

UMA NOVA HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE MINIMIZAÇÃO DE TROCAS DE FERRAMENTAS

Antonio Augusto Chaves

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, SP, Brasil
chaves@feg.unesp.br

Edson Luiz França Senne

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, SP, Brasil
elfsenne@feg.unesp.br

Horacio Hideki Yanasse

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Av. dos Astronautas 1758, São José dos Campos, SP, Brasil
horacio@lac.inpe.br

RESUMO

O problema de minimização de troca de ferramentas (MTSP) busca uma sequência para processar um conjunto de tarefas de modo que o número de trocas de ferramentas requeridas é minimizado. Este trabalho apresenta uma nova heurística para o MTSP. Esta heurística possui duas fases: uma fase construtiva que é baseada em um grafo onde os vértices correspondem a ferramentas e existe um arco $k = (i, j)$ que liga os vértices i e j se e somente se as ferramentas i e j são necessárias para a execução da tarefa k ; e uma fase de refinamento baseada na metaheurística Busca Local Iterativa. Resultados computacionais mostram que a heurística proposta tem um bom desempenho para os problemas testados.

PALAVRAS CHAVE. Sequenciamento. Heurística. Grafo. (Metaheurísticas)

ABSTRACT

The minimization of tool switches problem (MTSP) seeks a sequence to process a set of jobs so that the number of tool switches required is minimized. This work presents a new heuristic for the MTSP. This heuristic has two phase: a constructive phase, which is based on a graph where the vertices correspond the tools and exists an arc $k = (i, j)$ binding vertices i and j if tools i and j are necessary for the execution of task k ; and an improved phase based on the Iterated Local Search. Computational results show that the proposed heuristic has a good performance for the executed instances.

KEYWORDS. Scheduling. Heuristic. Graph. (Metaheuristic)

1. Introdução

Considere um ambiente produtivo em que se tem um conjunto de tarefas $T = \{1, \dots, N\}$ a serem processadas sequencialmente e sem interrupção em uma única máquina flexível de manufatura e um conjunto de ferramentas $F = \{1, \dots, M\}$. Seja T_f o conjunto de tarefas que requerem a ferramenta $f \in F$. Cada tarefa $t \in T$ requer que um subconjunto de ferramentas F_t seja colocado na máquina e somente quando todo este subconjunto de ferramentas está na máquina é possível processar a tarefa t . Considere que a máquina é capaz de conter no máximo C ferramentas de cada vez, em que $C \geq \max_t \{|F_t|\}$. Suponha que a capacidade C de armazenamento de ferramentas da máquina seja inferior ao número total de ferramentas necessário para processar todas as tarefas. Do contrário, o problema é trivial, pois todas as ferramentas podem ser carregadas na máquina e todas as tarefas podem então ser processadas sem que sejam necessárias trocas de ferramentas. Se a capacidade for inferior, trocas de ferramentas serão necessárias. Uma troca de ferramentas consiste em remover uma ferramenta da máquina e incluir outra em seu lugar. A ordem das ferramentas na máquina é irrelevante. O problema de minimizar o número de trocas de ferramentas (MTSP, do inglês *Minimization of Tool Switches Problem*) consiste em determinar uma sequência de processamento das tarefas de modo a minimizar o número de trocas de ferramentas necessárias.

O MTSP é classificado como um problema NP-difícil (Crama et al., 1994). Este problema foi estudado por alguns autores que propuseram, em sua maioria, heurísticas. A seguir é realizada uma revisão bibliográfica de alguns destes trabalhos.

Tang e Denardo (1988) mostram que minimizar o número de trocas de ferramentas para uma dada sequência de tarefas pode ser resolvido em tempo polinomial por uma política conhecida como KTNS (*Keep Tool Needed Soonest*). Esta política estabelece que, quando trocas de ferramentas são necessárias, as primeiras ferramentas requeridas para uma próxima tarefa devem ser as primeiras a serem mantidas na máquina.

Em Bard (1988) o problema é formulado como um programa inteiro não linear para o problema e resolvido com duas heurísticas baseadas em relaxações de variáveis duais. Crama et al. (1994) consideram o problema sobre outro ponto de vista teórico e computacional e várias heurísticas são propostas para sua solução. Hertz et al. (1998) também apresentam e comparam várias heurísticas, sendo que, algumas destas mostram um desempenho superior aos métodos existentes.

Matzliach (1998) apresenta três heurísticas para o MTSP com tamanhos não uniformes de ferramentas em um ambiente dinâmico (*online*). As heurísticas propostas são baseadas no problema estático e consideram várias suposições com respeito à aleatoriedade do processo dinâmico.

Shirazi e Frizelle (2001) avaliam a eficiência de métodos empregados atualmente por sete empresas de manufatura para resolver o MTSP e comparam estes métodos com algumas heurísticas disponíveis na literatura.

Fathi e Barnette (2002) propõem três heurísticas para resolver o problema de sequenciamento de um conjunto de peças com dados tempos de processamento e ferramentas requeridas em m máquinas paralelas idênticas. O artigo mostra que estas heurísticas são eficazes para encontrar um plano de troca de ferramentas para cada máquina.

Song e Hwang (2002) propõem uma política de ferramentas ideal utilizando o conceito de inserção precoce de ferramentas, a fim de minimizar a frequência dos movimentos de troca para uma máquina flexível, que deve processar um conjunto de peças com a sequência de produção já prescrito.

Ghrayeb et al. (2003) consideram o problema de sequenciamento de placas de circuito impresso (PCP) visando minimizar o número total de trocas de fitas de entrada necessária para produzir PCPs. Os autores apresentam um modelo matemático para este problema e uma

heurística rápida para resolver o problema. A heurística proposta é eficaz em reduzir o número de trocas de fitas e pode ser usada para o MTSP.

Al-Fawzan e Al-Sultan (2002) apresentam um algoritmo Busca Tabu para resolver o MTSP. O algoritmo é testado com algumas problemas teste gerados aleatoriamente e apresenta bons resultados computacionais.

Propostas de métodos exatos são escassos (Laporte et al., 2004; Yanasse and Lamosa, 2005; Yanasse e Rodrigues, 2007; Yanasse et al. 2009) e tem aplicabilidade prática na solução apenas de exemplares relativamente pequenos. Laporte et al. (2004) relatam sucesso na resolução de apenas alguns exemplares, com certas particularidades, de problemas com 25 tarefas. Yanasse et al. 2009 apresentam um novo esquema enumerativo baseado em ordenamentos parciais que obtém melhores resultados em exemplares em que o algoritmo de Laporte et al. (2004) falha.

Este trabalho apresenta uma nova heurística visando obter um bom limitante superior para o MTSP. Esta heurística tem uma fase construtiva, a qual é baseada em um grafo no qual os vértices correspondem as ferramentas e existe um arco $k = (i, j)$ que conecta os vértices i e j se e somente se as ferramentas i e j são necessárias para a execução de uma tarefa k , e uma fase de refinamento baseada na meta-heurística Busca Local Iterativa (ILS, do inglês *Iterated Local Search*) (Stützle, 1999; Lourenço et al. 2003).

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma. A seção 2 descreve a heurística construtiva proposta, e a seção 3 apresenta a implementação do método heurístico aplicado ao MTSP. A seção 4 apresenta os resultados computacionais. Na seção 5 são descritas algumas conclusões a respeito deste trabalho.

2. Heurística Construtiva

Este trabalho apresenta um método heurístico para o MTSP que possui duas fases: uma fase construtiva e uma fase de refinamento. Na primeira fase propõe-se uma nova heurística construtiva para o MTSP e na segunda fase implementa-se a meta-heurística Busca Local Iterativa (ILS) objetivando melhorar a solução construída.

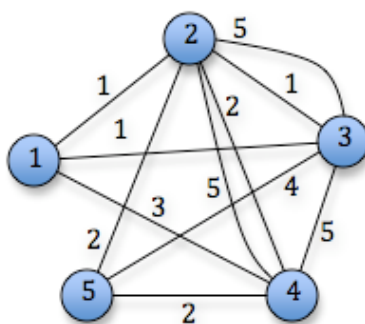
Na heurística construtiva, inicialmente gera-se um grafo $G = (V, A)$ em que o conjunto de vértices $V = \{1, 2, \dots, m\}$ corresponde ao conjunto de ferramentas e o conjunto de arcos $A = \{1, 2, \dots, n_a\}$ é tal que existe um arco $k = (i, j)$ ligando os vértices i e j se e somente se as ferramentas i e j são necessárias para a execução da tarefa k . Para ilustrar esta heurística apresenta-se a seguir uma aplicação desta a um exemplo pequeno do MTSP.

Seja o exemplar Teste₁ do problema MTSP cujos dados estão apresentados na Tabela 1. Este exemplar tem $N = 5$, $M = 5$, $C = 3$.

Tarefa	Ferramentas requeridas
1	1, 2, 3
2	2, 5, 4
3	1, 4
4	3, 5
5	2, 3, 4

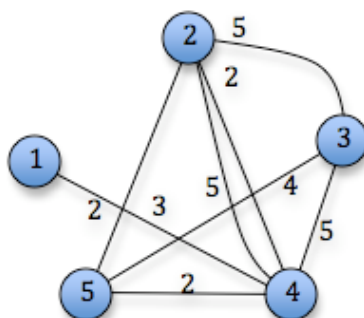
Tabela 1. Dados do exemplar Teste₁

Para este exemplo, tem-se o seguinte grafo:



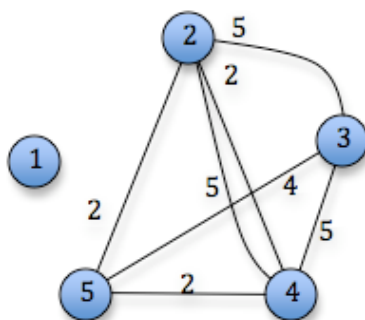
O algoritmo construtivo trabalha com a idéia de que devem ser selecionados os arcos (tarefas) tal que a retirada do arco produza vértices isolados (ferramentas que podem ser retiradas da caixa, pois não precisam voltar mais). Neste caso, os vértices de menor grau são os vértices 1 e 5. Devemos selecionar um deles para iniciar o procedimento de retirada de arcos. A ideia é retirar todos os arcos de uma determinada tarefa (notar que existem, no máximo, C arcos para cada tarefa e, portanto, sempre será possível retirar do grafo todos os arcos de uma tarefa. Isto, no máximo, irá requerer trocar todas as ferramentas existentes na caixa). Inicialmente, vamos remover os arcos da tarefa 1. Isto implica em incluir na caixa as ferramentas 1, 2, 3 necessárias para a realização desta tarefa. Então teremos:

Caixa	1, 2, 3
Trocas	0
Sequência	1



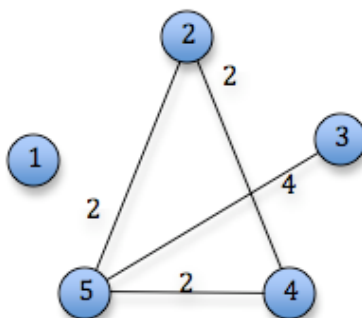
Em seguida, o arco 3 é selecionado para ser retirado (notar que, dentre as ferramentas presentes na caixa, o vértice 1 é o de menor grau) produzindo um vértice isolado. Isso implica em incluir na caixa a ferramenta 4. Porém, como a caixa está com sua capacidade completa, para incluir a ferramenta 4 devemos retirar a ferramenta 2 (vértice de maior grau). Com isso, teremos:

Caixa	1, 3, 4
trocas	1
sequência	1, 3



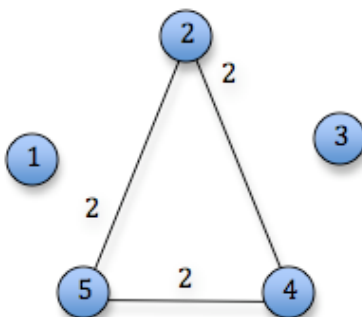
Em seguida, como dentre os vértices 3 e 4 (ferramentas que estão na caixa), o vértice 3 tem o menor grau, devemos escolher, dentre os arcos 4 e 5 (arcos que saem do vértice 3), o arco a ser retirado. O arco 4 implica em 1 troca (incluir a ferramenta 5 no lugar da ferramenta 1). O arco 5 implica em 1 troca (incluir a ferramenta 2 no lugar da ferramenta 1). Mas, como a escolha pelo arco 5 implica em reduzir mais o número de arcos do grafo, devemos escolher o arco 5. Com isso, teremos:

caixa	2, 3, 4
trocas	2
sequência	1, 3, 5



Em seguida, dentre as ferramentas 2, 3 e 4 que estão na caixa, a de menor grau é 3 e, portanto, devemos retirar o arco 4. Seja 2 a ferramenta que sai da caixa (escolhida aleatoriamente, pois os vértices 2 e 4 possuem o mesmo grau). Com isso, teremos:

caixa	3, 4, 5
trocas	3
sequência	1, 3, 5, 4



Finalmente, incluindo a ferramenta 2 no lugar da ferramenta 3 na caixa, o arco 2 pode ser retirado do grafo, o que vai implicar na seguinte solução:

caixa	2, 4, 5
trocas	4
sequência	1, 3, 5, 4, 2

Este exemplo ilustra a heurística construtiva para o MTSP, sempre privilegiando a retirada de arcos (inclusão de uma tarefa na sequência) que poderão ocasionar um vértice isolado (ferramenta que não será mais utilizada em tarefas que ainda não foram executadas). A cada iteração é necessário verificar se há alguma tarefa que pode ser realizada sem a necessidade de realizar trocas.

3. Implementação

Uma solução do MTSP é composta por um vetor que representa a sequência de tarefas a serem realizadas. A Figura 1 ilustra a representação de uma solução com 5 tarefas.

	0	1	2	3	4
Tarefas	1	3	5	4	2

Figura 1 - Representação de uma solução do MTSP

Para realizar o cálculo da função objetivo de uma solução do MTSP, ou seja, o número de trocas de ferramentas necessário para processar as tarefas em uma dada sequência foi implementado o algoritmo KTNS (*Keep Tool Needed Soonest*) de Tang e Denardo (1988).

Neste trabalho optou-se por utilizar a meta-heurística Busca Local Iterativa (ILS) que faz uso da solução gerada pela heurística construtiva apresentada anteriormente como sendo a solução inicial do processo de busca. O ILS consiste em um processo iterativo, no qual uma solução é perturbada, gerando novas soluções de partida para um método de busca local.

O algoritmo ILS inicializa a partir uma solução inicial para o MTSP (s_0). Em seguida, é aplicada uma heurística de busca local obtendo uma solução ótima local (\hat{s}). A partir dessa solução inicializa-se um processo iterativo até que o critério de parada seja satisfeito. A cada iteração realiza-se um procedimento de perturbação aleatória da solução produzindo um novo ponto de partida para a busca local (s'). A heurística de busca local é então aplicada sobre s' encontrando a solução ótima local desta região (\hat{s}').

Para realizar a perturbação da solução corrente define-se um movimento que troca a sequência de duas tarefas no vetor aleatoriamente, modificando a ordem de execução das tarefas. A intensidade da perturbação varia a cada iteração. Uma porcentagem β relacionada com o número de tarefas do problema define a quantidade de movimentos realizados. A porcentagem β varia de 20% a 40%.

A heurística de busca local *DescidaDoisTroca* foi aplicada para obter um ótimo local para a solução s' . Essa heurística consiste em examinar as possíveis trocas entre duas tarefas da solução s' , examinando a qualidade da solução a cada troca. Se a solução gerada pela troca for melhor que a solução anterior, continua-se a busca a partir desta solução. Caso contrário, a troca é desfeita e continua-se a busca. A heurística é encerrada quando todas as trocas entre pares de tarefas forem pesquisadas. Ao final, a heurística retorna a melhor solução encontrada.

O critério de aceitação irá determinar se \hat{s}' é aceita ou não como a nova solução corrente, aceitando-a quando esta for melhor que a solução \hat{s} . O critério de parada do ILS foi definido como o número máximo de iterações, gerando 3000 soluções.

A figura 2 apresenta o pseudo-código do ILS aplicado ao MTSP.

algoritmo ILS

$s_0 \leftarrow \text{HeuristicaConstrutiva}()$

$\hat{s} \leftarrow \text{DescidaDoisTroca}(s_0)$

enquanto (critério de parada não for satisfeito) **faça**

$s' \leftarrow \text{Perturbação}(\hat{s}, \text{histórico})$

$\hat{s}' \leftarrow \text{DescidaDoisTroca}(s')$

$\hat{s} \leftarrow \text{CritériodeAceitação}(\hat{s}, \hat{s}', \text{histórico})$

fim-enquanto

fim-algoritmo

Figura 2 – Pseudo-código da meta-heurística ILS

4. Resultados Computacionais

O método heurístico foi codificado na linguagem C e os testes computacionais foram executados em um PC com processador Pentium 4 2,6 GHz e memória de 1 GB. Os experimentos foram empreendidos com o objetivo de evidenciar a qualidade dos resultados da heurística, mostrando que este método pode ser competitivo para resolver o MTSP.

Os experimentos computacionais foram conduzidos com exemplares gerados aleatoriamente por Yanasse et. al. (2009) como indicado em Crama et al. (1994): dadas as quantidades mínima e máxima de ferramentas requeridas por qualquer tarefa, gera-se aleatoriamente um número dentro deste intervalo para estabelecer a quantidade de ferramentas requeridas para cada tarefa. As ferramentas requeridas são, então, estabelecidas aleatoriamente. Em todos os exemplares utilizados para os testes, todas as ferramentas são utilizadas pelas tarefas e, portanto, não existem tarefas dominadas.

Os resultados computacionais obtidos encontram-se nas Tabelas 2 a 6. Estas tabelas contêm:

- N: número de tarefas;
- M: número de ferramentas;
- C: capacidade de carregamento de ferramentas na máquina;
- Sol*: melhor solução encontrada;
- Sol: solução média em 20 execuções;
- T*: tempo médio para encontrar a melhor solução;
- T: tempo total médio de execução.

Para a heurística construtiva são apresentados apenas os valores da solução encontrada (Sol) e o tempo computacional (T), uma vez que a heurística sempre constrói a mesma solução. Em cada linha destas tabelas apresenta-se o resultado da resolução de 10 exemplares. Para cada exemplar o método heurístico foi executado 20 vezes.

Pelos resultados mostrados nas Tabelas 2 a 6 pode-se observar que a heurística construtiva proposta obtém boas soluções iniciais para o MTSP em um tempo computacional significativamente baixo. Em comparação com a melhor solução encontrada pela meta-heurística ILS, a heurística construtiva obteve um *gap* médio de 20%.

A boa qualidade da solução inicial ajudou a melhorar o processo de convergência da meta-heurística. Em média, o ILS encontra a melhor solução em 5% do tempo total de execução do método.

A meta-heurística ILS encontra boas soluções para todos os exemplares testados. Além disso, o método mostrou ser robusto, uma vez que o desvio médio, em relação a melhor solução encontrada e a solução média, foi de 0,031. No pior caso, Tabela 6, o desvio médio foi de 0,091.

Os baixos tempos computacionais da heurística construtiva e da meta-heurística ILS também foram importantes, visto que, para alguns exemplares da Tabela 6 o método enumerativo proposto em Yanasse et al. (2009) é executado por 3600 segundos e não consegue resolver o problema. Para os exemplares desta tabela o ILS encontra a melhor solução em média em 2 segundos de execução.

Tabela 2 – MTSP: Resultados Computacionais para exemplares com 8 tarefas

			Heurística			ILS		
N	M	C	Sol	T	Sol*	Sol	T*	T
8	15	5	14,40	0,00	12,00	12,00	0,00	0,98
8	15	10	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	0,89
8	15	10	7,90	0,00	6,70	6,70	0,00	1,10
8	15	10	10,70	0,00	8,80	8,80	0,00	1,08
8	20	10	16,40	0,00	14,00	14,00	0,00	1,60
8	20	10	17,50	0,00	15,20	15,20	0,01	1,66
8	20	15	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	1,37
8	20	15	8,20	0,00	6,90	6,90	0,00	1,44
8	20	15	5,40	0,00	5,00	5,00	0,00	1,49
8	20	15	9,50	0,00	8,20	8,20	0,00	1,34
8	20	15	15,40	0,00	12,40	12,40	0,01	1,25
8	25	10	22,50	0,00	18,60	18,60	0,00	1,73
8	25	10	24,50	0,00	21,00	21,00	0,01	1,80
8	25	15	11,30	0,00	10,00	10,00	0,00	1,52
8	25	15	15,40	0,00	13,50	13,50	0,00	1,63
8	25	15	11,20	0,00	10,10	10,10	0,00	1,56
8	25	15	16,50	0,00	13,80	13,80	0,01	1,65
8	25	15	24,70	0,00	20,30	20,30	0,01	1,88
8	25	20	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	1,56
8	25	20	5,20	0,00	5,00	5,00	0,00	1,52
8	25	20	8,20	0,00	6,90	6,90	0,00	1,48
8	25	20	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	1,47
8	25	20	5,50	0,00	5,10	5,10	0,00	1,45
8	25	20	8,10	0,00	7,00	7,00	0,01	1,45
8	25	20	6,40	0,00	5,90	5,90	0,00	1,44
8	25	20	11,10	0,00	8,80	8,80	0,00	1,46
8	25	20	15,60	0,00	12,40	12,40	0,01	1,42
8	25	5	22,50	0,00	20,10	20,10	0,00	1,60
8	25	10	15,00	0,00	15,00	15,00	0,00	1,58
8	25	15	10,00	0,00	10,00	10,00	0,00	1,51
8	25	20	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	1,44
8	20	5	19,60	0,00	16,80	16,80	0,00	1,30
8	20	10	10,00	0,00	10,00	10,00	0,00	1,22
8	20	15	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	1,16
média			11,73	0,00	10,28	10,28	0,00	1,44

Tabela 3 – MTSP: Resultados Computacionais para exemplares com 9 tarefas

			Heurística			ILS		
N	M	C	Sol	T	Sol*	Sol	T*	T
9	15	5	14,90	0,00	12,20	12,20	0,00	1,39
9	15	10	5,20	0,00	5,00	5,00	0,00	1,26
9	15	10	8,50	0,00	7,40	7,40	0,00	1,28
9	15	10	12,30	0,00	9,70	9,70	0,01	1,26
9	20	10	18,60	0,00	15,00	15,00	0,03	1,83
9	20	10	21,20	0,00	17,50	17,50	0,03	1,90
9	20	15	5,40	0,00	5,00	5,00	0,00	1,54
9	20	15	9,80	0,00	8,30	8,30	0,00	1,57
9	20	15	5,40	0,00	5,30	5,30	0,00	1,55
9	20	15	10,20	0,00	8,90	8,90	0,01	1,59
9	20	15	16,60	0,00	13,10	13,10	0,04	1,63
9	25	10	24,20	0,00	19,00	19,00	0,03	2,37
9	25	10	26,50	0,00	22,30	22,30	0,03	2,47
9	25	15	11,40	0,00	10,40	10,40	0,00	2,09
9	25	15	15,80	0,00	13,70	13,70	0,00	2,19
9	25	15	20,00	0,00	16,10	16,10	0,04	2,29
9	25	15	29,10	0,00	23,50	23,51	0,04	2,50
9	25	20	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	1,96
9	25	20	5,20	0,00	5,00	5,00	0,00	1,91
9	25	20	7,80	0,00	6,70	6,70	0,00	2,47
9	25	20	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	2,56
9	25	20	5,40	0,00	5,20	5,20	0,00	2,54
9	25	20	8,60	0,00	7,60	7,60	0,00	2,54
9	25	20	7,50	0,00	6,80	6,80	0,01	2,53
9	25	20	15,80	0,00	11,80	11,80	0,02	2,38
9	25	20	17,10	0,00	13,80	13,80	0,03	2,12
9	20	5	21,70	0,00	17,40	17,40	0,01	1,82
9	20	10	10,00	0,00	10,00	10,00	0,00	1,70
9	20	15	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	1,62
9	25	5	24,10	0,00	20,40	20,40	0,01	2,22
9	25	10	15,20	0,00	15,00	15,00	0,00	2,17
9	25	15	10,00	0,00	10,00	10,00	0,00	2,10
9	25	20	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	2,00
média			12,83	0,00	10,97	10,97	0,01	1,98

Tabela 4 – MTSP: Resultados computacionais para exemplares com 10 e 15 tarefas.

			Heurística		ILS			
N	M	C	Sol	T	Sol*	Sol	T*	T
10	10	4	12,50	0,00	9,50	9,50	0,02	1,17
10	10	5	7,30	0,00	6,20	6,20	0,00	1,12
10	10	6	4,40	0,00	4,30	4,30	0,00	1,09
10	10	7	3,00	0,00	3,00	3,00	0,00	1,07
15	20	6	27,50	0,00	21,40	21,54	1,07	8,84
15	20	8	16,60	0,00	14,30	14,35	0,62	7,88
15	20	10	11,30	0,00	10,30	10,30	0,01	7,58
15	20	12	8,80	0,00	8,20	8,20	0,00	7,36
média			11,43	0,00	9,65	9,67	0,21	4,51

Tabela 5 – MTSP: Resultados computacionais para exemplares com 15 tarefas.

			Heurística		ILS			
N	M	C	Sol	T	Sol*	Sol	T*	T
15	15	5	21,60	0,00	16,60	16,64	0,69	5,90
15	15	10	5,30	0,00	5,00	5,00	0,01	7,32
15	15	10	12,60	0,00	9,60	9,62	0,23	5,02
15	15	10	19,80	0,00	14,80	14,97	1,00	6,09
15	20	5	25,30	0,00	20,60	20,74	0,95	9,60
15	20	10	10,80	0,00	9,90	9,90	0,01	8,99
15	20	10	26,80	0,00	19,80	19,97	1,06	9,43
15	20	10	34,00	0,00	25,50	25,86	1,07	8,91
15	20	15	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	7,26
15	20	15	6,80	0,00	5,80	5,80	0,05	6,97
15	20	15	17,00	0,00	12,30	12,41	1,14	7,11
15	20	15	8,30	0,00	6,80	6,80	0,18	7,00
15	20	15	16,90	0,00	12,80	12,93	0,92	7,16
15	20	15	26,20	0,00	20,40	20,56	1,51	6,91
15	25	5	34,80	0,00	27,50	27,67	0,80	9,99
15	25	10	17,00	0,00	15,00	15,00	0,01	9,44
15	25	10	33,60	0,00	26,20	26,30	1,35	12,08
15	25	10	45,50	0,00	34,00	34,33	2,55	12,95
15	25	15	10,00	0,00	10,00	10,00	0,00	10,71
15	25	15	14,40	0,00	11,40	11,42	0,21	10,75
15	25	15	25,20	0,00	18,90	18,94	1,22	11,01
15	25	15	17,70	0,00	13,70	13,75	1,03	10,67
15	25	15	33,50	0,00	24,50	24,81	1,65	10,29
15	25	15	46,40	0,00	35,90	36,25	2,46	10,99
15	25	20	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	8,92
15	25	20	5,10	0,00	5,00	5,00	0,00	8,44
15	25	20	7,60	0,00	6,30	6,30	0,04	8,26
15	25	20	10,40	0,00	8,20	8,23	0,51	8,50
15	25	20	5,40	0,00	5,00	5,00	0,01	8,69
15	25	20	8,70	0,00	6,60	6,60	0,48	8,56
15	25	20	14,90	0,00	11,10	11,19	0,73	8,53
15	25	20	12,40	0,00	9,50	9,52	0,33	8,52
15	25	20	22,50	0,00	17,00	17,34	1,60	8,68
15	25	20	30,10	0,00	22,90	23,37	1,56	8,84
média			18,72	0,00	14,66	14,77	0,75	8,78

Tabela 6 – MTSP: Resultados computacionais para exemplares com 20 e 25 tarefas.

N	M	C	Heurística		ILS			
			Sol	T	Sol*	Sol	T*	T
20	15	5	29,40	0,00	21,20	21,72	3,55	15,00
20	15	10	5,80	0,00	5,40	5,40	0,03	12,35
20	15	10	15,50	0,00	11,00	11,42	1,91	12,90
20	20	5	33,60	0,00	24,40	24,86	6,17	23,21
20	20	10	11,70	0,00	10,60	10,66	0,96	21,99
20	20	15	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	20,86
20	20	15	8,80	0,00	6,90	6,90	0,61	16,97
20	20	15	10,90	0,00	8,10	8,27	1,21	15,86
20	25	5	40,10	0,00	30,40	30,87	4,41	23,74
20	25	10	17,80	0,00	15,40	15,48	1,02	22,30
20	25	15	10,00	0,00	10,00	10,00	0,00	21,39
20	25	15	16,60	0,00	13,40	13,54	2,13	21,31
20	25	15	20,70	0,00	15,80	16,16	3,98	21,94
20	25	15	62,40	0,00	46,50	47,47	8,20	25,94
20	25	20	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	19,53
20	25	20	5,10	0,00	5,00	5,00	0,00	18,41
20	25	20	6,90	0,00	5,70	5,70	0,35	17,90
20	25	20	13,00	0,00	9,00	9,24	1,96	17,53
25	15	10	7,00	0,00	5,90	5,96	0,93	21,87
25	20	10	14,20	0,00	11,60	11,93	3,55	31,27
25	20	15	10,10	0,00	7,60	7,73	2,07	27,81
25	25	10	20,40	0,00	16,60	16,86	6,51	41,19
25	25	15	10,00	0,00	10,00	10,00	0,00	38,92
25	25	20	5,00	0,00	5,00	5,00	0,00	38,22
25	25	20	5,50	0,00	5,10	5,10	1,02	35,18
25	25	20	7,40	0,00	6,40	6,49	1,71	34,35
média			15,30	0,00	12,19	12,38	2,01	23,77

5. Conclusão

Este trabalho propõe uma nova heurística construtiva para gerar boas soluções iniciais para o problema de minimizar o número de trocas de ferramentas (MTSP) em uma máquina flexível de manufatura. Além disso, apresenta uma implementação da meta-heurística Busca Local Iterativa (ILS) para refinar a solução inicial construída, objetivando encontrar um bom limitante superior para o MTSP.

A heurística construtiva proposta utiliza a ideia de gerar um grafo no qual os vértices representam as ferramentas e os arcos são as tarefas. Para cada tarefa haverá arcos rotulados com o número da tarefa interligando as ferramentas necessárias para sua execução. O objetivo é produzir vértices isolados por meio da retirada de arcos do grafo, ou seja, escolher as tarefas a serem executadas de tal modo que ferramentas possam ser retiradas da caixa e não necessitem mais voltar. Esta heurística obtém boas soluções iniciais para todos os exemplares testados, sendo um bom ponto de partida para o processo de busca da meta-heurística ILS.

Os experimentos computacionais mostram que o ILS é competitivo para resolver esse problema em um tempo computacional razoável. O ILS encontrou boas soluções para os exemplares testados em pouco tempo de execução e mostrou ser um método robusto. A heurística proposta proporcionou uma aceleração no processo de convergência do ILS, fornecendo boas soluções iniciais. Portanto, estes resultados validam a heurística construtiva proposta e a aplicação do ILS ao MTSP.

Um possível alvo de estudos futuros é a utilização de outras regras de seleção de tarefas a serem inseridas e de ferramentas a serem trocadas na heurística construtiva. Pretende-se também, utilizar a meta-heurística ILS como geradora de soluções para um método híbrido conhecido como Busca por Agrupamentos (CS, do inglês *Clustering Search*) (Chaves e Lorena, 2008; Chaves e Lorena, 2009). Além disso, a realização de testes com exemplares maiores também será objeto de investigação futura.

Referências

- Al-Fawzan, M.A., Al-Sultan, K.S.** (2002), A tabu search based algorithm for minimizing the number of tool switches on a flexible machine, *Computers & Industrial Engineering*, 44, 35-47
- Bard, J.F.** (1988), A heuristic for minimizing the number of tool switches on flexible machine, *IIE Transactions*, 20, 382-391.
- Chaves, A. A., Lorena, L. A. N.** (2008), Hybrid metaheuristic for the prize collecting traveling salesman problem, *Lecture Notes in Computers Science*, 4972, 123-134.
- Chaves, A. A., Lorena, L. A. N.** (2009). Clustering search algorithm for the capacitated centred clustering problem, *Computers & Operations Research*, 37, 552-558.
- Crama, Y., Kolen, A.W.J., Oelermans, A.G., Spijksma, F.C.R.** (1994), Minimizing the number of tool switches on a flexible machine, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 6, 33-54.
- Fathi, Y., Barnette, K.W.** (2002), Heuristic procedures for the parallel machine problem with tool switches, *International Journal of Production Research*, 40, 151-164.
- Ghrayeb, O.A., Phojanamongkolkij, N., Finch, P.R.** (2003), A mathematical model and heuristic procedure to schedule printed circuit packs on sequence, *International Journal of Production Research*, 41, 3849-3860.
- Hertz, A., Laporte, G., Mittaz, M., Stecke, K.** (1998), Heuristics for minimizing tool switches when scheduling part types on a flexible machine, *IEEE Transactions*, 30, 689-694.
- Laporte, G., Salazar, J.J., Semet, F.** (2004), Exact Algorithms for the Job Sequencing and Tool Switching Problem, *IIE Transactions*, 36, 37-45.
- Lourenço, H.; Martin, O.; Stützle, T.** Iterated local search. Em: Glover, F. e Kochenberger, G.A. (Eds.). *Handbook of Metaheuristics*, Springer, New York, 320-353, 2003.
- Matzliach, B.** (1998), The online tool switching problem with non-uniform tool size. *International Journal of Production Research*, 36, 3407-3420.
- Shirazi, R., Frizelle, G.D.M.** (2001), Minimizing the number of tool switches on a flexible machine: an empirical study, *International Journal of Production Research*, 39, 3547-3560.
- Song, C-Y., Hwang, H.** (2002), Optimal tooling policy for a tool switching problem of a flexible machine with automatic tool transporter, *International Journal of Production Research*, 40, 873-883.
- Stützle, T.** Iterated local search for the quadratic assignment problem. Tese (Doutorado), TU Darmstadt, 1999.
- Tang, C.S., Denardo, E.V.** (1988), Models Arising from a Flexible Manufacturing Machine, Part I: Minimization of the Number of Tool Switches, *Operations Research*, 36, 767-777.
- Yanasse, H.H., Lamosa, M.J.P.** (2005), An application of the generalized travelling salesman problem: the minimization of tool switches problem, *Operations Research 2005 – International Annual Scientific Conference of the German Operations Research Society*, Bremen, Germany, Program, 90-90.
- Yanasse, H.H., Rodrigues, R.C.M.** (2007). A partial ordering enumeration scheme for solving the minimization of tool switches problem, *INFORMS Annual Meeting Seattle 2007*, Seattle, Washington, EUA, Book of Abstracts, 299-299.
- Yanasse, H.H., Rodrigues, R.C.M., Senne, E.L.F.** (2009), Um algoritmo enumerativo baseado em ordenamento parcial para resolução do problema de minimização de trocas de ferramentas, *Gestão e Produção*, 16 (3), 370-381.