

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

David Trindade Disconzi

**O DESPERDÍCIO DE ESPAÇOS FÍSICOS EM CHAPAS METÁLICAS
PARA O PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL RETANGULAR
EM FAIXAS**

Santa Maria, RS
2021

David Trindade Disconzi

**O DESPERDÍCIO DE ESPAÇOS FÍSICOS EM CHAPAS METÁLICAS PARA O
PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL RETANGULAR EM FAIXAS**

Projeto de pesquisa do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro de Produção**.

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior

Santa Maria, RS.

2021

O DESPÉRDÍCIO DE ESPAÇOS FÍSICOS EM CHAPAS METÁLICAS PARA O PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL RETANGULAR EM FAIXAS

WASTE OF PHYSICAL SPACES ON METAL PLATES FOR THE PROBLEM OF RECTANGULAR BIDIMENSIONAL CUTTING IN STRIPS

David Trindade Disconzi¹, Alvaro Neuenfeldt Júnior²

RESUMO

O problema de corte bidimensional retangular em faixas consiste em determinar o arranjo de itens retangulares sobre uma faixa, na qual a largura da faixa é pré-definida e a altura deve ser minimizada para alocar todos os itens retangulares, satisfazendo restrições físicas, estruturais e de ortogonalidade. Assim, o objetivo da presente pesquisa é desenvolver um framework de verificação a fim de comparar o uso prático de soluções alternativas e soluções ótimas para o problema de corte de chapas metálicas. Para a verificação dos resultados, métodos exatos foram construídos através de modelagens matemáticas e soluções alternativas foram obtidas com o uso de heurísticas. Com a condução da pesquisa foi verificado que as soluções alternativas são capazes de reduzir o tempo, corte e deslocamento da pistola de corte nas chapas metálicas em comparação às soluções ótimas em 12 das instâncias testadas do problema.

Palavras-chave: Problema de corte e empacotamento em faixas, Método exato, Heurísticas, Desperdício

ABSTRACT

The two-dimensional rectangular strip packing consists of determining the arrangement of rectangular items on a strip, in which the width of the strip is pre-defined and the height must be minimized to allocate all rectangular items, satisfying physical, structural, structural constraints and orthogonality. Thus, the objective of this research is to develop a verification framework in order to compare the practical use of alternative solutions and optimal solutions to the problem of cutting sheet metal. To verify the results, exact methods were built through mathematical modeling and alternative solutions were obtained using heuristics. With the conduct of the research it was found that the alternative solutions are capable of reducing the time, cut and displacement of the cutting gun in the metal plates in comparison to optimal solutions in 12 of the tested instances of the problem.

Keywords: Strip packing problem, Exact method, Heuristics, Waste

¹ Aluno, autor: Graduando do Curso de Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Maria

² Professor, orientador: Doutor em Engenharia e Gestão Industrial pela Universidade do Porto

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BL	<i>Bottom-Left</i>
BLF	<i>Bottom-Left-Fill</i>
C&P	<i>Cutting and Packing Problem</i>
2D-SPP	<i>strip packing problem</i> retangular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
UNIDO	<i>United Nations Industrial Development Organization</i>
D_1	maior dimensão do objeto
D_2	menor dimensão do objeto
d_{1i}	maior dimensão do retângulo
d_{2i}	menor dimensão do retângulo
h	altura da faixa
H_{A1}	altura da solução alternativa 1
H_{A2}	altura da solução alternativa 2
H_{SO}	altura da solução ótima
LB	<i>Lower Bound</i>
n	número total de retângulos na instância
nt	quantidade de retângulos diferentes na instância
S	ponto inicial de corte
w	largura da faixa
x_i, x_j	posição do retângulo na coordenada x
y_i, y_j	posição do retângulo na coordenada y
α	variável que representa a ocorrência de rotatividade de 90 graus nos retângulos

1 INTRODUÇÃO

O setor industrial, desde a origem até a atualidade, mostrou-se substancial para a economia mundial. Com isso faz-se necessária a reestruturação produtiva e tecnológica, no intuito de atender as demandas, frente aos novos desafios de ambientes competitivos. Exigiu-se a modernização dos processos produtivos para a reformulação de novos produtos, buscando o propósito de satisfazer as expectativas sobre determinado produto.

A indústria metalmeccânica vem inovando em técnicas de produção desde a Revolução Industrial. Com o surgimento da produção em série e, mais tarde, com a criação de novas tecnologias, houve um aumento da competitividade, sendo assim o impacto viu-se na qualidade dos produtos. A partir de então, a acirrada concorrência passou a impedir que as empresas aumentassem sua margem de lucro, com isso o repasse foi diretamente para o custo final do produto, necessitando de um uso mais eficiente da sua matéria-prima, a fim de reduzir seus custos. Qualidade, eficiência e produtividade são conceitos que devem ser percebidos na concepção dos produtos da empresa que busca sobreviver em um mercado cada vez mais competitivo (Campos, 1992). Em um contexto onde as organizações se preocupam cada vez mais com a eficiência produtiva de equipamentos, visando eliminar as perdas de matéria-prima e de tempo e com produtos defeituosos ou de má qualidade (Delmas, Pokovic, 2015).

No que se refere ao mercado da indústria de transformação, em específico quando se trata de chapas metálicas, a indústria siderúrgica é uma importante fornecedora de insumos. A indústria siderúrgica é caracterizada pela presença de grandes organizações, um total de 25 indústrias brasileiras, trabalhando em diversas etapas do processo produtivo, desde a transformação do minério em ferro primário (ferro gusa), até a produção de bobinas laminadas a quente, a frio ou galvanizadas, para aplicação em produtos na indústria automotiva, de bens de capital, naval, de linha branca, entre outras. Corroborando com as informações sobre a importância da produção, o Instituto Aço Brasil publicou a quantidade de toneladas de aço nos últimos 12 meses manufaturado para as 10 maiores indústrias de siderurgia, são: aço bruto (345.300 t), laminados (233.660 t), planos (140.120 t), longos (93.540 t), semiacabados (95.030 t), placas (84.140 t), ferro-gusa (280.350 t), lingotes, bloco e tarugos (10.890 t) (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2019).

Conforme referido, a indústria siderúrgica tem como principais insumos o minério de ferro, onde possui grande disponibilidade no território brasileiro, sendo assim a indústria é intensiva em capital; e o carvão mineral, que além de ser escasso, possui baixa qualidade, o que

demanda a importação de grandes volumes desse insumo para o setor siderúrgico brasileiro, sendo assim desperdícios geram mais custos de produção.

Um recente relatório divulgado pela *United Nations Industrial Development Organization* (UNIDO) mostra que apesar do decréscimo evidente da indústria em 2018, devido a tensões entre Estados Unidos e China, não afetando os crescimentos de 2,6% e 6,2% respectivamente em relação ao trimestre passado. A importância para o Brasil é comprovada segundo uma pesquisa desenvolvida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2018, na qual o setor representa 18,45% do Produto Interno Bruto (PIB). Além da geração de empregos e renda, 7,7 milhões de funcionários diretos. Os blocos industriais movimentam capital, acelerando o consumidor do desenvolvimento econômico e produtivo.

A produção de aços laminados representa 18,45% do total verificado para a indústria siderúrgica, onde a importância é vista na economia através do encadeamento de cadeias produtivas. Os aços laminados são absorvidos pela indústria de transformação, onde ocorre a transformação da matéria-prima, podendo ser: processo de manufatura, processo químico, processo físico, entre outros. No contexto nacional, a indústria de transformação está consolidada, apresentando um crescimento de 1% no Produto Interno Bruto entre os anos de 2018 e 2019 (CONSELHO NACIONAL DE INDÚSTRIAS, 2019).

Diante da pertinente situação, há necessidade de atentar-se para uma questão pertinente no setor, o processo de corte e estampagem. Na maioria das situações de fabricação, é necessário que a matéria-prima seja cortada em pedaços menores, como por exemplo tiras, tarugos, o que pode resultar desperdícios. Por consequência, procedimentos devem ser aplicados para a redução dos resíduos e, conseqüente, maximização da utilização do matéria-prima.

Buscando entender o obstáculo, é indiscutível o conhecimento sobre *Cutting and Packing Problem* (C&P). O problema de corte consiste no corte de matéria-prima maiores para a produção de retângulos menores, de modo a minimizar as perdas e o problema de empacotamento visa arranjar um determinado número de retângulos dentro de algum objeto estabelecido. Na prática, os problemas de corte e empacotamento apresentam-se de diversos formatos, tais como o empacotamento de itens diferentes em um número finito de recipientes de forma a minimizar o número de recipientes, denominado por *bin packing problem*, outro modelo seria uma situação em que é necessário alocar em uma mochila objetos de pesos e valores diferentes com o objetivo de preencher a mochila com o maior valor possível não ultrapassando o peso máximo, denominado por *knapsack problem* e o *strip packing problem*.

O *strip packing problem* (2D-SPP) é caracterizado como um *open dimensional problem*, onde uma série de itens devem ser arranjados sobre um objeto, com pelo menos uma dimensão pré-definida e outra dimensão indefinida, a fim de minimizar o tamanho da dimensão indefinida (Wäscher et al., 2007). Quando se trata de chapas metálicas como matéria-prima e a geometria dos itens retangular, o problema pode ser definido como 2D-SPP retangular. Por questões práticas, considera-se ainda o caso que permite a rotação em 90° dos retângulos, respeitando assim a restrição de ortogonalidade, bem como a operação de corte não-guilhotinável, onde não é permitido a separação dos itens sem que a ferramenta de corte realize curvas ou seja interrompida no processo em qualquer ordem das operações. Por fim, a entrada dos dados é *off-line*, assim parâmetros (largura, área, perímetro etc.) são conhecidos antecipadamente, possibilitando a definição de um critério para a ordem em que os retângulos serão alocados.

Com base no contexto apresentado, a hipótese levantada pela pesquisa é: “De que forma os principais fatores presentes no processo de corte em chapas metálicas podem influenciar no uso prático de soluções ótimas?”

Portanto, o objetivo da pesquisa é desenvolver um framework de verificação a fim de comparar a movimentação da pistola de corte no uso prático de soluções ótimas e alternativas para o processo de corte de chapas metálicas.

Com a finalidade de atingir o objetivo descrito acima, os objetivos específicos devem ser buscados:

- a) Compreender o processo de corte de chapas metálicas e suas respectivas relevâncias para o estudo;
- b) Escolher o aspecto do processo de corte de chapas metálicas a ser estudado;
- c) Calcular a solução ótima e soluções alternativas para instâncias do problema;
- d) Elaborar comparativos entre a solução ótima e as soluções alternativas para estudar o comportamento do aspecto escolhido.

No âmbito acadêmico, a pesquisa difere-se de outros trabalhos realizados. Normalmente, o viés de pesquisa está na criação ou melhoria de métodos ou heurísticas na solução de *strip packing problem*. No estudo, o foco está na análise do desperdício de chapas metálicas com base em fatores influenciadores do *strip packing problem*, assunto ainda pouco explorado na literatura (Oliveira et al., 2016). A busca por artigos científicos foi realizada nas plataformas *Scopus* e *Web of Science*, utilizando o seguinte protocolo de busca: “*metal sheet*” AND “*cutting and packing*” AND “*factors*”, indexadores, sem pré-definição de horizonte de tempo. Os estudos contemplados não se assemelham a proposta da pesquisa. Sobretudo,

algumas aplicações sobre análise de desperdícios voltada a processos de corte de chapas metálicas são encontradas nas temáticas de planejamento e controle de produção, pesquisa operacional e engenharia ambiental.

A justificativa prática para o estudo está no fato de que o mundo globalizado tem trazido consigo um mercado cada vez mais competitivo e exigente, no qual as empresas precisam melhorar o desempenho de seus processos e sua produtividade, eliminando consideravelmente as perdas e reduzindo os custos para se manterem em atividade e crescimento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSO DE CORTE

O processo de corte mecânico é exercido através da pressão de uma lâmina de corte, laser ou plasma, onde as chapas são cortadas para obtenção de itens geométricos.

O corte a plasma é um processo que através da movimentação de uma pistola de corte com um bico na extremidade utiliza a passagem de gás em alta temperatura, gerando o corte do material, como: aço alumínio. Devido a velocidade e precisão do corte o processo a plasma cresceu o mercado da área (Sanda et al., 2010).

Ao longo do tempo, várias tecnologias foram concebidas e o corte a plasma continua sendo visto como um dos principais métodos de conformação de metais. Os tipos variam entre manuais e mecanizados (Radziemski, Cremers, 1989).

Considerando a tolerância e qualidade do acabamento do produto, o plasma apresenta o pior resultado, mas possui menor valor de compra da máquina. O corte a água mostrou a melhor performance nos requisitos vistos, porém seu preço de compra foi o mais alto. Já o corte a plasma provou ser o melhor custo/benefício em relação a qualidade do acabamento e tolerância.

2.2 DESPERDÍCIO NO PROCESSO DE CORTE

O desperdício é determinado quando uma ação é feita sobre a matéria-prima/produto não agregando valor. O maior foco das indústrias é combater os desperdícios que podem ocorrer na produção de um produto. Conforme a pesquisa, identificaram-se possíveis desperdícios causados no corte de chapas de aço, como: tempo (tempo final para realização dos cortes na chapa), dimensão (porcentagem de chapa com maior utilização), desperdício de chapa (porcentagem de menor desperdício de chapa), espessura (grossura da lâmina), qualidade do

corte (critérios de avaliação segundo DIN EN ISO 9013:2000), eficiência do corte (quantidade de energia necessária para remover uma unidade de volume do material, velocidade (velocidade da máquina de corte), consumo de energia (consumo de energia elétrica empregado para utilização da máquina) e o número de movimentação da pistola de corte.

Para o número de movimentação da pistola de corte, o controle da pistola de corte é feito através de um sistema automático, onde se manipula uma tocha de plasma nos eixos x e y . Os sistemas mecanizados geralmente possuem requisitos mínimos de funcionamento, como: tochas refrigeradas por líquido refrigerante, configuração de arranjo não deverá passar da dimensão da chapa, possuir aterramento e limitação da espessura da chapa para o corte, entre outros (Deli, Bo, 2011). Os requisitos tratados anteriormente necessitam de grande atenção quando definidos, pois depois de ajustados a máquina começará a efetuar as operações de corte, e caso os parâmetros estejam inadequados, haverá perda de material.

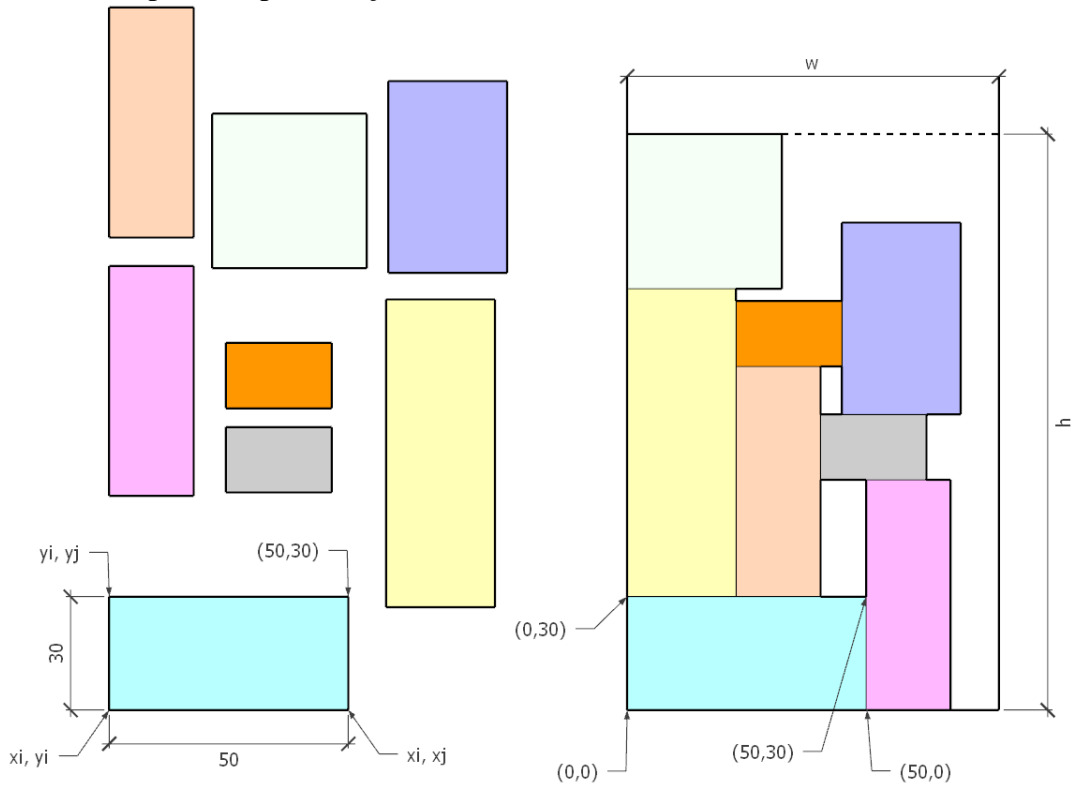
2.3 STRIP PACKING PROBLEM

Na literatura, o processo de corte de chapas metálicas através de uma mesa de corte recebe a tipologia de problema do corte retangular de objetos, denominados por faixas, em duas dimensões, do inglês *Strip Packing Problem* (2D-SPP), o qual consiste em alocar todos os retângulos disponíveis dentro um objeto, onde uma das dimensões é pré-definida e a outra indefinida, tendo a finalidade de buscar a minimização da grandeza tratada como infinita, conforme mostra o exemplo esquemático da Figura 1 como exemplo de representação do 2D-SPP.

Devido a investigações de métodos a fim de encontrar uma solução rápida e eficiente, o 2D-SPP é classificado por princípios de resoluções, tais como: aproximados, mistos e exatos (Oliveira et al, 2016).

Os métodos exatos são construídos através de modelagens matemáticas, tais que o melhor uso de recursos possa ser determinado, conhecidos os objetivos e necessidades do analista. A programação compõe uma subclasse de problemas nos quais a modelagem é inteiramente expressa em termos de equações lineares (Martello et al, 2003).

Figura 1 – Exemplo de representação do 2D-SPP



Fonte: Autor (2020).

O desenvolvimento do método exato considerando a rotatividade em 90 graus para a problematização do *strip packing problem* é obtido por intermédio da definição das variáveis inteiras: h (altura da faixa), w (largura da faixa), x_i, x_j (posição do retângulo na coordenada x), y_i, y_j (posição do retângulo na coordenada y) e n (número de retângulos). O eixo x corresponde a direção da largura da faixa e o eixo y a direção de sua altura, onde a localização de cada retângulo é dada pelas coordenadas (x_i, y_i) (Kenmochi et al., 2009).

$$\text{minimize } h \quad (1)$$

$$\text{subject to } x_i + h_i \alpha_{n+i} + w_i \alpha_i \leq w, \quad \forall i \in n \quad (2)$$

$$y_i + h_i \alpha_i + w_i \alpha_{n+i} \leq h, \quad \forall i \in n \quad (3)$$

$$x_i + h_i \alpha_{n+i} + w_i \alpha_i \leq x_j \text{ or } x_j + h_j \alpha_{n+j} + w_j \alpha_j \leq x_i \text{ or } y_i + h_i \alpha_i + w_i \alpha_{n+i} \leq y_j \text{ or } y_j + h_j \alpha_j + w_j \alpha_{n+j} \leq y_i, \quad \forall i, j \in n, i \neq j \quad (4)$$

$$\alpha_i + \alpha_{n+i}, \quad \forall i \in n \quad (5)$$

$$x_i, y_i \geq 0, \quad \forall i \in n \quad (6)$$

A função objetivo (1) tem como critério de otimização, a minimização da altura utilizada da faixa. A equação (2) garante que cada retângulo será alocado dentro das limitações da largura da fita. A restrição (3) impõem que objeto será colocado em uma posição menor que a altura da

tira. Já a restrição (4) certifica que os itens não ficaram sobrepostos, onde o operador *or* retorna verdadeiro quando um dos fatores da equação consegue respeitar as condicionantes. E a equação (5) representa a ocorrência de rotatividade de 90 graus nos retângulos. A restrição (6) é relacionada à não-negatividade das variáveis, sendo assim, asseguramos uma solução natural ao problema.

As heurísticas são métodos que permitem uma melhora na eficiência do processo de busca de soluções de um problema, tendo a capacidade de captar características específicas do problema, mas não garantindo a solução ótima do problema. Ademais, são capazes de retornar uma solução de qualidade em um tempo adequado dependendo das necessidades da aplicabilidade. A recomendação para o uso de heurísticas é devido ao baixo tempo computacional exigido em problemas combinatórios de alta dificuldade, já os métodos exatos consistem na resolução direta do modelo matemático considerando as restrições, porém com tempo computacional elevado.

As heurísticas podem ser construtivas ou de melhoria. As heurísticas construtivas são encarregadas de construir soluções viáveis, sendo que a execução é feita de maneira incremental, onde a cada laço um novo elemento é definido para fazer parte da solução, de acordo com sua função objetivo, restrições e limitantes. Com o conceito de heurística construtiva bem definido, ainda a classificamos em quatro segmentos: “*positioning*”, “*fitness*”, “*level*” e “*profile*”. Na continuação abordaremos duas heurísticas *positioning*: *bottom-left* e *bottom-left-fill*.

Na forma lógica de arranjo *positioning* pretende-se efetuar a alocação dos retângulos utilizando como referência alguma das extremidades do objeto. Uma das heurísticas mais utilizadas no 2D-SPP é o *Bottom-Left* (BL), em que os retângulos são alocados sempre que possível no canto inferior-esquerdo, evitando sobreposição dos retângulos e que a largura da faixa seja respeitada (Baker et al., 1980), até que todos os retângulos sejam posicionados. Conseqüentemente, foram construídos algoritmos eficientes, estudando as limitações e verificando os piores casos para o desempenho das soluções produzidas.

Já o *Bottom-Left-Fill* (BLF) possui a mesma mecânica de funcionamento do *bottom-left*, alocar o próximo retângulo na fila no canto inferior esquerdo sempre que possível, mas o diferencial está no preenchimento dos espaços vazios existentes no layout causados pela má distribuição de retângulos, antes de tentar alocar um retângulo no canto inferior esquerdo (Chazelle, 1983).

As heurísticas de melhoria têm como principal desígnio melhorar uma solução inicial de entrada qualquer, gerada de forma aleatória ou por uma heurística construtiva. As heurísticas

de melhoria utilizam o conceito de vizinhança para explorar o espaço de soluções do problema de otimização em questão (Alvarez- Valdés et al., 2005).

Com a intenção de aperfeiçoar o resultado primeiramente encontrado, o *tabu search* é um procedimento adaptativo que pode guiar um algoritmo de busca local na exploração contínua do espaço de busca não sendo finalizado prematuramente pela falta de vizinhos que melhorem a solução atual. O *tabu search* explora a imediação de uma dada solução e seleciona a melhor solução, mesmo que piore a solução atual, assim a estratégia permite que a busca escape de um ótimo local e percorra outra parcela do espaço de soluções. Se ocorrer retornos a um ótimo local previamente visitado (condição desejada, mas não necessária), o *tabu search*, por meio dos mecanismos de controle, permite que a exploração do espaço de soluções continue reduzindo o efeito de "ciclagem". O movimento só é aceito quando está presente na lista tabu e o valor da função objetivo é minimizado (Glover, 1990).

2.4 PESQUISAS PRÉVIAS

Pesquisas semelhantes são encontradas de diferentes formas acerca do 2D-SPP, sendo inevitável o relacionamento a diversos temas. Os estudos anteriores têm por objetivo complementar a fundamentação teórica do presente trabalho. Pesquisas sobre soluções metodológicas para vários tipos de 2D-SPP são encontradas na literatura, desta maneira o estudo é separado em dois grupos: *strip packing problem*, método exato e *tabu search*.

Para os estudos análogos ao *strip packing problem*, Bortfeld (2006) é apresentado um algoritmo genérico para o 2D-SPP com peças retangulares. Adicionando duas restrições na pesquisa: orientação de 90° dos retângulos (todos os retângulos alocados podem rotacionar caso o algoritmo determine) e o corte guilhotinado (requer que todas as peças colocadas em um layout podem ser reproduzidas por uma série de cortes guilhotinados, ou seja, cortes de ponta a ponta paralelos às bordas do recipiente). Já em Ye et al. (2009) uma versão online do problema é adotada, na qual os retângulos estão chegando um a um e uma decisão de posicionamento para o retângulo atual deve ser tomada antes que o próximo retângulo seja fornecido. Ademais, uma vez que um retângulo tenha sido compactado na faixa, não podemos alterar sua colocação posteriormente, sendo a rotação dos retângulos não permitida.

Uma evolução destacada é a proposta na pesquisa de Alvarez-Valdes et al. (2016), onde é apresentado um procedimento de busca adaptativa aleatória (GRASP) para o *strip packing problem*, investigando estratégias para a etapa de construção e melhoria do algoritmo, juntamente com a definição de aspectos críticos na busca. Através dos fatores já citados

anteriormente, os autores desenvolvem um algoritmo flexível, no qual outras restrições e condicionantes podem ser inseridos.

Em Hooper e Turton (2011) o estudo compara os algoritmos híbridos em termos de qualidade da solução e tempo de computação em vários problemas de 2D-SPP de diferentes tamanhos. Para mostrar a eficácia do design dos diferentes algoritmos, o desempenho é comparado às pesquisas aleatórias e às rotinas de corte da heurística. Com o intuito de aprimorar as pesquisas de algoritmos híbridos na resolução do 2D-SPP, Allen (2010) mostra uma estratégia de posicionamento híbrido para o 3D-SPP, que envolve alocar um conjunto de cuboides em um container tridimensional de largura e altura fixas, mas comprimento irrestrito. O objetivo é posicionar todas as caixas no contêiner, minimizando o comprimento resultante. Assim os autores conseguem apresentar o potencial de aplicação da pesquisa, como: setor no corte de estoque (madeira e metal) e também o carregamento de cargas, além de outras aplicações em áreas como a programação multidimensional de recursos.

Conforme mencionado anteriormente, o 2D-SPP pode ser resolvido de diferentes modos, em específico 2D-SPP resolvidos pelo método exato. No artigo proposto por Martello et al. (2003) é exibido um novo relaxamento para 2D-SPP, que produz bons resultados e pode ser usado para obter algoritmos heurísticos eficazes. Os resultados obtidos são usados em um algoritmo *branch-and-bound*, capaz de resolver instâncias de teste da literatura envolvendo até 200 itens. Já Alvarez-Valdes et al. (2009) desenvolve um novo algoritmo *branch and bound*, sendo que a estrutura da árvore de pesquisa é extraída de Martello et al. (2003), assim novos limites e novas condições para melhorar a eficiência do algoritmo são obtidas.

Kenmochi et al. (2009) propôs algoritmos exatos para o 2D-SPP com e sem rotações de 90°. Em um primeiro momento é desenvolvido um algoritmo de *branch-and-bound*, examinando dois pontos das operações, um baseado no ponto inferior esquerdo e o outro com base em uma estratégia chamada *G-STAIRCASE*, e propondo novas operações de delimitação baseadas em programação dinâmica (DP), programação linear (LP) e outros. Disposto a melhorar os resultados de Kenmochi et al. (2009), Arahori et al. (2012) sugeriu introduzir novas ideias diretamente no *branch-and-bound*, como adicionar apenas formas canônicas de soluções, assim obtendo exclusivamente soluções canônicas.

Outra pesquisa semelhante resolvida pelo método exato, mas com itens circulares é em Akeb et al. (2011), discute-se o problema circular de dimensão aberta (CODP), um problema da família de corte e empacotamento. No CODP, recebemos uma faixa inicial de largura fixa e comprimento ilimitado, além de um conjunto finito peças circulares de raio conhecido, onde o

objetivo é procurar um ótimo global correspondente ao comprimento mínimo da faixa inicial que contém as todas as peças.

Alvarez-Valdes et al. (2007) um algoritmo de melhoria *tabu search* é proposto para o corte não guilhotinado, onde vários movimentos baseados na redução e inserção de retângulos foram determinados. Os resultados mostraram que o algoritmo é muito eficiente quando utilizado em grandes instâncias. Burke et al. (2009) ilustra como melhorias na qualidade da solução podem ser alcançadas pela hibridização da heurística *best-fit*, comparando com abordagens híbridadas da literatura em termos de execução e qualidade das soluções alcançadas. A hibridização do algoritmo *bottom-left-fill* é construída através do *tabu search* afim de simular um algoritmo genético, podendo ser capaz de monitorar sua performance.

3 METODOLOGIA

Para obter os resultados e respostas sobre a problematização, um detalhamento sobre o enquadramento metodológico e as etapas de pesquisa são apresentados a seguir.

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

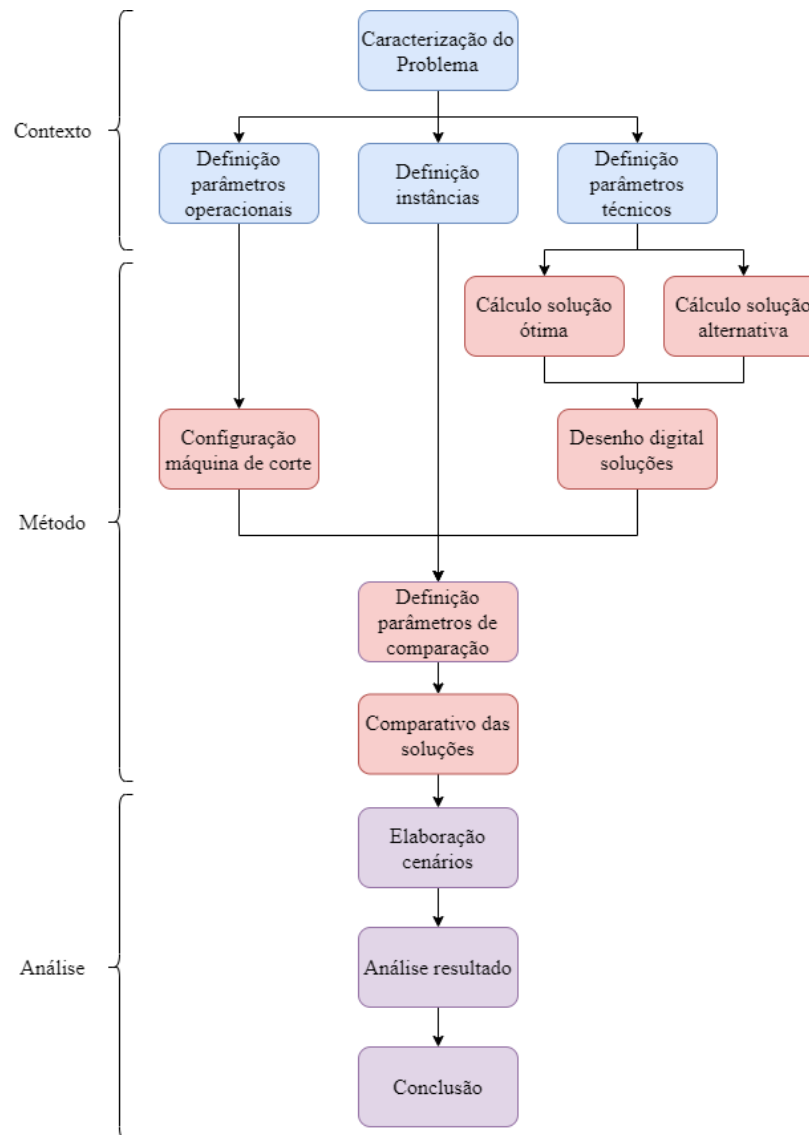
Para a composição da pesquisa foram empreendidas classificações indicativas da metodologia que o estudo em questão foi tratado, sendo: natureza da pesquisa, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos. Quanto a natureza, a classificação é a pesquisa aplicada, buscando gerar conhecimento para a aplicação prática e dirigida a solução de problemas pontuais das indústrias que trabalhem com o corte de metais (Gil, 2010).

A forma de abordagem é uma pesquisa quantitativa, visando a tradução de informações obtidas em conhecimento e números (Marconi; Lakatos, 2010), sendo utilizados para a construção do framework de verificação, e para isso é necessária à coleta de dados, a fim de definir os principais fatores presentes no corte de chapas metálicas. Com relação aos objetivos de caráter exploratório, procurou-se proporcionar maior familiaridade com o problema de desperdícios do processo de corte, para futuramente analisar os cenários pré-definidos utilizando o framework de verificação. Os procedimentos técnicos são de caráter experimental, já que tem por objetivo selecionar as variáveis que podem ser capazes de influenciar o objeto de corte durante a transformação.

3.2 ETAPAS DE PESQUISA

Para visualizar as etapas da pesquisa, uma esquematização metodológica para o cumprimento do objetivo proposto foi elaborada, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Etapas da pesquisa.



Fonte: Autor (2020).

Na etapa de caracterização do problema a pesquisa foi delimitada, objetivada pela importância do setor industrial no Brasil, os desperdícios causados pelo processo de corte em chapas metálicas e classificação do 2D-SPP em paralelo com um levantamento bibliográfico, onde foram consultados artigos científicos para abordar o que já existe sobre o problema.

Em um segundo momento, a definição das instâncias foi realizada através da seleção do grupo de instâncias da literatura com características pré-selecionadas, como o número máximo

de retângulos, a largura máxima do objeto, as dimensões máximas dos retângulos e o nível de heterogeneidade, calculado a partir da soma das dimensões dos retângulos e do objeto (Neuenfeldt Júnior et al., 2017). Um exemplo para a definição de uma instância pode ser visualizado a seguir: Todos os retângulos cortados devem ter no máximo 500 mm nas dimensões x e y , número mínimo de 5 retângulos e dispor do comprimento menor que a largura calculada da tira de corte.

A definição de parâmetros operacionais compreende a determinação dos aspectos que compõe o processo de corte de chapas metálicas, a fim de entender a relação de cada aspecto no contexto do problema abordado. Para tanto, com base no manual técnico da máquina de corte a plasma utilizada para a conduzir o estudo, os parâmetros operacionais são o *Feed Rate*, o *Pierce Height* e o *Plunge Rate* (SheetCam TNG – Jet cutting setup and operation manual), sendo outro parâmetro a priorização de corte da máquina, configurando o caminho mais curto, iniciando o corte pela origem e finalizando após terminar o corte do último retângulo.

Para os aspectos técnicos, o cálculo das soluções ótimas para cada instância foi desenvolvido através de uma *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), modelado com o uso do software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.5 – 64 bits. Para todas as instâncias, a optimalidade das soluções ótimas foi provada. Em paralelo, as soluções alternativas foram obtidas com o uso da heurística construtiva *bottom-left fill*, em conjunto com um processo de melhoria através de iterações utilizando o *tabu search*. Para cada instância, um total de duas soluções alternativas foram calculadas para realizar a comparação da movimentação da pistola de corte em relação a solução ótima. Ambos, BLF e *tabu search* foram implementados em C/C++.

Após os cálculos, o desenho digital das soluções foi realizado com o uso do software *SketchUp 2020* (versão 2020-0-1), escolhido por ser o mais flexível programa de projetos e desenhos em realizar a modelagem geométrica dos retângulos e o objeto. Os arquivos dos desenhos digitais de todas as soluções são transferidos para o software *Sheetcam* (versão 6.0.0), onde é feita a configuração de todos os parâmetros operacionais da máquina de corte. Finalizado o ajuste no *Sheetcam*, o arquivo gerado é plotado no software *Mach3*, responsável por realizar as simulações do corte a plasma. A escolha pelos softwares *Sheetcam* e o *Mach3* está completamente interligada com o controle da implementação do *G-code*, pois algumas soluções necessitam de trabalho manual nas linhas de comando, causando trabalho adicional.

A definição dos parâmetros de comparação foi determinada em três propriedades, sendo: *tempo*, *corte* e *deslocamento*. O *tempo* (em segundos) é o parâmetro numérico contínuo no qual passa a ser contado a partir do primeiro movimento da pistola de corte, iniciando todo o

processo de corte do objeto, após o término do corte a pistola é parada, a contagem do tempo é interrompida e o valor é determinado. A distância de corte (em milímetros), denominado apenas como “*Corte*”, é definida como todo o percurso percorrido pela pistola de corte durante o processo em que o objeto é efetivamente cortado pelo plasma, gerando os retângulos e agregando diretamente valor ao procedimento (processo que a matéria-prima é transformada em produto). Por fim, a distância de movimentação (em milímetros), denominada por “*Deslocamento*”, é determinada quando a pistola de corte necessita mover-se pelo objeto não efetuando um corte, mas apenas uma locação até uma aresta para iniciar um corte e não agrega valor ao produto (procedimento necessário, mas que deve ser reduzido ao máximo, pois apenas a movimentação da pistola não efetua nenhum corte).

Por consequência, as comparações da movimentação da pistola de corte entre a solução ótima e as soluções alternativas de cada instância é viabilizada com o uso de variáveis de referência característicos do processo de corte de chapas metálicas, com base no arranjo dos retângulos na chapa obtido com os cálculos realizados com o método exato a ser modelado e as heurísticas implementadas. A definição das variáveis de referência para a comparação foi realizada considerando a distância percorrida pela pistola de corte e o tempo decorrido no processo de corte. Com as variáveis de referência *corte*, *deslocamento* e *tempo* definidos, cenários de simulação foram adotados para a comparação da movimentação da pistola de corte com o uso da solução ótima e das soluções alternativas de cada instância. Os cenários foram elaborados com base em aspectos, nos quais são alterados buscando uma solução mais realista possível.

Para atender aos objetivos relacionados à pesquisa, foi realizado uma análise dos dados obtidos das soluções e os resultados dos cenários. Com a conclusão da pesquisa, espera-se verificar se soluções alternativas são capazes de produzir uma redução no desperdício de determinados aspectos técnicos das chapas metálicas em comparação às soluções ótimas.

4 COMPARATIVO DAS SOLUÇÕES

4.1 ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS

A elaboração dos cenários foi desenvolvida com base em quatro variáveis características do problema: *número de retângulos*, *largura do objeto*, *aspectratio* e *heterogeneidade*, sendo possível realizar a classificação de todas as instâncias no cenário respectivo.

O *aspectratio* é empregado para mensurar e identificar variações entre as dimensões (d_1 e d_2) dos t retângulos, quanto maior o valor de *aspectratio*, maior o intervalo entre as dimensões dos retângulos (Wang, Valenzela, 2001), obtido por intermédio da definição das variáveis: D_1 (maior dimensão do objeto), D_2 (menor dimensão do objeto), d_{1i} (maior dimensão do retângulo), d_{2i} (menor dimensão do retângulo) e n (número total de retângulos na instância), conforme mostra a Equação 1:

$$\text{aspectratio} = (D_1/D_2) / \sum_{i=1}^n (d_{1i}/d_{2i}) / n \quad (1)$$

A heterogeneidade é referente a diversificação dos retângulos da instância, ou seja, a proporção de retângulos diferentes obtidos através de comparação das dimensões na instância, sendo as variáveis: nt (quantidade de retângulos diferentes na instância) e n (número totais de retângulos na instância), conforme mostra a Equação 2:

$$\text{heterogeneidade} = nt/n \quad (2)$$

A justificativa para a escolha das variáveis, *número de retângulos* e a *largura do objeto* é pelo fato de que são características básicas para a solução de uma instância. Enquanto a *heterogeneidade* e o *aspectratio* são propriedades comprovativas à diversificação das instâncias, pois apenas o *lower bound (LB)* é um valor de referência para a solução ótima e alternativas, não possuindo precisão quando tratamos de soluções de instâncias que possuam muitos espaços vazios no arranjo.

Os cenários foram formados a partir da diferença de configuração das instâncias, onde os cenários separados por faixas, surgiram com a combinação das faixas com as variáveis. Os valores base foram determinados através da média dos valores das variáveis de todas as instâncias. Para o *número de retângulos*, o valor foi de 20 retângulos, então a instância poderia ser classificada como maior ou igual a 20 retângulos ou menor que 20. A mesma situação ocorre com a *largura* de 200 milímetros, *heterogeneidade* de 0,6 e *aspectratio* 1,0.

As instâncias foram relacionadas a todas as variáveis e após a categorização, o cenário para cada é estabelecido, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Definição dos cenários para a classificação das instâncias.

Cenário	n	w	<i>heterogeneidade</i>	<i>aspectratio</i>
1	≥ 20	≥ 200	$\geq 0,6$	$\geq 1,0$
2	≥ 20	≥ 200	$\geq 0,6$	$< 1,0$
3	≥ 20	≥ 200	$< 0,6$	$\geq 1,0$
4	≥ 20	≥ 200	$< 0,6$	$< 1,0$
5	≥ 20	< 200	$\geq 0,6$	$\geq 1,0$
6	≥ 20	< 200	$\geq 0,6$	$< 1,0$
7	≥ 20	< 200	$< 0,6$	$\geq 1,0$
8	≥ 20	< 200	$< 0,6$	$< 1,0$
9	< 20	≥ 200	$\geq 0,6$	$\geq 1,0$
10	< 20	≥ 200	$\geq 0,6$	$< 1,0$
11	< 20	≥ 200	$< 0,6$	$\geq 1,0$
12	< 20	≥ 200	$< 0,6$	$< 1,0$
13	< 20	< 200	$\geq 0,6$	$\geq 1,0$
14	< 20	< 200	$\geq 0,6$	$< 1,0$
15	< 20	< 200	$< 0,6$	$\geq 1,0$
16	< 20	< 200	$< 0,6$	$< 1,0$

Fonte: Autor (2020).

As instâncias utilizadas para a classificação foram retiradas da literatura, somando um total de 790 instâncias armazenadas em uma base de dados. Em um primeiro momento o estudo foi idealizado com uma seleção prévia de 64 instâncias totais, quatro instâncias por cenário, mas devido ao alto tempo computacional exigido para a solução ótima, o número de instâncias foi reduzido para 16, uma por cenário, sendo: *N1* (Burke et al., 2004), *bwmv4*, *bwmv52*, *bwmv254* (Berkey, Wang, 1987), *pt16_26_84*, *pt1_24_60*, *pt2_23_42*, *pt13_26_84*, *pt3_24_89*, *pt14_24_89b*, *pt1_23_3*, *pt14_24_89*, *pt7_23_100*, *pt6_23_95* e *pt15_22_84* (Neuenfeldt Júnior et al., 2019). Nenhuma conseguiu atingir os valores do cenário 1, devido à complexidade em alcançar os valores base do cenário proposto.

Posterior a classificação e organização das instâncias, o cálculo das soluções é realizado, sendo três soluções para cada instância: solução ótima obtida pela modelagem matemática e duas alternativas utilizando a heurística de posicionamento BLF em conjunto com a heurística de melhoria *tabu search*, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Configuração das instâncias

Cenário	Instância	n	w	<i>heterogeneidade</i>	<i>aspectratio</i>	LB	H_{SO}	H_{A1}	H_{A2}
1									
2	<i>bwmv254</i>	20	300	1,00	0,48	130	140	169	149
3	<i>pt1_24_60</i>	22	230	0,27	1,26	69	77	84	93
4	<i>pt2_23_42</i>	20	329	0,30	0,85	139	146	183	164
5	<i>bwmv4</i>	20	10	1,00	1,35	47	49	52	55
6	<i>bwmv52</i>	20	30	1,00	0,64	15	16	17	17
7	<i>pt16_26_84</i>	23	134	0,20	2,66	534	680	779	696
8	<i>pt13_26_84</i>	23	134	0,21	0,23	256	277	291	291
9	<i>pt3_24_89</i>	7	229	0,71	1,05	73	81	110	96
10	<i>pt14_24_89b</i>	7	229	0,71	0,83	195	237	386	240
11	<i>pt1_23_3</i>	14	224	0,36	2,46	26	29	59	39
12	<i>pt14_24_89</i>	7	229	0,57	0,11	173	237	284	271
13	<i>pt7_23_100</i>	10	94	0,70	1,40	232	247	279	325
14	<i>NI</i>	10	40	0,90	0,48	40	40	60	44
15	<i>pt6_23_95</i>	16	69	0,44	3,90	974	1154	1173	1173
16	<i>pt15_22_84</i>	11	134	0,45	0,37	273	291	298	294

Fonte: Autor (2020).

A optimalidade das soluções ótimas foi provada, retornando as coordenadas dos retângulos no objeto. O critério de parada para o *tabu search* foi o atingimento de um total de 200 iterações de execução. Assim, para cada instância as soluções ótimas e as soluções alternativas encontradas permitiram a obtenção de arranjos diferentes de posicionamento dos retângulos no objeto, sendo utilizadas para a análise do desperdício mostrada a seguir.

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados são mostrados considerando os parâmetros de comparação, onde cada instância foi classificada em um cenário pré-definido anteriormente. A elaboração do comparativo entre a solução ótima e as soluções alternativas, com a intenção de estudar o comportamento do *tempo*, *corte* e *deslocamento*, é apresentado nesta seção, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados obtidos para os parâmetros de comparação tempo, corte e deslocamento.

Instância	H_{S0}			H_{A1}			H_{A2}		
	Tempo (s)	Corte (mm)	Deslocamento (mm)	Tempo (s)	Corte (mm)	Deslocamento (mm)	Tempo (s)	Corte (mm)	Deslocamento (mm)
<i>bwmv254</i>	249	3172	2216	234	3090	1428	226	2989	1567
<i>pt1_24_60</i>	174	2094	1423	154	1899	1133	155	1920	1244
<i>pt2_23_42</i>	255	3323	1897	246	3250	2085	241	3146	1811
<i>bwmv4</i>	45	358	343	43	354	320	41	342	294
<i>bwmv52</i>	50	416	299	43	367	266	42	356	310
<i>pt16_26_84</i>	262	3409	2157	251	3344	1682	268	3538	1847
<i>pt13_26_84</i>	213	2678	1695	190	2495	981	285	5096	3584
<i>pt3_24_89</i>	94	1220	564	91	1229	485	96	1277	704
<i>pt14_24_89b</i>	128	1774	607	139	1935	520	143	1974	672
<i>pt1_23_3</i>	96	1143	670	91	1083	855	91	1095	785
<i>pt14_24_89</i>	124	1712	688	132	1806	628	125	1699	750
<i>pt7_23_100</i>	112	1485	739	122	1601	706	130	1808	752
<i>N1</i>	36	375	225	39	404	291	37	397	201
<i>pt6_23_95</i>	278	3739	2090	276	3736	1875	275	3735	1769
<i>pt15_22_84</i>	154	2084	694	133	1835	631	132	1808	445

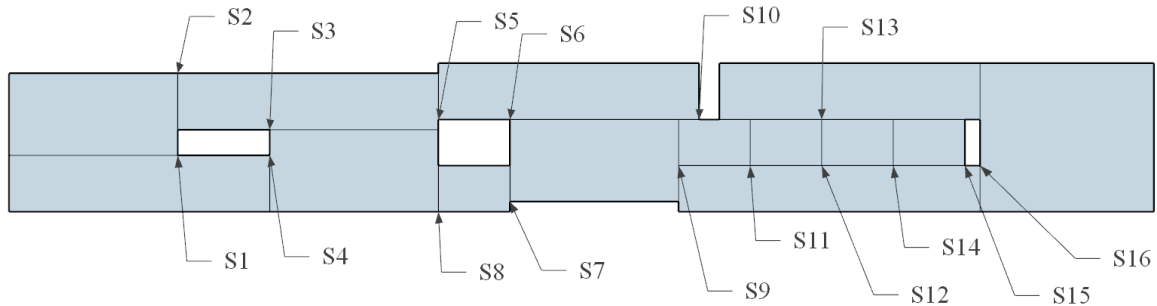
Fonte: Autor (2020).

A determinação altura do objeto é uma atividade fundamental no processo de corte, pois a determinação do valor está baseada em métodos de solução que geralmente são modelagens matemáticas ou heurísticas, permitindo assim obter como os retângulos estão arranjados na faixa. A instância *pt1_23_3*, contida no cenário 11, apresentou um melhor desempenho de *tempo* e *corte* na solução alternativa 1 comparada a solução ótima, pois apresenta uma menor quantidade de desníveis no arranjo dos retângulos. Enquanto a solução alternativa 1 ($H_{A1} = 59$) possui 6 desníveis, na solução ótima 7 desníveis são encontrados, apesar da altura calculada para a solução ótima ser menor ($H_{S0} = 29$), então o nivelamento de retângulos no objeto tem relação direta com a melhor execução do corte, mesmo possuindo uma altura superior. Como exemplo, as Figuras 3 e 4 mostram os níveis de corte dos retângulos obtidos para a solução ótima e a solução alternativa 1 da instância *pt1_23_3*, onde o “S1” expressa o primeiro ponto de corte inicial de um retângulo, na qual a pistola se desloca até o ponto “S1”, realizando o corte e, logo a seguir, dirigindo-se a “S2” chegando à marca e iniciando o corte. O procedimento é repetido de modo crescente até que todos os pontos sejam atingidos e os cortes efetuados.

O bom resultado obtido com a solução alternativa 1, visto através dos parâmetros *tempo*, *corte* e *deslocamento*, não apontam o desperdício físico causado pelo arranjo dos retângulos, em virtude de a solução alternativa possuir um desperdício maior em paralelo a solução ótima. Consequentemente, apesar dos melhores resultados dos parâmetros de comparação na solução

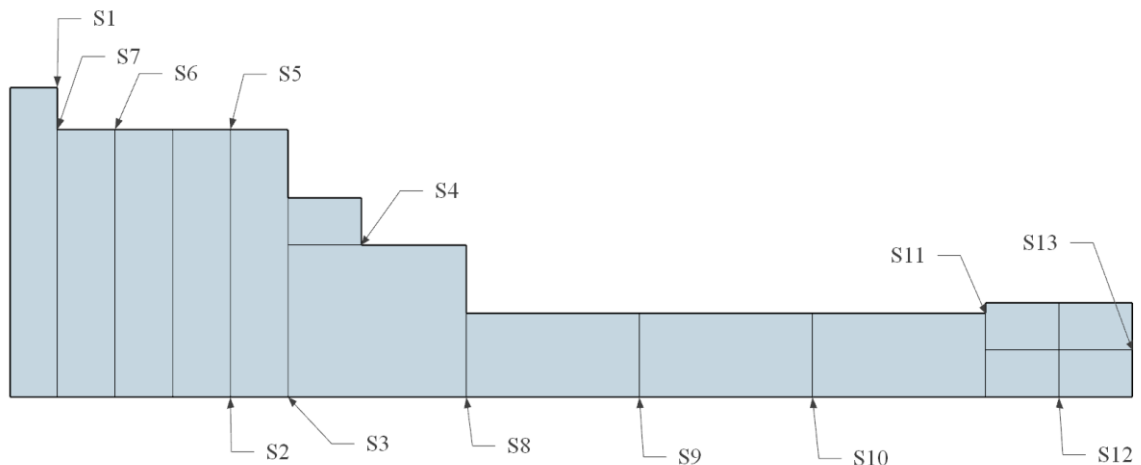
alternativa 1, onde foi possível visualizar os reflexos em relação ao alto desperdício físico ocasionado no arranjo alternativo, mesmo dispondo do menor tempo.

Figura 3 – Arranjo de corte para a solução ótima da instância *pt1_23_3*



Fonte: Autor (2020).

Figura 4 – Arranjo de corte para a solução alternativa 1 da instância *pt1_23_3*



Fonte: Autor (2020).

A velocidade de *deslocamento* da pistola de corte é maior que a velocidade de execução do *corte*, de modo que maiores distâncias percorridas para a execução do *corte* influenciam de maneira mais significativa no aumento do *tempo* necessário para cortar os retângulos no objeto, portanto a sensibilidade do parâmetro de execução do *corte* é maior perante o *deslocamento* da pistola.

Outro ponto observado na análise é que em 53% das instâncias a solução ótima teve *tempo* superior as soluções alternativas devido ao arranjo. Com relação aos parâmetros de *corte* e *deslocamento*, as soluções ótimas tiveram uma distância maior em ambos, possuindo 40% das 15 instâncias estudadas.

Em cenários considerados de fácil resolução, particularmente o cenário 12, representado pela instância *pt14_24_89*, a solução ótima possui o menor *tempo* se comparada as duas soluções alternativas, mas outros aspectos (*corte* e *deslocamento*) são relativamente maiores, pelo fato da solução ótimas apenas buscar o viés de melhor disposição dos retângulos no objeto gerando menor desperdício físico, entretanto as soluções alternativas recorrem a soluções de maior altura, mas minimizando fatores como o *corte* e *deslocamento*. Já em cenários complexos, evidenciados pela instância *pt6_23_95*, pertencente ao cenário 15, verificamos mínimas diferenciações em relação ao *tempo* e *corte* em todas as soluções, onde a divergência ocorre no *deslocamento*, chegando a 321 mm de diferença entre a solução ótima e solução alternativa 2. Enunciando que cada solução possua uma contribuição positiva para a construção de uma solução de melhor desempenho prático.

No cenário 2, onde a heterogeneidade é elevada, caracterizado pela instância *bwmv254*, a solução ótima obteve os piores resultados se comparados as soluções alternativas, devido a particularidades dos retângulos: diversificados e de grandes dimensões. O *aspectratio* não influenciou a análise no comportamento abordado, pois apresentou valores desestabilizados para a instância em investigação.

A instância *pt13_26_84* (cenário 8) apresentou a mesma altura para ambas as soluções alternativas, sendo $H_{A1} = H_{A2} = 291$. A solução alternativa 2 atestou valores muito superiores em todos os parâmetros de comparação (*tempo*, *corte* e *deslocamento*), já que o trajeto de execução foi melhor aproveitado pela solução alternativa 1, visto que foi beneficiado pela otimização do caminho da pistola de corte, diminuindo o retrabalho na execução do *corte*.

Na instância *bwmv4* (cenário 5) a solução ótima que dispõe da menor altura, ($H_{SO} = 49$), mas possui maiores valores de *tempo*, *corte* e *deslocamento* se comparados as heurísticas que possuem uma altura superior, $H_{A1} = 52$ e $H_{A2} = 55$. Portanto, existe uma solução delimitada pelo universo compreendido entre a solução ótima (limite inferior) e alguma solução alternativa não identificada em que os desperdícios de *tempo*, *corte* e *deslocamento* possuem um melhor desempenho na prática.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo geral desenvolver um framework de verificação a fim de comparar a movimentação da pistola de corte no uso prático de soluções ótimas e alternativas para o processo de corte de chapas metálicas. O desenvolvimento do presente estudo possibilitou testar a modelagem proposta, onde foram realizados testes em 16 instâncias

categorizadas em cenários, formados entre a diversificação das variáveis: *número de retângulos, largura do objeto, heterogeneidade e aspectratio*. Dessa forma obtemos que a solução ótima não seja a solução mais adequada na prática do corte das chapas metálicas dependendo do aspecto analisado.

Dada a importância do assunto, torna-se necessário a visão de incentivar formas de agilizar todos os processos que envolvam o corte de materiais, tornando mais fáceis a utilização e manutenção dos equipamentos. Podendo economizar o tempo e recursos naturais, onde os recursos têm um papel fundamental no mercado mundial, pois oferecem um valor tangível de presente e de futuro para a organização.

Tendo em vista os resultados obtidos nas instâncias, torna-se interessante a replicação com diferentes perspectivas para a modelagem, configuração e testes em mais instâncias, a fim de verificar se dentro dos cenários ocorrem comportamentos padronizados dos valores das variáveis, e como influenciaria o arranjo das soluções. Analogamente, um estudo econômico é importante, já que o tempo do maquinário e matéria-prima absorvem parte dos lucros empresariais, a pesquisa possibilitaria investigar o quanto de desperdício seria identificado e eliminado durante o processo de corte.

Como limitações da pesquisa, demonstrou-se o fato do pequeno número de instâncias analisadas, já que é necessário um grande esforço computacional para definir o melhor arranjo e o prazo limitado para obtenção das soluções ótimas, tornando necessário a delimitação do trabalho. A falta de pesquisas anteriores sobre os aspectos presentes no processo de corte, também é apontada como uma limitação do estudo. Logo, as principais bases de dados devem ser amplamente e rigorosamente consultadas. Identificar uma limitação serve como uma oportunidade para encontrar novas lacunas na literatura e, conseqüentemente, novas investigações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKEB, H.; HIFI, M.; NEGRE, S. An augmented beam search-based algorithm for the circular open dimension problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 61, p. 373-381, 2011.
- ALLEN, S.; BURKE, E.; KENDALL, G. A hybrid placement strategy for the three-dimensional strip packing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 209, p. 219-227, 2011.
- ALVAREZ-VALDES, R.; PARREÑO, F.; TAMARIT, J. M. A branch and bound algorithm for the strip packing problem. **OR Spectrum**, v. 31, p. 431-459, 2009.
- ALVAREZ-VALDES, R.; PARREÑO, F.; TAMARIT, J. M. A GRASP algorithm for constrained two-dimensional non-guillotine cutting problems. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 4, p. 1065-1083, 2008.
- ARAHORI, Y.; IMAMICHI, T.; NAGAMOCHI, H. An exact strip packing algorithm based on canonical forms. **Computers & Operations Research**, v. 39, p. 2991-3011, 2012.
- BERKEY, J.O.; WANG, P.Y. Two-dimensional finite bin-packing algorithms. **Journal of the Operational Research Society**, p. 423-429, 1987
- BORTFELD, A. A genetic algorithm for the two-dimensional strip packing problem with rectangular pieces. **European Journal of Operational Research**, v. 172, p. 814-837, 2006.
- BURKE, E.K.; Kendall, G.; Whitwell, G. A new placement heuristic for the orthogonal stockcutting problem. **Operational Research**, v. 52(4), p. 655-671, 2004
- BURKE, E.K.; Kendall, G.; Whitwell, G. A Simulated Annealing Enhancement of the Best-Fit Heuristic for the Orthogonal Stock-Cutting Problem. **INFORMS Journal on Computing**, v. 21, p. 505-516, 2009
- CAMPOS, V. F. TQC: Controle da Qualidade Total: no estilo japonês. **Fundação Cristiano Ottoni**, Belo Horizonte, v.2, p. 20-145, 1992.
- CHAZELLE, B. The Bottomn-Left Bin-Packing Heuristic: An Efficient Implementation. **IEEE Transactions on Computers**, v. 32, p. 697-707, 1983.
- CONSELHO NACIONAL DE INDÚSTRIAS. **A Indústria em Números**. Brasília, 2020. Disponível em: < <http://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/industria-em-numeros/>>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- DELI, J., BO, Y. An intelligent control strategy for plasma arc cutting technology. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 13, p. 1 – 7, 2011.
- DELMAS, M. A.; PEKOVIC, S., Resource Efficiency Strategies and Market Conditions, **Long Range Planning**, v.48, p.80-94, 2015.
- GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo, Atlas, 2010.
- GLOVER, F. Tabu Search: A Tutorial. **Interfaces**, v. 20, n. 4, p. 74-94, 1990.
- HOPPER, E.; TURTON B. An empirical investigation of meta-heuristic and heuristic algorithms for a 2D packing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 128, p. 34-57, 2001.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **DIN EN ISO 9013: Thermal cutting - Classification of thermal cuts - Geometrical product specification and quality tolerances**. Suíça, 2000.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **PRODUÇÃO SIDERÚRGICA BRASILEIRA**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/estatisticas.asp?par=20197>>. Acesso em: 11 mar. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **PIB cresce 1,1% em 2018 e fecha ano em R\$ 6,8 trilhões**. Rio De Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de->

noticias/releases/23886-pib-cresce-1-1-em-2018-e-fecha-ano-em-r-6-8-trilhoes>. Acesso em: 09 mar. 2020.

KENMOCHI, M.; IMAMICHI, T.; NONOBE, K.; YUGIURA, M.; NAGAMOSHI, H. Exact algorithms for the two-dimensional strip packing problem with and without rotations.

European Journal of Operational Research, v. 198, p. 73-93, 2009.

MARCONI, M.A.; LAKATOS, E.M. **Fundamentos da metodologia científica**. São Paulo, Atlas, 2010.

MARTELLO, S.; MONACI, M., VIGO, D. An exact approach to the strip packing problem.

INFORMS Journal on Computing, v. 15, n. 3, p. 310-319, 2003.

NEUENFELDT JÚNIOR, A.; SILVA, E.; GOMES, A.M.; OLIVEIRA, J.F. The Two-Dimensional Strip Packing Problem: What Matters?. **Portuguese Operational Research Society**, p. 151-164, 2017.

NEUENFELDT JÚNIOR, A. N.; Silva, E.; Gomes, A. M.; Soares, C.; Oliveira, J. F. Data mining based framework to assess solution quality for the rectangular 2D strip-packing problem. **Expert Systems with Applications**, v. 118, p. 365-380, 2019.

OLIVEIRA, J. F. et al. A survey on heuristics for the two-dimensional rectangular strip packing problem. **Pesquisa Operacional**, v. 36, n. 2, p. 197-226, 2016.

SANDA, M., COTEANA, M., MUNTEANU, A. Experimental results concerning the Variation of Surface Roughness parameter (Ra) at Plasma arc cutting of a stainless steel workpiece. **International Journal of Modern Manufacturing Technologies**, v. 2, p. 2067-3604, 2010.

RADZIEMSKI, L. J., CREMERS D. A. **Laser Induced Plasmas and Applications**. New York, Marcel Dekker, 1989.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. **Growth of global manufacturing slowed in 2018 according to UNIDO Industrial Statistics Yearbook**.

União Europeia, 2018. Disponível em: <<https://www.unido.org/news/growth-global-manufacturing-slowed-2018-according-unido-industrial-statistics-yearbook>>. Acesso em> 11 nov 2019

WÄSCHER, G., HAUBNER, H., SCHUMANN, H. An improved typology of cutting and packing problems. **European Journal of Operational Research**, 183(3):1109–1130, 2007.

WANG, P.Y., VALENZA, C.L. Data set generation for rectangular placement problems. **European Journal of Operational Research**, 134(2), 378–391, 2001.

YE, D., HAN, X., ZHANG, G. A note on online strip packing. **Journal of Combinatorial Optimization**, v. 17, p. 417-423, 2009.