumenta o controle de qualidade, aumenta a flexibilidade e a capacidade efetiva de produção. O autor defende que lotes maiores só se tornam possíveis através do aumento da qualidade (ou seja, com a presença de aprendizado) para reduzir a chance de perder o controle do processo. Relaciona redução de custos de preparação e lotes menores como uma consequência do conceito de aprimoramento constante. Rosenblatt & Lee (1986) defendem igualmente o uso de lotes menores devido as questões da qualidade.

A redução conjugada do tempo de preparação e do tempo de retrabalho se integra dentro de uma heurística enxuta defendida por Koskela: Redução do trabalho em progresso como forma de reduzir o tempo de ciclo. Um artigo (SANTOS, POWELL & SARCHAR, 2000) apresenta algumas evidências em canteiro que a redução do trabalho em progresso resulta em diminuição de tempo de ciclo.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

A presente sessão explicita a organização do processo de pesquisa neste trabalho. O processo de pesquisa desenvolve-se em duas etapas. No presente capítulo faz-se uma defesa teórica da tese deste trabalho. No quarto capítulo, apresenta-se um ensaio teórico para ilustrar os efeitos práticos. Pretende-se, desta forma, definir a relevância prática do corolário em canteiro.

A defesa teórica da tese faz-se através de demonstração matemática. Demonstra-se que a redução da unidade de repetição, na presença do efeito aprendido, leva à redução do tempo de ciclo (e conseqüentemente do tempo de atravessamento) e que esse fenômeno acontece como corolário do efeito aprendido.

O ensaio das reduções de tempo de ciclo esperadas a partir da escolha de menores unidades de repetição realiza-se sobre dados recolhidos em obra. Partindo dos dados coletados na DEFG, aplica-se uma taxa de aprendizado de dez por cento a quatro diferentes unidades de repetição. O valor escolhido para a taxa de aprendizado tem caráter arbitrário e encontra-se dentro dos valores apontados pela bibliografia, observados em canteiro (EVERETT & FARGHAL, 1994).

Um grupo com quatro programações visa reduzir o tempo de atravessamento. O outro grupo, visa reduzir a quantidade média de operários presentes em canteiro, aproveitando a maior produtividade fornecida pelo corolário para permitir a redução do número de atividades em paralelo. Desta forma, neste grupo todas as quatro programações terminam no prazo original.

3.2 Metodologia para a demonstração

A demonstração da tese defendida no presente trabalho faz-se através do método dedutivo. O método dedutivo toma a forma de uma demonstração matemática. Partindo da fórmula de Wright para o aprendizado, mostrar-se-á que a mesma implica que a redução da unidade de repetição obriga a uma redução do tempo de ciclo.

Pretende-se provar que o princípio da redução de tempo de ciclo através da redução da unidade de repetição consiste em um corolário do efeito aprendizado. Tal acontece, pois a demonstração parte diretamente da fórmula sem utilização de outros subsídios teóricos ou de campo.

Tal escolha decorre de uma opção metodológica. Ao se agir desta forma não se propõe um modelo matemático como explicação de um fenômeno para posterior validação pela comunidade de pesquisa acadêmica. Ao invés, demonstra-se que o modelo matemático já amplamente confirmado em campo (a curva de Wright) contém em si um desdobramento até agora ignorado (o corolário) que implica que a redução da unidade de repetição provoca uma redução do tempo de ciclo.

Demonstrar que a tese defendida no presente trabalho consiste num corolário do efeito aprendizado corresponde a provar que em qualquer obra em que se verifique efeito aprendizado, a redução da unidade de repetição levará a uma redução do tempo de ciclo, pois tal resulta matematicamente do efeito aprendizado.

No capítulo anterior, a revisão da literatura mostrou a ocorrência usual do efeito aprendizado em obra. Mostrou igualmente que a formulação de Wright se mostrava a mais correta para construção civil (EVERETT & FARGHAL, 1994). Desta forma a formulação de Wright escolhe-se entre os outros modelos para a demonstração do corolário.

3.3 Metodologia para os ensaios

Os ensaios utilizam o método dedutivo. Partindo das produtividades médias para cada atividade apresentada na DEFG, aplica-se o corolário para calcular o tempo de ciclo de cada uma, segundo cada unidade de repetição e a filosofia de cada grupo.

Cada diferente unidade de repetição gera duas diferentes programações, uma para cada um dos dois grupos de ensaio, perfazendo oito ensaios diferentes. Formam-se assim dois grupos com quatro ensaios cada. As unidades de repetição escolhidas consistem em:

- Unidade mista (pavimento ou bloco) conforme a atividade tal como definido na DEFG;
- Pavimento;
- Apartamento;
- Meio apartamento.

A escolha destas unidades pretende ilustrar as variações do efeito da aplicação do corolário das unidades de repetição de diferentes dimensões.

A unidade mista utiliza-se para comparar mais facilmente o efeito da aplicação do corolário diretamente com a programação original.

O pavimento utiliza-se com freqüência como unidade de repetição em programação por linha de balanço. Por esse motivo o pavimento se utiliza como unidade para um dos ensaios.

O apartamento utiliza-se como unidade de repetição por três razões: a) do ponto de vista da produção, uma vez que a DEFG programa a construção de nove blocos iguais de quatro pavimentos com quatro apartamentos, esta obra pode encarar-se como uma empreitada para construir cento e quarenta e quatro apartamentos (nove blocos multiplicados por quatro pavimentos, multiplicados por quatro apartamentos) fornecendo desta forma quatro vezes mais repetições que a unidade pavimento;

b) da perspectiva comercial, o empreendedor enfoca vender apartamentos aos consumidores e não blocos ou pavimentos fazendo sentido eger o apartamento como unidade de repetição; c) como terceira razão para a escolha do apartamento como unidade de repetição pretende mostrar a diferença sensível de resultados de tal opção quando comparados com a unidade de repetição pavimento.

A quarta e ultima unidade de repetição escolhida consiste no meio apartamento. Tal escolha visa apresentar um parâmetro inferior de comparação para os ensaios. A escolha desta unidade de repetição como parâmetro inferior resultou da preocupação de garantir uma carga gerencial comportável. Desta forma, para todas as atividades e para qualquer repetição o tempo de ciclo tem um valor maior que meio período de trabalho (quatro horas) que se considera o horizonte mínimo para planejamento de curto prazo. Unidades menores que meio apartamento redundariam em ciclos menores que meio turno diário de trabalho.

3.4 Formulação do problema

Dada uma programação pela técnica de linha de balanço de um edifício multifamiliar a escolha da unidade de repetição altera o tempo de ciclo sob a influência do efeito aprendido?

3.5 Variáveis

O presente trabalho relaciona três variáveis: taxa de aprendizado, tempo de ciclo e unidade de repetição.

Considera-se a taxa de aprendizado constante em todas as atividades e todas as unidades de repetição. Por tempo de ciclo entende-se o periodo decorrido desde o início do trabalho em uma unidade de repetição até ao termino do mesmo,

pressupondo que a equipe por inteiro mantém o trabalho naquela atividade desde o início até o fim do período de trabalho. Define-se unidade de repetição como o quociente entre a quantidade total de trabalho presente numa atividade (como numerador) e um número inteiro (como denominador).

$$U_r = \frac{(\text{Quantidade de trabalho})}{(N^\circ \text{ de repetições})} \quad (1)$$

Este número inteiro define o número de repetições. Quanto maior este número, menor a dimensão da unidade de repetição. O tempo de ciclo de atividade conta o tempo decorrido desde o início de uma repetição até o fim da mesma, admitindo uma equipe por atividade. O somatório dos tempos de ciclo de todas as repetições de uma atividade forma o tempo de atravessamento de uma atividade funcionando como medida agregada da redução dos tempos de ciclos. A redução dos tempos de ciclo dentro de uma atividade mede-se através da redução do tempo de atravessamento que funciona como variável independente.

3.6 Relação entre as variáveis

Pretende-se provar uma relação contingente envolvendo três variáveis mencionadas no parágrafo anterior. Programando uma obra pela técnica de linha de balanço, a redução da dimensão da unidade de repetição implica, para cada atividade, a redução do tempo de atravessamento na presença do efeito aprendido. Da demonstração da relação entre essas três variáveis decorre a prova da redução do tempo de ciclo dentro da atividade pela redução da unidade de repetição. A redução da unidade de repetição funciona como redução do lote gerencial da programação por linha de balanço.

3.7 Explicitação dos conceitos

Cada programação de um edifício define-se como um conjunto de atividades. O conjunto destas atividades tem um número finito e cada uma delas contém igualmente uma quantidade finita de trabalho. Define-se igualmente que força de trabalho se mantém constante ao longo de cada atividade. A presente explicitação começa pressupondo uma produtividade p constante, segundo a visão convencional da programação. Desta forma, qualquer que seja a unidade de repetição escolhida, qualquer repetição da mesma terá a mesma duração.

Uma unidade de repetição obtém-se dividindo a quantidade de trabalho de uma atividade por um número natural. Esse número corresponde ao número de repetições dessa unidade:

$$W_n = \frac{W}{n} \quad \forall n \in \mathbb{N}, W \in \mathbb{R}: W > 0 \quad (2)$$

em que n representa o número de repetições da unidade de repetição em questão e W representa a quantidade de trabalho.

Analogamente, para determinar o tempo de ciclo de qualquer unidade de repetição:

$$T_n = \frac{T}{n} \quad \forall n \in \mathbb{N}, T \in \mathbb{R}: T > 0 \quad (3)$$

onde n representa o número de repetições da unidade de repetição em questão e T representa o tempo de atravessamento da atividade, soma de todos os tempos de ciclo da mesma.

O pressuposto de uma equipe por atividade usa-se para simplificar a demonstração. Para as atividades com mais de uma equipe o tempo de atravessamento de uma atividade pode, ou não, corresponder à soma dos tempos de ciclo de uma equipe qualquer da atividade dependendo da forma que as equipes se agrupam. O gráfico 3.1 ilustra esta afirmação.

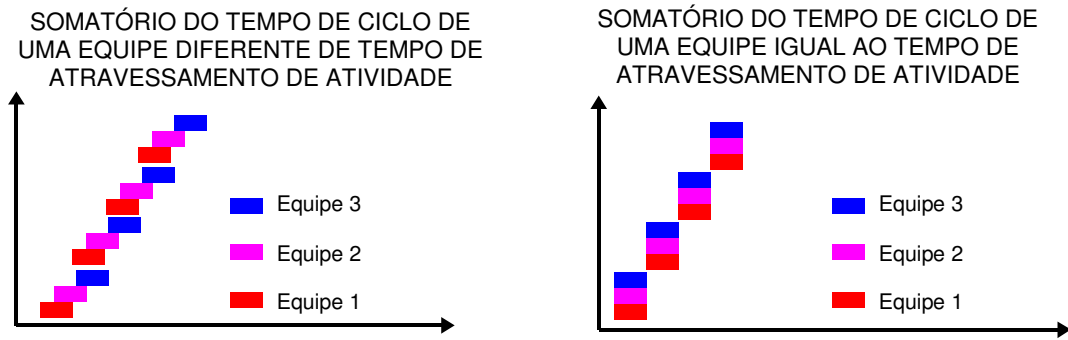


GRÁFICO 3.1: Relações entre tempo de ciclo de uma equipe e tempo de atravessamento de uma atividade

No entanto, a seguinte demonstração tem validade para todas as atividades independentemente do número de equipes. Em atividades com mais de uma equipe cada uma delas pode encarar-se como uma micro atividade de uma só equipe. O tempo de atravessamento de cada uma dessas micro atividades corresponde à soma de todos os tempos de ciclo dessa equipe. Assim, cada equipe está dentro das condições do corolário. Se o corolário atua em cada uma delas então o tempo de atravessamento da atividade tomado como um todo (contabilizando todas as equipes) também se reduz. O gráfico 3.2 ilustra este raciocínio.

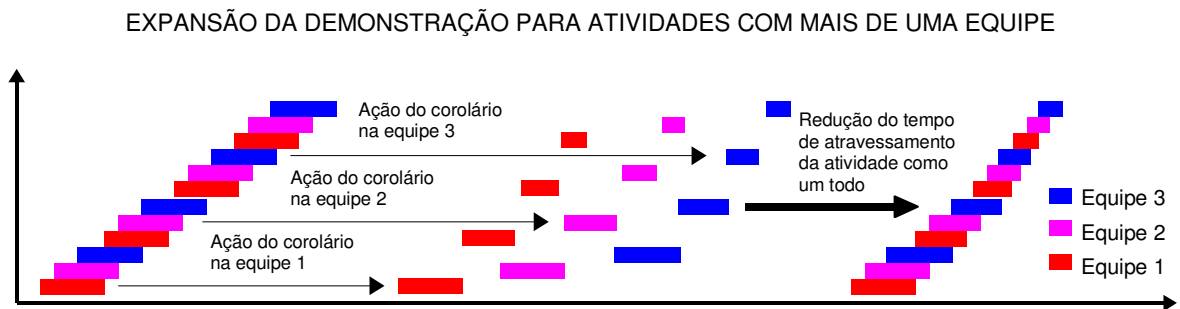


GRÁFICO 3.2: Ilustração da ação do corolário para atividades com mais de uma equipe

Desta forma, a demonstração faz-se para uma equipe só. Nesta equipe o pacote total de trabalho W contido na atividade A demora o tempo T para a sua conclusão:



GRÁFICO 3.3: Tempo de atravessamento sem efeito aprendido

Divide-se por n unidades de repetição de igual dimensão:



GRÁFICO 3.4: Tempo de atravessamento dividido por unidades de repetição sem efeito aprendido

Da equação anterior, tem-se:

$$T = n * T_n \quad (4)$$

que se pode expressar como um somatório da seguinte forma:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (5)$$

Por oposição, o efeito aprendido descreve um aumento na produtividade de qualquer atividade em que as repetições de uma mesma unidade decorram sem interrupções. Este aumento de produtividade processa-se segundo a equação de Wright, de acordo com a taxa de aprendizado escolhida. O modelo de Wright formula o fenômeno do aprendizado com uma equação logarítmica com taxa constante de aprendizado. Isto implica que cada nova unidade repetição produzida demorará menos tempo que a atividade anterior e que a diferença entre os tempos de ciclos entre unidade consecutivas reduz-se quanto maior o número de repetições.

Desta forma, o tempo de atravessamento da atividade com produtividade constante, apresenta uma redução por ação do efeito aprendido:



GRÁFICO 3.5: Tempo de ciclo com produtividade constante

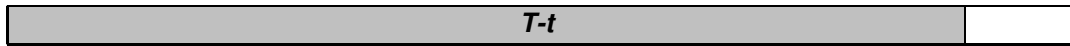


GRÁFICO 3.6: Redução do tempo de ciclo pelo efeito aprendido

Aplicando o efeito aprendido às unidades de repetição:

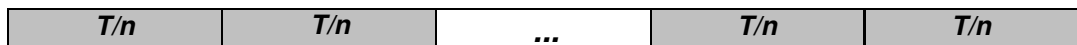


GRÁFICO 3.7: Tempo de ciclo dividido por unidades de repetição sem efeito aprendido

obtem-se o seguinte resultado:



GRÁFICO 3.8: Tempo de ciclo dividido por unidades de repetição com efeito aprendido

Os diversos valores de t representam a redução progressiva de tempo de ciclo a cada nova repetição.

Formalizando o raciocínio, para o cálculo do tempo de ciclo de uma dada unidade de repetição sobre efeito aprendido, utiliza-se a seguinte expressão do efeito aprendido descrito segundo a curva de Wright:

$$T_i = \frac{T_n}{i^k} \quad \forall n, i \in \mathbb{N}, \forall k \in \mathbb{R}: k > 0 \quad (6)$$

em que o índice i representa os diferentes valores de um a n . O índice k representa a taxa de aprendizado.

Da equação (5) e (6) resulta:

$$T = \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_n}{i^k} \right) \quad \forall n \in \mathbb{N}, \forall k \in \mathbb{R}: k > 0 \quad (7)$$

3.8 Demonstração

Visa-se demonstrar que em uma programação por linha de balanço, dada uma atividade de natureza repetitiva, quanto maior o número de repetições contidas na unidade de repetição escolhida menor o tempo de ciclo para a conclusão da mesma. Esta hipótese formula-se do seguinte modo:

$$\forall n \in \mathbb{N}: n > 1, \forall t, k \in \mathbb{R}: k > 0 \wedge t > 0$$

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{T/n}{i^k} \right] > \sum_{i=1}^{n+1} \left[\frac{T/n+1}{i^k} \right] \quad (8)$$

Pela equação 3 pode-se trocar o numerador da fração dentro do somatório pela seguinte expressão:

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{T/n}{i^k} \right] > \sum_{i=1}^{n+1} \left[\frac{T/(n+1)}{i^k} \right] \quad (9)$$

Trocando de lado um dos membros da equação se obtém:

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{T/n}{i^k} \right] - \sum_{i=1}^{n+1} \left[\frac{T/(n+1)}{i^k} \right] > 0 \quad (10)$$

Isolando a constante T em evidência em ambos os somatórios

$$T * \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(i^k * n)} \right] - T * \sum_{i=1}^{n+1} \left[\frac{1}{(i^k * (n+1))} \right] > 0 \quad (11)$$

Isolando novamente T em evidência:

$$T^* \left[\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(i^k * n)} \right] - \sum_{i=1}^{n+1} \left[\frac{1}{(i^k * (n+1))} \right] \right] > 0 \quad (12)$$

Desenvolvendo o segundo somatório:

$$T^* \left[\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(i^k * n)} \right] - \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{i^k * (n+1)} + \frac{1}{(n+1)^k * (n+1)} \right) \right] > 0 \quad (13)$$

Os dois somatórios apresentam agora o mesmo índice podendo então se juntar, deixando uma parcela à direita fora do novo somatório:

$$T^* \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{(i^k * n)} - \frac{1}{i^k * (n+1)} \right) - \left(\frac{1}{(n+1)^k * (n+1)} \right) \right] > 0 \quad (14)$$

Reduzindo ao mesmo denominador as duas parcelas do novo somatório:

$$T^* \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{n+1-n}{n * (n+1) * i^k} \right) - \left(\frac{1}{(n+1)^k * (n+1)} \right) \right] > 0 \quad (15)$$

Simplificando o numerador da expressão do somatório:

$$T^* \left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{n * (n+1) * i^k} \right) - \left(\frac{1}{(n+1)^k * (n+1)} \right) \right] > 0 \quad (16)$$

Para que a hipótese se verifique o membro esquerdo da inequação tem de apresentar um valor maior que zero. O membro esquerdo consiste num produto de dois fatores: T e as parcelas entre colchetes. T, por hipótese, tem valor maior que zero. Resta provar então que a expressão entre colchetes tem valor maior que zero. Tal formula-se na seguinte inequação:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n*(n+1)*i^k} > \frac{1}{(n+1)^k*(n+1)} \quad (17)$$

O somatório compõe-se de uma série de n termos de valor decrescente. O último termo do somatório apresenta o menor valor entre todos. Em termos matemáticos tal acontece, pois tem como numerador uma constante de valor um e o denominador apresenta valores sempre positivos e crescentes na medida que o índice i aumenta de valor de um até n .

Em termos práticos tal acontece, pois o somatório expressa o efeito aprendido em ação. Cada nova unidade de repetição demora menos tempo até a sua conclusão. Quanto maior o número da repetição, menor o tempo. Para provar esta inequação cria-se um somatório com n termos iguais de valor igual ao menor termo do somatório original. Tal somatório (à direita na inequação 18) tem menor valor que o somatório original (à esquerda na inequação 18):

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n*(n+1)*i^k} > \sum_{i=1}^n \frac{1}{n*(n+1)*n^k} \quad (18)$$

Como os termos do somatório do membro direito da inequação têm todos o mesmo valor (pois por definição este somatório constrói-se somando n vezes o último termo do somatório original, conforme descrito no paragrafo anterior), pode-se expressar a inequação da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n*(n+1)*i^k} > \frac{n}{n*(n+1)*n^k} \quad (19)$$

Comparam-se agora as inequações 17 e 19. Nas equações 18 e 19 criou-se um somatório que minora o membro esquerdo da inequação 17. Agora se prossegue para provar que esse somatório majora o membro direito da equação 17:

$$\frac{n}{n*(n+1)*n^k} > \frac{1}{(n+1)^k*(n+1)} \quad (20)$$

Simplificando a inequação:

$$\frac{1}{n^k} > \frac{1}{(n+1)^k} \quad (21)$$

Trocando os fatores de membro:

$$(n+1)^k > n^k \quad (22)$$

Assim, das inequações 19 e 20 tem-se:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n*(n+1)*i^k} > \frac{n}{n*(n+1)*n^k} > \frac{1}{(n+1)^k*(n+1)} \quad (23)$$

Por transitividade, prova-se verdadeira a equação 17:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n*(n+1)*i^k} > \frac{n}{n*(n+1)*n^k} > \frac{1}{(n+1)^k*(n+1)} \Rightarrow \sum_{i=1}^n \frac{1}{n*(n+1)*i^k} > \frac{1}{(n+1)^k*(n+1)} \quad (24)$$

que por sua vez prova a validade da equação 16:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n*(n+1)*i^k} > \frac{1}{(n+1)^k*(n+1)} \Rightarrow T*\left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{n*(n+1)*i^k}\right) - \left(\frac{1}{(n+1)^k*(n+1)}\right)\right] > 0 \quad (25)$$

Assim demonstrando a hipótese:

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{T}{i^k}\right] > \sum_{i=1}^{n+1} \left[\frac{T}{i^k}\right] \text{ C.q.d.} \quad (26)$$

3.9 Caracterização da obra

Os ensaios baseiam-se na programação de obra apresentada na DEFG. A programação desta obra teve a participação do pesquisador Edinaldo Favareto Gonzalez que acompanhou a obra na sua totalidade. Tal acompanhamento gerou uma base de dados abrangente sobre produtividade em obra de data recente no contexto local da grande Florianópolis.

Segue-se um resumo da caracterização da obra feita na DEFG para a especificação das decisões que embasam os ensaios. A programação original apresentada na DEFG prevê um prazo de onze meses para a execução de todas atividades. O empreendimento visa construir nove blocos de apartamentos residenciais.



FIGURA 3.1: Implantação do empreendimento

No quadro 3.1 apresenta-se uma caracterização das dimensões do empreendimento.

QUADRO 3.1: Caracterização quantitativa do empreendimento

Elementos	Quantificação
Pavimento térreo	203,85 m ²
Pavimento tipo	187,75 m ²
Caixa de água	8,26 m ²
Área total por bloco	813,59 m ²
Área total dos blocos	7322,31 m ²
Número Total de unidades habitacionais	144 unidades
Área do terreno	9434,74 m ²
Recreação coberta	146,46 m ²
Central de G.L.P.	7,36 m ²
Área total edificada	7476,13 m ²
Área destinada ao <i>playground</i>	137,60 m ²
Área destinada à quadra desportiva	392,00 m ²
Número de vagas de estacionamento	144 unidades

O financiamento do empreendimento fez-se através do programa PAR do Governo Federal. Tal programa financia obras para famílias com renda mensal até seis salários mínimos. O custo máximo das habitações a construir (incluindo todos os impostos inclusive imposto de transmissão) deve ter valor inferior a R\$ 20.000,00 (vinte mil reais) com um custo preferencial de R\$ 15.000,00 (quinze mil reais). Pelo programa, o empreendimento tem a obrigação de apresentar uma infra-estrutura interna que contemple pavimentação, luz, esgoto, água, guias e sarjeta.

Cada apartamento por exigência da Caixa Econômica Federal tem, no mínimo, de observar os seguintes requisitos: pavimento cerâmico, azulejo nas paredes molhadas do box, pia, lavatório e tanque, vãos de porta com folha em todos os cômodos, revestimento e pintura interna e externa compatível com o padrão da unidade. Os valores monetários referem-se ao ano de 2001.

Consideram-se atividades repetitivas aquelas que se repetem ao longo dos múltiplos pavimentos e blocos. As consideradas prioritárias foram aquelas possíveis de serem previstas e formalmente controladas: fundação, estrutura, reboco de teto, alvenaria, reboco de parede, reboco externo, montagem do madeiramento do telhado e colocação de telhas, pavimento cerâmico, caixa de água, pintura interna e pintura externa. Todas estas atividades repetitivas serviram de base para a programação constante na DEFG.

Definem-se como atividades repetitivas não seqüenciadas: as de encanadores, eletricitas e marceneiros, chumbamento de janelas, assentamento de louças, impermeabilização, encunhamento de paredes e outras (mencionadas dessa forma mas não discriminadas na DEFG). Estas atividades não tiveram previsão formal ao se considerar que não teriam uma função determinante no andamento do empreendimento. Na presente dissertação segue-se a mesma política. Ao se pautar os ensaios pela programação DEFG, tais decisões se incorporaram aos ensaios, o que levou igualmente à exclusão das atividades repetitivas não seqüenciadas da linha de balanço original. Desta forma, programam-se nove atividades caracterizadas no quadro 3.2.

QUADRO 3.2: Definição das atividades e equipes

Atividade	Quantidade de serviços	Unidade	Quantidade de equipes	Número de funcionários por equipe	Tempo de execução (dias)	HH/m²
Fundação e caixa de água	197,75 m ²	Bloco	1	1 Armador 1 Carpinteiro 1 Pedreiro 3 Serventes	5	1,21
Estrutura	197,75 m ²	Laje e Pilares	3	1 Armador 2 Carpinteiros 2 Serventes 1 Meio Oficial	7	2,0
Reboco do teto	197,75 m ²	Laje	2	2 Pedreiros 1 Serventes	5	0,61
Alvenaria	480 m ²	Pavimento	2	4 Pedreiros 2 Serventes	5	0,50
Reboco interno	680 m ²	Pavimento	3	3 Pedreiros 2 Serventes	10	0,60
Reboco externo	1.100 m ²	Bloco	2	4 Pedreiros 2 Serventes	20	0,87
Telhado	197,75 m ²	Telhado	1	1 Carpinteiro 2 Serventes	15	1,82
Pintura externa	1.100 m ²	Bloco	2	2 Pintores	20	0,30
Pintura interna	680 m ²	Pavimento	2	5 Pintores	5	0,30

No grupo I, pretende-se reduzir o custo do dinheiro ao reduzir o período sobre o qual os juros incidem sobre o capital emprestado para a construção do empreendimento. No grupo II, parte-se do pressuposto que o custo financeiro do capital não tem tanta importância para a empresa como o fluxo de caixa. Com maior produtividade disponível para utilizar no mesmo prazo, o consumo médio de mão de obra poderia reduzir-se permitindo maior facilidade para o gerenciamento do fluxo de caixa.

3.10 Estratégia para a programação dos grupos I e II

A estratégia de programação faz-se em dois passos: cálculo das durações das atividades consoante as unidades de repetição e montagem das programações dos dois grupos.

No primeiro passo, calcula-se a duração das atividades relativas às quatro unidades de repetição (Bloco e pavimento, pavimento, apartamento e meio apartamento). Estes cálculos formam a base comum de dados usados para montar as programações de ambos os grupos. Tal acontece pois se usam as mesmas atividades para formar as programações de ambos os grupos, variando somente o modo como se agrupam.

O cálculo da duração das atividades segue o definido na DEFG, utilizando o mesmo número e a mesma composição de equipes. Toma-se a produtividade média apresentada na DEFG para cada atividade como base para o cálculo. Estas produtividades médias previstas na programação original e confirmadas no canteiro. Partindo destas, calcula-se a duração das diversas atividades segundo as distintas unidades de repetição. A primeira unidade de repetição de cada equipe e de cada atividade tem a sua duração determinada pela produtividade média recolhida da DEFG.

Para todas as atividades e para todas as unidades de repetição, arbitra-se uma taxa de aprendizado de dez por cento, uma vez que não se encontrou literatura contrariando tal pressuposto. Dessa forma, toma-se como lícito esse pressuposto pois

unidades de repetição menores terão um menor número de operações a desempenhar e controlar e portanto condições para que a taxa de aprendizado se mantenha constante. Pressupõe-se igualmente que a diretoria esteja empenhada em tirar proveito de menores unidades de repetição e que o planejamento da obra envolva avaliações de desempenho mais freqüentes permitindo que a taxa de aprendizado se mantenha constante.

Após o cálculo das durações, inicia-se a montagem das programações de ambos os grupos.

No grupo I, pretende-se comprimir o tempo de ciclo, assim, agrupam-se as atividades de forma a reduzir as folgas entre as mesmas. No grupo II, objetiva-se reduzir o número médio de homens/dia. Desta forma, as atividades espalham-se dentro do prazo original estabelecido na DEFG de forma a reduzir o número de atividades correndo em paralelo.

Para criar as programações do grupo II de forma expedita garantindo que todas terminam no prazo original, as atividades dividiram-se arbitrariamente em dois conjuntos. Estes dois conjuntos definem-se através das precedências. O primeiro conjunto contém as seguintes atividades: fundações, estrutura, caixa de água, reboco do teto, alvenaria, telhado. O segundo conjunto contém as restantes atividades: reboco interno, reboco externo, pintura externa e pintura interna.

O primeiro conjunto monta-se seguindo a ordem de precedência. Começando-se com a fundação seguem-se todas as atividades com o menor intervalo possível até chegar à última atividade no menor prazo possível. Reduzem-se as folgas entre as atividades deste conjunto ao máximo possível.

De forma inversa, a programação das atividades do segundo conjunto inicia-se com o término da última atividade do conjunto (pintura interna), no último dia do prazo da programação original, partindo assim do término da atividade no último dia do prazo até chegar ao início da mesma. Depois se programa a penúltima atividade, de trás para frente, e assim sucessivamente até chegarmos à primeira atividade desse conjunto.

Esta estratégia reduz o número de atividades correndo em paralelo no período onde na programação original da DEFG apresentava o maior número de atividades simultâneas. O gráfico 3.7 explicita a estratégia.

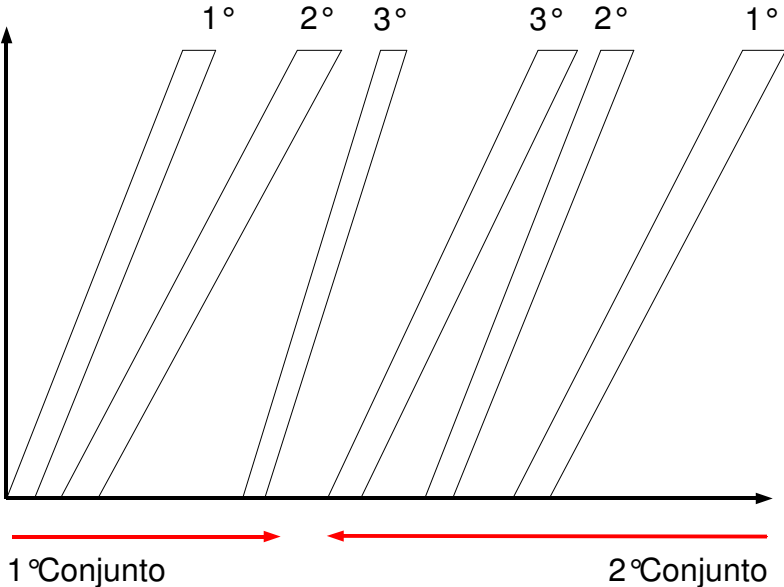


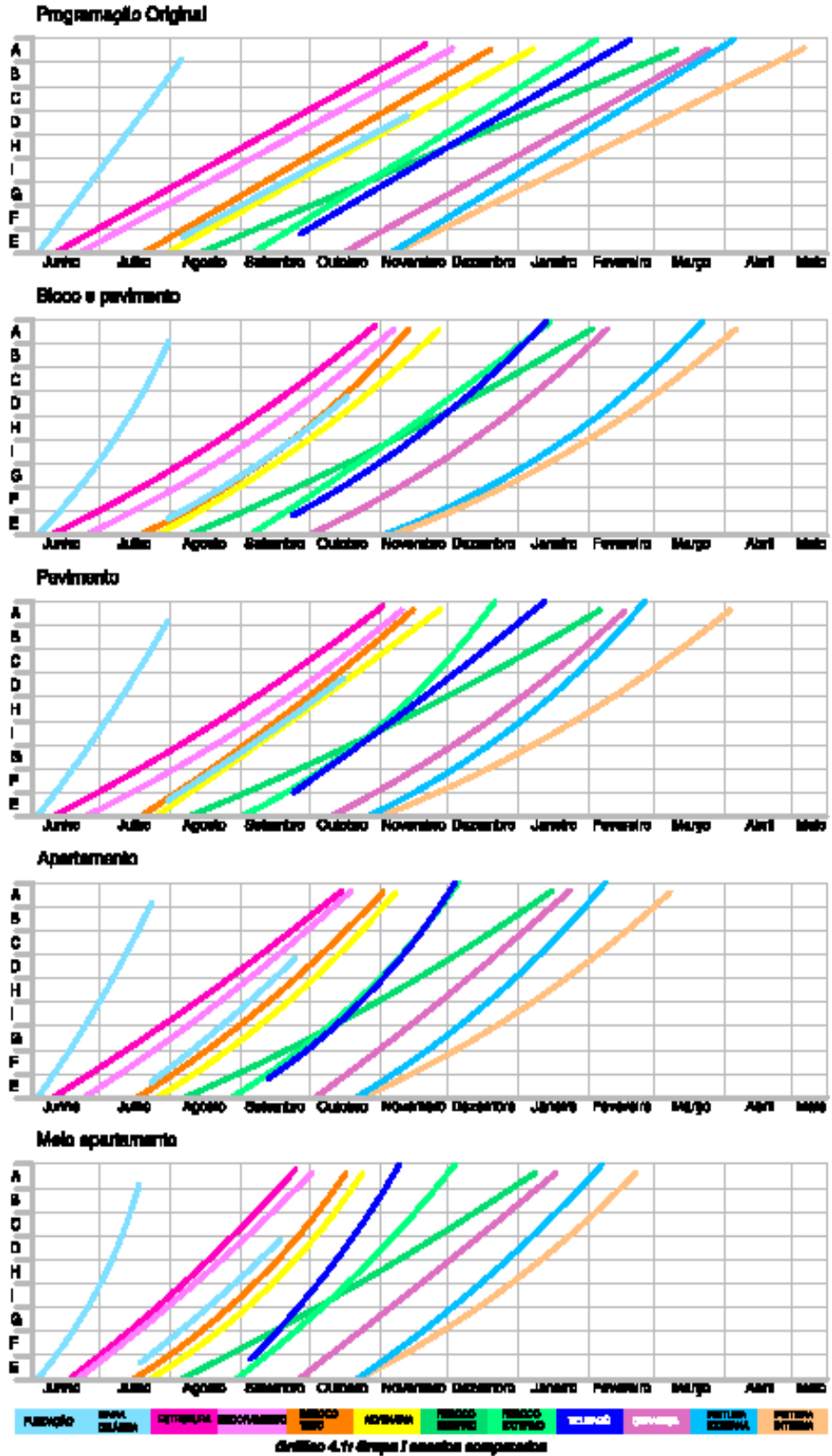
Gráfico 3.9: Estratégia de programação para o grupo II

4 ENSAIOS

No presente capítulo apresentam-se dois grupos de ensaios para ilustrar a ação do corolário partindo dos dados fornecidos na DEFG. Cada um dos dois grupos de ensaios apresenta quatro programações comparadas com a programação original. A programação original encontra-se na parte superior da página. As quatro programações de cada grupo de ensaios correspondem a quatro ensaios com quatro unidades diferentes presentes em ambos os grupos de ensaio: bloco e pavimento, pavimento, apartamento e meio apartamento.

4.1 GRUPO I

Segue-se o primeiro grupo de ensaios feitos com o objetivo de reduzir o tempo de ciclo.



4.2 GRUPO II

Segue-se a apresentação dos ensaios do segundo grupo que tem o objetivo de reduzir o consumo médio de mão de obra. A programação original encontra-se na parte superior da página servindo de termo de comparação com a programação de ensaio exposta na parte inferior da página. A mesma ordem de apresentação das unidades de repetição: bloco e pavimento, pavimento, apartamento e meio apartamento.

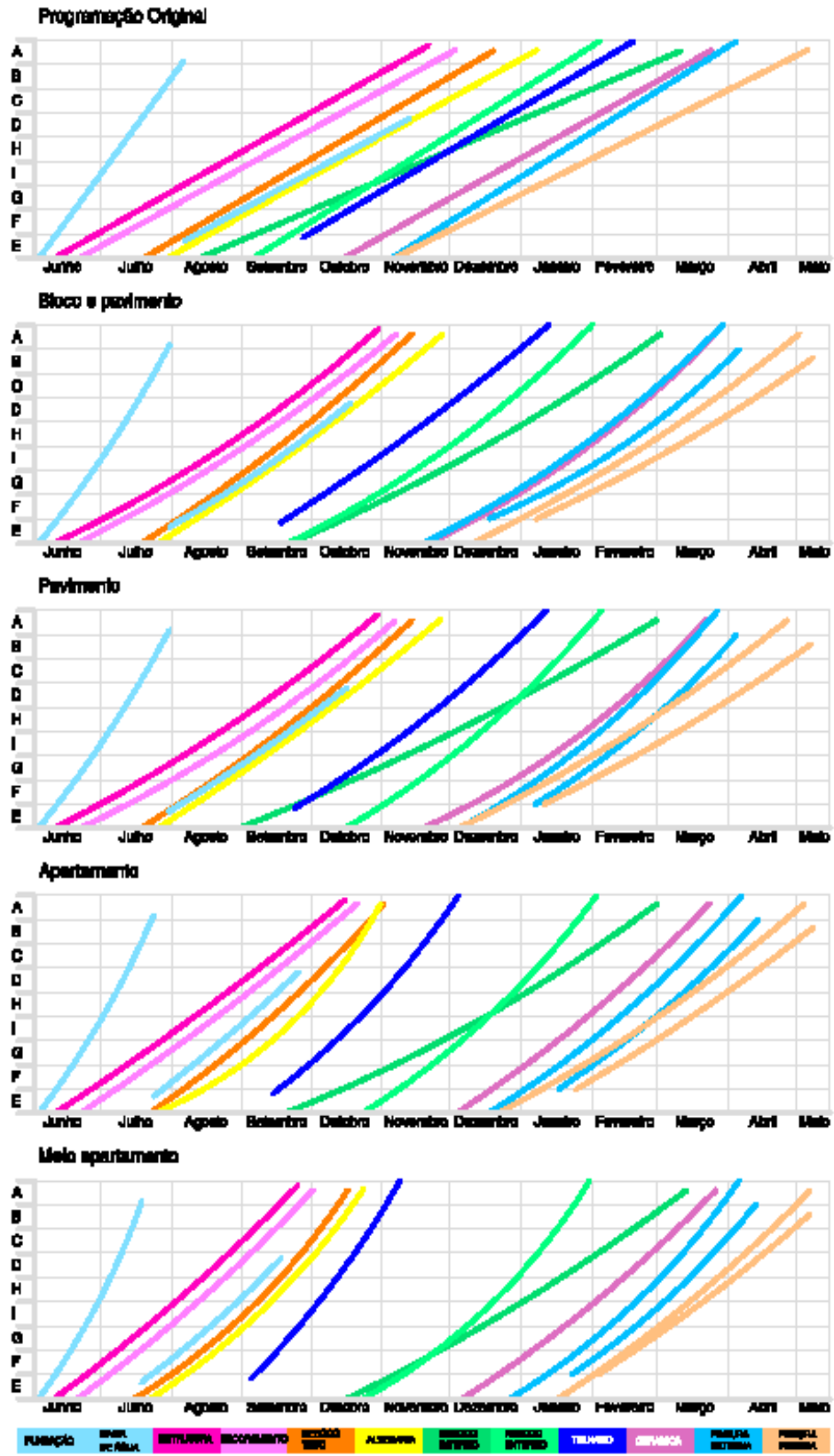


Gráfico 4.2: Grupo II cronograma comparativo

4.3 Análise de resultados

Segue-se a apresentação dos resultados dos dois grupos de ensaio. Esta apresentação divide-se em três partes, uma para cada grupo de ensaios e uma terceira para a comparação dos dois grupos.

A primeira parte apresenta e analisa os resultados do Grupo I de ensaios, enfocando os diversos tempos de ciclos que o ensaio revelou. A segunda parte apresenta e analisa os resultados do Grupo II enfocando a evolução do consumo médio de mão de obra. A terceira e última parte permite uma análise comparativa de ambos os grupos, através do cruzamento dos dados.

4.3.1 Resultados do Grupo I

O primeiro quadro apresenta os tempos de atravessamento das diversas programações do grupo I comparadas com o tempo de atravessamento da programação original. O quadro 4.1 mostra de forma absoluta os valores de tempo de ciclo de cada unidade de repetição.

QUADRO 4.1: Tempos de atravessamento por unidade de repetição

<i>Unidade de repetição</i>	<i>Tempo de atravessamento (dia)</i>
<i>Programação original</i>	337
Bloco e pavimento	306
Pavimento	304
Apartamento	277
Meio apartamento	255

A redução da unidade de repetição induz a diminuição do tempo de atravessamento em várias dezenas de dias. Do tempo de atravessamento original da DEFG de

trezentos e trinta e sete dias, a unidade meio apartamento apresenta um tempo de atravessamento de duzentos de cinquenta e cinco dias. Note-se uma aceleração na redução do tempo de atravessamento na medida em que as unidades vão decrescendo de dimensão. Essa aceleração torna-se notória entre as unidades pavimento e apartamento. O quadro 4.2, explicita tal aceleração ao apresentar a redução, em dias, do tempo de atravessamento por unidade e redução percentual comparada com a DEFG.

QUADRO 4.2: Comparação das reduções de tempo de atravessamento

<i>Unidade de repetição</i>	<i>Redução do tempo de atravessamento em dias</i>	<i>Redução relativa do tempo de atravessamento comparada com a DEFG</i>
<i>Programação original</i>	0	0
Bloco e pavimento	31	1,10
Pavimento	33	1,11
Apartamento	60	1,18
Meio apartamento	82	1,24

A redução do tempo de atravessamento apresenta uma amplitude mínima para a unidade bloco e pavimento e máxima para a menor unidade de programação do ensaio (meio apartamento) devido ao corolário. A redução entre os tempos de ciclo das unidades bloco-pavimento e pavimento apresenta o valor menor, resultado previsível dado o carácter misto da unidade Bloco e pavimento que provoca que algumas atividades apresentem os mesmos resultados em ambas as programações.

O aumento da redução do tempo de atravessamento entre a unidade pavimento e apartamento mostra um máximo na redução do tempo de atravessamento entre estas duas unidades reduzindo o tempo de atravessamento de menos trinta e três dias para menos sessenta dias, uma diferença de vinte sete dias, enquanto a diferença entre a unidade apartamento e a unidade meio apartamento se reduz a vinte e dois dias (de menos sessenta dias para oitenta e dois).

Desta forma verifica-se a maior redução entre as unidades pavimento e apartamento (de uma redução 1,11 para uma redução de 1,18). No entanto, em termos absolutos, a unidade meio apartamento apresenta a maior redução de tempo de atravessamento, reduzindo o prazo original da DEFG em oitenta e dois dias, relativamente falando 1,24 vezes menor.

No quadro 4.3 comparam-se as reduções de tempo de atravessamento com as dimensões relativas das unidades. As dimensões de cada unidade definem-se relativamente à área do bloco, utilizado como parâmetro de comparação. A unidade bloco e pavimento (utilizada na programação original) excluí-se do seguinte quadro por conter duas unidades de diferentes dimensões.

QUADRO 4.3: Dimensões relativas das unidades e tempos de atravessamento

<i>Unidade de repetição</i>	<i>Área da unidade de repetição comparada com a unidade Bloco (%)</i>	<i>Redução relativa do tempo de atravessamento</i>
Bloco	0	0
Pavimento	25,00	1,11
Apartamento	6,25	1,18
Meio apartamento	3,12	1,24

O quadro 4.3 relaciona a redução do tempo de atravessamento e a dimensão da unidade de repetição. Este quadro mostra o corolário agindo com a redução da unidade de repetição. A redução do tempo de atravessamento ultrapassa os dez por cento para a unidade pavimento, atingindo o valor máximo com a menor unidade, meio apartamento.

Desta forma, dentro do carácter teórico da presente dissertação, neste ensaio não se confirma a universalidade da unidade pavimento como escolha para programação por linha de balanço. A unidade de repetição pavimento apresenta uma redução do tempo de atravessamento de 1,11 vezes, de acordo com a taxa de aprendizado. Embora a relação entre taxa de aprendizado e redução de tempo de atravessamento em uma programação não tenha uma relação tão direta que se possa afirmar que uma redução

de dez por cento em todas as atividades implica necessariamente a redução de dez por cento no tempo de atravessamento da programação, torna-se claro que as maiores reduções de tempo de atravessamento ocorreram nas unidades de repetição de dimensão sensivelmente menor que a unidade de repetição pavimento.

O quadro 4.4 compara as dimensões relativas das diversas unidades de repetição não com a unidade bloco e sim com a unidade precedente. Este quadro enfoca portanto as reduções de tempo de atravessamento entre unidades de repetição sucessivas ao invés de comparar com uma unidade padrão como a tabela anterior.

QUADRO 4.4: Comparação das dimensões das unidades e tempos de atravessamento

<i>Unidades de repetição</i>	<i>Relação entre unidades seguidas</i>	<i>Redução do tempo de atravessamento em dias da unidade anterior</i>	<i>Redução relativa do tempo de atravessamento da unidade anterior</i>
Pavimento/ Bloco e pavimento	0,25	2	1,01
Apartamento/Pavimento	0,25	27	1,09
Meio apartamento/Apartamento	0,5	22	1,08

Este quadro 4.4 ilustra como a redução do tempo de atravessamento não segue um ritmo constante. A redução do tempo de atravessamento da unidade de pavimento para unidade apartamento apresenta uma redução de nove por cento no tempo de atravessamento, enquanto a de um apartamento apresenta um quarto da quantidade de trabalho contida na unidade pavimento.

Por sua vez a redução de tempo de atravessamento entre as unidades meio apartamento e apartamento tem o valor de oito por cento, enquanto a unidade meio apartamento apresenta metade da quantidade de trabalho da unidade apartamento. Constata-se portanto um aumento na redução do tempo de atravessamento na medida em que unidade de repetição diminui de dimensão.

4.3.2 Resultados do Grupo II

Apresentam-se em seguida os resultados referentes ao grupo II. Este grupo contém quatro programações utilizando as mesmas unidades de repetição do grupo anterior (bloco e pavimento, pavimento, apartamento e meio apartamento). Todas as referidas programações têm o mesmo tempo de atravessamento da DEFG, pois o ganho de produtividade se usa para reduzir o consumo médio de mão de obra.

O quadro 4.5 apresenta os resultados do número médio de homens/dia referentes a cada unidade de repetição.

QUADRO 4.5: Número médio de homens/dia

<i>Unidade de repetição</i>	<i>Número médio de homens/dia</i>
<i>Programação original</i>	38,51
Bloco e pavimento	31,41
Pavimento	31,09
Apartamento	26,71
Meio apartamento	24,11

Como a estratégia de programação do grupo II determina um tempo de atravessamento igual para todas as programações e como cada programação do grupo apresenta diferentes produtividades para cada unidade de repetição, resulta que as programações com as menores unidades de repetição apresentam menores consumos de mão de obra. Os resultados expressam a implementação dessa estratégia. O maior valor de consumo corresponde ao valor da programação original e o menor à unidade de repetição de meio apartamento de acordo com o esperado com o corolário. Em relação à programação original da DEFG a redução do número médio de homens/dia mostra uma redução de trinta e oito homens hora por dia para vinte e quatro homens hora por dia para a unidade de repetição meio apartamento.

O próximo quadro 4.6 compara os vários resultados de número médio de homens/dia com o número médio de homens/dia da programação original da DEFG mostrando a diferença em relação à DEFG e a redução percentual por unidade. Este quadro visa permitir um melhor entendimento da extensão das reduções do consumo médio de mão de obra entre as várias unidades.

QUADRO 4.6: Comparação número médio de homens/dia por unidade

<i>Unidade de repetição</i>	<i>Diferença no número médio de homens/dia (h/d)</i>	<i>Redução relativa do número médio de homens/dia com a DEFG</i>
<i>Programação original</i>	0	0
Bloco e pavimento	7,1	1,18
Pavimento	7,42	1,19
Apartamento	11,8	1,30
Meio apartamento	14,4	1,37

O quadro 4.6 mostra que a redução máxima conseguida com a unidade de repetição meio apartamento chega a trinta e sete por cento. Observa-se que a mudança de unidade do pavimento para o apartamento implicou uma redução de mais de dez por cento no consumo médio de mão de obra. Tal como no caso do grupo I a maior redução absoluta de valores entre unidade de repetição ocorre entre as unidades pavimento e apartamento. No entanto, a redução da diferença da unidade apartamento e meio apartamento quase alcançou 1,06 vezes passando de uma redução de 1,31 para 1,37.

No quadro 4.7 correlaciona-se as dimensões das unidades de repetição com a unidade bloco e a reduções de número médio de homens/dia das diversas programações.

QUADRO 4.7: Dimensões relativas das unidades e número médio de homens/dia

<i>Unidade de repetição</i>	<i>Área da unidade de repetição comparada com a unidade Bloco (%)</i>	<i>Redução relativa do número médio de homens/dia em relação a DEFG</i>
Pavimento	25	1,19
Apartamento	6,25	1,31
Meio apartamento	3,125	1,37

Como no caso do grupo I, a unidade bloco e pavimento exclui-se deste quadro por conter unidades de repetição diferentes para cada atividade impedindo a comparação entre a programação bloco e pavimento com a unidade bloco. O quadro 4.7 confirma a ação do corolário, indicando a vantagem da escolha de unidades de menor dimensão como a unidade apartamento e a unidade meio apartamento. A maior redução acontece entre a unidade pavimento e a unidade apartamento. O quadro 4.7, no entanto, não leva em conta as diferentes extensões na redução de dimensão entre as diferentes unidades. O quadro 4.8 compara esses dados.

QUADRO 4.8: Comparação das dimensões das unidades e número médio de homens/dia

<i>Unidades de repetição</i>	<i>Relação entre unidades seguidas</i>	<i>Redução do consumo de mão de obra em dias da unidade anterior</i>	<i>Redução relativa do número médio de homens/dia da unidade anterior</i>
Pavimento/ Bloco e pavimento	0,25	0,32	1,04
Apartamento/Pavimento	0,25	4,38	1,37
Meio apartamento/Apartamento	0,5	2,6	1,18

Verifica-se uma variação no ritmo de redução do número médio de homens/dia. A redução entre pavimento e bloco e pavimento apresenta o menor valor com quatro por cento. A redução maior verifica-se entre apartamento e pavimento com uma redução de trinta e sete por cento. A redução no número médio de homens/dia parece

estabilizar entre as unidades apartamento e meio apartamento, pois o valor de dezoito por cento tem o valor de aproximadamente metade da redução entre as unidades pavimento e apartamento.

Esta variação difere do verificado no grupo I. Na próxima seção comparam-se os resultados dos dois ensaios.

4.3.3 Comparação dos resultados dos Grupos I e II

Na seguinte seção analisam-se os resultados de ambos os grupos de ensaio. Objetiva-se, por comparação, notar como a redução do tempo de atravessamento e a redução do número médio homens/dia se comportam relativamente à variação das dimensões das unidades de repetição, observando se seguem padrões semelhantes ou distintos.

Inicia-se esta análise com o quadro 4.9, e os gráficos 4.3 e 4.4 que apresentam os resultados de ambos os ensaios para cada unidade de repetição (unidades comuns para os dois grupos de ensaios).

QUADRO 4.9: Comparação dos resultados dos dois ensaios

<i>Unidade de repetição</i>	<i>Grupo I: tempo de atravessamento (dia)</i>	<i>Grupo II: número de homens em obra (h/d)</i>
<i>Programação original</i>	337	38,51
Bloco e pavimento	306	31,41
Pavimento	304	31,09
Apartamento	277	26,71
Meio apartamento	255	24,11

Os ensaios indicam maior redução no grupo II relativamente ao grupo I quando os resultados de ambos se comparam aos valores de referência correspondentes presentes na DEFG.

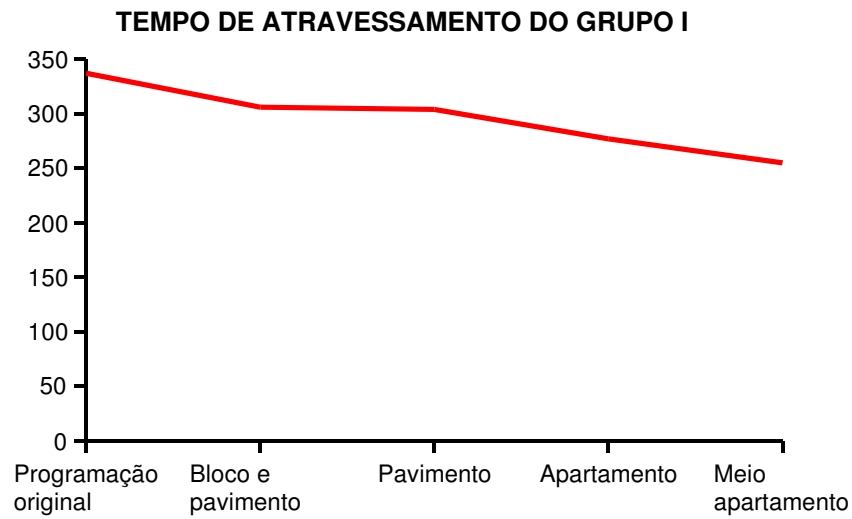


Gráfico 4.3: Tempo de atravessamento do grupo I

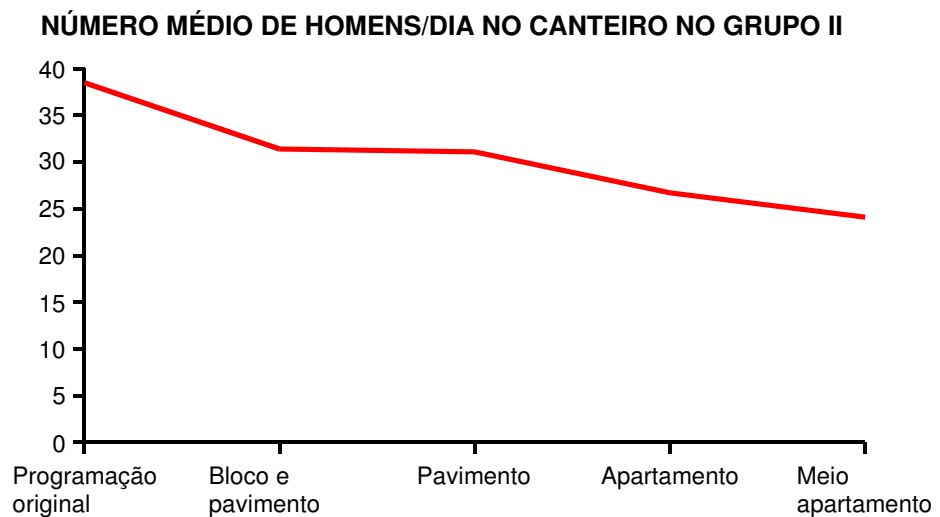


Gráfico 4.4: Número médio de homens/dia no canteiro do grupo II

O quadro gráfico 4.5 compara as reduções relativas de cada grupo por unidade com os valores base da programação original da DEFG, permitindo comparar os diferentes resultados dos dois grupos, expressos com unidades diversas, de uma forma mais clara.

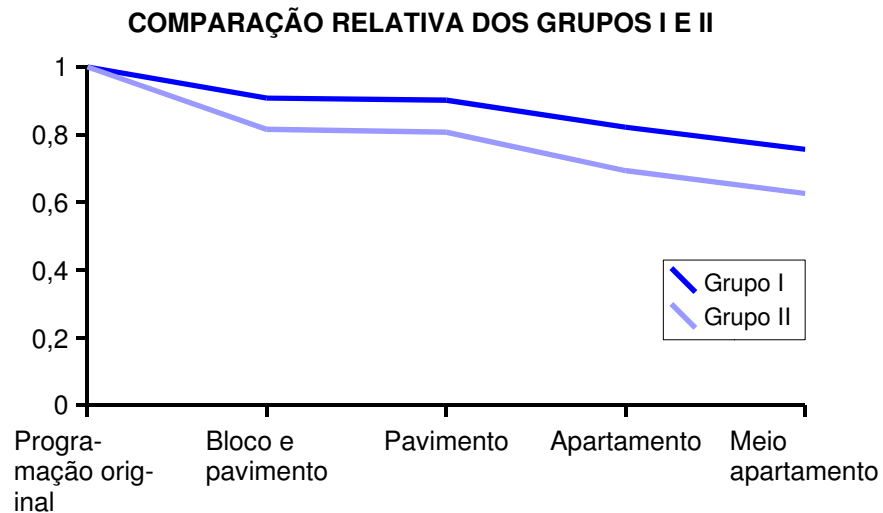


Gráfico 4.5: Número médio de homens/dia no canteiro do grupo II

Em ambos os grupos se confirma a redução de tempo de atravessamento e redução do número médio de homens/dia em canteiro com a redução de dimensão da unidade de repetição.

Este gráfico 4.5 explicita comportamentos diferentes para os dois grupos. Embora o grupo dois apresente maiores reduções relativas, a velocidade dessas reduções diminui com a redução da unidade de repetição. Por oposição, o grupo I mostra reduções menores comparativamente com mais velocidade constante.

A razão para tal comportamento vem do diferente efeito do corolário quando aplicado para a redução do tempo de atravessamento e redução do número de homens/dia em canteiro.

No grupo I, o corolário têm um efeito quádruplo na redução do tempo de atravessamento. Primeiro pela redução do tempo de atravessamento de cada atividade; segundo, pois a redução do tempo de atravessamento das atividades permite que as mesmas se iniciam mais cedo; terceiro, porque esse efeito tem conseqüências em cadeia. Se uma atividade começa mais cedo todas as atividades posteriores podem começar mais cedo. Assim, as últimas atividades beneficiam-se não da redução de tempo de atravessamento da unidade imediatamente anterior e sim de

todas as atividades anteriores, criando um efeito cumulativo na redução do tempo de atravessamento total. Em quarto e último lugar, as unidades de repetição menores provocam nas últimas unidades uma inclinação mais vertical que permite aproximar ainda mais as atividades.

No caso do grupo II, a redução do número de homens/dia em canteiro tem valores expressivos na medida que permite separar mais atividades permitindo que menos e menos atividades corram em paralelo. Esta separação permite descidas sensíveis na média de homens/dia. Tal processo pode continuar até um máximo teórico em que cada atividade corre sozinha (nenhuma atividade corre em paralelo). Atingindo esse máximo a redução da média torna-se mais lenta pois a partir deste ponto a mesma só pode baixar através de dias sem atividades correndo, que reduz o número médio de homens/dia mais lentamente. O Quadro 4.10 comprova que a velocidade de redução do tempo de atravessamento aumenta entre as unidades apartamento e meio apartamento. Embora a diferença entre estas duas unidades de repetição tenha o menor valor (metade) entre todas as unidades, apresenta o valor mais alto de diferença igual à diferença entre apartamento e pavimento.

QUADRO 4.10: Comparação entre diferenças relativas e dimensões de unidade

<i>Unidade de repetição</i>	<i>Relação entre as dimensões das unidades</i>	<i>Diferença entre os Grupo I e II</i>
Bloco e pavimento	Com DEFG	- 1,08
Pavimento	pavimento/bloco = 1/4	- 1,08
Apartamento	Apartamento/pavimento = 1/4	-1,13
Meio apartamento	Meio Apartamento/Apartamento = 1/2	-1,13

O quadro 4.11 visa mostrar qual a extensão da redução percentual da dimensão das unidades repetição necessária para se atingirem os resultados em cada uma, comparadas com uma base comum. Desta forma, este quadro correlaciona os resultados percentuais de reduções de tempo de atravessamento e do número médio de homens/dia com a dimensão percentual das unidades de repetição

comparativamente à unidade bloco. A unidade bloco e pavimento excluí-se deste quadro pelo seu caráter misto. Observa-se que ambos o grupos de programação apresentam resultados semelhantes. Em ambos os casos se verifica que os efeitos do corolário aumentam com a redução da dimensão da unidade de repetição.

QUADRO 4.11: Dimensões relativas das unidades e resultados por grupo

<i>Unidade de repetição</i>	<i>Redução relativa do tempo de atravessamento comparada com a DEFG</i>	<i>Redução relativa do número médio de homens/dia com a DEFG</i>	<i>Área da unidade de repetição comparada com a unidade Bloco (%)</i>
<i>Programação original</i>	0	0	-
Bloco e pavimento	1,10	1,18	-
Pavimento	1,11	1,19	0,25
Apartamento	1,18	1,31	0,06
Meio apartamento	1,24	1,37	0,03

O quadro 4.12 correlaciona três variáveis: as reduções percentuais em ambos os grupos, a dimensão em metros quadrados da área de laje contida em um bloco, um pavimento, um apartamento e meio apartamento e número de repetições de cada unidade. Objetiva-se quantificar a aplicação do princípio da redução da unidade de repetição correlacionada com conseqüente aumento do número de repetições.

QUADRO 4.12: Correlação entre resultados, unidades e número de repetições

<i>Unidade</i>	<i>Redução relativa do tempo de atravessamento em relação à DEFG</i>	<i>Redução relativa do número médio de h/d em relação à DEFG</i>	<i>Dimensão da unidade (m²)</i>	<i>Número de repetições da unidade</i>
Bloco	-	-	791,00	9
Pavimento	1,11	1,19	197,75	36
Apartamento	1,18	1,31	49,44	144
Meio apartamento	1,24	1,37	24,27	288

O número de repetições da unidade meio apartamento (duzentas e oitenta e oito) indicia que esta unidade representa a menor unidade operacional possível independentemente do aumento da velocidade na redução do tempo de atravessamento e consumo médio de mão de obra. Tal indício confirma a opção de escolher meio apartamento como a menor unidade na série. O quadro 4.13 comprova tal indício ao comparar por unidade o tempo de atravessamento com o número de repetições.

QUADRO 4.13 Quociente entre tempo de atravessamento e repetições

<i>Unidade</i>	<i>Grupo I: tempo de atravessamento (dia)</i>	<i>Número de repetições da unidade</i>	<i>Quociente entre tempo de atravessamento e número de repetições</i>
Bloco	337	9	37,44
Pavimento	304	36	8,44
Apartamento	277	144	1,92
Meio apartamento	255	288	0,89

O quadro 4.13 mostra o quociente entre o tempo de atravessamento em dias e o número de repetições. Este valor fornece uma indicação rápida do período de programação de cada unidade de repetição. Sem efeito aprendido, um bloco demora trinta e sete dias, em média, para a sua conclusão. Com o efeito aprendido este número torna-se mais aproximado mas fornece o valor médio do tempo de atravessamento de cada unidade.

Tomando como valor operacional mínimo de programação de curto prazo o meio período (meio dia) implicaria que o quociente tem um valor teórico mínimo de 0,5. A unidade meio apartamento apresenta valor de 0,89 muito próximo do valor mínimo. A próxima redução de unidade possível, um quarto de apartamento, já teria um valor menor que 0,5.

Desta forma, os ensaios confirmam a unidade meio apartamento como a menor unidade operacional possível para a programação, independentemente de os dados parecerem indicar uma aceleração da velocidade de redução do tempo de atravessamento nas unidades de menor dimensão. Para tirar proveito dessa redução, a complexidade gerencial aumentaria demasiado impondo uma programação de curto prazo menor de que meio período.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

A pergunta formulada no início deste trabalho tem resposta positiva. Demonstrou-se teoricamente no capítulo 3 como o efeito aprendido e a escolha da unidade de repetição conjugados influenciam o tempo de atravessamento na programação por linha de balanço.

No capítulo quatro, ensaiaram-se os efeitos de tal conjugação em condições teóricas ótimas como forma de pesquisar quão significativo se mostraria o alcance máximo do corolário, com o intuito de avaliar a relevância de testar a aplicação do mesmo em campo. Os ensaios mostram resultados com amplitude significativa para que se teste a confirmação do corolário no canteiro.

No capítulo dois, apontou-se bibliografia referente ao efeito aprendido no progresso na obra em canteiro. Computando o efeito aprendido, a programação por linha de balanço transforma-se em programação por curvas de balanço.

A aplicação do corolário do efeito aprendido objeto desta dissertação mantém essa característica. O tempo de atravessamento reduz-se mais quanto menor a dimensão da unidade de repetição. No capítulo quatro, demonstrou-se como o tempo de atravessamento varia para uma mesma obra conforme a unidade de repetição escolhida. Quanto menor a dimensão da unidade de repetição maior o número de repetições. Quanto maior o número de repetições, maior a ação acumulada do efeito aprendido resultando em um menor tempo de atravessamento.

5.2 O paradigma enxuto e o trabalho

No presente trabalho demonstra-se matematicamente que a redução da unidade de repetição provoca uma redução do tempo de atravessamento na presença do efeito aprendido. A redução da unidade de repetição entende-se no presente trabalho como a redução do lote gerencial em que consiste a unidade de repetição. Logo, a redução da unidade de repetição entende-se como uma aplicação do princípio de redução de tamanho de lote no contexto gerencial da linha de balanço.

A redução do tamanho de lote aponta-se como um dos princípios de produção enxuta. No entanto, esta heurística não está incluída no pacote de onze princípios de construção enxuta proposto no relatório técnico de Koskela (1992), nem se apresenta como exemplo no sistema de três classes de princípios enxutos apresentada por Koskela (2000) no seu doutorado.

Nesse sistema a procura de qualidade define-se como a pedra base de toda a filosofia enxuta. Desta forma consiste no único princípio de primeira classe. A segunda classe compõe-se de princípios auxiliares na procura de qualidade. A terceira classe inclui uma série de princípios que se verificou ajudarem na implementação dos princípios de segunda classe mesmo que resulte obscura a sua relação direta com a procura de qualidade.

A demonstração que a redução do tamanho de lote provoca na redução do tempo de atravessamento equivale a incluir a redução de tamanho de lote como princípio de terceira. No entanto, a demonstração explícita que tal acontece pelo efeito aprendido permite compreender o porque do que antes se limitava a constatar empiricamente. O efeito aprendido permite explicitar melhor a relação entre os vários princípios e as condições necessárias para que os mesmos funcionem. Como a redução do tamanho de lote provoca a redução do tempo de atravessamento na presença do efeito aprendido então medidas que criem, mantenham e aumentem o aprendizado tornam-se muito importantes. O porque de medidas como a transparência, limpeza e padronização torna-se claro pela sua importância para o aprendizado.

5.3 Recomendações para futuros trabalhos

Recomenda-se que futuros trabalhos pesquisem os seguintes temas:

Buscar evidências em campo comprovando uma redução do tempo de atravessamento resultante de uma redução da unidade de programação;

Testar se obras maiores apresentam menores tempos de atravessamento relativo comparadas com obras menores para unidades de repetição similares e taxas de aprendizado iguais. Teoricamente, como o acúmulo do efeito aprendizado cresce com maior número de repetições, quanto maior a obra, menor o tempo de atravessamento em termos relativos comparado com uma obra menor para unidades de repetição similares. Desta forma, a aplicação do corolário teria especial interesse para a redução do prazo de construção em grandes obras;

Entender a relação entre unidade de repetição e efeito esquecimento. O modelo de Wright tem uma aceitação ampla na literatura para a modelagem do efeito aprendizado mesmo no campo da produção industrial como um modelo suficientemente preciso. No campo da construção civil o modelo de Wright apresenta-se como o mais adequado. Por oposição, na literatura atual, nenhum dos vários modelos do efeito esquecimento tem uma aceitação abrangente para a produção industrial. Precisa-se determinar qual o modelo de esquecimento adequado para a construção civil. Este passo precede a criação posterior de um modelo integrado de aprendizado-esquecimento para a construção civil. Tal modelo torna-se necessário para poder estimar de forma precisa os custos de produtividade de interrupções no processo produtivo;

Pesquisar se princípios enxutos como redução do número de partes e interfaces, redução de variabilidade, estão ligados à curva de aprendizado. Pesquisar se mais princípios enxutos podem expressar-se de forma matemática como conseqüências do efeito aprendizado permitindo estimativas quantitativas dos efeitos de cada princípio;

Pesquisar como as diferentes relações entre atividades (convergentes, divergentes e paralelas) impactam os tempos de atravessamento. Quando atividades consecutivas

correm em paralelo, uma pode começar imediatamente a seguir ao término da primeira repetição da atividade anterior. Quando as atividades convergem, tal possibilidade não ocorre obrigando a atividade seguinte a esperar um determinado tempo até poder começar. Esse tempo extra aumenta o tempo de atravessamento merecendo um estudo mais aprofundado para estimar a sua contribuição para o tempo de atravessamento como um todo;

Pesquisar a relação entre efeito aprendido e qualidade. Pelo princípio de classificação proposto por Koskela, resulta que o aprendizado também deve considerar-se um princípio enxuto, pois auxilia na busca de qualidade. No entanto, resulta difícil saber qual a classe que pertence. Na literatura de produção industrial encontra-se um debate sobre a relação entre qualidade e efeito aprendido. Alguns autores utilizam a curva de aprendizado como modo de medir objetivamente a implementação dos programas de qualidade. Outros autores defendem que qualidade e aprendizado apresentam uma correlação, mas que não se podem confundir. O presente trabalho mostra como o aprendizado está subjacente ao aumento de qualidade. A presença do efeito aprendido permite não só o aumento da qualidade diretamente pela redução do tempo de ciclo como permite potencializar a mesma através da escolha de menores tamanhos de lote. Com a bibliografia dividida sobre a relação exata entre qualidade e aprendizado, mas pacífica de uma relação estreita entre ambas, um maior entendimento de ambos os conceitos se torna necessário para o progresso da aplicação prática dos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, T.C.L.; TOMMELEIN, I. D.. Buffering and batching practices in the HVAC industry. **11th International Conference on Lean Construction - Proceedings IGLC 2003**, <http://www.vtt.fi/rte/lean/>. 2003.

ARDITI, David; TOKDEMIR, Onur Behzat; SUH, Kangsuk. Effect of learning on line-of-balance scheduling. **Internacional Journal of Project Management**, n. 19, p. 265-277, 2001.

BALLOFF, N.. Start-up management. **IEEE Transactions on Engineering Management**, n. 17, p. 132-141, 1970.

CARR, Robert I.; MEYER, Walter L.. Planning construction of repetitive building units. **Journal of construction division**, v. 100, n. 3, p. 403-412, September 1974.

CHELAKA, M.; ABEYASINGHE, L.; GREENWOOD, David J.; JOHANSEN, Eric D.. An efficient method for scheduling construction projects with resource constraints. **International Journal of Project Management**, n.19, p. 29-45. 2001.

CHRZANOWSKI, E.N.; JOHNSTON D.. Application of linear scheduling. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 112, n. 4, p. 476-491, 1986.

CONWAY, R.; SCHULTZ, A.. The manufacturing progress function. **Journal of Industrial Engineering**, n. 10, p. 39-53, 1959.

COUTO, J.; TEIXEIRA, J.. Método das curvas de equilíbrio no planeamento da construção repetitiva em altura. **Engenharia Civil**, n. 13, p. 35-46, 2002.

COUTO, J. C.; TEIXEIRA, J. P.. Using linear model for learning curve effect on highrise floor construction. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 23, n. 4, p. 35-46, May 2005.

CROSSMAN, E.R.. A theory of acquisition of speed skill. **Ergonomics**, n. 2, p. 153-166. 1959.

EL-RAYES, Khaled; MOSELHI, Osama. Resource-driven scheduling of repetitive activities. **Construction Management and Economics**, n. 16, p. 433-446, 1998.

PORTEUS, Evan L.. Optimal Lot Sizing, Process Quality Improvement and Setup Cost Reduction. **Operations Research**, Vol. 34, No. 1, p. 137-144, Jan/Feb 1986.

EVERETT, J.G.; FARGHAL S.. Learning curve predictors for construction field operations. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 120, n. 3, p. 603-616, 1994.

GOLDRATT, Eliyahu M.; COX, Jeff. **The goal: a process of ongoing improvement**. North River Press ,1986, 384 p.

GOLDRATT, Eliyahu M.. **Corrente Crítica**. São Paulo: Nobel, 1998, 260 p.

GONZALEZ, Edinaldo Favareto. **Análise da implantação da programação de obra e do 5S em um empreendimento habitacional**. 2002. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

HALPIN, Daniel W.; WOODHEAD, Ronald W.. **Design of construction and process management**. New York: John Wiley & Sons Inc , 1976. 554 p.

HAMERLINK, David J.; ROWINGS, James E.. Linear scheduling model: development of controlling activity path. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 124, n.4, p. 263-268, July/August 1998.

HARRIS, Robert H.; IOANNOU, Photios G.. Scheduling projects with repeating activities. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 124, n. 4, p. 269-278, July/August 1998.

HEGAZY, Tarek; WASSEF, Nagib. Cost optimization in projects with repetitive non serial activities. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 127, n.3, p. 183-191, May/June 2001.

HEINECK, Luiz Fernando. **Estimativa do consumo unitário de mão de obra em orçamentos da construção : comparativo da precisão das estimativas em 3 canteiros de obras - metodologia para análise do efeito aprendido.** Belo Horizonte, MG. 1990. p. 698-703. In: ENEGEP, 10º, Belo Horizonte, 1990. Artigo técnico.

HEINECK, Luiz Fernando; PEIXE, Lucia Teresinha. **Aplicação do conceito do método de linha de balanço à programação de obras repetitivas : decisões fundamentais para sua aplicação.** Belo Horizonte, MG. 1990. p. 716-721. In ENEGEP, 10º, Belo Horizonte, 1990. Artigo técnico.

HIRSCHMANN, W.B.. Profiting from the learning curve. **Harvard Business Review**, n. 42, p.125-139, 1964.

HOWELL, Gregory A.; BALLARD, Glenn. Bringing light to the dark side of lean construction: a response to stuart green. **Proceedings: IGLC-7**, Berkeley, California, USA, 26-28 July, 1999.

HOWELL, Gregory A.. What is lean construction?. **Proceedings: IGLC-7**, Berkeley, California, USA, 26-28 July, 1999.

JAAFARI, A.. Time and priority allocation scheduling technique for projects. **Internacional Journal of Project Management**. n. 14, p. 289-299, 1996.

JABERA, Mohamad Y.; BONNEY, Maurice. The economic manufacture/order quantity (EMQ/EOQ) and the learning curve: Past, present, and future. **International Journal of Production Economics**, n. 59, p. 93-102 , 1999.

JABERA, Mohamad Y.; BONNEY, Maurice. Lot sizing with learning and forgetting in set-ups and in product quality. **International Journal of Production Economics**, n. 83, p. 95–111, 2003.

JOHNSTON D.W.. Linear scheduling method for highway construction. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 107, n. 2, p. 247-261, June 1981.

JOHNSTON, R.B.. Making manufacturing practices tacit: a case study of computer aided production management and lean production. **Journal of the Operational Research Society**, v. 46, n. 10, p. 1174-1183, October 1995.

KANKAINEN, Jouko; SEPPÄNEN, Olli. A line-of-balance based schedule planning and control system. **Proceedings: IGLC-11**, Blacksburg, Virginia, USA, 2003.

KOSKELA, Lauri. Application of the new production philosophy to construction technical report # 72. **Center for Integrated Facility Engineering. Department of Civil Engineering. Stanford University**, 75 p.,1992.

KOSKELA, Lauri. Management of production in construction: a theoretical view. **Proceedings: IGLC-7**, Berkeley, California, USA, 26-28 July, 1999.

KOSKELA, Lauri. **An exploration towards a production theory and its application to construction**. Espoo, Finland, May 2000. Dissertation to the degree of Doctor in Technology presented to the Helsinki University of Technology, 298 p.

KOSKELA, Lauri. On new footnotes to shingo. **Proceedings: IGLC-9**, Singapura, 2001.

LI H.; LOVE P.. Using improved genetic algorithms to facilitate cost optimization. **Construction Engineering and Management**, n. 123, v. 3, p. 233-237, September/October 1997.

LAM, K.C.; LEE, Donald; HU Tiesong. Understanding the effect of the learning-forgetting phenomenon to duration of projects construction. **Internacional Journal of Project Management**, n. 19, p. 411-420, 2001.

LEITE, Madalena Osório. **A utilização das curvas de aprendizagem no planejamento da construção civil**. Florianópolis, 2002. 93p. Dissertação, Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina.

LUTZ, James D.; HIJAZI, Adib. Planning repetitive construction: current practice. **Construction Management and Economics**, n. 11, p. 99-110, 1993.

MARCHIORI, Fernanda Fernandes. **Estudo da produtividade e da descontinuidade no processo produtivo da construção civil : um estudo de caso para edifícios altos**. Florianópolis, 1998. 103p. Dissertação, Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

MATTILA, Kris G.; ABRAHAM, Dulcy M.. Resource leveling of linear schedules using integer linear programming. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 124, n.3, p. 232-244, May/June 1998

MATTHEWS, Mark. Resource scheduling: incorporating capacity into schedule construction. **Project Management Journal**, n. 25, v. 2, p.44-54, June 1994.

MENDES JUNIOR, Ricardo.; HEINECK, Luiz Fernando. Preplanning method for multi-story building construction using line of balance. 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LEAN CONSTRUCTION - **Proceedings IGLC 1998**, <http://www.vtt.fi/rte/lean/>. 1998.

MENDES JUNIOR, Ricardo. Universidade Federal de Santa Catarina. **Programação da produção na construção de edifícios de múltiplos pavimentos**. Florianópolis, 1999. 221 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

NIELSSEN, Anni S.; THOMASSEN, Mikkel A.. How to reduce batch size. 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LEAN CONSTRUCTION - **Proceedings IGLC 2004**, <http://www.vtt.fi/rte/lean/>. 2004.

NKASU M. M.. COMSARS: a computer-sequencing approach to multi resource constrained scheduling. **International Journal of Project Management**, n. 12, v. 3, p. 183-192, August 1994.

PANZETER, Andrea Angela. **Estudo das relações entre os consumos de mão-de-obra e as quantidades físicas executadas**. Porto Alegre, 1988. 162p. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O'BRIEN, J.J.. **Scheduling handbook**. New York: McGraw-Hill Inc, 1969, p. 246-255.

O'BRIEN J.J.. VPM scheduling for high rise buildings. **Journal of the construction division**, 101, p. 895-905, 1975.

OHNO, Taiichi. **Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production**. Productivity Press, February, 1988.

OHNO, Taiichi; MITO, Setsuo. **Just-In-Time for Today & Tomorrow**. Productivity Press, September, 1988.

REDA, R. M.. RPM: repetitive project modeling. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 116, n. 22, p. 316-330, September 1990.

ROECH, L.S.. Network planning and velocity-diagrams. In housing construction. In: INTERNET CONGRESS, 3., 1972, Stockholm. **Proceedings ...** Stockholm: [1972?], v 2. p. 415-422.

ROSENBLATT M. J. ; LEE H. L.. Economic production cycles with imperfect production processes. **Institute of Industrial Engineers Transactions**, v. 18, n. 1, pp. 48-55, 1986.

RUSSEL, Alan D.; WONG. William C.. New generation of planning structure. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 119, n. 2, p. 196-214, June 1993.

SAKAMOTO, M.; HORMAN, M.J.; THOMAS, H.R.. A Study of the relationship between buffers and performance in construction. 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LEAN CONSTRUCTION - **Proceedings IGLC 2002**, <http://www.vtt.fi/rte/lean/>. 2002.

SANTOS, Aguinaldo dos. **Application of flow principles in the production management of construction sites**. 1999. 232 f. Tese (PhD) - School of Construction and Property Management, University of Salford, Inglaterra.

SANTOS, Aguinaldo dos; POWELL, James Alfred. Reduction of cycle time through smaller batch sizes in English and Brazilian construction sites. **Proceedings: CIB World Building Congress**, Wellington, New Zealand, 2nd to 6th April 23, 2001.

SANTOS, Aguinaldo dos, POWELL, James Alfred, SARCHAR, Marjan. Reduction of work-in-progress in the construction environment. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, Eight Annual Conference **Proceedings....** Brighton: University of Sussex, 2000.

SEPPÄNEN, Olli; KANKAINEN, Jouko. Empirical research on deviations In production and current state of project control. **Proceedings: IGLC-12**, Elsinore, Dinamarca, 2004.

SPEAR, Steven; BOWEN, H. Kent. Decoding the DNA of the Toyota production system. **Harvard Business Review**, September-October, pp. 97-106, 1999.

SHI, Jonathan J.; CHEUNG, O. S.; ARDITI, David. Construction delay computation method. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 127, n.1, p. 60-65, January/February 2001.

SHI, Jonathan J.; DENG, Zhongming. Object-oriented resource-based planning method (ORPM) for construction. **Internacional Journal of Project Management**, n. 18, p. 179-188, 2000.

SHINGO, S.. **Non-Stock Production: the Shingo system for continuous improvement**. Productivity Press, 1988.

STRADAL, O.; CACHA, Time space scheduling method. **Jornal of Construction Division**, n. 108, p. 445-457, 1982.

SUHAIL, Saad A.; NEALE, Richard H.. CPM/LOB: New methodology to integrate cpm and line of balance. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 120, n.3, p. 667-684, September 1994.

TOMMELEIN, I.D.. Pull-driven scheduling for pipe-spool installation: simulation of lean construction technique. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 124, n. 4, p. 279-288, July/August 1998.

TURBAN, E. *The line of Balance – A management by exception tool*. **Journal of industrial Engineering**, n. 19, p. 440-448, 1968.

WANG, Ching-Hwang; HUANG, Yu-Chun. Controlling activity interval times in LOB scheduling. **Construction Management and Economics**, n. 16, p. 5-16, 1998.

WRIGHT, T. Factors affecting the cost of airplanes. **Journal of Aeronautical Science**, n. 3, p. 122-128, 1936.