

HEURÍSTICA PARA MINIMIZAÇÃO DO ATRASO TOTAL DE TAREFAS BASEADA EM CURVAS DE APRENDIZADO E ASPECTOS ERGONÔMICOS

HEURISTICS FOR MINIMIZING TOTAL TARDINESS BASED ON LEARNING CURVES AND ERGONOMIC ASPECTS

Luana Serafini* E-mail: luanaserafini@gmail.com
Michel J Anzanello* Email: anzanello@producao.ufrgs.br
Alessandro Kahmann* E-mail: alessandrokahmann@hotmail.com
*Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre

Resumo: Ambientes produtivos apoiados em Customização em Massa são caracterizados por elevada variedade de modelos de produtos e tamanhos reduzidos de lotes, exigindo rápida adequação dos recursos aos novos modelos em produção. Tais características dificultam a programação de tarefas que demandam procedimentos manuais com distintos níveis de complexidade e repetitividade. Este artigo propõe uma abordagem que integra curvas de aprendizado, ferramentas de programação de tarefas e aspectos ergonômicos com vistas ao sequenciamento de tarefas em equipes de trabalhadores. Para tanto, propõe-se a regra ATCE (*Apparent Tardiness Cost with Ergonomics Factors*), a qual busca simultaneamente reduzir o atraso total ponderado e a alocação sucessiva de tarefas com complexidades idênticas a uma mesma equipe (medido através do percentual de saturação). A aplicação da ATCE em duas linhas produtivas da indústria calçadista apresentou desempenho satisfatório do ponto de vista ergonômico, reduzindo o percentual de saturação, quando comparado ao resultado gerado pela regra original ATC (*Apparent Tardiness Cost*). Em termos produtivos, a função objetivo pouco aumentou em todos os casos.

Palavras-chave: Programação de tarefas. Trabalhadores paralelos não relacionados. Fatores humanos. Atraso total ponderado.

Abstract: Industrial environments that rely on Mass Customization are characterized by a high variety of product models and reduced lot sizes, demanding prompt adaptation of resources to a new product model. These scenarios make it hard to schedule tasks that require manual procedures with different levels of complexity and repetitiveness. This article integrates learning curves, scheduling heuristics and tasks ergonomic aspects aimed at sequencing tasks in teams of workers. For that matter, we propose the ATCE rule (*Apparent Tardiness Cost with Ergonomics Factors*), which simultaneously reduces the total weighted tardiness and the allocation of tasks with similar complexities to the same team (measured by percentage of saturation). When applied to two assembly lines in the footwear industry, the ATCE presented satisfactory performance in ergonomics terms by reducing the percentage of saturation compared to the results yielded by the ATC rule (*Apparent Tardiness Cost*). In addition, the objective function slightly increased in both cases.

Keywords: Scheduling. Unrelated parallel workers. Human factors. Total weight tardiness.

1 INTRODUÇÃO

A Customização em Massa (CM), estratégia recentemente adotada por diversos setores industriais, caracteriza-se pela produção de itens personalizados,

com lotes de tamanhos e custos reduzidos (DA SILVEIRA *et al.*, 2001; WATCHARAPANYAWONG *et al.*, 2011; FOGLIATTO *et al.*, 2012). Tais características produtivas acabam por dificultar a programação de lotes de produção (sequenciamento), visto que a CM exige uma rápida adequação de máquinas e trabalhadores aos diferentes procedimentos demandados por novos modelos de produtos, sujeitos a tarefas (lotes) com distintos níveis de complexidade, repetitividade e características físicas. Ainda, a adaptação dos trabalhadores às tarefas pode ocorrer de forma lenta e com geração de não-conformes, dificultando a estimativa do tempo demandado para a conclusão de um lote sob efeito do aprendizado do trabalhador. Desse modo, é de fundamental importância definir uma sequência adequada para o processamento dos distintos modelos, de maneira a atenuar fatores como fadiga, estresse e monotonia, os quais impactam diretamente no desempenho do trabalhador (CARNAHAN, 2000). Nesse contexto, a combinação de curvas de aprendizado, heurísticas de programação de tarefas e índices associados a aspectos ergonômicos representa uma alternativa eficiente para minimizar atrasos produtivos e reduzir impactos ergonômicos em sistemas que continuamente submetem trabalhadores a novos procedimentos (ANZANELLO; FOGLIATTO, 2011b).

Curvas de aprendizado são modelagens matemáticas capazes de monitorar o processo de adaptação de um trabalhador a tarefas repetitivas, permitindo a análise e programação de tarefas de produção (ANZANELLO; FOGLIATTO, 2007a, 2010, 2011a; JABER; SAADANY, 2011). Propiciam alocar trabalhadores a tarefas de acordo com suas habilidades e experiência (UZUMERI; NEMBHARD, 1998; ANZANELLO; FOGLIATTO, 2007a), bem como reduzir custos de produção (GONG; WANG, 2010). Tal ferramenta considera que o tempo demandado para a execução de uma tarefa diminui à medida que repetições são realizadas. Entre os modelos de curvas de aprendizado, destacam-se os modelos potenciais, exponenciais e hiperbólicos (ANZANELLO; FOGLIATTO, 2007b). Os modelos de curvas de aprendizado hiperbólico de três parâmetros, exponencial de três parâmetros e tempo constante foram comparados por Anzanello e Fogliatto (2005) na alocação de famílias de produtos a equipes de trabalhadores. A partir dos critérios analisados, tais autores demonstraram que o modelo hiperbólico apresenta desempenho superior aos outros modelos, com uma melhor caracterização do perfil de aprendizado. Similarmente, Nembhard e Uzumeri (2000) realizaram diversas

comparações entre 11 modelos de curvas de aprendizado, avaliando critérios de eficiência, estabilidade e número de parâmetros e esquecimento dos modelos; a curva hiperbólica de três parâmetros apresentou os melhores resultados.

A programação de tarefas, por sua vez, visa definir uma ordem de execução das mesmas de maneira a minimizar uma função objetivo, normalmente associada a tempo ou custo de produção (PINEDO, 2008). Embora exista ampla disponibilidade de sistemáticas de programação de tarefas na literatura, pesquisas integrando-as a aspectos ergonômicos e de aprendizado são ainda incipientes. Biskup (1999) foi o pioneiro na análise da influência do efeito do aprendizado na programação das tarefas, buscando minimizar o tempo ponderado para conclusão de um conjunto de tarefas em uma única máquina, enquanto que Anzanello e Fogliatto (2010) integraram curvas de aprendizado a heurísticas de sequenciamento. Tal lacuna torna oportuno o desenvolvimento de heurísticas que comportem a inserção de fatores ergonômicos e contemplem aspectos de aprendizado dos trabalhadores.

Este artigo propõe um método que visa reduzir simultaneamente o atraso total ponderado para conclusão de um conjunto de tarefas e a saturação de tarefas de mesmo nível de complexidade designadas às equipes de trabalhadores em ambientes de CM. Para tanto, fundamenta-se na integração de curvas de aprendizado com heurísticas de programação de tarefas e aspectos ergonômicos. A sistemática proposta é composta por três etapas: (i) utilização de curvas de aprendizado para estimar o tempo de processamento de lotes de produção com diferentes tamanhos e níveis de complexidade; (ii) alocação das tarefas às diferentes equipes de trabalhadores, primando pelo equilíbrio no tempo de operação acumulado e complexidade das tarefas alocadas a cada equipe, e (iii) ordenamento das tarefas alocadas a cada equipe com vistas à minimização do atraso do processamento de lotes com diferentes datas de entrega por meio da regra ATCE (*Apparent Tardiness Cost with Ergonomics Factors*) aqui proposta. Tal ordenamento, operacionalizado através de adaptação na regra ATC (*Apparent Tardiness Cost*) de Rachamadugu e Morton (1982), visa ainda reduzir o acúmulo de tarefas de mesmo nível de complexidade em curtos intervalos de produção, buscando alternar as complexidades das tarefas na sequência sugerida. Nas proposições deste artigo, as equipes são vistas como máquinas paralelas não relacionadas, visto que os tempos demandados para execução em uma equipe não são influenciados por outra.

A heurística é aplicada em um processo de fabricação de calçados composto por 2 equipes de trabalhadores e 198 lotes de tamanhos e complexidades distintas. A eficiência do método ATCE é avaliada por meio da comparação de seus resultados com a regra ATC em duas frentes: valor da função objetivo de minimização do atraso ponderado, e do percentual de saturação (ocorrência de tarefas de mesma complexidade alocadas consecutivamente). Valores reduzidos para a função objetivo e percentual de saturação são desejados.

A principal contribuição deste artigo está na proposição de uma sistemática inédita de programação de tarefas que introduz aspectos ergonômicos em ambientes de CM, a ATCE; tal abordagem reduz níveis de repetibilidade de procedimentos idênticos ou semelhantes, os quais usualmente induzem a lesões por esforço repetitivo e morosidade na execução da tarefa. Outra contribuição está na sistemática de distribuição dos lotes às equipes, a qual é balizada pelo monitoramento do tempo acumulado de trabalho e nível de complexidade das tarefas alocadas a cada equipe. Espera-se, de tal forma, paridade na carga de trabalho das equipes e redução nas penalizações por atraso na entrega das tarefas.

Este artigo está estruturado como segue. Na seção seguinte são apresentadas o referencial teórico que embasa este estudo. Na terceira seção é detalhado o método proposto, explicando sua operacionalização. Na quarta seção são apresentados os resultados da aplicação do método em uma empresa da indústria calçadista. Na quinta seção são mostradas as conclusões oriundas deste estudo, assim como propostas para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta os fundamentos de programação de tarefas e a influência dos fatores humanos na programação.

2.1 Programação da produção em máquinas paralelas não relacionadas

A programação de tarefas em máquinas paralelas não relacionadas (ou equipes distintas de trabalhadores, neste estudo) é considerada um dos problemas de mais complexa solução em sequenciamento (YU *et al.*, 2002; ZHANG *et al.*, 2012). Nesse tipo de arranjo não existe associação entre as máquinas, sendo o

tempo de processamento de uma tarefa dependente exclusivamente da máquina na qual a mesma é processada (PINEDO, 2008; VALLADA; RUIZ, 2011). Tal condição representa de forma satisfatória atividades executadas por trabalhadores; nesse caso, cada trabalhador é visto como uma máquina e a velocidade de execução das tarefas de um trabalhador não está associada ao ritmo do outro (ANZANELLO; FOGLIATTO, 2010).

Problemas de sequenciamento em máquinas paralelas não relacionadas são abordados com o objetivo de alocar tarefas, otimizando uma função de mérito. As abordagens propostas pela literatura usualmente buscam minimizar uma ou mais funções objetivo como *makespan* (tempo total da programação de tarefas) (GAIRIG *et al.*, 2007; FANJUL-PEYRO; RUIZ, 2011, 2012), tempo total de conclusão (HSU *et al.*, 2011), tempo de atraso e adiantamento total (VALLADA; RUIZ, 2012; LEE *et al.*, 2012) e tempo de atraso total ponderado (ZHOU *et al.*, 2007; MÖNCH, 2008; LIN *et al.*, 2011), entre outros. A minimização do atraso total ponderado, função objetivo utilizada neste trabalho, foi abordada por Liaw *et al.* (2003), propondo um algoritmo *Branch-and-bound* na obtenção de uma solução ótima em máquinas paralelas não relacionadas. Kim *et al.* (2003) compararam quatro heurísticas para o problema em cenários afetados por *setup*. Similarmente, Logendran *et al.* (2007) abordaram o problema desenvolvendo seis algoritmos distintos com base na busca *Tabu* para a identificação do melhor sequenciamento.

Regras de despacho, por sua vez, constituem-se em importante recurso na solução de problemas de sequenciamento devido à facilidade de aplicação em funções- objetivo complexas (CHEN, 2012). Rachamadugu e Morton (1982) propuseram a regra de despacho conhecida por Custo Aparente do Atraso (ATC), originalmente desenvolvida para arranjos de máquina única. A regra ATC combina as regras de despacho WSPT - *Weighted Shortest Processing Time first* (priorização dos trabalhos com menores tempos de processamento ponderados) e MS - *Minimum Slack first* (priorização dos trabalhos com menores folgas). Seu funcionamento é baseado no cálculo do índice de prioridade para cada tarefa ainda não processada, dada pela equação (1):

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \times \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{k\bar{p}}\right) \quad (1)$$

onde p_j , d_j e t representam, respectivamente, o tempo de processamento e a data de entrega da tarefa j , com j variando entre 1 e J (total de tarefas), e o instante de tempo de término do processamento da última tarefa processada. A penalidade por unidade de tempo de atraso da tarefa j é representada por w_j , sendo k um parâmetro de escala obtido de forma empírica de acordo com o cenário em análise e \bar{p} a média dos tempos de processamento das tarefas ainda não processadas (PINEDO, 2008).

Desdobramentos da regra ATC têm sido propostos para sequenciamento em máquinas paralelas, podendo facilmente ser modificada para problemas de máquinas paralelas não relacionadas (LAMOTHE *et al.*, 2012; KAPLAN *et al.* 2012). Lin *et al.* (2011) compararam duas heurísticas em problemas de atraso ponderado: HEU-II (modificação da heurística HEU proposta por Liaw *et al.*, 2000) e ATC-I (adaptada para máquinas paralelas não relacionadas); em todas as situações, a regra ATC-I superou a regra HEU. Kaplan e Rabadi (2012) avaliaram as heurísticas ATC Modificada (MATC) e *Simulated Annealing* (SA) na minimização do tempo de atraso total ponderado em problemas de sequenciamento de reabastecimento aéreo. Os resultados mostram que MATC tem maior probabilidade de superar SA, principalmente quando o tamanho do problema aumenta, embora apresente menor desempenho em termos de desvio da solução ótima para problemas menores. Por fim, Lamothe *et al.* (2012) propuseram duas extensões da ATC para trabalhar com sequenciamento de máquinas paralelas em um laboratório de controle da indústria farmacêutica.

Tendo em vista a necessidade de considerar tempos de preparação na programação de tarefas, Lee e Pinedo (1997) apresentaram uma modificação da regra ATC, conhecida como Custo Aparente do Atraso com *Setups* (ATCS). A regra foi desenvolvida para sistemas de máquina única, e seu índice de priorização é representado pela equação (2).

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \times \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{k_1 \bar{p}}\right) \times \exp\left(-\frac{s_{lj}}{k_2}\right) \quad (2)$$

Os parâmetros p_j , d_j e \bar{p} são os mesmos utilizados pela regra ATC; s_{lj} representa o tempo de preparação ao passar-se da tarefa l para a tarefa j , e k_1 e k_2 são parâmetros determinados de forma empírica. A regra ATCS é uma das mais

poderosas regras de despacho compostas na literatura e tem sido aceita como padrão em diversas aplicações práticas de sequenciamento (CHEN, 2012).

2.2 Fatores humanos em procedimentos de programação de tarefas

A produção em linhas de montagem manuais visa atender aos elevados níveis de produtividade demandados, mantendo-se as exigências de trabalho dentro da capacidade física humana. Quando esse limite é ultrapassado, percebem-se consequências sobre o desempenho dos trabalhadores na execução de tarefas, como fadiga, reduzida autonomia, falta de motivação e monotonia, entre outros (LODREE *et al.*, 2009). A variabilidade dos fatores humanos podem ser controlada pela análise e monitoramento dos fatores ergonômicos de risco, os quais dependem do espaço físico, disposição dos equipamentos e das condições do ambiente de trabalho. Além disso, tal variabilidade depende também da complexidade dos procedimentos, nível de detalhes de um produto, repetitividade e duração das tarefas, principalmente quando se exige dos trabalhadores postura específica ou aplicação de força (KIM; JUNG, 2003; OTTO; SCHOLL, 2011).

A complexidade da tarefa influi no desempenho do trabalhador em vários aspectos, como capacidade mental, aquisição de habilidades, erros de trabalho e fadiga (HAM *et al.*, 2012). Nembhard e Osothsilp (2002) estudaram o efeito da complexidade da tarefa a partir da observação dos parâmetros individuais de aprendizagem e esquecimento. Concluíram que o aumento da complexidade incrementa a variabilidade das taxas individuais de aprendizagem e esquecimento, consequentemente impactando no desempenho dos trabalhadores ao executar tarefas com diferentes níveis de complexidade.

Os Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT), considerados um dos problemas mais graves relacionados à saúde do trabalhador, resultam em redução da produtividade e aumento dos índices de absenteísmo. Possuem como causa as variações de fatores físicos, como intensidade, repetitividade e duração da tarefa (WINKEL; MATHIASSEN, 1994; BERNARD, 1997; LI; BUCKLE, 1998; MICHALOS *et al.*, 2010). A duração das tarefas e seu nível de detalhes também impactam diretamente na fadiga, sendo entendida como a diminuição da capacidade funcional de um ou mais órgãos, ocasionando uma sensação de cansaço e desconforto corporal associado a atividades prolongadas

(FINKELMAN, 1994; ENOKA, 1995). Além disso, atividades prolongadas levam à diminuição da capacidade de produção e perda de motivação dos trabalhadores para realização das tarefas (GRANDJEAN, 1998). A repetitividade, considerada como um dos principais causadores dos DORT, pode ser avaliada quanto sua presença ou ausência através da medida da exposição dos trabalhadores a esse fator, sendo classificada como severidade baixa ou alta (LATKO *et al.*, 1999). Além disso, tarefas altamente repetitivas ocasionam o agravamento da monotonia e estresse do trabalhador, podendo resultar na redução do desempenho, insatisfação e acidentes de trabalho (SILVA; COIMBRA, 1980; BATIZ *et al.*, 2009; AZIZI *et al.*, 2010).

A sequência em que as tarefas são executadas influenciam diretamente no desempenho do trabalhador, impactando no desempenho individual e organizacional, permitindo a redução da fadiga, estresse e riscos associados a lesões (CARNAHAN *et al.* 2000). Lodree *et al.* (2009) apontaram estudos na literatura que mostram-se promissores na busca pela integração de sequenciamento com fatores humanos, classificando-os em três principais áreas: tempo de processamento dependente do sequenciamento, efeitos de aprendizagem e taxa de modificação das características das atividades. As sistemáticas sugerem alternativas de sequenciamento de tarefas que consideram o bem estar do trabalhador, embora priorizem os aspectos produtivos aos ergonômicos em sua grande maioria.

Aravindrakrishna *et al.* (2009) incorporaram a avaliação da fadiga ao sequenciamento de tarefas em uma linha de produção do tipo *flowshop*. Tal método inseriu fatores humanos em modelos de programação de tarefas clássicos, a partir dos quais desenvolveram uma heurística com base em Algoritmos Genéticos. Schomburg (2011) abordou a programação de tarefas considerando características humanas na redução de DORT em arranjos de máquina única. Utilizou um método ergonômico de avaliação corporal para quantificar o nível de atividade osteomuscular do trabalhador durante o processamento de tarefas, onde a pontuação obtida era utilizada para definir o sequenciamento das tarefas. O método proposto supõe que a data de entrega seja considerada infinita para todas as tarefas a serem processadas, o que limita sua aplicação em diversos cenários produtivos. Recentemente, Santos e Anzanello (2012) propuseram uma sistemática integrando curvas de aprendizado, ferramentas de programação de tarefas e índices de penosidade dos trabalhadores. O método, adaptado de Pinedo (2008), objetiva

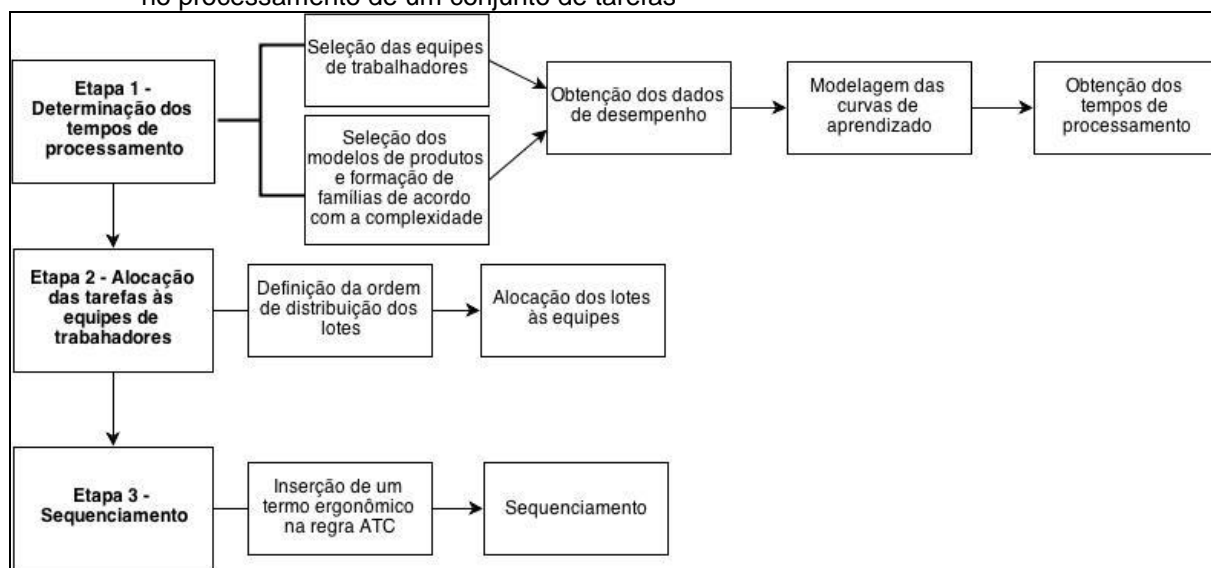
minimizar simultaneamente o atraso e adiantamento do conjunto de tarefas em relação a uma data comum de entrega, integrando a heurística a fatores ergonômicos.

O restante das abordagens foca-se nos métodos de rotação de trabalho, entendidos como a rotação de trabalhadores em diferentes postos de operação, os quais exigem diversas habilidades e responsabilidades (AZIZI *et al.*, 2010; THARMMAPHORNPHILAS; NORMAN, 2004). A técnica auxilia na formação de trabalhadores com elevado nível de conhecimento (ERIKSSON; ORTEGA, 2006), além de contribuir com a diminuição da monotonia (MICHALOS *et al.*, 2010) e aumento da satisfação do trabalhador (NEWNAM *et al.*, 2006). No entanto, os métodos de rotação de trabalho usualmente negligenciam indicadores produtivos. Ademais, possuem como foco principal fatores físicos e de segurança, pouco abordando fatores humanos, os quais são influenciados pelas decisões de sequenciamento (LODREE *et al.*, 2009).

3 METODOLOGIA

O método proposto integra curvas de aprendizado a ferramentas de sequenciamento e indicadores ergonômicos, distribuindo e sequenciando tarefas em arranjos de trabalhadores paralelos não relacionados. A operacionalização é dividida em três etapas, ilustradas na Figura 1, onde (i) curvas de aprendizado são utilizadas na determinação de tempos de processamento dos lotes de produção com tamanhos e complexidades distintas; (ii) tarefas são alocadas às equipes de trabalhadores, balanceando o nível de complexidade e carga de trabalho das tarefas designadas a cada equipe; e (iii) sequenciamento das tarefas alocadas às equipes, através da heurística ATCE, com vistas à minimização do atraso total ponderado dos lotes de produção, bem como a atenuação da ocorrência sucessiva de lotes de mesma complexidade dentro de uma equipe. O método pressupõe que todos os lotes estão disponíveis para processamento no instante de tempo zero, a divisão dos lotes não é permitida, e dois ou mais lotes não são processados simultaneamente pela mesma equipe. Os passos são detalhados na sequência.

Figura 1 - Etapas do método de programação de tarefas na minimização do atraso Total Ponderado no processamento de um conjunto de tarefas



Etapa 1 - Determinação dos tempos de processamento de tarefas através de curvas de aprendizado

Essa etapa inicia com a seleção de equipes de trabalhadores e modelos de produtos para coleta de dados de desempenho e modelagem dos mesmos através das curvas de aprendizado. Os modelos de produtos analisados devem apresentar elevada demanda por customização, e suas características devem permitir a formação de famílias de produtos. Três indicadores, considerados relevantes em termos ergonômicos, têm seu impacto no desempenho do trabalhador: (i) complexidade da tarefa, que pode ser obtida através da avaliação por especialistas de processo; (ii) repetitividade, a qual classifica tarefas com um ciclo entre 30 segundos e 1 minuto como intermediárias, enquanto que tarefas com um ciclo acima de 1 minuto são consideradas de baixa repetitividade (SILVERSTEIN *et al.*, 1987; KEYSERLING *et al.*, 1991; LATKO *et al.*, 1999); e (iii) características físicas do produto, que incluem número de componentes, robustez das partes, presença de partes móveis, entre outros. Os indicadores são quantificados de acordo com seu grau de dificuldade utilizando a escala numérica de 1 a 3 (mais elevado, maior a complexidade). Por meio de técnicas de clusterização aplicadas através de software estatístico, agrupam-se produtos com características similares em famílias, reduzindo a quantidade de dados a serem coletados. As famílias formadas são representadas por $f = 1, \dots, F$.

As equipes devem ser formadas por trabalhadores familiarizados com os procedimentos de execução das tarefas e com baixa rotatividade externa, evitando dessa maneira modificações no perfil de desempenho da equipe durante a análise. A representação das equipes é dada por $i = 1, \dots, I$.

Na sequência, os dados de desempenho são coletados por meio do cruzamento das F famílias de produtos com as I equipes de trabalhadores. Monitora-se a execução de operações gargalo (maior dificuldade), através da contagem do número de unidades produzidas em cada intervalo de tempo. A coleta é iniciada nos primeiros ciclos de fabricação do produto e encerrada quando variações no padrão de desempenho não são mais detectadas, atingindo o estado estacionário de produtividade.

Os dados de desempenho são ajustados à curva de aprendizado hiperbólica através de rotinas de regressão não-linear disponíveis em aplicativos de análise estatística. O modelo hiperbólico, proposto por Mazur e Hastie (1978), é utilizado por apresentar alta capacidade de monitoramento do processo de aprendizado, conforme Anzanello e Fogliatto (2005), e representado na equação (3)

$$y = k \frac{(x+p)}{(x+p+r)} \quad (3)$$

onde y representa o desempenho do trabalhador em termos de unidades produzidas após x unidades de tempo de prática acumulada. O parâmetro k (unidades/min) consiste no patamar máximo de desempenho a ser atingido, r (min) indica a taxa de aprendizado (tempo de operação necessário para que o trabalhador atinja a metade do patamar de desempenho), e p (min) quantifica o efeito da experiência prévia do trabalhador na execução da tarefa (NEMBHARD; UZUMERI, 2000).

Sendo assim, têm-se, para cada família f e equipe i , parâmetros k_{if} , p_{if} e r_{if} . Através das mensurações repetidas de desempenho de uma mesma família e equipe, obtêm-se os parâmetros médios, \bar{k}_{if} , \bar{p}_{if} e \bar{r}_{if} , a partir dos quais é possível gerar F conjuntos de curvas, contendo I curvas em cada conjunto. As curvas representam o perfil de desempenho de cada equipe ao processar produtos de determinada família e são utilizadas para estimar o tempo de processamento p_{ij} demandado pela equipe i para completar a tarefa j , ou seja, o tempo para processar

a totalidade de unidades no lote. Tal tempo é estimado através da integração da área sob a curva de aprendizado.

Etapa 2 – Alocação das tarefas às equipes de trabalhadores

A alocação das tarefas (lotes) às equipes de trabalhadores é realizada em dois estágios: (i) definição de uma ordem inicial dos lotes para distribuição, e (ii) alocação das tarefas às diferentes equipes de trabalhadores com base no nível complexidade das mesmas.

Essa etapa inicia com o agrupamento de tarefas com datas comuns de entrega, gerando blocos de datas de entrega. Os blocos são formados para que os estágios 1 e 2, descritos na sequência, sejam aplicados dentro de cada bloco (ao invés de aplicá-los no conjunto total de tarefas em etapa única). Dessa forma, as tarefas são distribuídas de maneira equilibrada entre as equipes, evitando a alocação de tarefas com uma mesma data de entrega a apenas uma equipe; isso faz com que se minimize a ocorrência de multas por atrasos de entrega. Os blocos são então ordenados em ordem crescente de datas de entrega.

Estágio 1 – Definição da ordem de distribuição dos lotes

A ordem de distribuição dos lotes é realizada com base na regra de priorização da Diferença Decrescente no Tempo de Processamento dos Lotes, proposta por Adamopoulos e Pappis (1998). Para cada lote j , são definidas as duas equipes com o menor tempo de processamento e calculada a diferença absoluta entre esses tempos. As tarefas são então ordenadas em ordem decrescente de D_j , conforme equação (4).

$$D_j = |p_{Aj} - p_{Bj}| \quad (4)$$

Estágio 2 – Alocação dos lotes às equipes de trabalhadores de acordo com a complexidade e carga de trabalho alocada a cada equipe

A alocação dos lotes às equipes deve equilibrar o número de tarefas de distintas penosidades, bem como a carga de trabalho atribuída (medida em unidades de tempo). Para tanto, modifica-se a regra do Tempo de Processamento proposta por Adamopoulos e Pappis (1998), inserindo um parâmetro que monitora o

número de tarefas de determinada complexidade já alocadas a uma equipe. A regra sugerida apoia-se em uma alocação primária e uma alocação secundária.

A alocação primária é orientada com base em dois parâmetros limites, $H = [N/I]$ e $C = [C_v/I]$, onde N refere-se ao número total de lotes a serem alocados, I ao número de equipes analisadas e C_v ao número total de lotes de complexidade v . O primeiro, H , correspondente ao limite superior do número de lotes a serem alocados a cada equipe, e visa evitar sobrecarga de algumas equipes e ociosidade em outras. O segundo, C , refere-se ao limite superior do número de lotes de uma mesma complexidade alocados a uma mesma equipe, equilibrando os níveis de dificuldade de tarefas alocadas e impactos ergonômicos por conta da elevada repetição de tarefas de uma mesma natureza.

O primeiro lote a ser alocado é destinado à equipe com o menor p_{ij} , sendo o procedimento repetido para todos os lotes e monitorado pelos limites H e C . Se H ou C forem excedidos, o lote é temporariamente alocado a uma equipe fictícia. Na alocação secundária, os lotes destinados à equipe fictícia são alocados às equipes reais com base no tempo acumulado de processo e monitorado por C , evitando-se a alocação sucessiva de lotes de uma mesma complexidade a apenas uma equipe. O tempo de processamento p_{ij} do primeiro lote remanescente é somado aos tempos acumulados de todas as equipes candidatas, e destinado à equipe com o menor tempo acumulado de processo, sendo esse procedimento repetido até que todos os lotes da equipe fictícia sejam alocados.

Etapa 3 – Programação dos lotes alocados a cada equipe

A programação das tarefas alocadas às equipes visa minimizar o atraso total ponderado, bem como assegurar o balanço no nível de complexidade e carga de trabalho das tarefas designadas a cada equipe. Desse modo, realiza-se uma adaptação da heurística ATC, proposta por Rachamadugu e Morton (1982), com a atribuição de um termo ergonômico associado às famílias de produtos. A regra proposta, denominada ATCE (*Apparent Tardiness Cost with Ergonomics Factors*), é apresentada na equação (5):

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \times \exp\left[-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{\bar{p}}\right] \times \exp\left[-\frac{t \times N_f}{\bar{p}_f \times N}\right] \quad (5)$$

onde w_j , p_j e d_j representam respectivamente, a penalidade (multa) por unidade de tempo de atraso, o tempo de processamento e a data de entrega da tarefa j . O instante de término do processamento da última tarefa processada é indicado por t e \bar{p} constitui a média dos tempos de processamento das tarefas ainda não processadas. A primeira parcela do termo exponencial na equação prioriza a escolha das tarefas mais próximas de suas respectivas datas de entrega. O último termo exponencial da equação (5) representa o fator ergonômico, onde N_f indica o somatório do número de tarefas já processadas pela família f , \bar{p}_f representa a média dos tempos de processamento das tarefas da família f ainda não processadas e \bar{N} consiste na média de N_f . A operacionalização do termo ergonômico baseia-se no somatório dos tempos das tarefas de famílias com distintas complexidades, forçando a alternância à medida que as tarefas são alocadas. Com isto, é possível reduzir o acúmulo sucessivo de tarefas com mesmo nível de complexidade em uma mesma equipe, evitando o agravamento dos fatores ergonômicos de risco.

O processo de sequenciamento em cada equipe é iniciado com o cálculo dos índices de prioridade $I_j(t)$ para todas as tarefas. A tarefa com o maior índice é a primeira a ser processada. Em seguida é necessário atualizar o contador de tempo t , o valor médio dos tempos de processamento \bar{p} , o conjunto de tarefas disponíveis para processamento e os parâmetros que compõem o termo ergonômico. Na sequência, os índices $I_j(t)$ são recalculados para todas as tarefas até esgotarem-se os lotes.

4 APLICAÇÃO DO MÉTODO NA INDÚSTRIA CALÇADISTA

O método proposto é aplicado na programação da produção de uma empresa calçadista localizada no sul do país. A coleta dos dados ocorreu no setor de costura (operação gargalo) por meio do monitoramento de duas equipes, sendo cada equipe composta por aproximadamente 40 trabalhadores.

Treze modelos de produtos foram avaliados, caracterizados por elevada demanda por customização, e agrupados em famílias de acordo com suas características ergonômicas de risco. Tais características são medidas através de escalas e endereçam fatores associados à repetitividade da tarefa, complexidade e características físicas do produto. Utilizou-se escala numérica de 1 a 3, onde 3

indica nível de complexidade severa referente à característica analisada. A repetitividade das tarefas é classificada de acordo com o tempo de ciclo básico, sendo altamente repetitiva a tarefa que possuir um tempo de ciclo básico igual ou inferior a 30 segundos após o trabalhador ter atingido seu patamar estacionário de desempenho, ou quando mais do que 50% do ciclo de trabalho envolve um mesmo padrão de movimentos (SILVERSTEIN *et al.*, 1987; KEYSERLING *et al.*, 1991; LATKO *et al.*, 1999). Os valores atribuídos à complexidade e às características físicas do produto foram determinados por análise de especialistas da indústria de calçados. As características físicas do produto são avaliadas em termos de complexidade da costura, enfeite, forro, material, número de peças, e tipo de calçado (sapatos e sandálias). Através de rotinas de clusterização implementadas no software SPSS v. 8.0., foram geradas três famílias de modelos de acordo com as características avaliadas, rotuladas com nível de complexidade Fácil (1), Média (2) ou Difícil (3).

Modelos pertencentes às três famílias foram distribuídos às equipes seguindo a programação da empresa e dados de desempenho foram coletados, sendo ajustados à curva de aprendizado hiperbólica através de aplicativo estatístico. A modelagem gerou os parâmetros k , p e r para cada modelo de produto e, por meio de coletas repetidas de dados de uma mesma família, foi possível obter os parâmetros médios \bar{k}_{if} , \bar{p}_{if} e \bar{r}_{if} apresentados na Tabela 1. Os parâmetros foram utilizados na construção das curvas de aprendizado, sendo gerados três gráficos referentes às famílias; cada gráfico é composto por duas curvas referentes às equipes analisadas. Os tempos de processamento dos lotes passam a ser estimados com a utilização dos gráficos gerados, com base nas áreas sob as curvas, e utilizados na heurística de sequenciamento proposta.

Tabela 1 - Parâmetros médios da curva de aprendizado hiperbólica

Complexidade	Equipe	\bar{k}	\bar{p} (min)	\bar{r} (min)
Fácil	1	1,19	80,25	146,00
	2	1,01	79,75	161,50
Média	1	1,67	21,25	49,05
	2	1,93	18,70	62,00
Difícil	1	1,25	41,50	55,65
	2	0,97	20,83	53,77

A heurística ATCE foi aplicada em 198 lotes de produtos e 2 equipes de trabalhadores. As informações de tamanho, família e datas de entrega dos lotes de

produtos são apresentados no apêndice, ordenados de acordo com a regra proposta no estágio 1 da etapa 2 desta metodologia. Foram atribuídas 6 datas de entrega distintas aos lotes, sendo o processamento realizado com base em 44 horas semanais de trabalho.

A eficiência da heurística proposta foi avaliada através da comparação de seus resultados com o sequenciamento da regra ATC com $w_j = 1$ para ambas as heurísticas. A sequência recomendada para manufatura dos lotes, bem como a complexidade das tarefas alocadas às equipes, são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Sequenciamento obtido para as tarefas alocadas à equipe 1

EQUIPE 1											
ATC						ATCE					
Lote	Família	Lote	Família	Lote	Família	Lote	Família	Lote	Família	Lote	Família
70	2	173	3	14	1	70	2	9	1	57	1
114	2	167	3	148	3	55	1	175	3	100	2
95	2	171	3	57	1	169	3	105	2	148	3
107	2	102	2	134	2	33	1	4	1	49	1
108	2	87	2	132	2	140	3	198	3	134	2
116	2	117	2	72	2	114	2	102	2	155	3
55	1	97	2	74	2	37	1	24	1	67	1
33	1	78	2	128	2	187	3	179	3	132	2
169	3	84	2	155	3	95	2	87	2	137	3
37	1	198	3	137	3	16	1	13	1	62	1
16	1	179	3	176	3	186	3	153	3	72	2
59	1	41	1	185	3	107	2	117	2	176	3
140	3	153	3	49	1	59	1	41	1	74	2
20	1	163	3	174	3	192	3	97	2	43	1
187	3	58	1	67	1	108	2	163	3	185	3
186	3	182	3	62	1	20	1	58	1	128	2
192	3	47	1	43	1	160	3	78	2	56	1
160	3	135	3	56	1	116	2	182	3	174	3
80	2	13	1	133	2	53	1	47	1	133	2
130	2	24	1	76	2	171	3	84	2	164	3
129	2	4	1	94	2	80	2	135	3	10	1
122	2	131	2	124	2	50	1	25	1	76	2
104	2	125	2	93	2	173	3	131	2	156	3
105	2	98	2	164	3	130	2	141	3	6	1
53	1	126	2	156	3	36	1	15	1	94	2
50	1	100	2	150	3	167	3	125	2	124	2
36	1	141	3	166	3	129	2	138	3	38	1
64	1	138	3	177	3	64	1	12	1	150	3
3	1	158	3	26	1	147	3	98	2	93	2
9	1	15	1	10	1	122	2	158	3	26	1
147	3	25	1	30	1	3	1	14	1	166	3
172	3	12	1	6	1	172	3	126	2	30	1
175	3	183	3	38	1	104	2	183	3	177	3

Tabela 3 - Sequenciamento obtido para as tarefas alocadas à equipe 2

EQUIPE 2											
ATC						ATCE					
Lote	Família	Lote	Família	Lote	Família	Lote	Família	Lote	Família	Lote	Família
82	2	178	3	52	1	90	2	86	2	113	2
90	2	157	3	39	1	22	1	48	1	195	3
69	2	165	3	40	1	189	3	165	3	40	1
96	2	101	2	81	2	82	2	101	2	121	2
115	2	85	2	121	2	1	1	32	1	199	3
127	2	91	2	110	2	194	3	190	3	21	1
22	1	77	2	83	2	69	2	85	2	81	2
1	1	71	2	68	2	11	1	63	1	136	3
11	1	111	2	21	1	193	3	139	3	29	1
189	3	32	1	29	1	96	2	91	2	110	2
54	1	190	3	199	3	54	1	17	1	159	3
194	3	63	1	18	1	184	3	154	3	18	1
66	1	139	3	136	3	115	2	77	2	152	3
34	1	154	3	5	1	66	1	7	1	83	2
193	3	17	1	159	3	170	3	151	3	5	1
143	3	168	3	46	1	127	2	71	2	197	3
170	3	151	3	152	3	34	1	44	1	68	2
184	3	7	1	197	3	143	3	168	3	46	1
75	2	180	3	162	3	75	2	111	2	79	2
89	2	44	1	196	3	27	1	51	1	162	3
109	2	51	1	79	2	149	3	180	3	65	1
120	2	92	2	88	2	89	2	92	2	88	2
106	2	99	2	112	2	28	1	45	1	196	3
86	2	73	2	118	2	181	3	188	3	35	1
27	1	103	2	123	2	109	2	99	2	112	2
28	1	113	2	65	1	31	1	61	1	161	3
31	1	188	3	161	3	146	3	191	3	8	1
2	1	191	3	23	1	120	2	73	2	118	2
60	1	200	3	42	1	2	1	200	3	144	3
48	1	145	3	8	1	178	3	52	1	42	1
149	3	195	3	144	3	106	2	103	2	123	2
146	3	45	1	142	3	60	1	145	3	142	3
181	3	61	1	35	1	157	3	39	1	23	1

Os resultados obtidos foram analisados com base no percentual de tempo de ocupação das equipes, função objetivo [soma do atraso total ponderado, $\sum w_j T_j$] e o percentual de saturação da complexidade dos lotes, conforme a Tabela 4. O percentual de Saturação indica cenários em que tarefas de mesma família são alocadas consecutivamente, sendo aconselhável a obtenção de valores baixos para a melhor distribuição das tarefas do ponto de vista ergonômico.

Tabela 4 – Função Objetivo, Percentual de Saturação e tempo de ocupação das equipes 1, 2 para as regras ATC e ATCE

Equipe	Regra	$\sum w_j T_j$	Percentual de Saturação	Tempo de ocupação das equipes
1	ATC	20026,0	66%	98,9%
	ATCE	20758,7	1%	
2	ATC	29667,9	62%	100,0%
	ATCE	30330,4	0%	

A função objetivo de minimização do atraso total ponderado apresentou resultados de eficiência produtiva similares para as regras ATC e ATCE: a heurística proposta ocasionou um aumento de 3,53% na função objetivo para a equipe 1 e de 2,18% para a equipe 2. Em termos de Percentual de saturação, a ATCE superou a regra ATC significativamente, sendo tal indicador reduzido de 66% para 1% na equipe 1 e de 62% para 0% na equipe 2. O tempo de ocupação, equivalente ao percentual de tempo em que cada equipe permaneceu ocupada, mostrou que a equipe 2 permaneceu integralmente ocupada por conta do seu maior desempenho final (expresso pelo parâmetro k) e maior taxa de aprendizado (expresso pelo parâmetro r). Tais resultados evidenciam que o método proposto atende as necessidades ergonômicas sem acarretar perdas significativas em termos de desempenho produtivo.

Com base no tempo de ocupação e na incidência de ocupação das equipes, observa-se que o método utilizado no estágio 2 da etapa 2 (alocação dos lotes às equipes) contribuiu para um adequado sequenciamento, minimizando o tempo de processamento e equilibrando o tempo de ocupação das equipes, ao mesmo tempo em que distribui de maneira uniforme o nível de complexidade das tarefas entre as equipes, sem sobrecarregar aquela que apresenta o melhor desempenho.

5 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um método para sequenciamento de tarefas baseado na utilização de curvas de aprendizado e na incorporação de fatores ergonômicos em cenários de elevada customização em massa. Tais cenários caracterizam-se por tarefas com diferentes níveis de complexidades, repetitividade e características físicas do produto em manufatura, impactando diretamente no desempenho do

trabalhador. A proposta aplicada em arranjos de trabalhadores paralelos não relacionados buscou atender a demanda produtiva sem prejudicar o desempenho do trabalhador, minimizando os riscos ergonômicos de trabalho.

O método foi aplicado em uma empresa calçadista. As curvas de aprendizado permitiram estimar o tempo de processamento de lotes de produção com diferentes tamanhos e complexidades. A programação dos lotes de produção foi realizada em três etapas: a primeira ordenou os lotes de entrada, a segunda alocou os lotes às equipes, e a terceira sequenciou as tarefas com base no monitoramento de fatores ergonômicos e atendimento das datas de entrega. A heurística proposta, ATCE, foi comparada com a regra original ATC através da análise do desempenho produtivo (minimização da função objetivo) e ergonômico (minimização do índice de saturação). Os resultados apresentaram desempenho satisfatório do ponto de vista produtivo, com aumento da função objetivo de 3,53% para a equipe 1 e de 2,18% para a equipe 2, e significativamente melhores sob o ponto de vista ergonômico, onde a incidência de saturação foi reduzida de 66% para 1% na equipe 1, e de 62% para 0% na equipe 2. De tal forma, percebeu-se que o método proposto cumpriu sua proposição de evitar o acúmulo sucessivo de tarefas de mesma complexidade a uma mesma equipe, sem no entanto acarretar atrasos na entrega das tarefas.

Desdobramentos futuros incluem a realização de simulações com vistas à avaliação da robustez do método proposto. A incorporação de outras características que afetem o desempenho do trabalhador na regra ATCE também é considerada.

REFERÊNCIAS

ADAMOPOULOS, G.; PAPPIS, C. Scheduling under a common due-date on parallel unrelated machines. **European Journal of Operational Research**, v. 105, p. 494–501, 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00057-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00057-X)

ANZANELLO, M. J.; FOGLIATTO, F. S. Alocação de modelos de produtos a equipes de trabalhadores baseada em modelos de curvas de aprendizagem. **Revista Produção**, v. 15, n. 2, p. 221-234, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-65132005000200007>

ANZANELLO, M. J.; FOGLIATTO, F. S. Curvas de aprendizado: estado da arte e perspectivas de pesquisa. **Gestão e Produção**. v. 14, n. 1, p. 109 – 123, 2007b. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2007000100010>

ANZANELLO, M. J.; FOGLIATTO, F. S. Learning curve models and applications: Literature review and research directions. **International Journal of Industrial Ergonomics**. v. 41, p. 573 – 583, 2011a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2011.05.001>

ANZANELLO, M. J.; FOGLIATTO, F. S. Programação de tarefas baseada em curvas de aprendizado para linhas de produção customizadas. **Revista Produção Online**, v.11, p. 851-870, 2011b. <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v11i3.955>

ANZANELLO, M. J.; FOGLIATTO, F. S. Scheduling learning dependent jobs in customized assembly lines. **International Journal of Production Research**. v. 48, n. 22, 2010. <http://dx.doi.org/10.1080/00207540903307599>

ANZANELLO, M.; FOGLIATTO, F. Learning curve modeling of work assignment in mass customized assembly lines. **International Journal of Production Research**. v. 45, n. 13, p. 2919–2938, 2007a. <http://dx.doi.org/10.1080/00207540600725010>

ARAVINDKRISHNA, T.; BALASUBRAMANIAN V.; NARENDRAN, T. T. Ergonomic risk incorporated schedules (ERIS) – scheduling using genetic algorithm to reduce operator fatigue in flow-shop based cells. **International Journal of Enterprise Network Management**, v. 3, p. 184 – 200, 2009. <http://dx.doi.org/10.1504/IJENM.2009.032394>

AZIZI, N.; ZOLFAGHARI, S.; LIANG, M. Modeling job rotation in manufacturing system: The study of employee's boredom and skill variations. **International Journal of Production Economics**. n. 123, p. 69-85, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.07.010>

BATIZ, E. C.; SANTOS, A. F.; LICEA, O. E. A. A postura no trabalho dos operadores de *checkout* de supermercados: uma necessidade constante de análises. **Revista Produção**, v. 19, n. 1, p. 190-201, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-65132009000100012>

BERNARD B. **Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors**: a critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back. Cincinnati: National Institute for Occupational Safety and Health, Publications Dissemination, p. 97-141, 1997.

BISKUP, D. Single-machine scheduling with learning considerations. **European Journal of Operational Research**, v. 115, p. 173–178, 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00246-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00246-X)

CARNAHAN, B.J.; REDFERN, M.S.; NORMAN, B. Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search. **Ergonomics**, v. 43, n. 4, p. 543–560, 2000. <http://dx.doi.org/10.1080/001401300184404>

CHEN, Y. Impact assessment of job machine factors on scaling parameters. **Advanced materials Research**, v. 340, p. 23 – 29, 2012. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.340.23>

DA SILVEIRA, G., BORENSTEIN, D., FOGLIATTO, F.S. Mass customization: literature review and research directions. **International Journal of Production Economics**, v.72, n. 1, p. 1–13, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(00\)00079-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00079-7)

ENOKA, R. M. Mechanisms of muscle fatigue: Central factors and task dependency. **Journal of Electromyography and Kinesiology**, v. 5, n. 3, p. 141-149, 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/1050-6411\(95\)00010-W](http://dx.doi.org/10.1016/1050-6411(95)00010-W)

ERIKSSON, T.; ORTEGA, J. The adoption of job rotation: testing the theories. **Industrial and labor relations review**. v. 59, p. 653 – 665, 2006. <http://dx.doi.org/10.1177/001979390605900407>

FANJUL-PEYRO, L.; RUIZ, R. Scheduling unrelated parallel machines with optional machines and jobs selection. **Computers and Operations Research**, v. 39, p. 1745–1753, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2011.10.012>

FANJUL-PEYRO, L.; RUIZ, R. Size-reduction heuristics for the unrelated parallel machines scheduling problem. **Computers and Operations Research**, n. 38, p. 301–309, 2011.
FINKELMAN, J.M. A large database study of the factors associated with work-induced fatigue. **Human Factors**, v. 36, n. 2, p. 232–243, 1994.

FOGLIATTO, F. S., DA SILVEIRA, G. J. C., BORENSTEIN, D. The mass customization decade: An updated review of the literature. **International Journal of Production Economics**, v. 138, p. 14–25, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.002>

GAIRIG, M.; MONIEN, B.; WOCLAW, A. A faster combinatorial approximation algorithm for scheduling unrelated parallel machines. **Theoretical Computer Science**, n. 380, p. 87–99, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tcs.2007.02.056>

GONG, H; WANG, M. Learning curve: Principle, application and limitation. ICEE - **International Conference on E-Business and E-Government**, pp.1840-1843, 2010.
GRANDJEAN. Manual de ergonomia: adaptando o trabalho ao homem. 4. ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.

HAM, D.; PARK, J., JUNG, W. Model-based identification and use of task complexity factors of human integrated systems. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 100, p. 33–47, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2011.12.019>

HSU, C.; CHENG, T.C.E.; YANG, D. Unrelated parallel machine scheduling with rate-modifying activities to minimize the total completion time. **Information Sciences**, v. 181, p. 4799–4803, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2011.06.010>

JABER, M. Y.; SAADANY, A. M. A. An economic production and remanufacturing model with learning effects. **International Journal of Production Economics**, v. 131, p. 115 – 127, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.04.019>

KAPLAN S.; RABADI G. Exact and heuristic algorithms for the aerial refueling parallel machine scheduling problem with due date-to-deadline window and ready times. **Computers and Industrial Engineering**, n. 62, p. 276–285, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2011.09.015>

KEYSERLING, W.M.; ARMSTRONG, T.J.; PUNNETT, L. Ergonomic job analysis: a structured approach for identifying risk factors associated with overextension injuries and disorders. **Applied Occupational and Environmental Hygiene**. v.6, n. 5, p. 353-363, 1991. <http://dx.doi.org/10.1080/1047322X.1991.10387896>

KIM, J. W.; JUNG, W. A taxonomy of performance influencing factors for human reliability analysis of emergency tasks. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 16, p. 479–495 , 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-4230\(03\)00075-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-4230(03)00075-5)

LAMOTHE, J.; MARMIER, F.; DUPUY, M.; GABORIT, P.; DUPONT, L. Scheduling rules to minimize total tardiness in a parallel machine problem with setup and calendar constraints. **Computers and Operations Research**, n. 39, p. 1236–1244, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2010.07.007>

LATKO, W.A.; ARMSTRONG, T.J.; FRANZBLAU, A.; ULIN, S.S.; WERNER, R.A.; ALBERS, J.W. Cross sectional study of the relationship between repetitive work and the prevalence of
Revista Produção Online, Florianópolis, SC, v. 16, n. 2, p. 550-574, abr./jun. 2016.

upper limb musculoskeletal disorders. **American Journal of Industrial Medicine**, v. 36, p.248-259, 1999. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199908\)36:2<248::AID-AJIM4>3.0.CO;2-Q](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199908)36:2<248::AID-AJIM4>3.0.CO;2-Q)

LATKO, W.A.; ARMSTRONG, T.J.; FRANZBLAU, A.; ULIN, S.S.; WERNER, R.A.; ALBERS, J.W. Cross sectional study of the relationship between repetitive work and the prevalence of upper limb musculoskeletal disorders. **American Journal of Industrial Medicine**, v. 36, p.248-259, 1999. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199908\)36:2<248::AID-AJIM4>3.0.CO;2-Q](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199908)36:2<248::AID-AJIM4>3.0.CO;2-Q)

LEE Y. H.; PINEDO M. Scheduling jobs on parallel machines with sequence- dependent setup times. **European Journal of Operational Research**, n. 100, p. 464–74, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(95\)00376-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(95)00376-2)

LEE, H.; YANG, D.; YANG, S. Multi-machine scheduling with deterioration effects and maintenance activities for minimizing the total earliness and tardiness costs. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4348-0>

LI, G.; BUCKLE, P. A practical method for the assessment of work-related musculoskeletal risks: quick exposure check (QEC). **Human Factors and Ergonomics Society: annual meeting**, v. 42, n. 2, 1998.

LIAW, C. F.; LIN, Y. K.; CHEN, M. C. Scheduling unrelated parallel machines to minimize total weighted tardiness. In: **Proceedings of the fifth annual international conference on industrial engineering**—theory, applications and practice, p.1–11, 2000.

LIAW, C., LIN, Y., CHENG, C., CHEN, M. Scheduling unrelated parallel machines to minimize total weighted tardiness. **Computers and Operations Research**, n. 30, p. 1777–1789, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00105-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00105-3)

LIN, Y. K.; PFUND, M. E.; FOWLER, J. W. Heuristics for minimizing regular performance measures in unrelated parallel machine scheduling problems. **Computers and Operations Research**, v. 38, p. 901–916, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2010.08.018>

LODREE, E. J., GEIGER, C. D., JIANG, X. Taxonomy for integrating scheduling theory and human factors: Review and research opportunities. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 39, p. 39–51, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2008.05.001>

LOGENDRAN, R.; MCDONELL, B.; SMUCKER, B. Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setups. **Computers & Operations Research**, n. 34, p. 3420 – 3438, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2006.02.006>

MAZUR, J. E.; HASTIE, R. Learning as Accumulation: a Reexamination of the Learning Curve. **Psychological Bulletin**, v. 85, n. 6, p. 1256-1274, 1978. <http://dx.doi.org/10.1037/0033-2909.85.6.1256>

MICHALOS, G.; MAKRIS, S.; RENTZOS, L.; CHRYSOLOURIS, G. Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems. **Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 2, p. 153–160, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.03.009>

MÖNCH. Heuristics to minimize total weighted tardiness of jobs on unrelated parallel machines. **IEEE Conference on Automation Science and Engineering**, n. 4626531, p. 572-577, 2008.

NEMBHARD, D. A.; OSOTHSILP, N. Task complexity effects on between-individual learning/forgetting variability. **International Journal of Industrial Ergonomics**. v. 29, p. 297–306, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8141\(01\)00070-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8141(01)00070-1)

NEMBHARD, D., UZUMERI, M. An individual-based description of learning within an organization. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 47, n. 3, p. 370–378, 2000. <http://dx.doi.org/10.1109/17.865905>

NEUMANN W.P.; WINKEL J.; MEDBO L.; MAGNEBERG R.; MATHIASSEN S. E. Production system design elements influencing productivity and ergonomics. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 26, p. 904–923, 2006. <http://dx.doi.org/10.1108/01443570610678666>

OTTO, A.; SCHOLL, A. **Reducing ergonomic risks at mixed-model assembly lines by job rotation scheduling**. Working papers in supply chain management friedrich schiller University of Jena. 2011.

PINEDO, M. **Scheduling, theory, algorithms and systems**. Springer: New York, 2008.

RACHAMADUGU, R.V., AND MORTON, T.E. **Myopic heuristics for the single machine weighted tardiness problem**. Working Paper, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, v. 30, p. 82-83, 1982.

SANTOS, L. S.; ANZANELLO, M. J. Programação de tarefas em linhas de produção customizadas baseada em curvas de aprendizado e fatores ergonômicos. **Revista Gestão e Produção**. São Paulo. Aguardando publicação, 2012.

SCHOMBURG, J. T. Sequencing labor-intensive production by ergonomic assessment for reduction of workrelated musculoskeletal disorders. **Theses and Dissertations**, n. 12075, 2011.

SILVA, A. V. E COIMBRA, R. R. C. **Manual de tempos e métodos: princípios e técnicas do estudo de tempos**. Editora Hemus, 1980.

SILVERSTEIN, B.A.; FINE, L.J.; ARMSTRONG, T.J. Occupational Factors and Carpal Tunnel Syndrome. **American Journal of Industrial Medicine**, v.11, p.343-358, 1987. <http://dx.doi.org/10.1002/ajim.4700110310>

SPSS for Windows: Statistical Package for Social Sciences. Version 8.0. Chicago: SPSS Inc, 1997.

THARMMAPHORNPHILAS, W; NORMAN, B. A. A quantitative method for determining proper job rotation intervals. **Annals of Operations Research**. v. 128, p. 251–266, 2004. <http://dx.doi.org/10.1023/B:ANOR.0000019108.15750.ae>

UZUMERI, M., NEMBHARD, D. A population of learners: a new way to measure organizational learning. **Journal of Operations Management**, v. 16, n. 5, p. 515–528, 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963\(97\)00017-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963(97)00017-X)

VALLADA, E.; RUIZ, R. A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times. **European Journal of Operational Research**, v. 211, n. 3, p. 612-622, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2011.01.011>

VALLADA, E.; RUIZ, R.. Scheduling unrelated parallel machines with sequence dependent setup times and weighted earliness–Tardiness Minimization. **Springer Optimization and Its Applications**, v. 60, p. 67-90, 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-1123-9_4

WATCHARAPANYAWONG, K.; SIRISOPONSILP, S.; SOPHATSATHIT, P. A Model of Mass Customization for Engineering Production System Development in Textile and Apparel Industries in Thailand. **Systems Engineering Procedia**, v. 2, p. 382 – 397, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sepro.2011.10.052>

WINKEL, J., MATHIASSEN, S. E. Assessment of physical work load in epidemiologic studies: concepts, issues, and operational considerations. **Ergonomics**, v. 37, p. 979-988, 1994. <http://dx.doi.org/10.1080/00140139408963711>

YU, L; SHIH, H.; PFUND, M.; CARLYLE, W.; FOWLER, J. Scheduling of unrelated parallel machines: an application to PWB manufacturing. **IIE Transactions**, v. 34, p. 921-931, 2002. <http://dx.doi.org/10.1080/07408170208928923>

ZHANG, Z., ZHENG, L., LI, N., WANG, W., ZHONG, S., HU, K. Minimizing mean weighted tardiness in unrelated parallel machine scheduling with reinforcement learning. **Computers and Operations Research**, n. 39, p. 1315–1324, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2011.07.019>

ZHOU, H., LI, Z., WU, X. Scheduling unrelated parallel machine to minimize total weighted tardiness using ant colony optimization. **IEEE International Conference on Automation and Logistics**, ICAL 2007, n. 4338544, p. 132-136, 2007. <http://dx.doi.org/10.1109/ical.2007.4338544>



Artigo recebido em 06/02/2015 e aceito para publicação em 15/04/2016
DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v16i2.1982>

Apêndice – Tamanho, família f e datas de entrega d_j (semanas) dos lotes de calçados analisados

Lote	f	Unidades	d _j	Lote	f	Unidades	d _j	Lote	f	Unidades	d _j	Lote	f	Unidades	d _j
116	2	257	2	178	3	280	4	63	1	299	6	159	3	334	10
108	2	254	2	146	3	278	4	32	1	295	6	136	3	332	10
107	2	253	2	181	3	278	4	4	1	290	6	199	3	330	10
95	2	252	2	149	3	277	4	24	1	288	6	155	3	324	10
114	2	242	2	171	3	274	4	13	1	287	6	137	3	323	10
70	2	236	2	173	3	272	4	47	1	286	6	176	3	321	10
127	2	223	2	167	3	272	4	58	1	283	6	185	3	321	10
115	2	216	2	175	3	271	4	41	1	279	6	174	3	318	10
69	2	204	2	172	3	268	4	98	2	329	8	46	1	337	10
96	2	204	2	147	3	266	4	126	2	329	8	5	1	335	10
90	2	195	2	60	1	274	4	100	2	329	8	18	1	332	10
82	2	193	2	48	1	274	4	125	2	324	8	21	1	330	10
184	3	264	2	2	1	273	4	131	2	323	8	29	1	330	10
170	3	262	2	31	1	266	4	113	2	318	8	49	1	329	10
143	3	258	2	28	1	265	4	103	2	317	8	67	1	327	10
193	3	251	2	27	1	264	4	73	2	315	8	62	1	326	10
194	3	242	2	9	1	264	4	99	2	310	8	43	1	326	10
189	3	237	2	3	1	263	4	92	2	302	8	56	1	324	10
160	3	236	2	36	1	258	4	195	3	316	8	93	2	394	12
34	1	248	2	64	1	258	4	145	3	315	8	124	2	385	12
192	3	223	2	50	1	256	4	200	3	314	8	94	2	381	12
66	1	245	2	53	1	253	4	188	3	312	8	76	2	365	12
186	3	220	2	84	2	301	6	191	3	312	8	133	2	363	12
54	1	239	2	78	2	300	6	141	3	311	8	118	2	357	12
11	1	231	2	97	2	298	6	138	3	310	8	123	2	357	12
22	1	225	2	117	2	291	6	158	3	310	8	112	2	355	12
1	1	225	2	87	2	286	6	183	3	307	8	88	2	352	12
187	3	207	2	102	2	284	6	148	3	306	8	79	2	348	12
140	3	206	2	111	2	284	6	39	1	323	8	162	3	415	12
20	1	206	2	71	2	280	6	40	1	323	8	196	3	410	12
16	1	195	2	77	2	279	6	52	1	322	8	161	3	369	12
59	1	195	2	91	2	277	6	61	1	321	8	144	3	360	12
37	1	189	2	85	2	276	6	45	1	320	8	142	3	358	12
169	3	182	2	101	2	275	6	25	1	319	8	164	3	354	12
33	1	166	2	180	3	305	6	15	1	319	8	156	3	353	12
55	1	158	2	151	3	303	6	12	1	316	8	150	3	352	12
105	2	275	4	168	3	303	6	14	1	315	8	166	3	347	12
104	2	269	4	139	3	299	6	57	1	311	8	177	3	347	12
129	2	267	4	154	3	299	6	128	2	345	10	65	1	379	12
122	2	267	4	190	3	298	6	74	2	344	10	35	1	361	12
130	2	265	4	198	3	298	6	72	2	342	10	8	1	359	12
80	2	264	4	179	3	295	6	132	2	340	10	42	1	355	12
86	2	264	4	153	3	293	6	134	2	337	10	23	1	350	12
106	2	263	4	163	3	293	6	68	2	337	10	10	1	348	12
120	2	262	4	182	3	289	6	83	2	335	10	6	1	346	12
109	2	260	4	135	3	287	6	110	2	334	10	38	1	346	12
75	2	258	4	51	1	309	6	81	2	330	10	30	1	345	12
89	2	258	4	44	1	306	6	121	2	330	10	26	1	342	12
165	3	283	4	7	1	305	6	197	3	345	10				
157	3	282	4	17	1	301	6	152	3	343	10				