



UM MODELO MATEMÁTICO PARA A GERAÇÃO DE PROGRAMAS DE ROTAÇÃO DE POSTOS DE TRABALHO PARA MINIMIZAÇÃO DE TRANSTORNOS MUSCULOESQUELÉTICOS POR LEVANTAMENTO E REPETIÇÃO DE MOVIMENTOS

Maria Fernanda Ramos Márquez

Ms(e) Engenheira de Produção, Universidade Federal de São Carlos
Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km 110 Bairro do Itinga, Sorocaba – SP, Brasil
mf_ramos91@hotmail.com

João Eduardo Silva

Prof. Dr. em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos
Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km 110 Bairro do Itinga, Sorocaba – SP, Brasil
jesilva@ufscar.br

RESUMO

Este artigo tem como objetivo propor um modelo matemático para determinar a alocação de trabalhadores a diferentes turnos e postos de trabalho, ao igual que as rotações necessárias a serem executadas em cada turno para prevenir transtornos musculoesqueléticos lombares por levantamento de cargas pesadas e por repetição de movimentos. A principal contribuição do estudo é a análise desses dois fatores em conjunto. O *stress* relacionado com tarefas de levantamento é medido por um indicador chamado *Job Severity Index* (JSI). A repetição de movimentos é avaliada por meio de uma restrição. Um estudo de caso foi realizado em uma empresa produtora de telhas de mármore, onde um programa de rotação de postos de trabalho, com um horizonte de uma semana, foi gerado para a área de produção. Os resultados demonstram a eficácia do modelo como ferramenta para gerar programas de rotação, obtendo resultados práticos e realistas que podem ser implementados.

PALAVRAS-CHAVE. Transtornos musculoesqueléticos (TME), programação linear inteira mista, Job Severity Index (JSI).

ABSTRACT

This article aims to propose a mathematical model to determine the allocation of workers to different shifts and jobs, along with the necessary rotations at every shift to minimize the risk of developing lumbar musculoskeletal disorders caused by lifting heavy loads and repetitive movements. The main contribution of this study is the analysis of these two factors together. The stress associated with lifting tasks is measured by an indicator called Job Severity Index (JSI). Repetitive movements are evaluated through a restriction. A case study was conducted in a company that produces marble tiles, where a job rotation program was generated for the production area, with a horizon of one week. The results demonstrate the effectiveness of the model as a tool to generate rotation programs, providing practical and realistic results that can be implemented in the company.

KEYWORDS. Musculoskeletal disorders, mixed integer linear programming, Job Severity Index (JSI).

1. Introdução

Com o avanço da ciência, da tecnologia e da industrialização, as tensões laborais e físicas mudaram dramaticamente, causando um desconforto progressivo. A demanda por esforços e a repetição de atividades ou posturas que são assumidas por períodos prolongados, têm sobrecarregado os sistemas físicos humanos, pois estes processos são inerentemente pouco naturais (KUMAR, 2001). Por sua vez, o corpo humano não está anatomicamente adaptado para suportar cargas que excedem seus próprios limites. A repetição de atividades no trabalho provou ser um forte fator de risco para o desenvolvimento de transtornos de trauma acumulativo.

Cada vez mais, as empresas desenvolvem alternativas de redesenho dos postos de trabalho para prevenir transtornos musculoesqueléticos, dentro das quais está a implementação de programas de rotação de postos de trabalho (TAYYARI; SMITH, 1997), modalidade de organização do trabalho que tenta reduzir a exposição a riscos ergonômicos dos trabalhadores por meio do incremento da variedade das tarefas realizadas por estes (HAIMS et al., 2002).

A rotação de postos de trabalho não só ajuda na prevenção de lesões, mas também é usada como mecanismo para fomentar a aprendizagem, melhorar a produtividade e os fatores psicossociais, dar emprego a pessoas com deficiências físicas, entre outras estratégias (ASENSIO-CUESTA, et al., 2009).

Em contraste, a eficácia das rotações reside em sua correta aplicação. Um programa onde, por exemplo, o balanceamento das cargas biomecânicas seja inadequado, pode trazer consequências desastrosas tanto para a saúde do trabalhador como para os resultados da empresa que o aplica. Igualmente, se o tempo de permanência de um trabalhador em um posto de trabalho é excessivo, ou a idoneidade de um trabalhador em um cargo não é levada em conta. (DAVIS; JORGENSEN, 2005).

Após a aplicação de um programa de rotação podem surgir dificuldades relacionadas com a resistência de trabalhadores antigos à mudança, a educação e formação de pessoal para os novos postos de trabalho, mudanças na estrutura de pagamento, custos diretos de implementação, e exposição de pessoal não treinado a situações de risco em ambientes industriais (MALINSKI, 2002). Por estes motivos, é importante realizar a execução do programa gradualmente, para poder identificar e solucionar problemas visando sua implantação definitiva. (ERIKSSON; ORTEGA, 2006).

É possível encontrar estudos da efetividade e dos benefícios das rotações de postos de trabalho baseados em múltiplas abordagens, que incluem a aplicação de questionários, entrevistas, acompanhamento do estado de saúde dos envolvidos, até o desenvolvimento de simulação de sistemas reais que, usualmente, propõem modelos generalizáveis (BAINES et al., 2004), dentro dos quais é possível encontrar a modelagem matemática. Na modelagem matemática, tenta-se minimizar ou maximizar uma função objetivo, a qual é representada por indicadores quantitativos que avaliam os níveis de criticidade dos critérios selecionados para a geração das rotações. No entanto, existem poucos trabalhos com a colaboração entre disciplinas de fatores humanos e de pesquisa operacional. Um ponto convergente entre essas duas áreas é a aplicação de modelos matemáticos que geram as rotações de postos de trabalho, a fim de minimizar os fatores de risco que afetam a saúde dos trabalhadores como o *stress*, o ruído, a iluminação, etc.

Assim, o objetivo deste artigo foi desenvolver um modelo de otimização, capaz de reduzir a ocorrência de transtornos musculoesqueléticos (TME) através da alocação adequada de trabalhadores em turnos e cargos, gerando as rotações de postos de trabalho. O modelo considera o número de turnos por dia (manhã, tarde e noite), o número de intervalos de rotação em cada turno (sendo um intervalo de rotação, o tempo que um trabalhador permanece em um mesmo cargo), a repetição dos levantamentos e a severidade do impacto lombar.

Os tipos de levantamentos executados em cada posto de trabalho são classificados em seis categorias: chão-pulso (C-P), chão-ombro (C-O), chão-alcance (C-A), pulso-ombro (C-O), pulso-alcance (P-A), ombro-alcance (O-A). A severidade do impacto lombar é medida com por meio do *Job Severity Index* (JSI), um índice que relaciona as proporções de levantamento, o peso levantado pelo trabalhador e o peso máximo que ele pode levantar dependendo do tipo de

levantamento, sexo, peso próprio, idade, força do braço e do ombro, altura do ombro, profundidade abdominal e resistência dinâmica. O modelo foi desenvolvido para atender as necessidades e especificações de uma empresa produtora de telhas de mármore, mas pode ser facilmente aplicado em outras organizações em processos semelhantes, através da variação dos parâmetros do modelo.

O trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta uma revisão da literatura relevante para a pesquisa; a seção 3 descreve o problema, incluindo premissas e limitações, assim como o modelo matemático proposto; a seção 4 apresenta o estudo de caso; a seção 5, os resultados computacionais e suas interpretações; e, por fim, a seção 6 resume as conclusões deste estudo.

2. Revisão da literatura: Rotação de postos de Trabalho

Vários estudos de caso realizados por Koike (1984) indicam que desde 1950 as empresas japonesas já implementavam rotações de postos de trabalho. Inspirados pelo sucesso econômico das empresas japonesas, também houve um crescente interesse no desenvolvimento e estudo da rotação de postos de trabalhos nos EUA (FARRANT, 1987).

Vários autores desenvolveram estudos sobre a adoção de práticas inovadoras de trabalho nas organizações, dentre as quais está a rotação de postos de trabalho (OSTERMAN, 1994; PIL e MACDUFFIE, 1996; GITTLEMAN et al., 1998). No entanto, estes trabalhos não explicitam a importância da rotação de postos de trabalho, mas simplesmente indicam sua utilização com foco na produtividade. Por essa época, Kusunoki e Numagami e (1998) demonstraram que a aplicação do método de rotação de postos de trabalho dificulta a restituição do conhecimento técnico existente. No entanto, os autores afirmam que, dada a natureza dos dados coletados, os resultados obtidos empiricamente são dificilmente generalizáveis.

Posteriormente, parte da pesquisa sobre rotação de postos de trabalho passou a investigar fatores relacionados com a saúde. Lesões lombares e do pulso são os assuntos mais abordados na rotatividade (ERIKSSON; ORTEGA, 2006). Frazer (2003), por exemplo, analisou o efeito da rotação de postos de trabalho sobre previsões para o risco de reportar dor lombar através do uso das abordagens *Low Back Pain Reporting (LBPR)* e *Time Weighted Average (TWA)*.

Bhadury e Radovilsky (2006) estudaram conjuntamente fatores econômicos e de saúde dos trabalhadores para a geração de programas de rotação. Neste trabalho, a rotação é realizada após levar em consideração fatores que influenciam o desenvolvimento da produção, a produtividade da empresa, a fadiga dos funcionários, a qualidade do produto e o custo.

Dentro das ferramentas de pesquisa operacional, a programação linear inteira mista, heurísticas e metaheurísticas têm sido utilizadas para a avaliação dos critérios de rotação de trabalho, segurança e saúde. Carnahan (2000), Chryssolouris e Subramaniam (2001) propuseram um método para a planificação dinâmica do trabalho, aproximando o problema a um *Scheduling Job Shop* e usaram algoritmos genéticos para resolvê-lo.

Tharmmaphornphilas e Norman (2004) descreveram um método quantitativo baseado em programação matemática para obter a duração apropriada dos intervalos de rotação, examinando e comparando os níveis de *stress* dos trabalhadores ao serem submetidos a postos de trabalho que demandam esforços por levantamento manual e exposição ao ruído durante diferentes períodos. Os mesmos autores, em 2007, abordaram a questão da rotação de funcionários, adotando um índice que avaliou a criticidade das tarefas de elevação, o *Job Severity Index (JSI)*, a fim de determinar o programa que diminui a probabilidade de lesão da parte inferior das costas devido ao levantamento. Os autores empregaram um modelo determinístico e propuseram uma heurística para solucionar a versão estocástica do problema de geração do programa de rotação.

Aryanezhad et al. (2009) desenvolveram um modelo multiobjetivo de programação linear inteira mista para determinar programas de rotação adequados para minimizar tanto a exposição ao ruído como o risco de desenvolver lesões lombares nos trabalhadores por levantamento.

Azizi et al. (2010) desenvolveram uma metodologia de rotação para mitigar o cansaço do trabalhador e explorar o efeito de intervalos de rotação em sua capacidade de aprender e esquecer. De acordo com essa abordagem, Fægria et al. (2010) centraram-se em explorar os

benefícios e desafios que estão ligados a melhorar a retenção do conhecimento entre os participantes da rotação de postos de trabalho. Michalos et al. (2010) desenvolveram uma ferramenta de rotação dinâmica de postos de trabalho usando aproximações hierárquicas de algoritmos multicritério e de tomada de decisão, com a finalidade de gerar alocações eficientes de trabalhadores ideais a tarefas de montagem.

As pesquisas mais recentes de rotação de postos de trabalho como meio de prevenção de TME também levam em conta métodos de solução e abordagens multicritério. O projeto dos programas de rotação é baseado não só em critérios ergonômicos, mas também em questões relacionadas à qualidade do produto e satisfação do empregado (ASENSIO-CUESTA et al., 2011). Asensio-Cuesta et al. (2012a) apresentaram um algoritmo genético para desenvolver programas de rotação para prevenir transtornos musculoesqueléticos em ambientes caracterizados por alta repetição de movimentos. O algoritmo proposto avaliou o nível de exposição ao movimento repetitivo de trabalhadores em um esquema de rotação usando o método *Occupational Repetitive Action* (OCRA).

Nesse mesmo ano, Asensio-Cuesta et al. (2012b) desenvolveram programas de rotação com o mesmo objetivo do trabalho anterior, porém adicionando mais um objetivo: otimizar o desempenho de produção, considerando as competências dos trabalhadores em suas alocações de trabalho com a utilização de um algoritmo genético. Ambos trabalhos foram conduzidos em uma linha de montagem de uma planta produtora de partes de automóveis.

Similarmente, Boenzi et al. (2013), propuseram um modelo matemático para atingir os mesmos objetivos que o algoritmo genético proposto por Asensio-Cuesta et al. (2012b). O modelo tentou maximizar a taxa de produção de estações de trabalho manuais, ao mesmo tempo em que reduz e equilibra a carga de trabalho humano dentro de limites aceitáveis, utilizando o método OCRA. O modelo foi aplicado em uma empresa italiana de montagem de assentos de carros.

Otto e Scholl (2013) propuseram uma heurística de suavização para o problema ergonômico de rotação de postos de trabalho, para balancear os riscos que todos os trabalhadores estão expostos. A heurística pode ser integrada com métodos de solução para calcular soluções iniciais e/ou como um procedimento de re-otimização local. Os autores fizeram experimentos computacionais com dados da indústria automotiva e compararam o desempenho da heurística com outros métodos propostos na literatura. A heurística provou ser rápida e eficaz.

Com foco na produtividade, Moreira e Costa (2013) propuseram um método de solução heurístico para o problema de geração de programas de rotação, que trabalha em três etapas principais: 1) obtenção de um conjunto (*pool*) de programas de rotação para um único período com diferentes metodologias heurísticas; 2) utilização de um problema inteiro misto para selecionar os “melhores” programas do *pool* e compor um planejamento de rotação completo e 3) melhoria pós-otimização baseado em vizinhança de programação inteira mista de larga escala. O objetivo foi minimizar o tempo de ciclo.

Na literatura é possível observar uma lacuna na implementação de métodos precisos para determinar as rotações mais adequadas de postos de trabalho, embora tenham sido propostos vários estudos, poucos têm considerado TME e são ainda mais escassas as pesquisas baseadas na medição da carga postural. Este trabalho aborda especificamente esses fatores.

3. Metodologia

O problema específico da pesquisa pertence ao conjunto de problemas de otimização combinatória, especificamente relacionado ao grupo de *Timetabling and Scheduling Problems* (Problemas de programação e sequenciamento), que tem como objetivo determinar a melhor configuração de um grupo de variáveis que, ao satisfazer certas restrições, minimizem ou maximizem a função objetivo. Para mais informações sobre essa natureza de problema, o leitor pode consultar Sigl et al. (2003).

A Figura 1 é uma representação adequada para o problema estudado. Nota-se que o problema pode ser facilmente dividido em duas etapas: alocação (designar trabalhadores a turnos

de trabalho e a postos de trabalho durante cada intervalo de rotação) e o sequenciamento (determinar a melhor sequencia de trabalho na troca de um intervalo de rotação a outro).

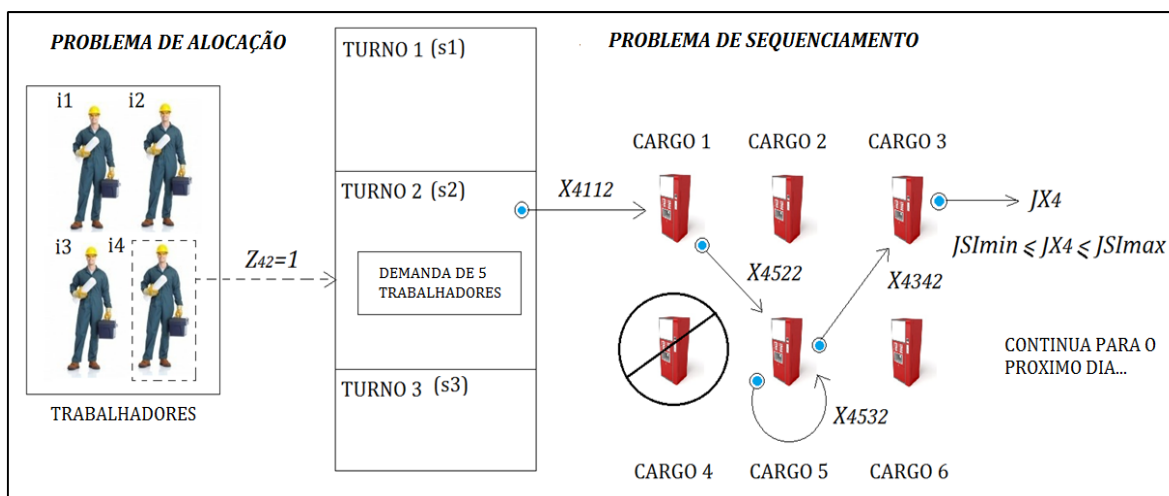


Figura 1. Descrição do problema de alocação e sequenciamento.

Não é suficiente só alocar trabalhadores a cargos, mas também é necessário encontrar a melhor sequência de trabalho, de todas as combinações possíveis, que minimizem os esforços por levantamento de peso dos trabalhadores e que evite que estes continuem executando um mesmo tipo de levantamento de maneira prolongada durante a jornada de trabalho.

Dois cenários foram comparados: no primeiro, foi gerado um programa de rotação de postos de trabalho visando minimizar o risco de desenvolvimento de lesões, onde trabalhadores têm que trocar de atividade a cada duas horas, isso para os três turnos de trabalho. No segundo cenário, trabalhadores foram alocados a postos de trabalho seguindo o padrão de designação da empresa, que consiste em não rotacionar apenas uma vez por semana.

Para avaliar a tensão por levantamento, é utilizado o indicador *Job Severity Index* (JSI). O JSI de um trabalhador i , que ocupa um cargo j qualquer, em um determinado intervalo de rotação t é calculado mediante a seguinte fórmula:

$$JSI_{ijt} = \left(\frac{WT_j \cdot b_{j1}}{CAP_{ij1}} + \frac{WT_j \cdot b_{j2}}{CAP_{ij2}} + \dots + \frac{WT_j \cdot b_{jl}}{CAP_{ijl}} \right) \cdot \frac{H_j}{HT}$$

Onde:

- WT_j Máximo peso de levantamento requerido pelo cargo j durante o dia de trabalho.
- CAP_{ijl} Capacidade ajustada do trabalhador i no cargo j exercendo um levantamento tipo l .
- b_{jl} Proporção de levantamentos tipo l no cargo j .
- H_j Horas de exposição ao cargo j .
- HT Horas totais trabalhadas, o que, para esse estudo, corresponde às horas totais trabalhadas em uma semana.

É importante ressaltar que segundo Liles (1986, pp. 66), “o JSI nunca deve estar acima de 1,5 para cada trabalhador, já que, do contrário, o risco de desenvolver lesões incapacitantes e permanentes aumenta significativamente”. Neste caso, é importante determinar a eficácia do modelo na geração de programas de rotação com restrições ergonômicas.

Os pressupostos do modelo são:

- ✓ Os trabalhadores estão distribuídos em vários turnos de trabalho, de mesma duração.

- ✓ Os trabalhadores têm diferentes habilidades e dificuldades. Assim, dois trabalhadores com a mesma sequência de rotações podem ter JSI diferentes.
- ✓ A duração dos intervalos de rotação é de 2 horas, pois segundo Tharmmaphornphilas (2004), este tempo é apropriado, pois “acumula quase todos os possíveis benefícios que podem ser obtidos a partir de rotação de trabalho e 2 horas também representa um intervalo de rotação de trabalho que é muito prático, do ponto de vista da possibilidade de implementá-lo em situações reais”.
- ✓ Os postos de trabalho podem não estar disponíveis em todos os turnos, por conta disso, o número de trabalhadores por turno não é sempre igual.

A seguinte notação será usada para descrever o modelo de programação linear inteira mista:

Índices e parâmetros

i	Índice dos trabalhadores.
j, k	Índice dos postos de trabalho.
t	Índice dos intervalos de rotação.
s	Índice de turnos de trabalho por dia.
l	Índice de tipo de levantamento.
a_{js}	Disponibilidade de cargos por turno (binário).
c_{ij}	Incremento no JSI do trabalhador i no posto de trabalho j .
b_{jl}	Cargo j com tipo de levantamento l (binário).

Variáveis

$Cmax$	Máximo JSI entre todos os trabalhadores
X_{is}	1 se o trabalhador i foi alocado no turno de trabalho s ; 0 caso contrário.
Z_{ijts}	1 se o trabalhador i é alocado no posto de trabalho j no intervalo de rotação t no turno de trabalho s ; 0 caso contrário.
u_{itl}	1 se o trabalhador i ocupa o cargo j com tipo de levantamento l ; 0 caso contrário.
Y_{it}	JSI do trabalhador i no final do intervalo de rotação t .
JSI_i	JSI final do trabalhador i .

A variável X_{is} evita que o trabalhador seja transferido de um turno a outro. Isso permite que em uma troca de intervalo de rotação, o trabalhador permaneça sempre no mesmo turno. X_{is} é usado como variável para o primeiro dia do horizonte de planejamento. Para os dias posteriores, os resultados obtidos do primeiro dia são tomados como parâmetros.

A função objetivo e as restrições do modelo são:

$$\text{Minimizar} \quad \alpha Cmax + \beta \sum_i \sum_t \sum_l u_{itl} \quad (1)$$

A função objetivo tenta minimizar a soma de dois elementos: o máximo JSI de todos os trabalhadores e a somatória da variável u_{itl} , que só recebe o valor de 1 quando um trabalhador passa de um cargo j com um tipo de levantamento l no intervalo de rotação t a um cargo k com um tipo de levantamento l no intervalo de rotação $t+1$. α e β representam as prioridades destes elementos, sendo que, para esse estudo ambas as prioridades são iguais.

Sujeito a:

$$Cmax \geq JSI_i \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_s X_{is} = 1 \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_j Z_{ijts} = X_{is} \quad \forall i, t, s \quad (4)$$

$$\sum_i Z_{ijts} = a_{js} \quad \forall j, t, s \quad (5)$$

$$Y_{it} \geq Y_{i,t-1} + \sum_j c_{ij} Z_{ijts} \quad \forall i, t, s \quad (6)$$

$$JSI_i \geq Y_{it} \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$\sum_j b_{jl} Z_{ijts} + \sum_k b_{kl} Z_{i,k,t+1,s} - u_{itl} \leq 1 \quad \forall i, t, l, s \quad (8)$$

$$Y_{it} \in \mathbb{R}^+; JSI_i \in \mathbb{R}^+; Z_{ijts} \in \{0,1\}; u_{itl} \in \{0,1\} \quad (9)$$

A restrição (2) determina qual é o máximo JSI de todos os trabalhadores; a restrição (3) estabelece que cada trabalhador deve ficar em só um turno de trabalho; a restrição (4) estipula que cada trabalhador, em cada intervalo de rotação de cada turno de trabalho, deve ocupar só um posto de trabalho, isso se o trabalhador foi alocado nesse turno de trabalho; a restrição (5) garante que, para cada posto de trabalho, em cada intervalo de rotação de cada turno, deve ser alocado só um trabalhador, isso se o posto de trabalho está habilitado nesse turno de trabalho; a restrição (6) indica que o JSI do trabalhador no intervalo de rotação atual, deve ser maior ou igual à soma do JSI atingido no intervalo de rotação anterior mais o incremento do JSI ao ser alocado em um posto de trabalho no intervalo de rotação atual; a restrição (7) indica que o JSI final de cada trabalhador deve ser maior ou igual ao JSI que o trabalhador atingiu no intervalo de rotação.

A restrição (8) é sobre os tipos de levantamento que os trabalhadores devem executar nos postos de trabalho. Esta restrição flexibiliza a troca de um trabalhador de um posto de trabalho a outro, ambos com ao menos um mesmo tipo de levantamento. No entanto, o ideal é que um trabalhador troque de um posto de trabalho para outro com diferentes tipos de levantamento. Finalmente, a restrição (9) diz respeito ao domínio das variáveis.

4. Descrição do caso estudado

O modelo proposto foi avaliado com os dados reais de uma empresa produtora de telhas de mármore. Os dados foram levantados na área de produção e as especificações da empresa foram implementadas no modelo matemático para poder testá-lo.

Na empresa são executadas atividades como o corte, manipulação e transporte de pedras de grande peso e volume; atividades que apresentam alto risco e ameaçam a saúde dos trabalhadores. Só no ano de 2012, 10 trabalhadores desenvolveram lesões lombares graves.

As medidas adotadas pela empresa para mitigar os riscos são indispensáveis para a prevenção de doenças relacionadas ao trabalho. No entanto, a aplicação de medidas preventivas deve ser controlada com mais rigor com suporte de métodos quantitativos que diminuam riscos aos trabalhadores.

O estudo na área de produção foi feito com 32 trabalhadores, 12 postos de trabalho e três turnos de trabalho (9:00 às 17:00; 17:00 às 01:00 e 01:00 às 09:00). Na tabela 1, são consignados os pesos que são levantados em cada posto de trabalho e na tabela 2, são apresentadas as proporções de levantamento de cada tipo, executadas em cada posto de trabalho.

POSTO DE TRABALHO	PESO A LEVANTAR (Kg)
Operador de retífica	0,0
Operador de esmerilhadora	14,5
Ajudante esmerilhadora	14,5
Operador cortadora mecânica 1	20,2
Ajudante cortadora mecânica 1	20,2
Operador cortadora mecânica 2	41,1
Operador cortadora manual 1	6,5
Operador cortadora manual 2	6,3
Operário de cortadora de ponte	30,8
Descartador de peças	7,3
Operador de pórtico	0,0
Operador de troqueladora	3,0

Tabela 1. Peso médio a levantar em cada cargo ou posto de trabalho. Os cargos com peso zero indicam que não há levantamentos nesses cargos.

POSTO DE TRABALHO	PROPORÇÃO DE TIPO DE LEVANTAMENTO					
	C-P	C-O	C-A	P-O	P-A	O-A
Operador de esmerilhadora	0,92	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Ajudante esmerilhadora	0,92	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Operador cortadora mecânica 1	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Ajudante cortadora mecânica 1	0,00	0,84	0,00	0,16	0,00	0,00
Operador cortadora mecânica 2	0,00	0,00	0,67	0,00	0,33	0,00
Operador cortadora manual 1	0,78	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00
Operador cortadora manual 2	0,78	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00
Operário de cortadora de ponte	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Descartador de peças	0,00	0,00	0,44	0,56	0,00	0,00
Operador de troqueladora	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 2. Proporções de tipo de levantamento de cada cargo

Embora tenha sido estabelecido que o horizonte de planejamento do programa de rotações fosse de uma semana, as otimizações são feitas por dia, e os resultados da otimização de um dia constituem dados de entrada para atualizar os valores do JSI do dia seguinte.

O modelo foi executado na plataforma CPLEX10.1, utilizando a linguagem para modelação GAMS com um tempo limite de 3.600 segundos. Os experimentos foram realizados em um notebook com processador Pentium® Dual-Core CPU T4400 – 2.20 GHz.

5. Resultados

Como mencionado anteriormente, na solução proposta, trabalhadores foram alocados a turnos de trabalho e a postos de trabalho em cada intervalo de rotação. Outra solução foi encontrada baseada no esquema que a empresa utiliza para fazer alocações de trabalhadores a postos de trabalho e os resultados foram comparados.

A capacidade do modelo de representar um sistema real e seu comportamento com um conjunto de dados foram avaliados.

Na Tabela 1, estão os resultados do teste feito ao alocar trabalhadores a turnos e a postos de trabalho com rotações diárias. Observa-se que o JSI máximo atingido no final da semana está abaixo de 1,5. Observe-se também que ao longo do horizonte de planejamento, diferentes trabalhadores atingiram o máximo JSI por dia, encontrando que efetivamente o modelo faz um balanceamento da carga de trabalho entre todos os operários. Observa-se também que a somatória da variável u_{ilt} em cada um dos dias foi igual a três (3), indicando que diariamente apresentaram-se três casos em que um trabalhador passou de um cargo com um tipo de levantamento l a outro cargo com esse mesmo tipo de levantamento.

Como foi mencionado anteriormente, dado que as alocações de trabalhadores a turnos foram feitas pelo modelo no dia 1 e para os dias restantes essas alocações foram tomadas como parâmetros, o modelo conseguiu atingir o ótimo em poucos segundos após o dia 2, no entanto, para o primeiro dia aos 3.600 segundos, o modelo alcançou um GAP de 2,27%.

Dia	JSI máximo	Trabalhador com máximo JSI	$\sum u$	GAP (%)	Tempo (Seg)
1	0,125	7	3	2,27	3.600
2	0,238	10	3	0	5,25
3	0,339	14	3	0	9,54
4	0,449	21	3	0	5,39
5	0,553	32	3	0	5,26
6	0,66	21	3	0	5,45
7	0,757	9	3	0	5,18

Tabela 3. Resultados do modelo para o horizonte de planejamento.

Para esclarecer como o modelo faz as alocações, na tabela 4 é apresentada a sequência de trabalho para o trabalhador N° 7. Este possui as maiores capacidades ajustadas por cargo e por tipo de levantamento. Na solução, ele foi alocado no terceiro turno de trabalho (de 1:00 a.m. até 9:00 a.m.) e rotacionado entre postos de trabalho com alta demanda física (e, portanto com alto JSI) para outros com demandas menores para assim balancear o esforço físico exigido cada dia.

Observe-se também que a sequência de trabalho varia dia a dia. No primeiro dia, por exemplo, nos intervalos de rotação 1, 2, 3 e 4 o trabalhador foi alocado nos postos de trabalho 6-9-5-11, respectivamente. Enquanto no segundo dia, a sequência de trabalho é totalmente distinta, pois foi alocado nos cargos 5-1-2-6 nos intervalos de rotação 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Ao respeito dos tipos de levantamento, durante um dia de trabalho, em raras ocasiões, o trabalhador foi trocado de um posto de trabalho para outro que demandava os mesmos tipos de levantamento.

Trabalhador 7		POSTO TRAB.	TIPO DE LEV.						JSI Cargo	JSI Acum.
DIA	I.R.		1	2	3	4	5	6		
1	1	6			x		x		0,054	0,054
	2	9	x						0,040	0,094
	3	5		x		x			0,031	0,125
	4	11							0,000	0,125
2	1	5		x		x			0,031	0,155
	2	1							0,000	0,155
	3	2	x	x					0,019	0,175
	4	6			x		x		0,054	0,228
3	1	6			x		x		0,054	0,282
	2	7	x				x		0,010	0,292
	3	11							0,000	0,292
	4	3	x	x					0,019	0,311
4	1	1							0,000	0,311
	2	4				x			0,028	0,339
	3	3	x	x					0,019	0,358
	4	11							0,000	0,358
5	1	6			x		x		0,054	0,412
	2	2	x	x					0,019	0,431
	3	6			x		x		0,054	0,485
	4	9	x						0,040	0,525
6	1	4				x			0,028	0,553
	2	2	x	x					0,019	0,572
	3	6			x		x		0,054	0,626
	4	2	x	x					0,019	0,645
7	1	5		x		x			0,031	0,676
	2	9	x						0,040	0,716
	3	5		x		x			0,031	0,747
	4	11							0,000	0,747

Tabela 4. Sequência de trabalho do trabalhador sete na semana.

O programa de rotação proposto poderá ser repetido semana a semana iniciando-se o *JSI* no primeiro dia da semana em zero.

Por outro lado, a metodologia de alocação utilizada pela empresa consiste em rotacionar os trabalhadores de turnos e de postos de trabalho semanalmente. Além da alta exposição à repetição de tarefas e ao levantamento de cargas pesadas que este tipo de designação gera, mudar trabalhadores de turnos com essa periodicidade provoca doenças físicas e psicológicas (FERNÁNDEZ-MONTALVO E PIÑOL, 2000). Seguindo esta estrutura, foi encontrada o melhor programa de trabalho para uma semana na empresa, na qual os trabalhadores ficam nos mesmos postos de trabalho e turnos nesses sete dias.

Sob as condições descritas anteriormente, o modelo encontrou que três trabalhadores apresentaram *JSI* acima do limite máximo estabelecido de 1,5, sendo o *JSI* máximo encontrado 1,61. Isso quer dizer que esses três trabalhadores encontram-se em alto risco de desenvolver TME lombares caso prossigam com essa agenda.

6. Conclusões

Esta pesquisa apresentou uma proposta de solução a um problema de saúde ocupacional em uma empresa do setor de construção civil, onde a ocorrência de doenças lombares nos trabalhadores é muito frequente pela repetição de tarefas e levantamento de cargas pesadas.

O modelo matemático apresentado, que simula o sistema real, mostrou ser uma ferramenta ajustável para a geração de programas de rotação de postos de trabalho com critérios ergonômicos, diversificando as tarefas desempenhadas pelos trabalhadores ao longo do dia de trabalho e minimizando o impacto lombar.

Para dar solução ao problema, foi utilizado o software GAMS como ferramenta de modelagem matemática. O modelo apresentou resultados que são substancialmente melhores do que o programa utilizado pela empresa atualmente, com resposta em tempos computacionais aceitáveis para a organização.

Este modelo limita seu escopo à redução da exposição dos trabalhadores a fatores de risco relacionados ao levantamento de cargas pesadas e a repetição de movimentos, portanto, como trabalhos futuros, podem ser propostos o desenvolvimento de modelos que levem em conta outros aspectos como o ruído, as vibrações, a iluminação, em conjunto com outras abordagens como o nível de aprendizagem, a produtividade, o cansaço e a motivação dos empregados.

Referências

- Aryanezhad, M. B., Kheirkhah, A.S., Deljoo, V., e Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J.** (2009), Designing safe job rotation schedules based upon workers' skills, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41, 193-199.
- Asensio-Cuesta, S., Diego-Más, J., Cremades-Oliver, L.V. e González-Cruz, M.** (2012a), A method to design job rotation schedules to prevent work-related musculoskeletal disorders in repetitive work. *International Journal of Production Research*, 50, 7467–7478.
- Asensio-Cuesta, S., Diego-Más, J., Canós-Darós, L. e Andrés-Romano, C.** (2012b). A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60, 1161–1174.
- Asensio-Cuesta, S., Diego-Más, J., González-Cruz, M. e Alcaide-Marzal, J.** (2009), Análisis De La Rotación De Puestos De Trabajo Desde Diferentes Perspectivas, *Anais do XIII Congresso Internacional de Ingeniería de Proyectos*.
- Azizi, N., Zolfaghari, S., e Liang, M.** (2010), Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations, *International Journal of Production Economics*, 123, 69-85.
- Baines, T., Mason, S., Siebers, P. e Ladbrook, J.** (2004), Humans: the missing link in manufacturing simulation? *Simulation Modeling, Practice and Theory*, 12, 515–526.
- Bhadury, J., e Radovilsky, Z.** (2006), Job rotation using the multi-period assignment model, *International Journal of Production Research*, 44, 4431-4444.
- Carnahan, B., Redfern, M. e Norman, B.** (2000), Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search, *Ergonomics*, 43, 543-560.
- Chryssolouris, G., e Subramaniam, V.** (2001), Dynamic scheduling of manufacturing job shops using genetic algorithms, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 12, 281–293.
- Eriksson, T., e Ortega, J.** (2006), The Adoption of Job Rotation: Testing the Theories, *Industrial & Labor Relations Review*, 59, 653-666.
- Fægri, T. E., Dybå, T., e Dingsøy, T.** (2010), Introducing knowledge redundancy practice in software development: Experiences with job rotation in support work, *Information and Software Technology*, 52, 1118–1132.
- Farrant, A. W.** (1987), Job Rotation is Important, *Supervision*, 49, 14-15.
- Fernández-Montalvo, J. e Piñol, E.** (2000), Horario laboral y salud: consecuencias psicológicas de los turnos de trabajo, *Revista de Psicopatología y Psicología Clínica*, Vol. 5, No. 3, PP. 207-222.

- Frazer, M., Norman, W., Wells, R. e Neumann, P.** (2003), The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain, *Ergonomics*, 46, 904-919.
- Gittleman, M., Horrigan, M. e Joyce, M.** (1998), “Flexible” workplace practices: evidence from a nationally representative survey, *Industrial and Labor Relations Review*, 52, 99-115.
- Haims M.C. e Carayon, P.** (2002), Work Organization Interventions, *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*, 3, 1441-1445.
- Jorgensen, M., Davis, K., Kotowski, S., Aedla, P. e Dunning, K.** (2005), Characteristics of job rotation in the Midwest US manufacturing sector. *Ergonomics*, 48, 1721-1733.
- Koike, K.** (1984), Skill Formation Systems in the U. S. and Japan: A Comparative Study. *The Economic Analysis of the Japanese Firm*, North Holland: Amsterdam pp. 47-75 in M. Aoki (ed.).
- Kumar, S.** (2001), Theories of musculoskeletal injury causation, *Ergonomics*, 44, 17-47.
- Kusunoki, K. e Numagami, T.** (1998), Interfunctional Transfers of Engineers in Japan: Empirical Findings and Implications for Cross Sectional Integration. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 45, 250–62.
- Liles, D. H.** (1986), The application of the job severity index to job design for the control of manual materials-handling injury, *Ergonomics*, 2, 65-76.
- Malinski, R. M.** (2002), Job Rotation in an Academic Library: Damned if you do and Damned if you don't!, *Library Trends*, 50, 673 – 680.
- Michalos, G., Makris, S., Rentzos, L., e Chryssolouris, G.** (2010), Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2, 153–160.
- Osterman, P.** (1994), How Common is Workplace Transformation and Who Adopts It?, *Industrial and Labor Relations Review*, 47(2), 173-88.
- Pil, F. K. e Macduffie, J. P.** (1996), The Adoption of High Involvement Work Practices, *Industrial Relations*, 35, 423-55.
- Sigl, B., Golub, M. e Mornar, V.** (2003), Solving Timetable Scheduling Problem by Using Genetic Algorithms. Tomado do portal da Universidade de Zagreb. Recuperado de <http://zemris.fer.hr/~golub/clanci/iti2003.pdf>
- Tayyari, F., e Smith, J. L.**, *Occupational ergonomics principles and applications*. London: Chapman and Hall, Londres, 1997 .
- Tharmmaphornphilas, W. N. e Norman, B.** (2004), A quantitative method for determining proper job rotation intervals, *Annals of Operations Research*, 128, 251-266.
- Tharmmaphornphilas, W. N. e Norman, B.** (2007), A methodology to create robust job rotation schedules, *Annals of Operations Research*, 155, 339–360.