



## **REDUÇÃO DO TEMPO DE ATRAVESSAMENTO EM PROGRAMAÇÃO POR LINHA DE BALANÇO ATRAVÉS REDUÇÃO DA UNIDADE DE REPETIÇÃO SOBRE INFLUÊNCIA DO EFEITO APRENDIZADO: UMA VISÃO ENXUTA**

**Miguel T.G. Pacheco (1); Luiz F. M. Heineck (2)**

(1) Doutorado do Departamento de Engenharia Civil – Centro Tecnológico – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail: miguel@labeec.ufsc.br

(2) Departamento de Engenharia de Produção Mecânica – Centro de Tecnologia – Universidade Federal do Ceará, Brasil – e-mail: Freitas8@terra.com.br

### **RESUMO**

**Proposta:** A construção enxuta transpõe uma filosofia da produção manufatureira para a construção. A filosofia de produção enxuta criou-se no chão de fábrica e consiste de um conjunto 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 atravessamento. Este artigo objetiva usar a curva de aprendizado como modo de explicar como e porque funciona tal princípio enxuto no contexto da programação de obra por linha de balanço em edifícios repetitivos em altura. **Método de pesquisa/Abordagens:** Método dedutivo, simulações partindo de dados de produtividade coletados em obra. **Resultados:** O presente artigo 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 atravessamento na presença do efeito aprendido. **Contribuições/Originalidade:** Uso da curva de aprendizado para fornecer uma base teórica e matemática para explicar porque e como funciona um princípio da construção enxuta.

Palavras-chave: linha de balanço; construção enxuta; curva de aprendizado.

### **ABSTRACT**

**Proposal:** Lean Construction applies a production philosophy from manufacturing to building. Lean production was born on the factory floor and is an ensemble of empirically tested principles. The lack of a theory that explains why and how such principles work raises doubts if they can be applied to the construction environment. One of such principles is reduction of lot size as a way to reduce lead time and this paper aims to use the learning curve to explain how and why this lean principle works. **Methods:** Mathematical deduction and simulations from productivity data gathered from a building site. **Findings:** A mathematical demonstration explaining how in line of balance programming of repetitive high rise buildings a reduction of lot size understood as the choice of smaller repetition units implies a reduction in lead in the presence of the learning effect. **Originality/value:** The use of the learning curve to supply a theoretical base and a mathematical underpinning of why and how a lean construction principle works.

Keywords: line of balance; lean construction; learning curve.

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 A linha de balanço como método de programação que permite uma visão de fluxo**

O método de programação por Linha de Balanço (LdB) oferece uma alternativa ao Método do Caminho Crítico, particularmente adequada para a programação de obras repetitivas. A LdB permite enxergar a obra como um todo, apresentando uma visão de fluxo da obra. Esta visão de fluxo torna-a uma ferramenta gerencial útil para programar obras segundo o paradigma da construção enxuta.

Referências ao uso da linha de balanço para programação de obra no Brasil podem encontrar-se na literatura desde 1981 (MACEDO 1981), tornando-se frequentes desde noventa do século passado (HEINECK & PEIXE 1990; LOSSO & ARAUJO 1995; HEINECK 1996; COELHO & ALIA 1996) até à presente década (SANTOS & MENDES 2001; SANTOS & ALIA 2002; MORAIS & BARROS NETO 2005).

## **1.2 Linha de Balanço: Criação**

Três versões diferentes da criação da LdB podem encontrar-se na bibliografia. Uma versão data a criação da LdB em 1942 pela Marinha dos Estados Unidos tendo a Nacional Housing Authority no Reino Unido aplicado-a para programação de edifícios repetitivos na década de cinquenta do século XX (SUHAIL & NEALE 1994). 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. Uma terceira versão apresenta O'Brien (O'BRIEN 1969). 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 (NAVY OFFICE OF NAVAL MATERIAL, 1962).

## **1.3 A linha de balanço e aprendizado**

A linha de balanço programa o decorrer das atividades de forma continua num ritmo constante. Tais condições provocam o efeito aprendizado. A comprovação de ocorrência do efeito aprendizado em obra é referida no contexto nacional desde a dissertação pioneira de Panzeter (1988). A Bibliografia pesquisa os efeitos do aprendizado na programação por linha de balanço (ARDITI, TOKDEMIR & SUH 2001; LAM, LEE & HU 2001; COUTO & TEIXEIRA, 2002) defendendo a necessidade de integrar na programação por linha de balanço o efeito aprendizado.

## **1.4 Escolha da unidade de repetição em programação por linha de balanço**

Uma programação por linha de balanço começa com a escolha da unidade de repetição. Tal escolha define a dimensão do foco gerencial influenciando todo o escopo da programação. A unidade de repetição consiste numa subdivisão da obra a programar. Na programação de edifícios de pavimentos repetitivos multifamiliares, as escolhas mais comuns para unidade de repetição recaem sobre o pavimento e o apartamento.

Teoricamente, qualquer subdivisão tem validade. Pressupõe-se que a escolha da unidade de repetição não tem nenhuma influência sobre a programação e especificamente sobre a produtividade. No entanto, tal pressuposto não está provado e se a escolha da unidade de repetição for encarada com uma definição do tamanho de lote então pelo princípio enxuto redução do tempo atravessamento através da redução do tamanho de lote seria de esperar que a escolha da unidade de repetição tenha influencia sobre a produtividade.

# **2 Objetivo**

O presente artigo visa provar a relação entre duas variáveis (tempo de atravessamento e dimensão da unidade de repetição) na contingência de uma terceira (efeito aprendizado) na programação por linha de balanço de edifícios de pavimentos repetitivos multifamiliares. Pretende, desta forma, apresentar uma base teórica que explicita o funcionamento do princípio enxuto redução de tempo de atravessamento através da redução do tamanho de lote.

### 3 Metodologia

#### 3.1 Unidade de repetição e tempos de ciclo: definições

No presente artigo, por tamanho de lote entende-se a unidade de repetição escolhida. Cada unidade de repetição se encara como um lote gerencial de diferente dimensão. Por tempo de atravessamento entende-se o tempo necessário para que todas as atividades ocorram numa unidade de repetição. Ou seja, o tempo que decorre desde o início da primeira atividade em uma unidade de repetição até o término da última atividade nessa mesma unidade de repetição.

Utiliza-se como auxiliar mais duas definições: tempo de ciclo de atividade e tempo de atravessamento de atividade. O tempo de ciclo de atividade é definido como o tempo que demora a concluir uma unidade de repetição dentro de uma mesma atividade. O tempo de atravessamento de atividade é igual ao período que decorre do início da primeira unidade de repetição até ao fim da última unidade de repetição dentro da mesma atividade.

Ao provar que o tempo de ciclo de atividade reduz-se ao reduzir a unidade de repetição por ação do efeito aprendido, prova-se que cada atividade individualmente reduz o seu tempo de atravessamento que leva a uma redução do tempo de atravessamento da obra como um todo. Tal ocorre por dois motivos: primeiro porque cada atividade demora menor tempo a ser concluída; segundo porque cada atividade, concluída mais cedo permite que as atividades seguintes se iniciem mais cedo, criando um efeito cumulativo.

#### 3.2 Formalização matemática do problema

Segue-se a demonstração que o tempo de ciclo de atividade diminui com a redução da unidade de repetição para a mesma taxa de aprendizado. Desta forma esta demonstração relaciona três variáveis, a saber: taxa de aprendizado, tempo de ciclo de atividade e unidade de repetição. Considera-se a taxa de aprendizado constante em todas as atividades. Define-se como índice da unidade de repetição como um número inteiro resultado do quociente entre a quantidade total de trabalho presente numa atividade (como numerador) e um número inteiro (como denominador).

$$\frac{W}{n} = W_n \quad \forall n \in N, W \in R : W > 0 \quad (\text{eq.1})$$

Quanto maior este índice maior o número de repetições, menor a dimensão da unidade. Quanto maior este número, menor a dimensão da unidade de repetição. Analogamente, para determinar o tempo de ciclo de qualquer unidade de repetição:

$$\frac{T}{n} = T_n \quad \forall n \in N, T \in R : T > 0 \quad (\text{eq.2})$$

Em que n representa o número de repetições da unidade de repetição em questão e T representa o tempo de ciclo da atividade. Desta forma o pacote total de trabalho contido na atividade W demora o tempo T para a sua conclusão:



Gráfico 1 - Tempo de atravessamento de atividade sem efeito aprendido

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



Gráfico 2 - Tempo de atravessamento de atividade dividido por unidades de repetição sem efeito aprendido

Da equação anterior, tem-se:

$$t = \sum_{i=1}^n T_i \quad (\text{eq.3})$$

Por oposição, o efeito aprendido descreve um aumento constante na produtividade de qualquer atividade em que a produção de repetições de uma peça que decorra sem interrupções. Este aumento de produtividade processa-se a uma taxa constante. A cada nova unidade repetição produzida demorará menos tempo que a atividade anterior. Desta forma o tempo de ciclo da produtividade constante:



**Gráfico 3** - Tempo de atravessamento de atividade com produtividade constante

Apresenta uma redução por ação do efeito aprendido:



**Gráfico 4** – Redução do tempo de atravessamento de atividade devido ao efeito aprendido

Aplicando o efeito aprendido às unidades de repetição:



**Gráfico 5** – Tempos de ciclo de atividade sem efeito aprendido

Obtém-se o seguinte resultado:



**Gráfico 6** – Tempos de ciclo de atividade com efeito aprendido

Em que os diversos valores de t representam a redução progressiva de tempo de ciclo a cada nova repetição. Formalizando o raciocínio, para o calculo do tempo de ciclo de uma dada unidade de repetição sobre efeito aprendido utiliza-se a seguinte expressão:

$$T_m = \frac{T_n}{i^k} \quad \forall n, m \in N, \forall k \in R : k > 0 \wedge i > 0 \quad (\text{eq.4})$$

Da equação (eq.3) e (eq.4) resulta:

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{T_n}{i^k}, \forall n \in N, \forall k \in R : k > 0 \quad (\text{eq.5})$$

### 3.3 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:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{T_n}{i^k} \right) > \sum_{i=1}^{n+1} \left( \frac{T_{n+1}}{i^k} \right), \forall n \in N, \forall t, k \in R : k > 0 \wedge t > 0 \quad (\text{eq.6})$$

Pela equação (2) pode-se trocar o numerador da fração dentro do somatório pela seguinte expressão:

$$\sum_{i=1}^n \left[ \frac{T/n}{i^k} \right] > \sum_{i=1}^{n+1} \left[ \frac{T/(n+1)}{i^k} \right] \quad (\text{eq.7})$$

Trocando de lado um dos membros da inequação obtém-se:

$$\sum_{i=1}^n \left[ \frac{T/n}{i^k} \right] - \sum_{i=1}^{n+1} \left[ \frac{T/(n+1)}{i^k} \right] > 0 \quad (\text{eq.8})$$

Pondo a constante T em evidência em ambos os somatórios:

$$T * \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{(i^k * n)} \right] - T * \sum_{i=1}^{n+1} \left[ \frac{1}{(i^k * (n+1))} \right] > 0 \quad (\text{eq.9})$$

Pondo novamente T em evidência:

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

Destrançando o segundo somatório:

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

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

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

Reduzindo ao mesmo denominador as duas parcelas do novo somatório:

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

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 inequação 14.

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n * (n+1) * i^k} > \frac{1}{(n+1)^k * (n+1)} \quad (\text{eq.14})$$

O somatório compõe-se de uma série de n termos de valor decrescente. O ultimo termo do somatório apresenta o menor valor entre todos. 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 15 inequação) tem menor valor que o somatório original (à esquerda na inequação 15):

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n * (n+1) * i^k} > \sum_{i=1}^n \frac{1}{n * (n+1) * n^k} \quad (\text{eq.15})$$

Como os termos do somatório do membro direito da inequação têm todos o mesmo valor pode-se expressar a seguinte inequação da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n * (n+1) * i^k} > \frac{n}{n * (n+1) * n^k} \quad (\text{eq.16})$$

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:

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

Simplificando a inequação temos:

$$(n+1)^k > n^k \quad (\text{eq.18})$$

Simplificando a inequação temos:

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

Por transitividade assim prova-se verdadeira a equação 17:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n * (n+1) * i^k} > \frac{n}{n * (n+1) * n^k} > \frac{1}{(n+1)^k * (n+1)} \quad (\text{eq.20})$$

Que por sua vez prova a validade da equação 16:

$$\sum \frac{1}{n*(n+1)*i^k} > \frac{n}{n*(n+1)*n^k} > \frac{1}{(n+1)^k *(n+1)} \Rightarrow \sum \frac{1}{n*(n+1)*i^k} > \frac{1}{(n+1)^k *(n+1)} \quad (\text{eq.21})$$

Assim demonstrando a hipótese:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{T_n}{i^k} \right) > \sum_{i=1}^{n+1} \left( \frac{T_{n+1}}{i^k} \right) \quad (\text{eq.22})$$

### 3.4 Simulações

Apresentam-se agora simulações dos efeitos deste corolário, partindo de dados recolhidos dissertação de Edinaldo Favareto Gonzalez (2002) que programou e acompanhou a construção de nove blocos idênticos de habitação, usando a programação original e computando os efeitos do corolário para diferentes unidades de repetição com uma taxa de aprendizado de dez por cento segundo a curva de Wright.

**Tabela 1** - Redução do tempo de ciclo de atividade na concretagem

<b>Unidade de repetição</b>	<b>Tempo de atravessamento (dia)</b>	<b>Redução do tempo de atravessamento (dia)</b>	<b>Redução relativa do tempo de atravessamento</b>
Programação original	154	0	0
Bloco e Piso	135	19	1,14
Piso	129	25	1,19
Apartamento	115	39	1,33
Meio apartamento	101	53	1,52

A tabela 1 mostra como o corolário reduz o tempo de ciclo de atividade para a concretagem pela escolha de quatro unidades de repetição sucessivamente menores (bloco e piso, piso, apartamento e meio apartamento) partindo de uma taxa de aprendizado de dez por cento.

**Tabela 2** - Redução do tempo de atravessamento (total)

<b>Unidade de repetição</b>	<b>Tempo de atravessamento (dia)</b>	<b>Redução do tempo de ciclo (dia)</b>	<b>Redução relativa do tempo de ciclo</b>
Programação original	337	0	0
Bloco e Piso	306	31	1,10
Piso	304	33	1,11
Apartamento	277	60	1,18
Meio apartamento	255	82	1,24

A tabela 2 simula como o corolário aplicado a todas as atividades de uma programação reduz o tempo de atravessamento segundo as diferentes escolhas de unidade de repetição.

**Tabela 3 - Redução do tempo de atravessamento (total)**

<b>Unidade de repetição</b>	<b>Consumo médio de mão de obra (dia)</b>	<b>Redução do consumo médio de mão de obra (dia)</b>	<b>Redução relativa do consumo médio de mão de obra</b>
Programação original	337	0	0
Bloco e Piso	306	31	1,10
Piso	304	33	1,11
Apartamento	277	60	1,18
Meio apartamento	255	82	1,24

A tabela 3 simula o consumo médio de mão de obra para diferentes unidades de repetição para programações com tempo de atravessamento igual ao da obra original, mas com diferentes produtividades. Os ganhos em tempo de ciclo de atividade e de atravessamento de atividade para reduzir o consumo médio de mão de obra.

#### **4 Conclusões**

Demonstra-se a escolha da unidade de repetição em conjugação com o efeito aprendido influencia o tempo de ciclo de atividade na programação por linha de balanço como corolário do efeito aprendido. A demonstração mostra que a escolha de unidades de repetição de menor dimensão (que implicam um maior número de repetições) amplifica o efeito aprendido. Essa amplificação do efeito aprendido permite reduções no tempo de ciclo de atividade devido a uma produtividade acrescida. A redução do tempo de ciclo de atividade leva à redução do tempo de atravessamento de atividade. A redução do tempo de atravessamento de atividade leva à redução do tempo de atravessamento global, não só pela diminuição do prazo de termino das atividades, mas também porque permite que as atividades posteriores na programação se iniciem mais cedo. Teoricamente conclui-se que o efeito aprendido apresenta uma explicação possível porque e como funciona o princípio enxuto redução de tamanho de lote implica redução de tempo de ciclo.

Apresentaram-se simulações que apontam efeitos significativos teóricos da ação do corolário exemplificando-se como os mesmos poderia usar para reduzir tempo de ciclo ou reduzir consumo médio de mão de obra caso se opte por programar mantendo os prazos

#### **5 REFERÊNCIAS**

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.

COELHO, Renato de Quadros; VARGAS, Carlos Luciano Sant'Ana; HEINECK, Luiz Fernando Mahlmann. **Simulando a técnica da linha de balanço com os recursos de programas de gerenciamento de projetos**. Piracicaba, SP. 1996. 6p. In: Encontro Nacional de Engenharia da Produção, 16º, Piracicaba, SP, 1996. Artigo técnico.

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

GONZALEZ, E. F. **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.

HEINECK, Luiz Fernando Mahlmann. **Dados básicos para a programação de edifícios altos por linha de balanço.** Florianópolis, SC. 1996. p. 167-173. Congresso Técnico-Científico de Engenharia Civil, Florianópolis, 1996. 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.

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.

LOSSO, Iseu Reichmann; ARAÚJO, Hércules Nunes. **Aplicação do método da linha de balanço: estudo de caso.** Rio de Janeiro, RJ. 1995. 6p. ENTAC 95, Rio de Janeiro, 1995. Artigo técnico.

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

MACEDO, Mauro Lambert de. **A aplicação do método da linha de balanço na coordenação da execução de canteiros de habitações unifamiliares.** São Paulo, SP. 1981. p. 777-786. Simpósio Latino-Americano de Racionalização da Construção e sua Aplicação às Habitações de Interesse Social, São Paulo, 1981. Artigo técnico.

MORAIS, Cirilo M. M.; BARROS NETO, J. P.. **Um modelo computacional para desenvolvimento de sistema de controle de mão-de-obra através da utilização da técnica de linhas de balanço e da geração de cartões de produção.** São Paulo, SP. 2005. 1 CD-ROOM. SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2, 2005, São Paulo, SP.

NAVY OFFICE OF NAVAL MATERIAL, Line-of-balance technology, NAVEXOS, p.1853, 1962.

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

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.

SANTOS, Adriana P. L.; MENDES JR., Ricardo. **Planejando um conjunto de 77 residências utilizando a linha de balanceamento e last planner.** Fortaleza, CE. 2001. 14p. Simpósio Brasileiro de Gestão da Qualidade e Organização do Trabalho no Ambiente Construído, 2º, Fortaleza, CE, 2001. Artigo técnico.

SANTOS, Débora de Góis; BORGES, Valeska Prada; PRADO, Renato Lucio; HEINECK, Luiz Fernando M.. **O ensino de linha de balanço e variabilidade através de um jogo didático.** Foz de Iguaçu, PR. 2002. p. 767-776. In: IX Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. Artigo Técnico.

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.