

PALETIZAÇÃO DE CARGAS ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM PELA META-HEURÍSTICA DO RECOZIMENTO SIMULADO

Wander Antunes Gaspar Valente, wander.gaspar@ifsudestemg.edu.br¹

Maykon Vieira Soares Júnior, maykonjunior2006@hotmail.com¹

Rodrigo Souza, rodrigo.engecom@gmail.com¹

Victor Rezende Franco, victorrezendefranco@gmail.com¹

¹ Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, Juiz de Fora-MG, Brasil

Resumo: O presente trabalho apresenta uma abordagem computacional para o problema do carregamento de cargas em um paletê retangular a partir da aplicação de uma meta-heurística denominada Recozimento Simulado. O método originalmente baseia-se no esfriamento controlado de metais para obter uma configuração cristalina ótima. Nos casos de teste utilizados, obteve-se um carregamento ótimo, sem perdas de espaço, em mais de 80% das simulações realizadas. Os dados de posicionamento e orientação das caixas são em seguida fornecidos como parâmetros de entrada para o software de um braço robótico industrial, que deve executar a paletização respeitando-se as restrições de posicionamento e movimentação.

Palavras-chave: Paletização de cargas, Otimização combinatória, Recozimento simulado.

1. INTRODUÇÃO

Denomina-se paletização ao arranjo de cargas sobre uma plataforma de madeira (estrado), ou outro tipo de material, a fim de tornar mais ágeis e seguras as operações de manuseio, armazenamento e movimentação (Lim, Yu, Kang and Han, 2006). A paletização é utilizada para cargas acondicionadas em caixas, sacos, garrafas ou outros materiais e o empilhamento é conduzido de acordo com um padrão pré-estabelecido.

O processo de paletização depende de diversos fatores como a quantidade, as dimensões e o formato das cargas, bem como do número de camadas. Em razão da complexidade do problema, a paletização pode ser conduzida através de um sistema de automação industrial, com o emprego de esteiras rolantes e braços robóticos, cuja programação da execução deve atender a requisitos de posicionamento, movimentação e tempos de operação (Figura 1).

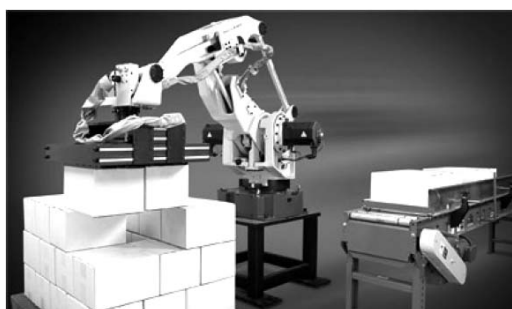


Figura 1: Automação da paletização com braço robótico (Lim, Yu, Kang and Han, 2006)

Nesse contexto, o problema da programação da paletização pode ser tratado com algoritmos computacionais que lidam com a otimização combinatória em um espaço de estados discreto (Pureza and Morabito, 2006).

Um algoritmo computacional deve, em geral, atender a duas propriedades fundamentais. A primeira, consiste em possuir tempo de execução aceitável, de acordo com o problema tratado. A segunda propriedade é fornecer uma solução correta em todas as execuções. Em Ciência da Computação, uma heurística é um algoritmo que não atende a pelo menos uma das propriedades fundamentais, ou seja, não pode garantir soluções corretas em todas as execuções ou em um tempo pré-determinado (Pearl, 1984).

Denominam-se meta-heurísticas os métodos de natureza heurística normalmente empregados na área de otimização combinatória, onde se deseja encontrar uma solução ótima ou sub-ótima para um problema de valor máximo ou mínimo. Uma abordagem através de meta-heurísticas é geralmente aplicável a problemas de elevada complexidade algorítmica

para os quais se dispõe de dados incompletos ou capacidade computacional limitada. O argumento favorável à utilização de meta-heurísticas deve-se à elevada capacidade de encontrar soluções ótimas com menor esforço computacional (Blum and Roli, 2003).

Diversos métodos propostos na literatura científica podem ser classificados como meta-heurísticas, dentre os quais é possível citar algoritmos genéticos, recozimento simulado, busca tabu e colônia de formigas (Bianchi, Dorigo, Gambardella and Gutjahr, 2009).

Métodos baseados em meta-heurísticas têm sido empregados com sucesso em problemas de otimização combinatória em muitas áreas da Engenharia. Apesar de os resultados promissores obtidos por essa abordagem em uma variedade de casos complexos, poucas aplicações para o problema do carregamento de paletes são relatadas na literatura científica (Dowsland, 1993). Em um trabalho recente de Silva, Oliveira and Wäscher (2016), é apresentada uma interessante revisão bibliográfica de artigos cujo tema consiste em abordagens computacionais para o problema da paletização de cargas. Observa-se, nessa revisão, que apenas dois trabalhos utilizam alguma técnica baseada em meta-heurísticas.

Nessa linha de tratamento para o problema, o presente estudo tem por objetivo propor uma abordagem através de uma meta-heurística computacional para buscar soluções ótimas ou sub-ótimas em um espaço de estados discreto, ou seja, finito, para problemas de carregamento de paletes em ambientes de manufatura.

Especificamente, o trabalho desenvolvido emprega a meta-heurística denominada recozimento simulado (do inglês, *Simulated Annealing*), que explora uma analogia entre o resfriamento de metais em uma estrutura cristalina de baixa energia e a busca pelo valor mínimo em um sistema modelado computacionalmente (Kirkpatrick, Gelatt and Vecchi, 1983). A escolha do recozimento simulado deve-se a um conjunto de características positivas do método como a capacidade de lidar com diversos tipos de problemas e funções de otimização, a relativa facilidade de programação quando comparado com outras meta-heurísticas e análises estatísticas de desempenho que relatam bons resultados quando aplicado em situações de elevada complexidade combinatorial (Rutenbar, 1989).

Os algoritmos desenvolvidos no contexto desse trabalho tem como foco a paletização de cargas na estação de manufatura automatizada instalada no Núcleo de Mecânica do campus Juiz de Fora do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, que inclui um manipulador robótico industrial (Figura 2).



Figura 2: Estação de manufatura automatizada do IF Sudeste MG

A primeira etapa do desenvolvimento do projeto concentra-se no carregamento de estrados em formato retangular e em camada única, utilizando cargas tridimensionais modeladas como paralelepípedos de comprimento variável e arranjos de cargas em disposição paralela ou perpendicular (Martello and Monaci, 2015). Inicialmente, o trabalho consiste em obter uma configuração que maximize o aproveitamento do espaço disponível para um conjunto de caixas a serem carregadas em um palet retangular de dimensões configuráveis como dados de entrada para o problema. As restrições impostas à solução final procurada são a não ocorrência de colisões entre caixas e a disposição delas nos limites do estrado. A Figura 3 representa duas configurações de paletes restritas aos limites físicos do estrado. Em *P1*, não há a ocorrência de colisão entre caixas e em *P2* existe a colisão entre peças.

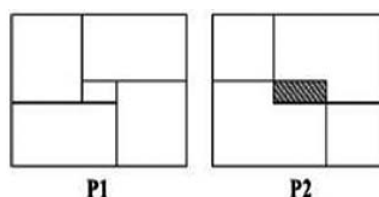


Figura 3: Configurações de paletes sem ocorrências de colisão de caixas (*P1*) e com colisão de caixas (*P2*)

Em uma segunda etapa, o desenvolvimento do projeto trata do carregamento de estrados em múltiplas camadas, mantendo-se a mesma configuração de paletes e de cargas em formato de paralelepípedo. Nessa etapa, também é possível definir a priori as dimensões (largura e comprimento) do estrado a cada execução da simulação computacional.

A implementação do algoritmo computacional para o método de recozimento simulado utiliza, como ferramenta de software, o ambiente de programação do Matlab[®]. Como saída do algoritmo, obtém-se as coordenadas espaciais e orientações de cada uma das caixas a serem carregadas no estrado. Esse conjunto de dados é, em seguida, fornecido como parâmetro de entrada para o ambiente de programação da estação de manufatura automatizada Festo[®], que emprega um braço robótico Mitsubishi[®] modelo RV-2AJ. Os dados recebidos são processados no ambiente de desenvolvimento integrado Cosirop utilizando-se a linguagem MELFA Basic IV (Mitsubishi, 2007). A partir dos dados de posicionamento e orientação, o braço robótico executa a movimentação sequencial das caixas, a fim de realizar o carregamento de acordo com a saída do algoritmo desenvolvido na meta-heurística computacional.

2. MODELO COMPUTACIONAL

A representação computacional do palete utiliza uma matriz $M \times N$, onde M e N são, respectivamente, o comprimento e a largura do estrado, medidos em milímetros. Inicialmente, a matriz é preenchida com zeros, representando assim o paleta vazio. Na sequência, são sorteadas aleatoriamente as posições iniciais a serem ocupadas pelas caixas no estrado, sem nenhum tratamento de colisão. O único critério de validação da posição sorteada é que as caixas estejam totalmente sobre a área útil do paleta. Caso a posição sorteada não atenda ao critério estabelecido, a caixa é descartada e novo sorteio é realizado.

A partir da configuração inicial, a matriz é alterada de acordo com a distribuição das peças, sendo que cada elemento da matriz é acrescido de uma unidade para cada caixa que ocupa uma determinada posição. Nessa abordagem, os espaços vazios são representados por 0, espaços que contêm apenas uma caixa são representados por 1, espaços onde existe colisão de duas caixas são representados por 2 e assim sucessivamente (Figura 4 – esquerda).

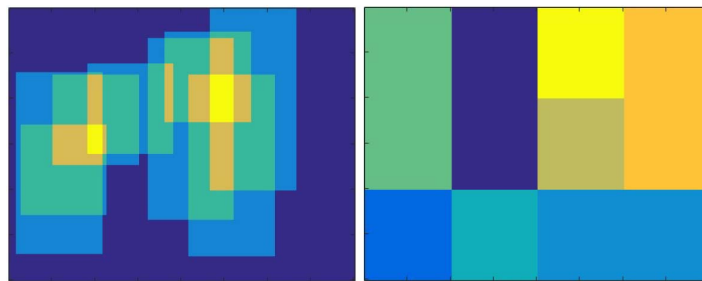


Figura 4: Configuração inicial (esq.) e final (dir.) das caixas no paleta

Na representação pictográfica da Figura 4 (esq.), quanto mais clara a cor ou o tom de cinza, maior o nível de colisão entre as caixas dispostas no estrado na configuração inicial. É possível observar que, em algumas regiões do estrado, ocorrem múltiplas colisões. Por outro lado, há regiões onde nenhuma caixa encontra-se posicionada.

Em seguida, as colisões são tratadas pelo método do recozimento simulado. Uma vez que a meta-heurística fundamenta-se no comportamento de um corpo metálico durante o processo de resfriamento, torna-se necessário correlacionar as características do carregamento de paletes com as propriedades físicas tratadas no recozimento simulado. Nesse contexto, a diminuição da temperatura do corpo é relacionada ao avanço do número de iterações ocorridas no carregamento do estrado.

As caixas que apresentam um maior índice de colisões têm maior probabilidade de serem deslocadas a cada iteração. É realizado um sorteio para determinar se uma determinada caixa será deslocada na largura ou no comprimento do estrado, ou se será apenas rotacionada. A probabilidade para cada uma dessas ocorrências é, respectivamente, 46%, 46% e 8%. Esses valores de probabilidade foram escolhidos com base em sucessivos testes realizados com combinações diversas de valores. Além disso, os deslocamentos são restritos a até 10% do comprimento ou largura do estrado.

Caso o deslocamento efetuado reduza a quantidade total de colisões no paleta, o novo estado de carregamento é automaticamente aceito e tem início a próxima iteração do recozimento. Caso o deslocamento efetuado implique em uma piora no estado do carregamento atual, é utilizada uma probabilidade, tratada de acordo com a Equação 1 para determinar se o carregamento proposto será aceito pelo modelo computacional ou não.

$$\text{if } \exp(k * (\text{iteration} - \text{tot_iter}) / \text{tot_iter}) > \text{rand}() \quad (1)$$

A Figura 4 (dir.) apresenta uma configuração final fornecida pelo modelo computacional onde obteve-se o aproveitamento máximo do estrado para o conjunto de caixas dispostas conforme configuração inicial à esquerda. Na representação à direita, cada cor ou tom de cinza representa uma caixa alocada no paleta.

O algoritmo desenvolvido foi capaz de encontrar a solução ótima, ou seja, aquela que proporciona o aproveitamento total do estrado, em mais de 80% das execuções em um total de 100, para 3 (três) casos de testes distintos, constituídos por quantidades de caixas e tamanhos de estrados diferentes (Tabela 1).

Na segunda etapa do desenvolvimento do projeto, os conjuntos de testes utilizados consideram 3 (três) configurações distintas de quantidades de caixas e dimensões do estrado para o carregamento em duas camadas sobre o paleta.

A Figura 5 (superior) mostra as configurações iniciais para as duas camadas de um estrado que mede 12 cm $\times$ 16 cm, obtidas a partir de posicionamento aleatório das caixas no espaço de trabalho. A Figura 5 (inferior) exibe as

Tabela 1: Erros encontrados no carregamento em uma camada sobre paletes retangulares

Caso de Teste	0%	0,1% a 5,0%	5,1% a 9,2%
Nº 1	86	8	6
Nº 2	87	6	7
Nº 3	83	9	8

configurações finais para as duas camadas do mesmo palete, obtidas após a execução do modelo computacional baseado na meta-heurística do recozimento simulado. Como é possível observar, o algoritmo foi capaz de apresentar uma solução ótima para a disposição das peças em ambas as camadas do estrado.

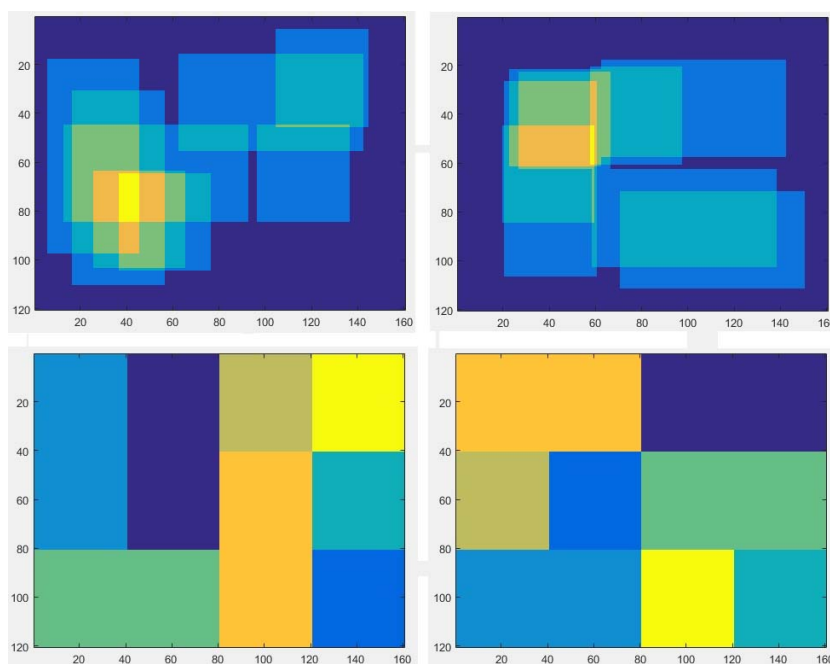


Figura 5: Configurações iniciais (superior) e finais (inferior) das caixas em duas camadas

Nessa situação, o modelo computacional desenvolvido foi também capaz de encontrar a solução ótima, ou seja, aquela que proporciona o aproveitamento total do estrado, em mais de 80% das execuções em um total de 100, para 3 (três) casos de testes distintos, constituídos por quantidades de caixas e tamanhos de estrados diferentes (Tabela 2).

Tabela 2: Erros encontrados no carregamento em duas camadas sobre paletes retangulares

Caso de Teste	0%	0,1% a 5,0%	5,1% a 9,5%
Nº 1	82	11	7
Nº 2	85	10	5
Nº 3	81	12	7

Como é possível observar a partir das Tabelas 1 e 2, não houve discrepâncias entre os resultados encontrados para os casos de teste destinados à paletização de cargas em uma ou duas camadas. Esse resultado é interessante porque caracteriza uma condição de robustez do algoritmo desenvolvido.

Uma vez que a solução computacional para a paletização de cargas é *off-line*, ou seja, obtém-se uma configuração de caixas a priori à execução da movimentação das peças, é possível repetir o algoritmo até que o resultado encontrado atenda a um determinado critério de parada, em geral a utilização de um percentual sobre o total da área disponível no estrado.

3. PALETIZAÇÃO DE CARGAS AUTOMATIZADA

A parte experimental, conduzida em laboratório, é realizada após a execução do modelo computacional. Os dados de saída do algoritmo, implementado no ambiente de programação do Matlab, consiste em um conjunto de valores numéricos que representa as coordenadas espaciais (x , y e z) e a orientação (vertical ou horizontal) de cada uma das caixas a serem paletizadas. A informação sobre a orientação é necessária quando a peça não for exatamente cúbica.

A base de dados gerada no Matlab é, posteriormente, transferida para o ambiente de desenvolvimento integrado Cosirop, conectado ao braço robótico Mitsubishi modelo RV-2AJ. Nessa etapa do projeto, o objetivo do trabalho consiste em realizar o movimento do articulador final de forma a coletar sequencialmente as caixas a partir de dois pontos de

alimentação distintos. Nos casos de testes realizados, são utilizadas caixas em formato de paralelepípedo com 2 (dois) conjuntos de dimensões diferentes. O alimentador 1 está configurado para fornecer ao automatismo as caixas de $8\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ e o alimentador 2 está configurado para as peças de $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ (Figura 6). De acordo com a programação de movimentação definida no Cossirop, o articulador final deve coletar a próxima caixa no respectivo alimentador.

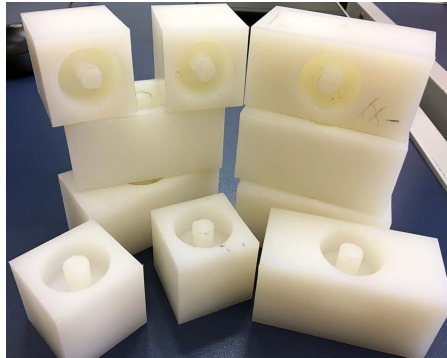


Figura 6: Modelos de caixas utilizadas nos casos de teste conduzidos

A solução computacional implementada em Melfa Basic para a movimentação das cargas utiliza como princípio um *flag* para cada peça. Inicialmente este *flag* é setado em 0 para todas as caixas. À medida que as peças são posicionadas no estrado, os respectivos *flags* são alterados para 1. Ao final do processo, todos os *flags* encontram-se alterados para a unidade.

A usinagem das peças utilizadas no experimento, conforme exibidas na Fig. 6, foi conduzida no laboratório de máquinas operatrizes do Núcleo de Mecânica do IF Sudeste MG campus Juiz de Fora. A geometria do recorte para a pinça foi projetado para adaptar-se a um modelo de garra metálica também produzido em laboratório e fixado ao braço robótico RV-2AJ (Figura 7).

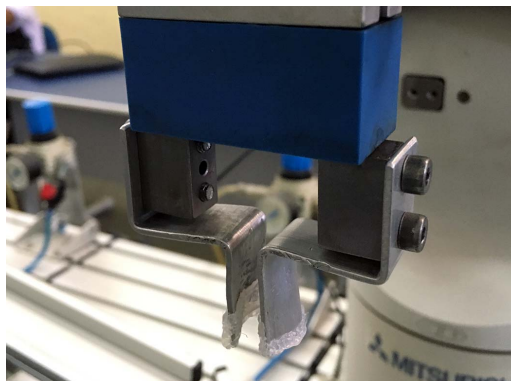


Figura 7: Garra metálica utilizada no braço robótico RV-2AJ

A geometria adotada para as peças e para a garra do braço robótico tem por objetivo minimizar a ocorrência de colisões do atuador final ao realizar a movimentação da caixa sobre o estrado.

4. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentado alcança índices de aproveitamento total do estrado em mais de 80% das execuções para os casos de teste utilizados, tanto para configurações de paletização em 1 (uma) quanto em 2 (duas) camadas.

O estudo desenvolvido é relevante ao incluir desde uma solução computacional para o problema de otimização combinatória relacionado à paletização de cargas industriais até o sequenciamento de movimentações do braço robótico para executar o conjunto de carregamento determinado pela meta-heurística empregada.

O uso da meta-heurística do recozimento simulado mostra-se interessante para o problema da paletização de cargas. Os resultados alcançados sugerem que a aplicação dessa abordagem tem potencial para resolver satisfatoriamente configurações de cargas de elevada complexidade, que incluam peças de diversos formatos.

Em continuidade ao desenvolvimento do projeto, pretende-se trabalhar com configurações em N camadas para peças em formato de paralelepípedo com dimensões diversas. A partir do uso desses parâmetros, deve-se elevar a complexidade do problema tratado. O objetivo é analisar o esforço computacional do modelo e avaliar possíveis refinamentos no algoritmo desenvolvido.

Ainda como trabalho futuro, deve-se avaliar o emprego de outra técnica de modelagem computacional baseada em meta-heurísticas inspiradas na natureza. O objetivo dessa etapa será avaliar comparativamente a qualidade dos resultados obtidos e o índice de desempenho dos métodos utilizados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IF Sudeste MG pelo apoio financeiro que permitiu a realização desse projeto de pesquisa e treinamento profissional, que envolveu professor e alunos de graduação do campus Juiz de Fora.

6. REFERÊNCIAS

- Bianchi, L., Dorigo, M., Gambardella, L.M. and Gutjahr, W.J., 2009. "A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization". *Natural Computing*, Vol. 8, No. 2, pp. 239–287. ISSN 1572-9796. doi:10.1007/s11047-008-9098-4. URL <https://doi.org/10.1007/s11047-008-9098-4>.
- Blum, C. and Roli, A., 2003. "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison". *ACM Comput. Surv.*, Vol. 35, No. 3, pp. 268–308. ISSN 0360-0300. doi:10.1145/937503.937505. URL <http://doi-acm-org.ez367.periodicos.capes.gov.br/10.1145/937503.937505>.
- Dowland, K.A., 1993. "Some experiments with simulated annealing techniques for packing problems". *European Journal of Operational Research*, Vol. 68, No. 3, pp. 389–399. ISSN 0377-2217. doi:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90195-S](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90195-S). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179390195S>.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. and Vecchi, M.P., 1983. "Optimization by simulated annealing". *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–680. ISSN 0036-8075. doi:10.1126/science.220.4598.671. URL <http://science.sciencemag.org/content/220/4598/671>.
- Lim, S., Yu, S., Kang, M. and Han, C., 2006. "Robot palletizing simulation using heuristic pattern generation and trajectory optimization". In *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*. pp. 2227–2232. doi:10.1109/SICE.2006.315731.
- Martello, S. and Monaci, M., 2015. "Models and algorithms for packing rectangles into the smallest square". *Computers and Operations Research*, Vol. 63, pp. 161–171. ISSN 0305-0548. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.04.024>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054815001161>.
- Mitsubishi, 2007. *Mitsubishi industrial robot: CR1 controller instructions manual*.
- Pearl, J., 1984. *Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA. ISBN 0-201-05594-5.
- Pureza, V. and Morabito, R., 2006. "Some experiments with a simple tabu search algorithm for the manufacturer's pallet loading problem". *Computers and Operations Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 804–819. ISSN 0305-0548. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.08.009>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054804001996>.
- Rutenbar, R.A., 1989. "Simulated annealing algorithms: an overview". *IEEE Circuits and Devices Magazine*, Vol. 5, No. 1, pp. 19–26. ISSN 8755-3996. doi:10.1109/101.17235.
- Silva, E., Oliveira, J.F. and Wäscher, G., 2016. "The pallet loading problem: a review of solution methods and computational experiments". *International Transactions in Operational Research*, Vol. 23, No. 1-2, pp. 147–172. doi:10.1111/itor.12099. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/itor.12099>.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

LOADS PALLETIZATION WITH AN APPROACH BASED ON SIMULATED ANNEALING HEURISTIC

Wander Antunes Gaspar Valente, wander.gaspar@ifsudestemg.edu.br¹

Maykon Vieira Soares Júnior, maykonjunior2006@hotmail.com¹

Rodrigo Souza, rodrigo.engecom@gmail.com¹

Victor Rezende Franco, victorrezeendefranco@gmail.com¹

¹Federal Institute of Education, Science and Technology of the Southeast of Minas Gerais

Resumo: This paper presents a computational approach to the loading problem on a rectangular pallet through the application of a metaheuristic called Simulated Annealing. The method originally relies on controlled cooling of metals to obtain optimum crystalline configuration. In the test cases, an optimum load was obtained, without loss of space, in more than 80% of the computational simulations. Next, data positioning and orientation of the pallets are provided as input parameters for the software controller of an industrial robotic arm, which must perform the palletizing respecting the restrictions of positioning and movement in the workspace.

Palavras-chave: Load palletizing, Combinatorial optimization, Simulated annealing