



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

ÉDEN MALVEIRA DOS SANTOS

APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR BASEADA EM GERAÇÃO DE
COLUNAS AO CORTE DE BARRAS DE AÇO DESTINADAS À CONSTRUÇÃO
CIVIL

FORTALEZA - CE

2022

ÉDEN MALVEIRA DOS SANTOS

APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR BASEADA EM GERAÇÃO DE COLUNAS
AO CORTE DE BARRAS DE AÇO DESTINADAS À CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto.

FORTALEZA - CE

2022

ÉDEN MALVEIRA DOS SANTOS

APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR BASEADA EM GERAÇÃO DE COLUNAS
AO CORTE DE BARRAS DE AÇO DESTINADAS À CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em: 30/08/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Vanessa Ribeiro Campos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Macário Cartaxo de Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Caio Augusto Nunes Marques
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Dedico este trabalho,

A minha mãe, pessoa que lutou incansavelmente para me proporcionar as melhores coisas da vida. Uma mulher de fé a qual eu tenho tanto orgulho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Grande Deus, que se faz presente em todos os momentos da vida. Obrigado pela força depositada nos momentos de fraqueza e por nunca ter me abandonado nos momentos difíceis, que foram muitos! Tenho a cada dia a esperança renovada de que irei realizar muitos sonhos, este é um deles. Ao Senhor, minha inenarrável gratidão.

Aos meus pais, José Eptácio Rodrigues dos Santos e Cláudia Eugênia Malveira Malagueta não tenho palavras para agradecer a grandiosidade que são vocês! Aprendi os melhores ensinamentos e valores da humanidade. Regracio pela presença, pela força, pelo incentivo e consolo. A vocês, que de mãos estendidas, almejavam meus ideais, o meu profundo respeito. Imensuravelmente, eu amo vocês.

Aos meus irmãos Eric Malveira dos Santos e Emilly Malveira dos Santos, que, apesar da distância, estão sempre presentes. São o meu alicerce em dias difíceis e a minha proteção. Que o amor, a alegria, o carinho prevaleçam na nossa união.

À minha família, base de tudo. Agradeço pela confiança, e pela fé inabalável da minha avó Iracilda. Obrigado pela presencialidade e pelos anseios de vitória aos meus sonhos.

Ao meu orientador Dr. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto, pelas orientações, críticas (sempre construtivas), materiais cedidos e por acreditar em mim nesses tempos difíceis. Você foi primordial para crescimento deste estudo, admirável profissional.

Aos professores participantes da banca examinadora pelas críticas e reflexões, pelas inestimáveis contribuições e sugestões.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Então, à CAPES, meu louvor pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À Empresa “Alpha” participante desta pesquisa, por abrir as portas e contribuir com a ciência, minha gratidão.

Ao grupo de pesquisa OPL - Pesquisa Operacional em Produção e Logística da UFC, em especial aos alunos Mauro Vitor e Helano Pessoa, que puderam ajudar e acrescentar nesta pesquisa.

Aos professores e servidores do PEC-UFC pelos ensinamentos e pelas contribuições valiosas na minha vida acadêmica, foi uma experiência única. Sei que abri portas para outros caminhos e dei um novo passo para a minha vida profissional. A troca de conhecimento durante esses anos foi inexplicável.

Aos colegas de mestrado, pessoas que deixaram esta caminhada mais leve! Costumo dizer que fomos “escolhidos a dedo” para compor essa turma. Um pessoal realmente unido, uma turma única e, por isso, tem sido primordial para minha chegada até aqui. Todavia, tivemos muitos momentos de aflição, tristeza, desespero... Porém só ficará guardados na memória os momentos de sorriso, crescimento e vitória. Agradeço a todos pela troca de conhecimentos e companhia durante esse tempo. Vocês são incríveis!

Aos meus amigos Karynne Nobre, Valéria Chaves, Israel Cavalcante, Magda Santiara e Keren Hapuk que são pessoas que tenho um grande apreço. Obrigado pelos momentos de amparo. Regracio pela companhia, alegria, confiança, ajuda e incentivo em todos esses momentos.

Aos meus colegas de trabalho e das empresas que passei neste período, um salve ao pessoal da CAC Engenharia, da Universidade de Fortaleza, do Tribunal de Justiça do Estado do Ceará e do Hotel Gran Marquise. Todo ensino e experiência têm seu valor e sempre será bem-vindos.

E por fim, aqueles que estiveram comigo durante esse tempo, formal ou informalmente, meu carinho e agradecimento.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.”

Martin Luther King

RESUMO

As construtoras precisam aprimorar o seu desempenho implantando melhorias de racionalidade em seus processos e alternativas gerenciais que resultem na redução dos custos operacionais. Arelado a isso, visou-se estudar o Problema de Corte de Estoque Unidimensional (PCEU), em razão da sua aplicação na Indústria da Construção Civil com proposições em minimizar os custos com matéria-prima e mão de obra, bem como reduzir o desperdício. O principal desafio está relacionado em comparar um modelo de programação linear baseado em geração de colunas aplicado ao PCEU na produção de barras de aço que atenda à demanda dos clientes com o método empírico utilizado por uma empresa especialista em corte e dobra de aço localizada no município de Maracanaú/CE. Para isso, foi delineada uma estratégia de pesquisa com cinco etapas, a qual foi aplicada na forma de estudo de caso para coleta e análise dos dados desta referida empresa. Os resultados computacionais demonstraram a eficiência do modelo baseado em geração de colunas para obtenção de padrões de cortes, o tempo computacional requerido pelo solver para retornar soluções ótimas nos projetos foi em média 97,45 segundos. Isso representa um ganho considerável do ponto de vista prático, pois há uma diminuição em mais de 45,86% do esforço gasto para planejar os próximos padrões de cortes a serem executados em cada parada solicitada. Com relação à capacidade produtiva, o método previu uma evolução média de 11,03% e 3,98%, para as barras com bitolas de 12,50mm e 16,00mm, respectivamente. Em termos monetários, anualmente, a minimização na utilização das barras em estoque traz redução de R\$ 314.658,46 e a redução dos desperdícios alcança um valor de R\$ 334.594,39. Os resultados obtidos pelo modelo implementado mostram melhorias consideráveis no objetivo definido, como as soluções ótimas foram encontradas em baixos tempos computacionais, acredita-se que essas abordagens são promissoras para serem aplicadas nas indústrias deste ramo. Espera-se que a empresa pesquisada analise os resultados apresentados nesta dissertação como iniciativa para reestruturar as metodologias de planejamento e posturas gerenciais com o foco em manter o padrão competitivo imposto pelo mercado.

Palavras-chave: Programação Linear; Problemas de corte e empacotamento; Método Simplex; Geração de colunas; Construção Civil.

ABSTRACT

The construction companies need to improve their performance by implementing rationality improvements in their processes and management alternatives that led to operating cost reduction. Related to this, the aim was to study the One-Dimensional Cutting Stock Problem (1D-CSP), due to its application in the Civil Construction Industry with propositions to minimize raw material and labor costs, and waste reduction. The main challenge is to compare a linear programming model based on column generation applied to 1D-CSP in steel bars production that meets customer demand to the empirical method used by a company specialized in cutting and bending steel located in the city of Maracanaú/CE. For this purpose, a five-step research strategy was outlined, which was applied in the form of a case study to collect and analyze data from this company. The computational results demonstrated the efficiency of the column generation-based model for obtaining cutting patterns, the computational time required by the solver to return optimal solutions in the projects was 97.45 seconds on average. This represents a considerable gain from a practical point of view, as there is a decrease of more than 45,86% in the effort spent to plan the next cutting patterns to be performed at each requested stop. Regarding the productive capacity, the method predicted an average evolution of 11,03% and 3,98%, for bars with gauges of 12,50mm and 16,00mm, respectively. In monetary terms, annually, minimizing the use of bars in stock brings a reduction of R\$ 314.658,46 and the waste reduction reaches the amount of R\$ 334.594,39. The results obtained by the implemented model show considerable improvements in the defined objective, as the optimal solutions were found in a low computational time, it is believed that these approaches are promising to be applied in the industries of this segment. It is expected that the studied company analyze the results presented in this thesis as an initiative to restructure the planning methodologies and management stances with a focus on maintaining the competitive standard imposed by the market.

Keywords: Linear Programming; Cutting and packing problems; Simplex method; Column generation; Civil Construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação das atividades da construção no total do VAB (%)	22
Figura 2 – Composição da cadeia produtiva da construção	23
Figura 3 – Vergalhões como objeto de estudo na pesquisa	24
Figura 4 – Corte de uma dimensão em uma barra de 120 cm	32
Figura 5 – Corte de duas dimensões em uma placa 50 cm x 50 cm.....	32
Figura 6 – Carregamento de itens em um cubo com dimensões de 50 cm x 50 cm x 50 cm...	33
Figura 7 – Exemplos possíveis de padrões de corte	37
Figura 8 – Estudos na literatura.....	48
Figura 9 – Enquadramento metodológico da pesquisa.....	50
Figura 10 – Delineamento da pesquisa.....	52
Figura 11 – Etapas do estudo de caso	55
Figura 12 – Barras de aço após o processo de corte e dobra	56
Figura 13 – Estoque de vergalhões de aço	57
Figura 14 – Máquina de corte de aço	57
Figura 15 – Ordem de serviço (OS)	58
Figura 16 – Exemplos de capacidade produtiva de vergalhões de aço	60
Figura 17 – Desperdício de matéria-prima.....	61
Figura 18 – Representação de elementos estruturais em projeto.....	62
Figura 19 – Capacidade produtiva dos projetos com cortes de bitolas de 12,50 mm	70
Figura 20 – Capacidade produtiva dos projetos com cortes de bitolas de 16,00 mm	71
Figura 21 – Quantidade de barras utilizadas nos projetos de bitolas de 12,50 mm.....	71
Figura 22 – Quantidade de barras utilizadas nos projetos de bitolas de 16,00 mm.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algoritmo do Problema de Corte de estoque baseado em Geração de Colunas	46
Tabela 2 – Dados dos projetos analisados na pesquisa.....	66
Tabela 3 – Resultados dos testes computacionais do projeto BSC 010 (12,5 mm).....	66
Tabela 4 – Tempo de procedimento geral.....	67
Tabela 5 – Dados do pedido do projeto UCP 002 (12,50 mm).....	68
Tabela 6 – Resultados da Otimização do Modelo vs. Método empírico usado pela empresa..	69
Tabela 7 – Projeções de ganhos com a redução da utilização de objetos em estoque através da introdução do modelo de programação baseado em geração de colunas	73
Tabela 8 – Projeções de ganhos com a redução do desperdício através da introdução do modelo de programação baseado em geração de colunas	74
Tabela 9 – Projeções de ganhos com a venda do material desperdiçado como sucata.....	74
Tabela 10 – Comparativo entre métodos quanto ao desperdício	75
Tabela 11 – Resultados dos testes computacionais do projeto UCP (12,50 mm).....	88
Tabela 12 – Resultados dos testes computacionais do projeto UCP 003 B (12,50 mm).....	89
Tabela 13 – Resultados dos testes computacionais do projeto UCP 003 C (12,5 mm).....	90
Tabela 14 – Resultados dos testes computacionais do projeto UCP 003 B (16,00 mm).....	98
Tabela 15 – Resultados dos testes computacionais do projeto UCP 003 C (16,00 mm).....	100
Tabela 16 – Dados do pedido do projeto BCS 010 (12,50 mm).....	105
Tabela 17 – Dados do pedido do projeto UCP 003 B (12,50 mm).....	105
Tabela 18 – Dados do pedido do projeto UCP 003 C (12,50 mm).....	106
Tabela 19 – Dados do pedido do projeto UCP 003 B (16,00 mm).....	109
Tabela 20 – Dados do pedido do projeto UCP 003 C (16,00 mm).....	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAT	Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção
C&P	Problemas de Corte e Empacotamento
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CC	Componente Construtivo
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas
CONCLA	Comissão Nacional de Classificação
CSP	<i>Cutting Stock Problem</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICC	Indústria da Construção Civil
LSF	<i>Ligth Steel Frame</i>
mm	Milímetro
NBR	Normas Brasileiras
PAIC	Pesquisa Anual da Indústria da Construção
PIB	Produto Interno Bruto
km	Quilômetro
UFC	Universidade Federal do Ceará
VAB	Valor Adicionado Bruto

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
&	Conjunção aditiva
ϕ	Espessura/bitola da barra
R\$	Real
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização e justificativa da pesquisa.....	15
1.2	Problema e questão de pesquisa	17
1.3	Objetivos.....	19
1.4	Delimitação do estudo	19
1.5	Estrutura da dissertação	20
2	O SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL	21
2.1	Indústria da Construção Civil.....	21
2.2	Industrialização na ICC	25
2.2.1	<i>Pré-fabricação</i>	<i>27</i>
3	PROBLEMAS DE CORTE DE ESTOQUE	29
3.1	Pesquisa Operacional	29
3.2	Programação matemática	30
3.3	Problema de corte de estoque unidimensional (PCEU)	31
3.3.1	<i>Formulação matemática.....</i>	<i>35</i>
3.4	Métodos resolutivos aplicados ao PCEU	39
3.4.1	<i>Método Simplex</i>	<i>39</i>
3.4.1.1	<i>Formulação matemática do Método Simplex.....</i>	<i>40</i>
3.4.2	<i>Método Geração de Colunas</i>	<i>43</i>
3.4.2.1	<i>Formulação matemática do Método Geração de Coluna.....</i>	<i>44</i>
3.4.3	<i>Problema da Mochila</i>	<i>46</i>
3.4.3.1	<i>Formulação matemática do Problema da Mochila.....</i>	<i>46</i>
3.5	Problemas de corte e empacotamento na pré-fabricação	47
4	PROCESSO METODOLÓGICO	49
4.1	Enquadramento metodológico da pesquisa.....	49
4.2	Estratégia de pesquisa, os meios de coletas e análise de dados	51
4.3	Delineamento da pesquisa.....	52
4.3.1	<i>Levantamento na literatura.....</i>	<i>53</i>
4.3.2	<i>Validação da implementação do modelo de programação linear baseado em geração de colunas aplicado na produção de barras de aço destinadas à construção civil.</i>	<i>53</i>
4.3.2.1	<i>Estudo de caso</i>	<i>54</i>
4.3.2.1.1	Caracterização da empresa, produto e processo de fabricação.....	55

4.3.2.1.2	Método de programação adotado pela empresa	58
4.3.2.1.3	Situação-problema	59
4.3.2.1.4	Caracterização e construção do modelo	61
4.3.2.1.5	Resolução do problema	64
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS	65
5.1	Resultados Computacionais.....	65
5.2	Análise dos resultados	68
5.2.1	<i>Economia de matéria-prima.....</i>	73
5.2.2	<i>Economia de atividades que não agregam valor.....</i>	76
5.2.3	<i>Outros benefícios</i>	76
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	79
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE A – TESTES COMPUTACIONAIS	88
	APÊNDICE B – DEMANDAS DOS PROJETOS	105

1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta a contextualização e a justificativa da pesquisa, juntamente com a problemática identificada. À vista disso, foi possível, então, elaborar a questão de pesquisa, a lacuna do conhecimento a ser preenchida no campo da ciência, os objetivos e a delimitação do estudo que proporcionaram a estruturação desta dissertação.

1.1 Contextualização e justificativa da pesquisa

Para acompanhar o atual cenário econômico e as inúmeras mudanças que estão acontecendo dentro da Indústria da Construção Civil (ICC), torna-se necessário que as empresas realizem adequações e reestruturações constantes em busca de metodologias e posturas gerenciais as quais são exigidas pelo mercado para manter o padrão competitivo (ALMEIDA *et al.*, 2016). Em meio a esses padrões, certamente, a industrialização se destaca, pois representa o desenvolvimento tecnológico do setor (QUAGLIO, 2018).

A construção industrializada se mostra como uma oportunidade para aprimorar o processo de produção na construção civil sem que esta desconfigure as suas características e atividades (OLIVEIRA, 2019). Segundo Nadim (2009), a industrialização por meio de estratégias de negócios tem o poder de transformar o processo tradicional em um processo de fabricação e montagem através de tecnologias novas e avançadas.

Diante dos fatos expostos, “observa-se que a construção industrializada não está relacionada apenas ao uso de sistemas construtivos pré-fabricados, mas ao uso de técnicas que visam a racionalização do processo produtivo” (OLIVEIRA, 2019, p.53).

Por conseguinte, é crucial que as construtoras aprimorem o seu desempenho implantando melhorias de racionalidade em seus processos e visem alternativas gerenciais que resultem na redução de atividades que não agregam valor, aumento da qualidade, redução dos custos operacionais e que atendam às expectativas dos clientes.

Oportunamente, cabe evidenciar a existência de algumas atividades que estão sendo deslocadas do canteiro de obras para indústria, uma delas é o serviço de corte e dobra do aço. Deste modo, optar por este serviço é uma boa possibilidade, visto que poderá existir um ganho de espaço e melhoramento de *layout* nas obras, praticidade, produtividade, qualidade e economia. Segundo Peinado, Mori e Miotto (2013) a industrialização deste serviço permite a produção de elementos mais complexos com maior velocidade e a redução das perdas do aço.

Ressalta-se que existem construções com limitação de espaço, deste modo, ter uma central de armação de corte e dobra de aço torna quase impraticável a operação dos serviços no canteiro de obra, evidenciando, para estes casos, a necessidade de terceirar o serviço de corte e dobra de barras.

Apesar do emprego de corte e dobra de barras de aço ser comum nos canteiros de obra, esta atividade apresenta elevados índices de perdas do material neste processo, da ordem de 10% segundo Praça e Barros Neto (2001) e de 6% a 14% segundo Souza (2006). Além de que, Marinho (2012), em seu trabalho, constata que o custo deste processo no canteiro é 48,13% maior que no processo industrial, consequentemente, as perdas também são maiores.

Outrossim, esta atividade requer um planejamento e controle assertivo dentro dos canteiros de obras pois exige um período de produção e confecção de peças a serem utilizadas nas estruturas. Já no processo industrial estas barras chegam nos canteiros apenas para serem montadas.

Nesse contexto, as barras de aço são consideradas materiais unidimensionais, uma vez que apenas uma de suas dimensões é relevante para o plano de corte, especificamente o comprimento. Além do aço, esta definição é ampliada para outros materiais de construção como perfis metálicos, peças de madeiras, cordoalhas, tubos, etc. Estes produtos que têm um comprimento padrão são denominados como materiais de estoque (BENJAORAN; BHOKHA, 2014; CUI *et al.*, 2016), para o caso dos vergalhões de aço, esse tamanho padrão corresponde a 12 (doze) metros.

Assim, utilizar vergalhões como material de estoque para atender aos projetos estruturais é compreender que mais adiante eles serão cortados em tamanhos menores de modo a atender todos os comprimentos previstos no dimensionamento. O processo de corte, quando não planejado, resulta em perdas por capacidade ociosa.

Então, analisar este modelo de produção associado ao entendimento do processo de corte e dobra e da logística necessária para a entrega do material conforme os projetos de engenharia, além da busca por métodos matemáticos que minimizem a capacidade ociosa, constitui um tema amplamente explorável na literatura.

Assim, torna-se atrativa a contribuição desta pesquisa para produzir soluções precisas e contínuas quanto a capacidade produtiva desta indústria, visto que, diversas empresas que atuam neste ramo não têm a visão gerencial correlacionada a essa questão. O fato das organizações utilizarem *softwares* para a geração de *layout* de cortes não necessariamente quer dizer que elas estejam utilizando todos os recursos disponíveis, pois muitas vezes estes artifícios não se adequam à realidade da empresa.

De tal maneira que, articular essas concepções com os problemas que ocorrem no chão de fábrica, por meio da coleta de dados, da confrontação das informações e de sua incorporação em modelos matemáticos, possibilita a geração de resultados eficazes e eficientes. Tal abordagem apresenta-se como uma lacuna passível de ampla exploração, sobretudo no enfrentamento de questões como redução do *lead time*, diminuição de excessos de estoque, mitigação de custos elevados e minimização das perdas de material.

Os pesquisadores Kim *et al.* (2016) estudaram a produção de barras de alumínio para fabricação de esquadrias com o foco em minimizar a perda por capacidade ociosa. Os resultados dos testes piloto realizados com 20 conjuntos de dados do mundo real confirmam que a proposta supera significativamente o sistema utilizado pela empresa estudada.

Benjaoran e Bhokha (2014) mostram a importância de se fazer um plano de corte eficiente para se obter a redução das perdas por sobra de material. Como o objeto de estudo são barras de aço, as quais demandam quantidades expressivas quando trata-se de estruturas de concreto armado, a obtenção de soluções ótimas mostra-se essencial para essa aplicação, pois o custo unitário deste material é bastante elevado comparado ao salário dos trabalhadores (um quilograma de barras de aço é aproximadamente igual a 0,53 horas de trabalho).

Portanto, o estímulo está em verificar a importância da construção industrializada, em especial, a fabricação de barras de aço em tamanhos distintos atrelada aos problemas de corte e empacotamento enfrentados pela indústria, propondo a utilização de modelos matemáticos com a finalidade de minimizar a capacidade ociosa gerada pelos padrões de corte.

1.2 Problema e questão de pesquisa

A problemática desta pesquisa está relacionada ao problema de corte e empacotamento na produção de barras de aço destinadas à execução de elementos estruturais nos canteiros de obras. Além disso, a aplicação de métodos de otimização em sistemas produtivos torna-se essencial diante da necessidade de aprimorar as práticas do setor, considerando o conhecimento acumulado pela indústria sobre sua capacidade produtiva e sobre os fatores que geram desperdícios.

O Problema de Corte de Estoque, do inglês *Cutting Stock Problem* (CSP), foi classificado como um tipo de Problemas de Corte e Empacotamento por Dyckhoff (1990) e posteriormente aprimorado por Wäscher, Haussner e Schumann (2007). Esse problema atraiu a atenção dos pesquisadores em razão da generosa variedade de aplicações em muitas

indústrias, além da geração de boas soluções de empacotamento que resultam em reduzir os custos de mão de obra e de produção (ZHAO; HAAS, 2019).

Segundo Arenales *et al.* (2007) e Ogunranti e Oluleye (2016), as instituições desenvolvem estratégias voltadas à fabricação de artefatos em formatos grandes e padronizados, os quais são primeiramente armazenados e somente depois reduzidos em dimensões menores para aplicação industrial ou para suprir demandas específicas.

Os autores supracitados afirmam que existe a necessidade de acrescentar uma nova operação, a execução do corte, cuja realização deste procedimento, inevitavelmente, produz perdas. De tal maneira que o fator econômico atrelado aos problemas de desperdícios e altos custos desperta a necessidade de se planejar padrões de cortes.

Os estudos a seguir, apresentam o empenho, nos últimos sete anos, de pesquisas cujos objetivos foram combater esses obstáculos enfrentados na construção industrializada. No primeiro, existe uma certa padronização na produção de peças do mesmo tipo, como por ser apresentado nos estudos de Arai e Haraguchi (2019) e Prata, Pitombeira-Neto e Sales (2015).

No segundo caso, há variação nos tipos dos itens, isto é, ocorrem mudanças nas dimensões ou na forma de pedido para pedido, visto que os itens podem ser retangulares, circulares, irregulares ou complexos, como demonstrado no estudo de Bennell, Cabo e Martinez-Sykora (2018) e Martinez-Sykora *et al.* (2017).

Pitombeira-Neto e Prata (2019) notaram que em muitos ambientes industriais o primeiro caso não mostra uma suposição realista, pois os pedidos dos clientes podem incluir a variação apresentada pelo segundo caso.

Assim posto, esse estudo tem como proposta fazer a integração entre os estudos feitos por Bennell, Cabo e Martinez-Sykora (2018) e Martinez-Sykora *et al.* (2017) e Pitombeira-Neto e Prata (2019), ou seja, entender, com dados reais, a produção de barras de aço destinadas à construção civil em atendimento aos pedidos dos clientes.

Por fim, levando em consideração o papel fundamental que a programação matemática exerce sobre os problemas de corte e empacotamento, mais especificamente, na minimização da utilização de objetos em estoque e do desperdício no meio industrial, formulou-se a seguinte questão de pesquisa:

Como um modelo de programação linear baseado em geração de colunas pode minimizar o desperdício e a utilização de barras em estoque na produção de barras de aço destinadas à construção civil, quando comparado ao método empírico adotado pela indústria?

O principal desafio está relacionado à integração dos métodos matemáticos dos Problemas de Corte de Estoque Unidimensional (PCEU) abordados na literatura com a utilização de método empírico empregado na produção de barras de aço em uma indústria de corte e dobra do aço. Devido a esta pesquisa ultrapassar a utilização de dados sintéticos ao se utilizar dados reais, espera-se que resulte em importantes contribuições para a ciência, também, para as indústrias que trabalham com corte e dobra de aço destinados à construção civil.

O pressuposto inicial é que, a partir de um modelo de programação linear (PL) é possível solucionar problemas de corte e empacotamento aplicados à indústria de corte e dobra de aço, cujos benefícios poderão dizer se a geração de corte terá uma diferença substancial quanto aos processos e métodos já adotados pela empresa estudada no que tange aos custos operacionais e a redução de desperdícios.

1.3 Objetivos

O trabalho em questão teve como objetivo principal comparar um modelo de programação linear baseado em geração de colunas aplicado aos problemas de corte de estoque unidimensional na produção de barras de aço que atenda à demanda dos clientes com o método empírico utilizado por uma empresa de corte e dobra de aço.

Tomando como base o objetivo principal desta pesquisa, os objetivos específicos são listados a seguir:

- a) Implementar um modelo computacional baseado em programação linear com geração de colunas;
- b) Avaliar o desempenho computacional do modelo em instâncias reais;
- c) Comparar os resultados do modelo com o método empírico adotado pela empresa;
- d) Propor melhorias gerenciais no processo produtivo a partir dos resultados obtidos.

1.4 Delimitação do estudo

Como o campo da pesquisa é bastante extenso, faz-se necessária a delimitação deste estudo. Assim, o presente trabalho limita-se aos problemas de corte de estoque em indústrias da construção civil nas três formas:

- a) Pré-fabricação: os componentes construtivos têm que ser submetidos a um processo produtivo fora do canteiro de obras;
- b) Indústrias cearenses: disponibilidade e interesse de empresas contribuírem com a ciência abrindo caminhos para realizações de estudos, além da valorização da economia local;
- c) Tipo de problema: restringe-se ao caso unidimensional.

1.5 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em 6 (seis) capítulos. O primeiro capítulo, apresenta a introdução, na qual foi feita uma breve explanação sobre a Indústria da Construção Civil, os Problemas de Corte e Empacotamento, assim como a problemática da pesquisa, a questão de pesquisa, delimitação do estudo e os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre o Setor da Construção Civil, com destaque na industrialização na ICC, mais especificamente, aos pré-fabricados.

No terceiro, é apresentada a contextualização dos Problemas de Corte de Estoque envolvendo a programação linear e sua formulação matemática bem como traz os métodos aplicados para resolução dos problemas de corte de estoque.

No capítulo seguinte apresenta-se o processo metodológico da pesquisa, contemplando o enquadramento metodológico, a estratégia adotada, os procedimentos de coleta e análise dos dados, bem como o delineamento da pesquisa. O delineamento está estruturado em duas subseções: a primeira refere-se ao levantamento realizado na literatura; a segunda aborda a validação da implementação do modelo de programação linear baseado em geração de colunas aplicado à produção de barras de aço destinadas à construção civil.

O quinto capítulo conta com as análises dos resultados e a proposição de melhorias no gerenciamento da produção de barras de aço destinadas à Construção Civil com a apresentação dos resultados computacionais e as respectivas análises. O último traz as considerações finais da dissertação e a sugestão para trabalhos futuros.

2 O SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL

2.1 Indústria da Construção Civil

A Indústria da Construção Civil é um dos setores que contribui de forma expressiva para a economia brasileira e as atividades deste ramo abrangem um setor complexo. Para melhor entender sua participação no âmbito da economia, é necessário, primeiramente, entender a sua formação a partir da associação dos subsetores produtivos. Para Quaglio (2018) há uma dessemelhança nas classificações sobre o setor da construção civil nas pesquisas que buscam a ordenação das estruturas e os números das atividades da construção.

Inicialmente, para descrever a composição desta área, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) dispõe a Comissão Nacional de Classificação (CONCLA), este por sua vez, engloba a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) que tem o objetivo de uniformizar as referências de identificação das unidades de produção do país nos cadastros e registros da administração pública (IBGE, 2022).

De acordo com a classificação do CNAE, a seção “construção” compreende três divisões, sendo elas: a construção de edifícios em geral, as obras de infraestrutura e os serviços especializados para construção que fazem parte do processo de construção (IBGE, 2022).

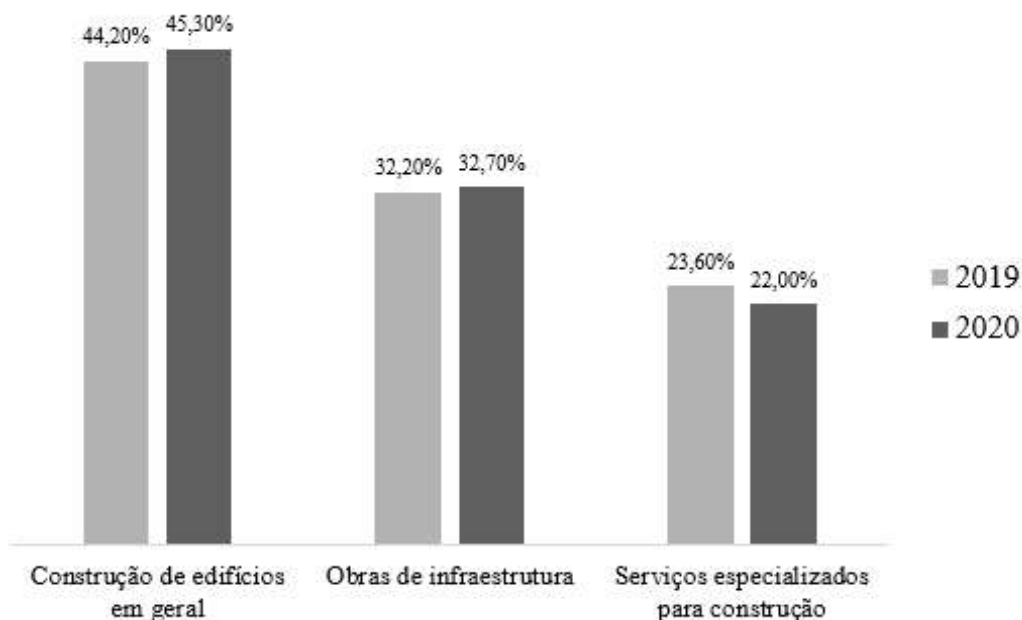
Logo, a construção de edifícios, segundo este órgão governamental, compreende as atividades realizadas pelas construtoras, incorporadoras e imobiliárias. A construção de obras de infraestrutura abrange a construção de obras de saneamento básico bem como instalações industriais, redes de transporte por dutos, linhas de eletricidade e instalações de equipamentos públicos, etc. Os serviços especializados para construção envolvem as atividades de demolição e preparação do terreno, instalações, fundações e acabamentos.

Em contrapartida, esta seção não compreende a produção de materiais de construção ou de elementos mais complexos destinados a obras de edifícios e de infraestrutura, um exemplo disso são estruturas metálicas que fazem parte da seção “indústria de transformação”. No tocante, esta, compreende diversos grupos das mais variadas indústrias. Vale ressaltar que os componentes pré-fabricados produzidos e montados pela mesma unidade fabril são considerados como “indústria de transformação”, caso a montagem seja em outro local, é classificado como “construção”. Exemplificando, a fabricação e a montagem de casas de madeira, de concreto ou de estrutura metálica, pré-moldadas ou pré-fabricadas, quando realizadas pelo próprio fabricante não compreendem a seção “construção”.

Dessa forma, para entender a sua formação e a composição econômica em relação às classificações do IBGE, o próprio órgão, através da Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC) extrai informações relacionadas à participação no valor de incorporações, obras e serviços por setor de atividade.

Em termos de composição, a divisão é caracterizada com bases na CNAE. A Figura 1 mostra o panorama dessa indústria. Inicialmente, o setor da construção responde por aproximadamente 3,9% do Valor Adicionado Bruto (VAB) brasileiro no ano de 2019, segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) (CBIC, 2022). Consoante aos dados expostos, entre os anos de 2019 e 2020 a divisão construção de edifícios em geral tem a maior porcentagem na participação das atividades da construção total do valor adicionado apresentando um pequeno aumento de 1,10%. As obras de infraestruturas permanecem como a segunda principal atividade do segmento da construção, e no ano de 2020 apresentou um leve crescimento, passando de 32,20% para 32,70%. Já os serviços especializados permanecem na terceira posição apresentando um declínio de 1,60% (IBGE, 2022).

Figura 1 – Participação das atividades da construção no total do VAB (%)



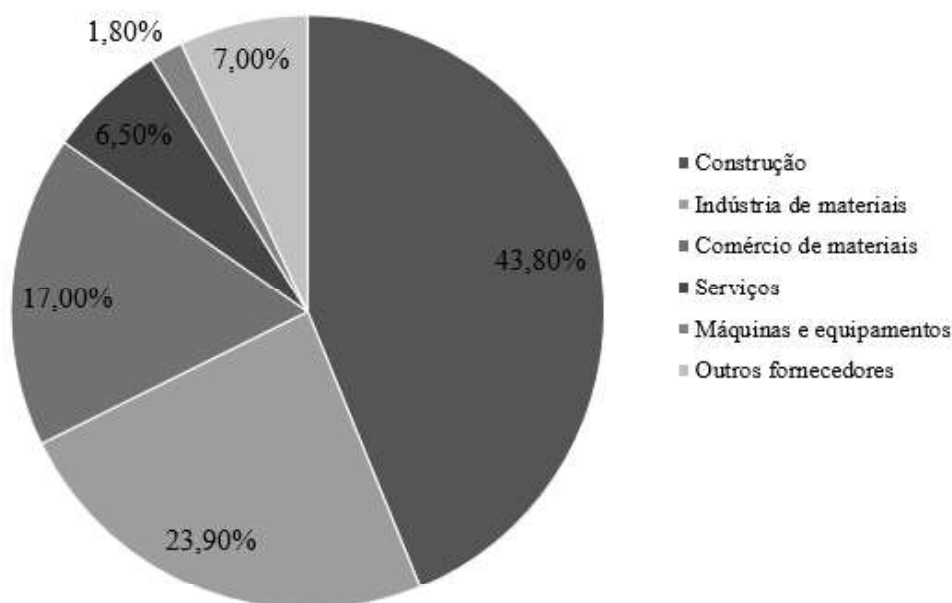
Fonte: PAIC (2021, com adaptações) e PAIC (2022, com adaptações).

Outros órgãos regulamentam as atividades deste setor, sendo elas: a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) que porta de informações sobre o perfil da cadeia produtiva da construção com dados da Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção (ABRAMAT).

Deste modo, a ABRAMAT (2022) descreve a cadeia da construção por participação no Produto Interno Bruto (PIB) em seis divisões, o que difere da classificação já relatada acima. Assim, a cadeia da construção é composta (Figura 2) por: construção, indústria de materiais, comércio de materiais, serviços, máquinas e equipamentos e outros fornecedores.

De acordo com os dados fornecidos no relatório “Perfil da Cadeia 2021” organizado por essa associação, o PIB da cadeia da construção resulta em 5,00% e ao comparar com o ano anterior, percebe-se uma queda de 0,90%. À vista disso, a atividade de construção é a principal atividade do setor representando 43,80% do total. A indústria de materiais ocupa a segunda posição com 23,90%, o comércio de materiais e serviços possuem 17,00% e 6,50%, respectivamente. E o restante são formadas por máquinas e equipamentos 1,80% e outros fornecedores 7,00%.

Figura 2 – Composição da cadeia produtiva da construção



Fonte: ABRAMAT (2021, com adaptações).

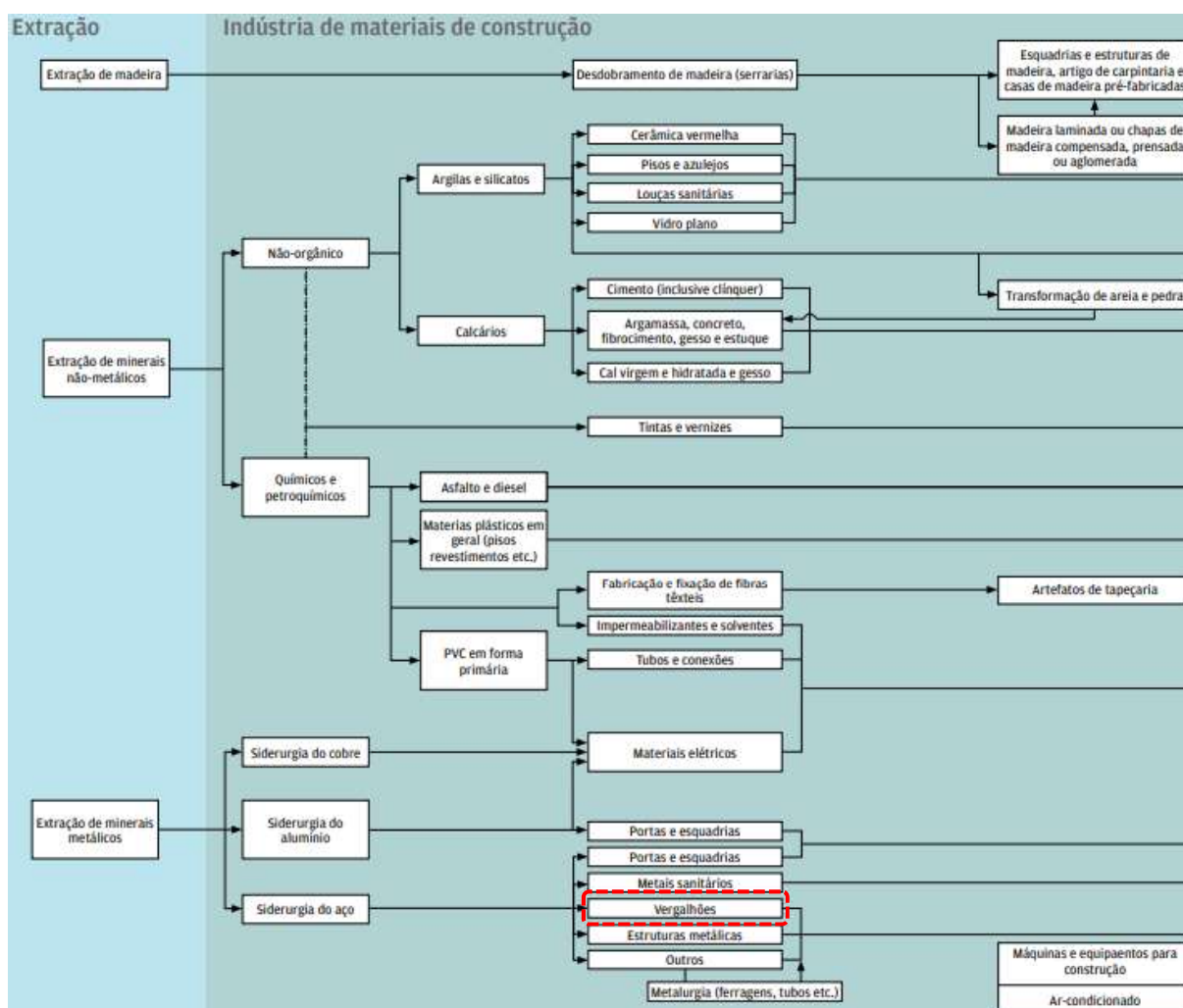
Ao observar essas definições da indústria da construção civil, percebe-se que existem divergências entre as composições das atividades que regem esta área, de tal modo que o IBGE adota uma definição e a CBIC/ABRAMAT considera outra, o que explica a diferença entre os valores apresentados. Segundo Spadeto (2011) esse fato ocorre devido o IBGE adota uma metodologia de cálculo que não considera as relações intersetoriais, geração de empregos informais e os reflexos sobre a economia.

Após essa descrição da cadeia da construção civil esta pesquisa precisa se adequar às definições apresentadas. O conceito que melhor se encaixa é o trazido pela CBIC/ABRAMAT.

Assim, posicionando o trabalho em questão na indústria de materiais de construção, percebe-se que na Figura 3 existem diversos materiais que podem ser estudados na cadeia da construção civil e seriam considerados como unidimensionais. Na extração da madeira, poderíamos estudar os pré-fabricados de madeira, um exemplo, seria as estruturas para o *Light Steel Frame*. Nos metálicos, esquadrias e as próprias estruturas metálicas.

Ademais, levando em consideração os objetivos lançados neste estudo, a aplicação da programação linear baseada em geração de colunas será voltada para o processo produtivo de barras de aço/vergalhões destinados à construção civil. Este material é bem representativo e usual nos canteiros de obras, pois é amplamente utilizado nas estruturas de concreto armado.

Figura 3 – Vergalhões como objeto de estudo na pesquisa



Fonte: ABRAMAT (2008, com adaptações).

Para finalizar o enquadramento e a caracterização da indústria de materiais de construção como parte integrante da cadeia da construção civil, em Martucci (1990), observa-se o subsetor de componentes e materiais de construção produzidos por empresas industrializadas. Ou seja, as empresas produtoras de barras de aço estão inclusas nesta perspectiva. De tal maneira que Spadeto (2011), complementa, descrevendo, que a cadeia da construção civil é formada por serviços que vai de atividades extrativista até a comercialização dos produtos.

2.2 Industrialização na ICC

Como já mencionado, a ICC é muito relevante e influente nas questões econômicas do país. Com esse olhar, percebe-se que muitos estudos apontam a industrialização do setor da construção civil como uma ferramenta para a evolução da área, pois a indústria da construção é caracterizada por ser lenta em adotar novas inovações em comparação em outras indústrias (UUSITALO; LAVIKKA, 2020).

O conceito de industrialização da construção é difundido desde a década de 1950 (ZHANG *et al.*, 2016). Com o passar do tempo a industrialização foi somando várias definições e conceitos devido à crescente demanda e necessidade econômica (WANG *et al.*, 2018).

Tradicionalmente, a industrialização na construção concentrava-se na substituição da mão de obra com a utilização de máquinas e sistemas automatizados (CHAUHAN; PELTOKORPI; BERGHEDE, 2018). Para esses autores, houve um progresso ao longo dos anos sobre o conceito, de tal modo que houve evolução nas atividades, pois elas passaram a serem externas às edificações como, por exemplo, o projeto e a fabricação de itens mais complexos do edifício.

Todavia, Lessing (2015) afirma que atualmente a industrialização na construção não é limitada à pré-fabricação e produção fabril fora do local, mas foca o processo de um projeto que inclui a produção sistemática, controlada e padronizada em sistemas de construção bem definidos e documentados que permitem supervisionar e reunir resultados de projeto, produção e montagem do sistema de construção como base para melhorias contínuas. Para Zabihi, Habib e Mirsaedie (2013), a industrialização da construção agrega diversos conceitos e técnicas, incluindo, a automação, robótica, reprodução, padronização, modularização, mecanização, pré-fabricação e construção externa e sustentabilidade.

A construção industrializada teve uma influência significativa na melhoria da eficiência, qualidade e redução de impacto ambiental nos projetos (GASPARRI; AITCHISON,

2019; GIBB, 1999; RAZKENARI *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2016). Assim, a construção industrializada é resultado de processos e tecnologias de produção da manufatura aplicados na construção com a finalidade de melhorar os principais objetivos de projeto: tempo, custo, produtividade, qualidade, sustentabilidade e segurança (GIBB, 1999; GOH; LOOSEMORE, 2017; HOUGH; LAWSON, 2019; LI; SHEN; XUE, 2014; RAZKENARI *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2016). No entanto, hoje o conceito é muito mais complexo devido às várias definições usadas em toda a literatura, nas quais se incluem: uso de ferramentas e sistemas computadorizados (ANDERSSON; LESSING, 2017; ZHANG *et al.*, 2016), aperfeiçoamento contínuo do processo (UUSITALO; LAVIKKA, 2020; WANG *et al.*, 2018), pré-fabricação, (GASPARRI; AITCHISON, 2019; LI *et al.*, 2020) e construção modular (HOUGH; LAWSON, 2019; LAWSON; OGDEN; GOODIER, 2014).

Os métodos tradicionais demonstram baixo desempenho nos três pilares para o desenvolvimento sustentável: meio ambiente, economia e aspectos sociais (NEIMAN; RABINOVICI; SOLA, 2014). Andersson e Lessing (2017) abordam que esse baixo desempenho se deve às desvantagens dos métodos executados nos canteiros, como operação manual, falta de padronização, fragmentação e descontinuidade.

Para Zhang *et al.* (2016), existem duas razões para o impulsionamento da industrialização na construção civil: a primeira é pela a escassez e pelos custos da mão de obra, e a segunda razão é a sustentabilidade na construção civil e processos de construção sustentáveis. Os autores afirmam que os processos tradicionais consomem mais energia e poluem mais o ambiente, além de que existem novos materiais que agredem menos o meio ambiente quando aplicados aos novos métodos provenientes da construção industrializada.

De acordo com Uusitalo e Lavikka (2020), mesmo que a uma maior produtividade seja proporcionada pela construção industrializada, a adoção de formas de trabalho industrializados tem sido lenta, mas as empresas de construção tradicionais estão dispostas a avançar rumo à industrialização.

Este entendimento da industrialização foi confirmado para aumentar o desempenho do processo de construção. Um exemplo claro pode ser visto nos resultados do estudo de Olivieri *et al.* (2017) que analisaram o Light Steel Frame (LSF) como sistema de fachadas e compararam com a construção tradicional. Este estudo obteve resultados significativos quanto à minimização de recursos humanos, resíduos, consumo de água e prazo.

Portanto, a industrialização é entendida como um resultado gradual de melhorias contínuas nos processos de construção, ou seja, é um processo para encontrar oportunidades

para otimizar o trabalho e reduzir o desperdício (CHAUHAN; PELTOKORPI; BERGHEDÉ, 2018).

Os produtos de construção fabricados fora do local oferecem possibilidades de controle tecnológico e sistemático de produção, ou seja, a construção industrializada permite resultados da experiência para fazer melhorias contínuas nos processos. Para Andersson e Lessing (2017) as questões importantes de padronização e melhorias contínuas são muito difíceis de estabelecer no processo de construção tradicional.

2.2.1 Pré-fabricação

A pré-fabricação é um dos conceitos que compõem a construção industrializada pois é caracterizada pela produção externa ao ambiente de execução de atividades, sendo abordada em normas técnicas brasileiras. Assim, trazendo a definição ao manuscrito, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da norma brasileira NBR 9062 (2017, p. 4) descreve elementos pré-fabricados como “elemento pré-moldado executado industrialmente, em instalações permanentes de empresa destinada para este fim, que se enquadrem e estejam em conformidade com as especificações regulamentadas”

Conforme Chauhan, Peltokorpi e Berghede (2018, p. 849, tradução nossa) a pré-fabricação é, “tecnicamente, qualquer edifício que tenha sido dividido em subseções ou subprodutos produzidos no ambiente fabril e confeccionados no local, pode ser considerado um edifício pré-fabricado”.

Todavia, Razkenari *et al.* (2020) afirmam que as construções externas enfrentam uma resistência significativa da indústria da construção e do mercado do ambiente construído mesmo apresentando todos os benefícios já citados, porém novas condutas de construção externa estão surgindo nesta indústria para englobar questões de produtividade intrínsecas aos domínios organizacional, tecnológico e estratégico.

Para Lessing (2015) e Chauhan, Peltokorpi e Berghede (2018) a pré-fabricação de materiais atribuídos a construção é uma das áreas mais importantes da industrialização por utilizar equipamentos mais sofisticados e tecnológicos que proporcionam controle de qualidade e melhores condições de trabalho.

Enfatizando os pontos positivos da pré-fabricação sobre a construção manual, que é caracterizada pela mão de obra artesanal:

Os projetos de construção experimentam constantemente excedentes de custos e problemas de programação. Ao mesmo tempo, o mercado da construção exige produtos mais rapidamente, a preços mais baixos e com alta qualidade. No geral, essas deficiências fizeram com que esta indústria chegasse a um estado em que não há solução específica, especialmente dada a crescente falta de mão de obra qualificada na construção que continua aumentando os seus custos e reduzindo a eficiência e a qualidade (RAZKENARI *et al.*, 2020, p. 1, tradução nossa).

A construção industrializada é um fator diferencial existente pois apresenta características que minimizam fatores como custo, cronograma e desperdício. Assim, em concordância, Chauhan, Peltokorpi e Berghede (2018) afirmam que a pré-fabricação é essencial para a conclusão do projeto dentro do planejamento previsto e da qualidade pretendida.

Para acrescentar à discussão, a literatura traz estratégias da construção pré-fabricada em relação ao futuro das pesquisas. Li, Shen e Xue (2014) propuseram um novo roteiro para os estudos nessa área. Eles sugeriram que as investigações futuras incluam: perspectiva da indústria, desenvolvimento e aplicação, avaliação de desempenho, tecnologia e design, produção, estratégias de transporte e montagem.

Dessa forma, a construção pré-fabricada é uma solução alternativa à construção tradicional, pois ajuda a aumentar a produtividade, reduzir o desperdício, aumentar a previsão e o ciclo de vida além de trazer benefícios para todos os envolvidos no processo de construção (CAO *et al.*, 2015).

Mais estudos apresentam benefícios à pré-fabricação, como é o caso do estudo de Cao *et al.* (2015). Os resultados da pesquisa de dois projetos residenciais indicaram que a construção pré-fabricada foi mais eficiente do que a construção tradicional no uso de energia com uma redução de 20,49%, queda de 35,82% na utilização de recursos, uma diminuição de 6,61% nos prejuízos à saúde e de 3,47% nos danos ao ecossistema, além de minguar as taxas de consumo de madeira e água foram mais notáveis em 70,93% e 22,48%, respectivamente.

De fato, com esta pesquisa, espera-se contribuir na eficiência da produção, no que tange à aplicação de modelos de programação matemática para reduzir os desperdícios e melhorar a capacidade da produção de forma que atenda às perspectivas da indústria de barras de aço pertencente à cadeia produtiva da construção civil.

3 PROBLEMAS DE CORTE DE ESTOQUE

O capítulo apresenta a contextualização sobre pesquisa operacional, programação matemática, além dos problemas de corte de estoque unidimensional (PCEU). Este, por sua vez, será discutido ao decorrer do conteúdo, por ser o alvo desta dissertação. Ainda, seus métodos de resolução serão descritos.

3.1 Pesquisa Operacional

Segundo Arenales *et al.* (2007) a pesquisa operacional propõe uma abordagem científica na solução de problemas complexos ajudando os planejadores nos processos de tomadas de decisões como projetar, programar e operar sistemas em situações que demandam alocações eficientes de recursos escassos.

A pesquisa operacional ganhou destaque no período da Segunda Guerra Mundial em razão de pesquisadores contribuírem com o planejamento e a alocação de recursos, otimização de matéria-prima, etc (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

A pesquisa operacional considera problemas clássicos, como localização, programação ou problemas de mochila, e estende os modelos disponíveis para acomodar diversos campos das indústrias (KARSU; MORTON, 2015). Este ramo da ciência contribuiu nos últimos anos para aliviar os impactos negativos em diversas áreas por meio do uso de vários modelos e soluções de otimização técnicas (BEKTAŞ *et al.*, 2019).

Esses modelos são usados em uma ampla gama de serviços, incluindo, entre outros, gerenciamento de tráfego, alocação de recursos, alocação de carga, localização de instalações de serviços (KARSU; MORTON, 2015). Além de ser amplamente aplicados à ICC, mais especificamente, às indústrias de corte e dobra de aço, existe uma grande relevância em tratar sobre este segmento visto que eles são tecnicamente interessantes para serem explorados e estão inseridos nos problemas de corte e empacotamento.

Segundo Muter e Sezer (2018) o problema de corte de estoque figura entre os temas mais tradicionais e relevantes da pesquisa operacional, apresentando inúmeras aplicações práticas. Há uma extensa literatura dedicada a esse problema e às suas diversas variantes.

Portanto, torna-se fundamental a leitura minuciosa dos próximos tópicos, visto que, existe uma relação com a problemática da pesquisa, sobretudo, com a orientação aos problemas de corte e empacotamento da cadeia da construção civil, envolvendo a definição de métodos e formulações matemáticas.

3.2 Programação matemática

Para solucionar esses problemas, existem alternativas, dentre elas, as ferramentas matemáticas. Conforme apontam Wavrzynczak, Ulbricht e Teixeira (2016), tais ferramentas têm sido amplamente empregadas nos últimos anos, uma vez que sua aplicação no ambiente industrial contribui para o aumento da eficiência dos processos produtivos, com o objetivo de reduzir o uso excessivo de recursos e minimizar desperdícios.

A modelagem matemática consiste na formulação de problemas reais, como os de corte e empacotamento, em modelos de programação matemática. Devido à complexidade inerente a esses problemas, caracterizada pela multiplicidade de objetivos e pela elevada combinações de soluções, apenas um número restrito de métodos é capaz de produzir soluções exatas ou ótimas para o problema (ZHAO; HAAS, 2019).

Nesse contexto, a programação linear configura-se como um dos principais métodos da programação matemática. Sua principal característica reside no fato de que tanto a função objetivo quanto as restrições são expressas por relações lineares entre as variáveis de decisão (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Para estes autores, a construção do modelo inicia-se com a definição das variáveis de decisão, seguida pela formulação das restrições, que podem assumir a forma de igualdades ou desigualdades, e da função objetivo, a qual visa à maximização ou minimização de determinado critério.

A programação linear é amplamente utilizada na modelagem de problemas de corte de estoque. De modo geral, os problemas de corte e empacotamento consistem em alocar itens de dimensões conhecidas em objetos ou recipientes de capacidade limitada, respeitando restrições operacionais e buscando otimizar uma função objetivo. As restrições básicas envolvem a não sobreposição dos itens e o respeito aos limites físicos dos objetos disponíveis (WÄSCHER; HAUSSNER; SCHUMANN, 2007).

A ampla aplicação desses modelos pode ser observada em diversos estudos. Yang, Ma e Wu (2016) propuseram um modelo de planejamento para múltiplas linhas de produção de elementos pré-fabricados, utilizando técnicas de programação linear para apoiar o planejamento. Já Prata, Pitombeira-Neto e Sales (2015) concentraram-se na maximização da taxa de utilização de moldes como forma de otimizar cronogramas de produção.

Embora muitos problemas possam ser adequadamente representados por modelos de programação linear clássicos, situações mais complexas exigem técnicas avançadas de resolução. Nesse sentido, destacam-se métodos como o Simplex, a Geração de Colunas e o

Problema da Mochila, os quais são amplamente utilizados na resolução de problemas de corte de estoque. Os fundamentos teóricos e as características desses métodos são apresentados nos tópicos subsequentes.

3.3 Problema de corte de estoque unidimensional (PCEU)

Os problemas de corte e empacotamento ocorrem em vários processos industriais, podendo ser aplicados em diversas atividades do mundo real, como agendamento de trabalhos, carregamento de contêineres, corte de vidro, papel ou aço (DYCKHOFF, 1990; WÄSCHER; HAUSSNER; SCHUMANN, 2007; BENNELL; CABO; MARTÍNEZ-SYKORA, 2018; MAHVASH; AWASTHI; CHAUHAN, 2017).

Observa-se que este estudo aborda a sistemática de dois problemas supracitados: os problemas de corte de estoque e de empacotamento. O problema de empacotamento consiste em embalar um determinado conjunto de itens em compartimentos com o objetivo de minimizar o número de caixas ou de maximizar a utilização de sua capacidade (MAHVASH; AWASTHI; CHAUHAN, 2017). O problema de corte de estoque, por sua vez, consiste em determinar a forma ótima de cortar materiais disponíveis em estoque (como bobinas, barras e chapas) em dimensões menores demandadas, de modo a minimizar desperdícios e custos associados ao processo.

O primeiro trabalho na área foi elaborado por Kantorovich (1939), a partir de então outros trabalhos foram publicados, dentre eles, os de Gilmore e Gomory (1961) e (1963) que vem sendo citados e estudados até os dias atuais. Os autores descreveram soluções de PCEU por meio da utilização do método de geração de coluna concomitante ao método simplex.

Assim, a condição padrão consiste em cortar peças maiores (caixas/bins) disponíveis em estoque para produzir peças menores (itens) para atender a uma demanda específica e minimizar as perdas de matéria-prima (OGUNRANTI; OLULEYE, 2016). Segundo Pessoa (2017) as peças maiores são cortadas para produzir itens menores, podendo ser em formatos diferentes, tais como estruturas retangulares, circulares ou mais complexos, a fim de cumprir as demandas dos clientes cortando a menor quantidade possível de artefatos em estoque.

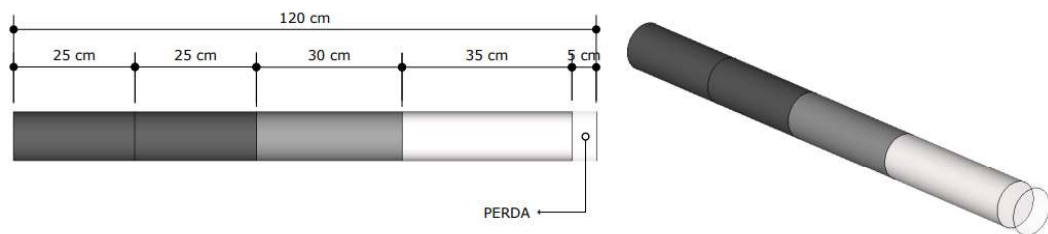
Dada a ampla variedade de problemas de corte e empacotamento descritos na literatura, tornou-se necessária a formulação de uma tipologia capaz de classificá-los de maneira sistemática e coerente. Nesse sentido, Dyckhoff (1990) apresentou uma tipologia abrangente, fundamentada na estrutura lógica das diferentes variações desses problemas, com

o propósito de padronizar e unificar as notações utilizadas nos estudos da área. Posteriormente, Wäscher, Haussner e Schumann (2007) propuseram revisões e aprimoramentos à tipologia de Dyckhoff (1990), consolidando um esquema classificatório mais robusto. As características principais dessa tipologia estruturada por Dyckhoff (1990) são apresentadas a seguir:

a) Dimensionalidade: classifica os problemas pela dimensão do corte. Especifica se os itens são unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais.

- Um problema é caracterizado como unidimensional quando apenas uma dimensão é de interesse ao plano de corte (Figura 4). Exemplos aplicados à construção civil são as barras de aço, perfis de alumínio, etc.

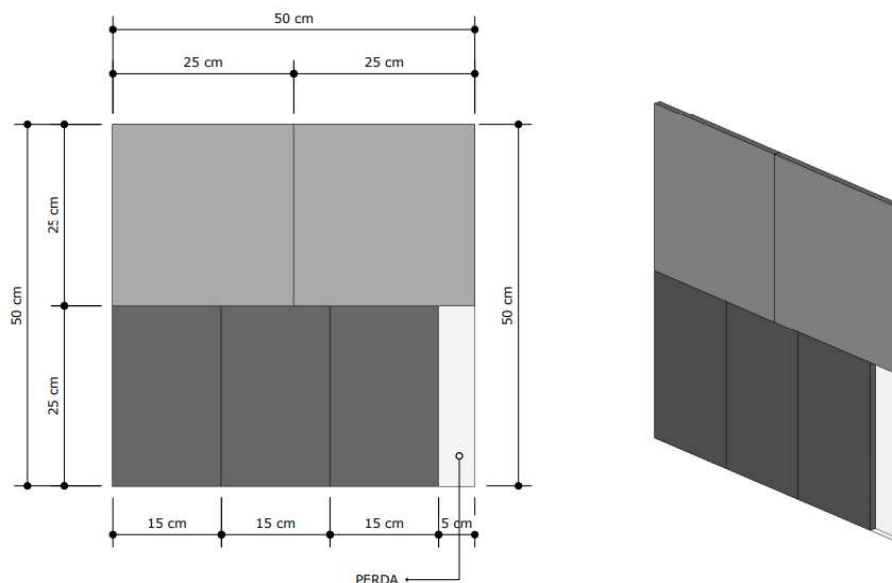
Figura 4 – Corte de uma dimensão em uma barra de 120 cm



Fonte: elaborado pelo autor.

- O bidimensional é quando duas dimensões (comprimento e largura) são relevantes na obtenção da solução (Figura 5). Placas de madeiras, placas de vidros podem exemplificar esta classificação.

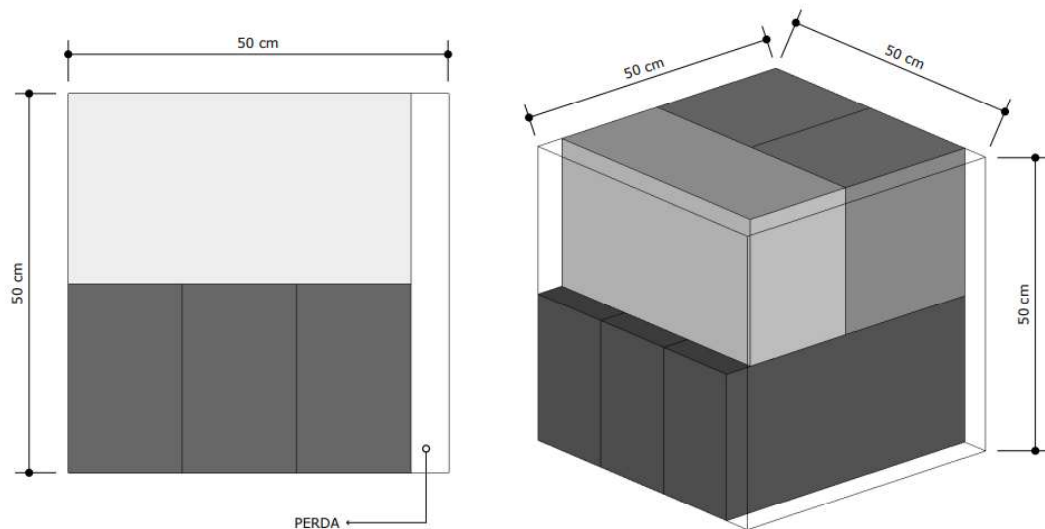
Figura 5 – Corte de duas dimensões em uma placa 50 cm x 50 cm



Fonte: elaborado pelo autor.

- E o tridimensional (Figura 6) envolve as três dimensões (comprimento, largura e espessura), pode-se citar o carregamento de um caminhão com blocos cerâmicos, cimentos, tintas, etc.

Figura 6 – Carregamento de itens em um cubo com dimensões de 50 cm x 50 cm x 50 cm



Fonte: elaborado pelo autor.

Além dessas classificações de dimensionalidade, existem a n -dimensional, com $n > 3$.

b) Tipo de atribuição:

- (B) Todos os objetos e uma seleção de itens, exemplificando, esta atribuição ocorre no problema da mochila;
- (V) Uma seleção de objetos e todos os itens, esta situação ocorre nos Problemas de Corte de Estoque.

c) Características de objetos:

- Somente uma unidade (O): pode ser observado no Problema da Mochila;
- Objetos com formas idênticas (I): ocorre nos problemas de empacotamento;
- Objetos com tamanhos variados (D): corresponde aos problemas de corte de estoque com sobras aproveitáveis.

d) Características dos itens:

- Poucos itens com tamanhos diferentes (F);
- Muitos itens com tamanhos diferentes (M);

- Muitos itens com pequena variação do tamanho (R);
- Tamanhos congruentes (C).

Com a categorização acima, criada por Dyckhoff (1990), é possível classificar o problema como Problema de Empacotamento (1/V/I/M), ou seja, unidimensional, com uma seleção das unidades maiores de tamanho fixo e os itens menores são em grande quantidade, possuindo grande variação de tamanhos, em geral.

Quanto à classificação introduzida por Wäscher, Haussner e Schumann (2007), cita-se:

a) Tipo de atribuição:

- (B) Maximização das saídas, o objetivo é a produção do máximo de itens possíveis;
- (V) Minimização das entradas, o objetivo é usar o mínimo possível dos objetos em estoque.

b) Característica de objetos:

- Um objeto grande, este poderá ter todas as dimensões fixas ou uma ou mais dimensões variáveis;
- Vários objetos grandes; este poderá ter objetos grandes idênticos, variedade fracamente heterogênea ou variedade fortemente heterogênea.

c) Característica dos itens:

- Itens idênticos;
- Variedade fracamente heterogênea;
- Variedade fortemente heterogênea
- Vários objetos grandes;

d) Forma dos itens

- Existe uma diferença entre os itens regulares (retângulos, círculos, etc) ou irregulares.

Com a categorização acima, levantada por Wäscher, Haussner e Schumann (2007), é possível classificar como “*Bin Packing Problem*” (Problema de Empacotamento) em sua versão mais simples, o estoque apresenta objetos de forma ilimitada e segue o padrão de possuir o mesmo tamanho, faz parte do conjunto dos chamados “Problemas de Empacotamento de tamanho único” (*Single Bin Size Bin Packing Problem* - SBSBPP).

Assim, o próximo tópico apresentará a formulação matemática dos problemas de corte e empacotamento, depois serão apresentados alguns trabalhos já produzidos

correlacionados com a cadeia da construção civil. A literatura foi investigada para esta descrição.

3.3.1 Formulação matemática

Após a definição, notações e classificações, agora, discorre-se sobre a formulação algébrica do problema de corte de estoque, uma vez que esta fundamentação será necessária para o entendimento de todo o trabalho. As principais referências e consulta na literatura para demonstrar esta aplicação foi levantada nos trabalhos de Poldi (2003) e Arenales *et al.* (2007).

Para a apresentação da formulação matemática, por simplicidade, focou-se no problema unidimensional, e que inicialmente existe apenas um tipo de barra em estoque. Embora essa abordagem possa ser estendida para problemas com mais dimensões.

Segundo estes autores, um problema unidimensional, consiste em cortar barras, em número suficientemente grande disponíveis em estoque, de um determinado tamanho único L , para a produção de barras menores de m tipos de itens com tamanhos l_i , $i = 1, 2, \dots, m$, de modo que, $l_i \leq L$. E serão produzidos de acordo com quantidade demandada b_i , $i = 1, 2, \dots, m$, respectivamente.

A primeira formulação deste problema foi elaborada por Kantorovich (1939), e é reproduzida a seguir.

Definiu-se as variáveis:

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{se a barra } j \text{ é usada} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

x_{ij} = número de vezes que o item i é cortado na barra j .

Tem-se então, o seguinte modelo:

$$\min \quad z = \sum_{j=1}^n y_j \quad (3.1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \geq b_i, i = 1, \dots, m \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^m l_i x_{ij} \leq L y_j, j = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

$$y \in B^n, x \in Z_+^{mn}$$

O objetivo é minimizar o número de barras usadas, dado um limitante superior de barras disponíveis n . Para que isso seja possível, é necessário determinar as melhores forma de se cortar estes objetos em estoque.

Nota-se que a formulação de Kantorovich (1939) não é baseada em padrões de corte, de tal modo que outra concepção será apresentada para este mesmo problema. O modelo embasado em padrões de corte é mais usual na literatura e computacionalmente pois apresenta uma relaxação linear mais forte o que proporciona a sua resolução de forma mais rápida.

Neste problema anteriormente apresentado, a função objetivo concentra-se em usar ou não as barras em estoque e como iria cortar cada item nesta barra. No modelo que ainda será apresentado, os padrões de corte irão descrever quantas vezes cada item será cortado. Dessa forma, precisa-se definir os chamados padrões de corte. Segundo Poldi (2003) e Arenales *et al.* (2007):

Definição I. (Padrão de Corte). Padrão de corte corresponde a um arranjo de como cortar um objeto maior em estoque para produção de itens menores demandados, a Figura 7 apresenta alguns padrões de corte. Associa-se um vetor m -dimensional a um padrão de corte que contabiliza os itens produzidos:

$$\mathbf{a}_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj}), j = 1, 2, \dots, n$$

onde a_{ij} é o número de barras do tipo i que serão produzidas ao se cortar um objeto no padrão j .

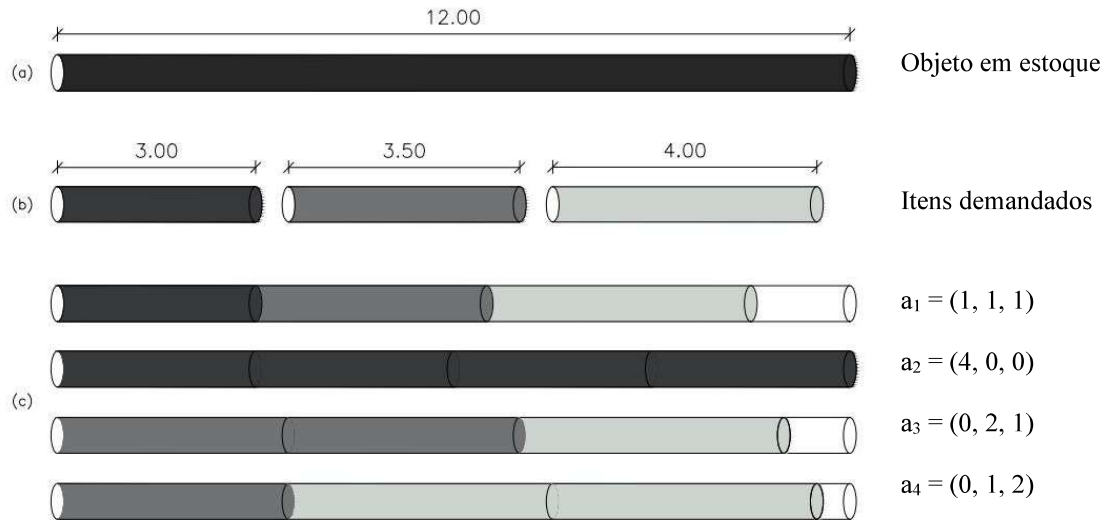
Observe que um vetor $\mathbf{a}_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj})$, refere-se a um padrão de corte se e somente se satisfazer as restrições do Problema da Mochila, considerando apenas as restrições físicas:

$$l_1 a_{1j}, l_2 a_{2j}, \dots, l_m a_{mj} \leq L \quad (3.4)$$

$$a_{1j} \geq 0 \quad (3.5)$$

$$a_{ij} \in \mathbb{Z}_+, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n.$$

Figura 7 – Exemplos possíveis de padrões de corte



Fonte: elaborado pelo autor.

Definição II. (Padrão de Corte Completo). Padrão de corte completo corresponde a um arranjo de cortes em que a sobra gerada seja inferior ao menor tamanho de itens demandados a se produzir.

Considera-se $l_i \leq L$, $i = 1, 2, \dots, m$, os tamanhos dos itens demandados e $l = \min(l_i)$, o menor entre eles. Um padrão de corte a_j completo ocorrerá quando:

$$L - l_1 a_{1j} + l_2 a_{2j}, \dots, l_m a_{mj} < l, j = 1, 2, \dots, n. \quad (3.6)$$

Na Figura 7 todos os padrões de corte são completos, visto que as sobras são inferiores ao menor item demandando ($l_1 = 3,00m$).

Após as definições difundidas pelos autores citados (Poldi (2003) e Arenales *et al.* (2007)), precisa configurar a modelagem para o problema de corte de estoque. Para isto, duas etapas precisam ser levantadas:

- Representar todos os padrões de corte possíveis;
- Descrever a quantidade que cada padrão de corte será empregado para atender a demanda.

Diante do exposto, far-se-á a modelagem matemática do PCEU. Para isto, é necessário definir todos os possíveis padrões de corte, isto é, determinar todas as possíveis soluções de (3.4). Assim, suponha que sejam n as possíveis soluções:

$$\mathbf{a}_1 = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{bmatrix}, \mathbf{a}_2 = \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \vdots \\ a_{m2} \end{bmatrix}, \dots, \mathbf{a}_n = \begin{bmatrix} a_{1n} \\ a_{2n} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{bmatrix}$$

onde a_{ij} é a número de itens do tipo i que serão produzidos ao se cortar um objeto no padrão j , $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$.

O objetivo do PCEU é minimizar o número de barras a serem usadas. Assim, o problema pode ser formulado como um problema de programação linear inteiro.

Seja x_j o número de vezes que o objeto é cortado usando o padrão j . Considera que:

$$\text{minimizar } f(x) = x_1 + x_2 + \dots + x_n \quad (3.7)$$

$$\text{sujeito a: } \mathbf{a}_1 x_1 + \mathbf{a}_2 x_2 + \dots + \mathbf{a}_n x_n = \mathbf{b} \quad (3.8)$$

$$x_j \geq 0, x_j \in \mathbb{Z}_+, j = 1, 2, \dots, n.$$

Correspondente, o mesmo problema pode ser escrito em notação matricial:

$$\text{minimizar } f(x) = \sum_{j=1}^n x_j \quad (3.9)$$

$$\text{sujeito a: } \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{x} \geq 0, \mathbf{x} \in \mathbb{Z}_+$$

onde cada coluna da matriz $\mathbf{A} \in \mathbb{Z}_+^{m \times n}$ é um vetor associado a um padrão de corte.

Pautando o desperdício, a função objetivo do problema irá ser substituída considerando a minimização da perda total, assim é definida como:

$$\text{minimizar } f(x) = \sum_{j=1}^n c_j x_j, \quad (3.11)$$

onde:

$$c_j = L - (l_1 a_{1j} + l_2 a_{2j}, \dots, l_m a_{mj}), \quad (3.12)$$

define a perda no padrão de corte j , $j = 1, 2, \dots, n$ (consultar a Figura 7).

A minimização da função $f(x)$ em (3.11) resulta no conjunto de padrões de corte com perda mínima. Para os casos mais simples, nos quais se tem apenas um tipo de objeto em estoque, são semelhantes: minimizar o total de objetos cortados e minimizar a perda total. Segue a prova desta afirmação de acordo com o trabalho de Poldi (2003).

Considere o problema que minimiza a perda:

$$\text{minimizar } f(x) = \sum_{j=1}^n c_j x_j,$$

$$\text{sujeito a: } \mathbf{Ax} = \mathbf{b}$$

$$\mathbf{x} \geq 0, \mathbf{x} \in \mathbb{Z}_+$$

Reescrevendo o problema:

$$\text{minimizar } f(x) = \sum_{j=1}^n (L - \sum_{i=1}^m l_i a_{ij}) x_j \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \text{sujeito a: } \quad & \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \mathbf{x} \geq 0, \mathbf{x} \in \mathbb{Z}_+ \end{aligned} \quad (3.14)$$

A função objetivo de (3.13) pode ser reescrita como:

$$f(x) = L \sum_{j=1}^n x_j - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m l_i a_{ij} x_j \quad (3.15)$$

Pelas propriedades comutativa da adição e distributiva, pode-se reescrever como:

$$f(x) = L \sum_{j=1}^n x_j - \sum_{i=1}^m l_i \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad (3.16)$$

Como $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j$ é igual ao lado esquerdo da restrição em (3.14), pode-se fazer a substituição, assim tem-se a seguinte função objetivo:

$$f(x) = L \sum_{j=1}^n x_j - \sum_{i=1}^m l_i b_i \quad (3.17)$$

Dado que $L > 0$ e $\sum_{i=1}^m l_i b_i$ são constantes, tem-se que a função original (minimizar perda) é equivalente a minimizar o total de barras a serem cortadas: $\sum_{j=1}^n x_j$.

Reitera-se que minimizar a utilização das barras em estoque e o desperdício são objetivos equivalentes quando se há apenas um tipo de barra disponível em estoque e restrições de igualdade.

3.4 Métodos resolutivos aplicados ao PCEU

Para apresentar os métodos resolutivos aplicados aos problemas de corte de estoque esta seção aborda todos os conceitos teóricos dos métodos simplex, geração de colunas, e o problema da mochila.

3.4.1 Método Simplex

Devido à elevada complexidade associada à enumeração de todas as soluções básicas viáveis de um problema de Programação Linear, torna-se impraticável analisar exaustivamente todas as alternativas possíveis. Nesse contexto, o método Simplex foi proposto

como a primeira técnica sistemática capaz de conduzir à solução ótima desses modelos, explorando iterativamente apenas um subconjunto das soluções viáveis. Desenvolvido por George Dantzig em 1947, o Simplex permanece até os dias atuais como uma das principais ferramentas de resolução no âmbito da Pesquisa Operacional (DANTZIG, 1963).

A ideia geral do método Simplex consiste em partir de uma solução básica viável inicial e, a partir dela, avançar ao longo das bordas da região viável, testando soluções básicas viáveis adjacentes até alcançar a solução ótima (DANTZIG, 1963). As definições apresentadas serão aprofundadas no próximo tópico, na qual serão detalhadas as formulações matemáticas e o funcionamento do Método Simplex.

Atualmente, o algoritmo Simplex pode ser executado eficientemente por meio de ferramentas computacionais que permitem a resolução rápida e precisa de problemas de programação linear complexos e de larga escala. Essa capacidade está presente em *solvers* comerciais e livres, como CPLEX (IBM), GLPK (GNU) e COIN-OR, amplamente utilizados na indústria e na pesquisa (HILLIER; LIEBERMAN, 2013; IBM, 2022; FSF/GNU, 2022; COIN, 2022).

3.4.1.1 Formulação matemática do Método Simplex

Para apresentar os conceitos básicos do Método Simplex as referências adotadas foram de Arenales *et al.* (2007), Munari Junior (2009) e Munari Junior (2013). Assim, nesta seção apresenta-se algumas definições e formulações matemáticas de um dos métodos mais importantes da otimização linear.

Para os autores, a condição de integralidade sobre as variáveis x_j dificulta ou inviabiliza que os problemas de corte (3.9) sejam resolvidos computacionalmente. Para contornar esta limitação relaxa-se a condição de integralidade sobre as variáveis x_j e resolve-se o problema por meio do método simplex.

Escrevendo o problema de otimização (3.9) em notação matricial, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{minimizar } f(x) &= c^T x \\ \text{sujeito a: } \mathbf{Ax} &= \mathbf{b} \\ \mathbf{x} &\geq 0 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Sendo:

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Entretanto, pode-se escrever esta matriz de outra forma:

$$a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \cdots + a_n x_n = b \quad (3.19)$$

Em que, a_i é coluna i de A . Assim, a matriz A , corresponde:

$$A = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \cdots \ a_n]$$

Pode-se ter uma submatriz agrupando algumas colunas. Por exemplo, para um dado subconjunto ordenado de índices $\mathfrak{B} = \{1, 2, 3\}$, tem-se:

$$A_{\mathfrak{B}} x_{\mathfrak{B}} + \cdots + a_n x_n = b \quad (3.20)$$

com,

$$A_{\mathfrak{B}} = [a_1 \ a_2 \ a_3], x_{\mathfrak{B}} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$$

Definindo $B := A_{\mathfrak{B}}$

Fica-se:

$$B x_{\mathfrak{B}} + \cdots + a_n x_n = b \quad (3.21)$$

Reformulando:

$$B x_{\mathfrak{B}} = b - \cdots + a_n x_n \quad (3.22)$$

Essa submatriz pode ajudar a determinar o valor de $x_{\mathfrak{B}}$. Ainda, se ela for invertível, deixamos apenas o vetor $x_{\mathfrak{B}}$ do lado esquerdo da equação. Assim:

$$B^{-1}(B x_{\mathfrak{B}} = b - \cdots - a_n x_n) \quad (3.23)$$

Neste caso, chama-se de $\mathfrak{B}$ de base (submatriz invertível). A inversa pela própria matriz gera uma matriz identidade I , então:

$$x_{\mathfrak{B}} = B^{-1}b - \cdots - B^{-1}a_n x_n \quad (3.24)$$

A solução geral do sistema de equações (3.18) pode ser descrita da seguinte maneira. Define-se que $\mathcal{N}$ com os índices das variáveis que não estão em $\mathfrak{B}$, então:

$$x_{\mathfrak{B}} = B^{-1}b - \sum_{j \in \mathcal{N}} B^{-1}a_j x_j \quad (3.25)$$

é a solução geral do sistema de equação $Ax = b$, em que $x_{\mathfrak{B}}$ fica determinado de forma única se atribuir valores a $x_{\mathcal{N}}$.

Por conseguinte, a matriz B , onde $B \in \mathbb{R}^{m \times m}$, é chamada de matriz básica e é formada por m colunas linearmente independentes da matriz A e a matriz $\mathcal{N}$ é chamada de matriz não-básica.

Se na solução geral, fixar $x_{\mathcal{N}} = 0$, obtém a solução básica:

$$\bar{x}_{\mathfrak{B}} = B^{-1}b, \bar{x}_{\mathcal{N}} = 0$$

é a solução particular do sistema de equação $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$. Se $\bar{x}_{\mathfrak{B}} = B^{-1}b \geq 0$ então a solução básica é dita factível e, neste caso, diz-se que a partição básica é factível.

Agora, escrevendo a função objetivo em termos de $x_{\mathcal{N}}$ apenas, usando a solução geral que foi definida. Reescrevendo o sistema (3.18) com as partições definidas e após inserir a equação já definida (3.25).

$$\text{minimizar } f(x) = c_{\mathfrak{B}}^T x_{\mathfrak{B}} + c_{\mathcal{N}}^T x_{\mathcal{N}} \quad (3.26)$$

$$\text{sujeito a: } f(x) = \mathbf{B}x_{\mathfrak{B}} + \mathbf{N}x_{\mathcal{N}} = \mathbf{b} \quad (3.27)$$

$$x_{\mathfrak{B}} \geq 0, x_{\mathcal{N}} \geq 0$$

É dada por:

$$f(x) = c_{\mathfrak{B}}^T (\mathbf{B}^{-1}b - \sum_{j \in \mathcal{N}} \mathbf{B}^{-1}a_j x_j) + c_{\mathcal{N}}^T x_{\mathcal{N}}, \quad (3.28)$$

$$f(x) = c_{\mathfrak{B}}^T \mathbf{B}^{-1}b - \sum_{j \in \mathcal{N}} c_{\mathfrak{B}}^T \mathbf{B}^{-1}a_j x_j + c_{\mathcal{N}}^T x_{\mathcal{N}}, \quad (3.29)$$

$$f(x) = c_{\mathfrak{B}}^T \mathbf{B}^{-1}b + \sum_{j \in \mathcal{N}} (c_j - c_{\mathfrak{B}}^T \mathbf{B}^{-1}a_j) x_j, \quad (3.30)$$

definindo,

$$\mathbf{p}^T := c_{\mathfrak{B}}^T \mathbf{B}^{-1}$$

Chama-se o vetor $\mathbf{p} \in \mathfrak{R}^m$, o vetor das variáveis duais ou vetor multiplicador simplex. Com isso, a função em termos das variáveis não-básicas é dada por:

$$f(x) = \mathbf{p}^T b + \sum_{j \in \mathcal{N}} (c_j - \mathbf{p}^T a_j) x_j, \quad (3.31)$$

onde a_j corresponde à coluna j de $\mathbf{A}$ e $\mathcal{N}$ é o conjunto dos índices das colunas da matriz $\mathbf{N}$. Observa-se que $s_j := c_j - \mathbf{p}^T a_j$ é o custo reduzido das variáveis não-básicas x_j .

Quanto menor seja o valor de s_j , mais rápido a função objetivo decresce. Uma heurística gulosa conhecida na literatura como regra de Dantzig, justifica a escolha da variável não-básica a ser perturbada com o menor custo reduzido.

Assim, a direção simplex é definida pelo vetor $\mathbf{y} = \mathbf{B}^{-1}a_j$, que fornece os coeficientes de como as variáveis básicas são alteradas pela estratégia simplex.

A estratégia do simplex corresponde quando uma alteração da solução básica através da perturbação de uma variável não-básica. A componente x_k a ser perturbada deve ser tal que $c_j - \mathbf{p}^T a_k < 0$. Precisa-se definir o valor máximo para a variável x_k que deixará de ser nula. Ou seja, entrará na base $\mathfrak{B}$.

Logo,

$$\min_{i=1,2,\dots,n} \left\{ \frac{\bar{x}_{\text{g}}}{y_i}, y_i > 0 \right\}$$

Isso resulta em uma nova partição básica com mudança de índices:

$$B_l \leftrightarrow N_k$$

Assim, x_k entra na base e x_l sai da base. De tal modo que, a propriedade garante que a nova partição é básica.

3.4.2 Método Geração de Colunas

O método Geração de Colunas foi introduzido na literatura através do trabalho pioneiro de Ford e Fulkerson (1958). Mais adiante, Dantzig e Wolfe (1960) publicaram um artigo que aborda a decomposição Dantzig-Wolfe. Os autores tiveram a ideia de resolver um problema de programação linear que não se podia representar computacionalmente. Posteriormente, Gilmore e Gomory (1961) apresentaram e desenvolveram o método Geração de Colunas para resolução de Problema de Corte de Estoque Unidimensional, sendo um grande marco para a comunidade acadêmica, pois é bastante eficiente para resolução deste problema.

O algoritmo de Geração de Colunas, segundo Carvalho (2016), inicia com um problema mestre restrito (subconjunto das variáveis do problema mestre) que é otimizado. As soluções duais do Problema Mestre Restrito (PMR) são utilizadas na resolução de subproblemas, que se destinam a encontrar a variável de decisão (representada por uma coluna) mais atrativa para inserir no PMR, que é novamente otimizado. Estas operações se repetem até que os subproblemas não consigam mais gerar pontos extremos que os custos relativos sejam negativos, obtendo então, uma solução que é ótima.

Por conseguinte, devido aos problemas reais, que é o caso deste estudo, possuem um número de variáveis (colunas) elevado comparado ao cômputo de restrições (linhas) o método simplex pode ser ineficiente. Para isso, será apresentado a formulação matemática do método geração de colunas aplicado aos problemas de corte e empacotamento com base no estudo de Arenales *et al.* (2007) e Pitombeira-Neto (2022).

3.4.2.1 Formulação matemática do Método Geração de Coluna

O modelo matemático a seguir foi proposto por Gilmore e Gomory (1961, 1963) e é uma alternativa ao modelo de Kantorovich (1939). Trata-se do problema original com um número limitado de padrões e sem as restrições de integralidade:

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{j \in \mathcal{J}} x_j \\
 & \text{s.a} \\
 & \sum_{j \in \mathcal{J}} A_j x_j \geq b, \\
 & x_j \geq 0, j \in \mathcal{J}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

em que $\mathcal{J}$ é um subconjunto arbitrário do conjunto (finito) de padrão viáveis.

Um novo padrão (coluna) para o problema mestre é gerado por meio da solução de um problema da mochila:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{i=1}^m w_i y_i \\
 & \text{s.a} \\
 & \sum_{i=1}^m l_i y_i \leq L \\
 & y_i \in \mathbb{Z}_+, i = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

Nota-se que as variáveis de decisão y_i correspondem às componentes que vão compor um novo padrão gerado.

Observa-se que o interesse consiste em gerar padrões que reduzam o valor da função-objetivo do problema mestre. Portanto, deve-se escolher os valores dos pesos w_i da função-objetivo do problema da mochila de forma a garantir a geração de padrões que atinjam esse propósito. Isso pode ser obtido ao se usar os valores das variáveis duais na solução do problema mestre.

Ao aplicar o método simplex ao problema mestre restrito, a regra de Dantzig para inclusão de uma variável (coluna) na base deve-se escolher aquela com o custo reduzido s_j mais positivo:

$$\max \{s_j : j \in \mathcal{J}\}$$

Ademais, sabe-se da teoria da programação linear que o custo reduzido de uma coluna pode ser escrito como:

$$s_j = \sum_{i=1}^m w_i a_{ij} - c_j \quad (3.34)$$

em que $c_j = 1$ são os coeficientes da função-objetivo do problema mestre e w_i são os valores das variáveis duais associadas a cada restrição.

Portanto, após resolver o problema mestre restrito, obtêm-se os valores das variáveis duais $w_i, i = 1, 2, \dots, m$, e é formado o subproblema da mochila com função-objetivo dada por:

$$\max \sum_{i=1}^m w_i y_i$$

em que $y_i, i = 1, 2, \dots, m$, são as variáveis de decisão.

Quanto a introdução do novo padrão no problema mestre e condições de otimalidade, seja y^* uma solução ótima do subproblema. Caso:

$$\sum_{i=1}^m w_i y_i^* - 1 > 0, \quad (3.35)$$

introduz-se um novo padrão

$$y^* = \begin{bmatrix} y_1^* \\ y_2^* \\ \vdots \\ y_m^* \end{bmatrix}$$

no problema mestre.

Caso contrário, não há mais nenhum padrão que possa reduzir o valor da função-objetivo do problema mestre e uma solução ótima foi atingida.

Ressalta-se que para resolver um problema de PCEU baseado em Geração de Colunas cuja contorna a dificuldade da condição de integralidade sobre as variáveis x_j relaxando-as, consecutivamente, precisa-se utilizar algum método heurístico para obter a solução inteira. Na literatura existem diversas heurísticas para tratar deste assunto como é o caso no estudo de Poldi e Arenales (2006) que apresentam tipos de heurísticas construtivas e residuais.

Uma das maneiras mais simples de obter a solução do PCEU é utilizando o arredondamento simples aproximando o valor real para o inteiro mais próximo. Entretanto, deve-se lembrar da condição da demanda que deverá ser satisfeita. Logo, o arredondamento deve ser para o maior igual inteiro mais próximo.

Na tabela 1 é apresentado o algoritmo do método geração de colunas para resolução dos problemas de corte e empacotamento.

Tabela 1 – Algoritmo do Problema de Corte de estoque baseado em Geração de Colunas

Algoritmo

```

1  início Inicialize  $\mathcal{J}$  com um conjunto inicial de padrões
2  para  $k \leftarrow 1, 2, \dots, n$ , faça
3      Resolva o problema mestre restrito com os padrões  $\mathcal{J}$ 
          
$$x^* \in \arg \min \{1^T x : A_{\mathcal{J}} x \geq b, x \geq 0\}$$

4      Obtenha os valores  $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$  das variáveis duais
5      Resolva o subproblema da mochila
          
$$y^* \in \arg \max \{w^T y : l^T y \leq L, y \in \mathbb{Z}_+^m\}$$

6      se  $w^T y^* > 1$ , então:
7          | Adicione o padrão  $y^*$  ao conjunto  $\mathcal{J}$ 
8      se não
9          | pare
10     fim se
11 fim para
12 retorne Uma solução ótima para o problema mestre  $x^*$ 
13 fim

```

Fonte: elaborado pelo autor.

3.4.3 Problema da Mochila

O problema formulado a seguir, é conhecido na literatura como problema da mochila (*knapsack problem*). Este problema envolve escolhas de itens a serem colocados em uma mochila ou mais, maximizando a função utilidade.

Como abordado no Método Geração de Colunas, o subproblema consiste em um Problema da Mochila que gera uma nova coluna no PMR cujo esta interação será realizada até o momento em que o subproblema não consegue mais gerar variáveis custo relativo negativo.

3.4.3.1 Formulação matemática do Problema da Mochila

Foi levantado na literatura a formulação proposta por Arenales *et al.* (2007), entretanto a definição foi associada aos problemas de corte de estoque unidimensional de barras de aço. Ou seja, os itens de tamanhos l_i , $i = 1, 2, \dots, m$, devem ser empacotados ao longo dos objetos em estoque de comprimento L , de forma a maximizar a capacidade.

Um exemplo de problema da mochila é a seleção de barras de aço. As barras i tem tamanhos l_i e u_i de valor utilidade do item. O problema consiste em selecionar as barras que maximizem a capacidade dos vergalhões.

Assim, se:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{se a barra } i \text{ é selecionado} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O problema é formulado como:

$$\max \sum_{i=1}^m u_i x_i \quad (5.13)$$

$$\sum_{i=1}^m l_i x_i \leq L \quad (5.14)$$

$$x_i \in \mathbb{Z}_+, i = 1, 2, \dots, m,$$

onde L é o comprimento dos vergalhões em estoque.

No PCEU, o problema da mochila surge como subproblema na solução através do método simplex. Ao definir uma coluna a entrar na base, utiliza-se a solução do subproblema cujo valor de utilidade da barra i é o i -ésimo multiplicador simplex.

O modelo de programação linear dessa pesquisa embasa-se, também, na problemática da mochila (empacotamento) visto que nos vergalhões, o objetivo principal da otimização é a maximização da capacidade produtiva, em outras palavras, a minimização dos espaços ociosos deixados pelos padrões de cortes adotados.

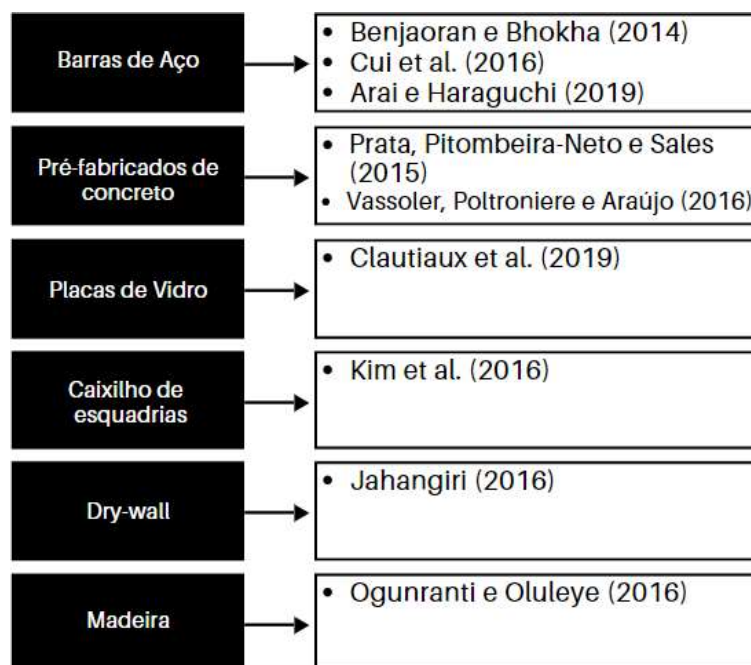
3.5 Problemas de corte e empacotamento na pré-fabricação

O problema de corte e empacotamento pode ser aplicado de maneira mais específica na indústria da construção, como auxiliar na colocação de materiais de construção em locais de construção, melhorando a eficiência do transporte de ferramentas de construção ou construção fabricada montagens, aumentando a utilização do espaço dos caminhões e reduzindo o espaço de armazenamento dos resíduos de construção. Apesar de todas as aplicações promissoras, são poucas as pesquisas que envolvem os problemas de corte e empacotamento no âmbito da indústria da construção (ZHAO; HAAS, 2019).

O fator econômico atrelado à dificuldade de resolução de problemas de corte e empacotamento motiva a comunidade acadêmica na busca de métodos para a obtenção de

soluções ótimas para essas situações. A Figura 8 mostra o empenho nos últimos sete anos de pesquisadores para combater esses obstáculos enfrentados na construção industrializada.

Figura 8 – Estudos na literatura



Fonte: elaborado pelo autor.

Kim *et al.* (2016) discutem o problema de corte encontrado por um fabricante de esquadrias de janelas. Os perfis de alumínio devem ser cortados para cada ordem estrutural da janela de modo a minimizar a perda de compensação. Clautiaux *et al.* (2019) estudaram um problema de corte de vidro industrial relacionado à fabricação de janelas com vidros duplos, sendo objetivo da pesquisa minimizar a quantidade de material usado quando uma lista de pequenas peças retangulares é cortada de um grande número de placas de vidro idênticas.

No trabalho de Jahangiri (2016) foi testado um suplemento com certo número de modelos simples para várias iterações junto a esquemas de corte que minimizassem o desperdício. Em um modelo muito específico contendo vinte peças que têm de ser cortadas em um painel completo, a aplicação gastou 100 minutos para gerar os esquemas de corte, o que resultou na redução de 36% em comparação com os esquemas gerados nas iterações iniciais.

4 PROCESSO METODOLÓGICO

Neste capítulo será apresentado o procedimento metodológico que norteia o presente trabalho. Inicialmente, são realizadas algumas considerações a respeito do enquadramento metodológico para o processo de elaboração desta dissertação. Posteriormente, serão descritos os métodos e os materiais utilizados durante toda a pesquisa, associado aos objetivos do trabalho, bem como serão descritas as formas pelas quais os dados foram coletados e tratados.

Segundo Cândido (2015), para que a pesquisa apresente coerência e validade em seus achados científicos, é fundamental que os pesquisadores realizem uma interpretação adequada e conduzam corretamente as abordagens metodológicas, bem como desenvolvam estratégias de pesquisa consistentes.

Ademais, o autor destaca que, para responder à questão de pesquisa, é necessário compreender o paradigma adotado, o tipo de pesquisa quanto à natureza dos dados, aos objetivos, à lógica e aos resultados. Da mesma forma, torna-se indispensável a escolha de uma estratégia metodológica, bem como dos meios de coleta e análise de dados compatíveis com as fontes de evidência disponíveis e com a natureza dos objetivos propostos.

Para Silva (2004), a finalidade da pesquisa científica não se limita à mera descrição ou ao relato de fatos obtidos empiricamente, mas envolve o desenvolvimento de uma abordagem interpretativa, voltada à análise e compreensão dos dados coletados.

Desta forma, o presente capítulo exhibe as premissas metodológicas que justificam a escolha da estratégia de pesquisa, bem como a adoção da transparência nos passos adotados para tornar a condução do trabalho acessível e replicável.

4.1 Enquadramento metodológico da pesquisa

A pesquisa científica deve ser sistemática, metódica e crítica, além de instigar aos pesquisadores, conhecerem, com todo rigor técnico, um ou mais determinado assunto em estudo (PRODANOV; FREITAS, 2013). Assim, o enquadramento metodológico deve adequar-se ao problema estudado. A Figura 9 apresenta a classificação desta pesquisa.

Figura 9 – Enquadramento metodológico da pesquisa



Fonte: Cândido (2015, com adaptações).

A seguir, apresentam-se as classificações metodológicas adotadas nesta pesquisa quanto à abordagem do problema, aos objetivos e às bases lógicas.

Com o propósito de desenvolver um modelo de programação matemática capaz de otimizar os desperdícios na produção de barras de aço destinadas à construção civil, esta pesquisa adota uma abordagem quantitativa, uma vez que os fenômenos analisados são mensurados numericamente e tratados por meio de modelos matemáticos de otimização. Segundo Prodanov e Freitas (2013), a abordagem quantitativa caracteriza-se pela quantificação dos dados e pelo emprego de métodos e técnicas estatísticas, permitindo a análise objetiva das informações coletadas.

Quanto aos objetivos, a pesquisa caracteriza-se como exploratória e descritiva. O caráter exploratório decorre da investigação de um problema ainda pouco abordado na literatura, especialmente no que se refere à aplicação de modelos de programação matemática ao corte de barras de aço na construção civil com dados reais. Para Gil (2008), as pesquisas exploratórias têm como finalidade proporcionar uma visão geral do problema e aproximar o pesquisador do fenômeno estudado.

Adicionalmente, a pesquisa apresenta natureza descritiva ao analisar e comparar o desempenho do método empírico adotado pela empresa com os resultados obtidos por meio de um modelo de programação linear baseado em geração de colunas, descrevendo o comportamento do sistema produtivo e os impactos decorrentes da aplicação do modelo.

Em relação às bases lógicas, a pesquisa adota o método dedutivo, uma vez que parte de modelos teóricos consolidados da Pesquisa Operacional para aplicação e avaliação em um contexto específico. Conforme Marconi e Lakatos (2003), no raciocínio dedutivo as conclusões derivam logicamente das premissas estabelecidas, permitindo verificar a adequação dos modelos teóricos quando aplicados a situações particulares.

Em síntese, o tipo de pesquisa quanto à natureza dos dados classifica-se como quantitativa, quanto aos objetivos como exploratória e descritiva e quanto às bases lógicas como dedutiva. Na sequência, são apresentados os pressupostos teóricos relacionados à estratégia de pesquisa, bem como os procedimentos de coleta e análise de dados e o delineamento do estudo.

4.2 Estratégia de pesquisa, os meios de coletas e análise de dados

A estratégia de pesquisa predominante neste trabalho é o estudo de caso. Segundo Yin (2015), essa estratégia é apropriada quando se busca compreender fenômenos mais complexos inseridos em contextos reais, especialmente em situações nas quais os limites entre o fenômeno investigado e o contexto não estão claramente definidos.

No contexto desta pesquisa, o estudo de caso justifica-se pela necessidade de avaliar o desempenho de um modelo de programação matemática aplicado ao processo de corte de barras de aço em ambiente industrial real, permitindo a comparação direta com o método empírico utilizado pela empresa. Diferentemente de estudos baseados em ambientes controlados ou em dados sintéticos, a utilização de dados reais possibilita captar as restrições operacionais e as decisões práticas inerentes ao processo produtivo.

Conforme Yin (2015), a condução de um estudo de caso requer a definição de procedimentos e técnicas de coleta de dados, bem como a utilização de múltiplas fontes de evidência, de modo a fortalecer a validade dos resultados. Nesse sentido, os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos a partir de registros em arquivos operacionais e documentos internos da empresa, complementados pela observação do processo produtivo, permitindo a construção de uma base consistente para as futuras análises.

De acordo com Prodanov e Freitas (2013), os documentos constituem registros utilizados como fonte de informação e devem ser submetidos a uma avaliação crítica quanto à sua autenticidade, confiabilidade e origem. No âmbito deste estudo, os documentos forneceram informações relativas à empresa, ao produto e ao processo operacional.

Os registros em arquivos, conforme Yin (2015), representam uma fonte relevante de evidência em estudos de caso por abrangerem dados organizacionais estruturados ao longo

do tempo, como pedidos, projetos e informações operacionais. Nesta pesquisa, tais registros constituíram a principal fonte de dados para responder aos problemas investigados, especialmente no que se refere aos pedidos dos clientes e ao método de programação adotado pela empresa.

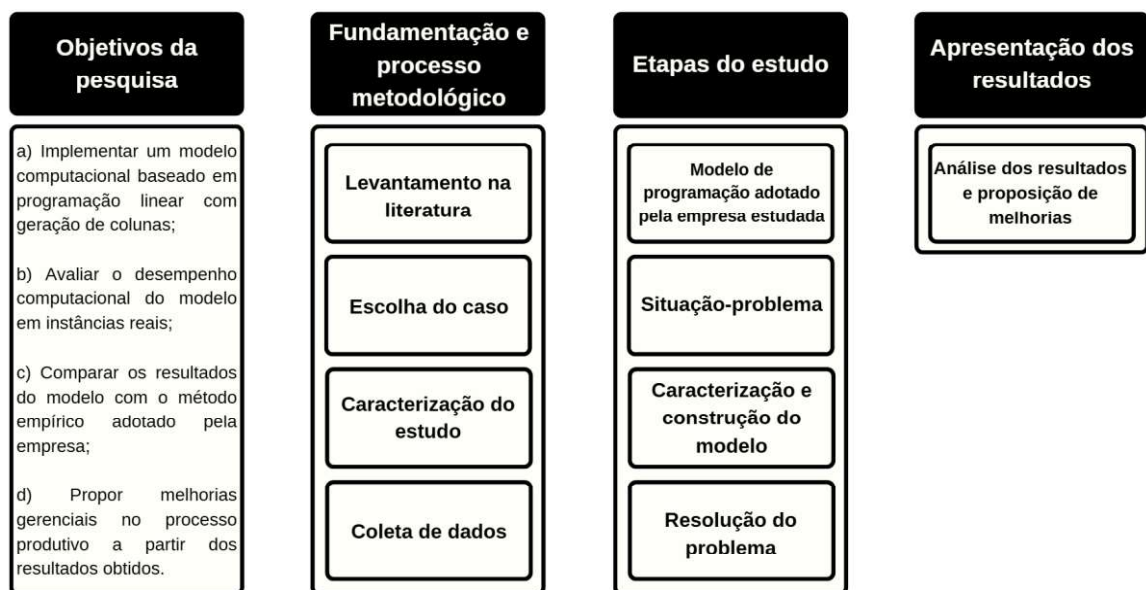
A observação direta foi empregada de forma complementar, com o objetivo de validar e contextualizar as informações obtidas nos documentos e registros, permitindo compreender as práticas operacionais e as restrições reais do processo produtivo.

Na análise dos dados, empregou-se a análise documental para o tratamento dos documentos e dos registros em arquivos utilizados como fontes de evidência. Ademais, utilizaram-se técnicas estatísticas, considerando que os resultados analisados correspondem às saídas de um modelo de programação matemática.

4.3 Delineamento da pesquisa

Esta subseção descreve o delineamento da pesquisa, detalhando a estrutura e as principais etapas do estudo. A Figura 10 apresenta, de maneira resumida, o delineamento do trabalho, possibilitando ao leitor uma visão integrada da organização da pesquisa e das atividades metodológicas desenvolvidas.

Figura 10 – Delineamento da pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.1 Levantamento na literatura

O levantamento na literatura concentrou-se em construir uma base de conhecimento teórico e crítico para a pesquisa. Inicialmente, buscou-se levantar os trabalhos sobre os problemas de corte e empacotamento na indústria da construção civil e sobre programação linear aplicados a esta temática. Para tal, o levantamento foi realizado em periódicos e em congressos renomados. Utilizou-se como ferramenta de busca o Portal de Periódico Capes, e através do acesso a esse instrumento, foi possível acessar bases de dados como *Scielo*, *Scopus*, *Science Direct*, *Web of Science* e *Engineering Village*.

No âmbito nacional, inicialmente foram consultados livros de Pesquisa Operacional. Quanto às dissertações e teses, a ferramenta de busca foi através da biblioteca digital brasileira de teses e dissertações e da biblioteca digital de teses e dissertação da Universidade São Paulo (USP), na qual foi realizado uma retrospectiva de estudos realizados nos últimos sete anos. Internacionalmente, fora as bases de dados já mencionadas, foram consultados os anais do congresso *Internacional Group for Lean Construction* (IGLC).

Diante disso, a seleção dos trabalhos foi realizada inicialmente por meio da leitura dos títulos e, posteriormente, dos resumos. Os estudos identificados como tangenciais à pesquisa foram desconsiderados. Ao final desse processo, tornou-se possível identificar as lacunas do conhecimento, as quais subsidiaram a formulação de uma proposta de pesquisa voltada à contribuição científica no campo da ciência.

Com base nesse levantamento, foi possível estruturar o planejamento da pesquisa, contemplando a contextualização do tema, a formulação do problema, a justificativa, os objetivos e o processo metodológico. Na sequência, procedeu-se à análise dos resultados obtidos a partir do estudo de caso realizado na empresa participante da pesquisa.

A próxima subseção apresenta os meios e as ferramentas que compõem o estudo de caso referente à otimização da programação da produção de barras de aço, com ênfase nos problemas de corte e empacotamento. Em seguida, são descritas as informações iniciais necessárias à aplicação do estudo.

4.3.2 Validação da implementação do modelo de programação linear baseado em geração de colunas aplicado na produção de barras de aço destinadas à construção civil

O estudo de caso desta pesquisa foi realizado em uma empresa do ramo da Construção Civil especializada na produção de corte e dobra de barras de aço na cidade de

Maracanaú, Estado do Ceará. Para a realização da pesquisa foram coletados os dados de pedidos de clientes da empresa que constitui parte da pesquisa, bem como as especificações dos produtos e processo produtivo.

A partir de uma avaliação do processo produtivo e do seu planejamento foi analisado o problema de corte e empacotamento dentro da indústria (caso real), em seguida, foi levantado o modelo de programação matemática com base na coleta e tratamento dos dados a fim de solucionar a utilização excessiva das barras em estoque e o desperdício.

A coleta de dados foi em função da produção, assim como, dos documentos que contêm informações referentes às demandas de pedidos dos clientes. Em posse dos dados selecionados e tratados, foram definidas as restrições do problema com base nas principais variáveis de decisão: capacidade produtiva e demanda de pedidos. Posteriormente, procedeu-se a implementação do modelo de programação linear baseado em geração de colunas, conforme a formulação apresentada no capítulo 3 deste trabalho.

Quanto à seleção dos dados, foi necessária uma análise crítica dos documentos juntamente com a observação para identificar a sua validação. Após isso, escolheu-se os meios computacionais para dar suporte ao tratamento e tabulação dos dados. Ou seja, as informações coletadas em campo serão organizadas em planilhas eletrônicas para melhor compreensão e interpretação.

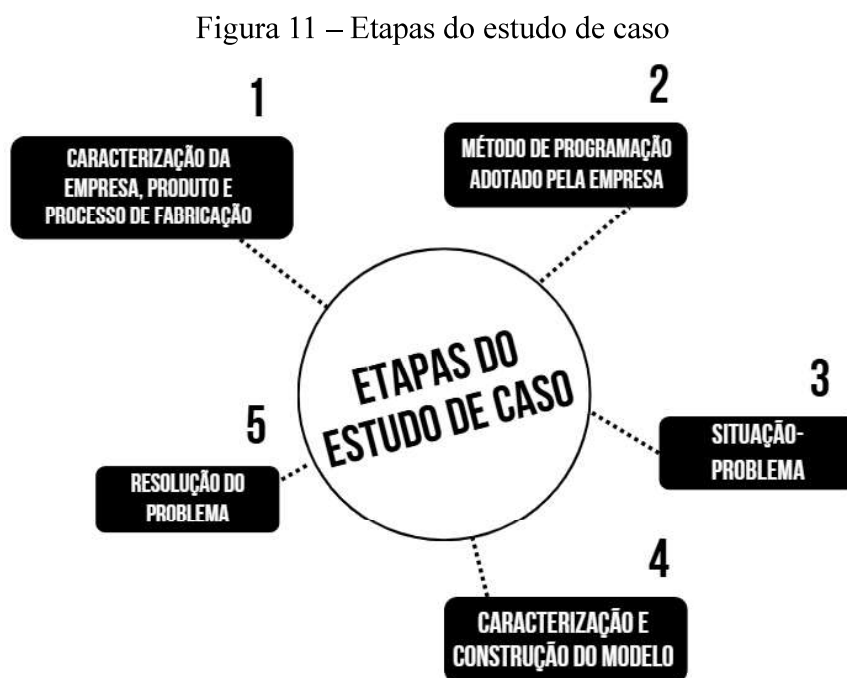
Já as análises foram realizadas com base nos resultados gerados através de técnicas matemáticas utilizadas na pesquisa (modelo), bem como houve uma investigação com o que já foi levantado na literatura a fim de conseguir respostas para as propostas lançadas no trabalho. Também, foi realizado um comparativo entre as soluções encontradas no modelo implementado com os meios de planejamento e controle e programação da produção utilizados pela empresa em análise.

4.3.2.1 Estudo de caso

A presente seção apresenta o estudo de caso da pesquisa. No decorrer do conteúdo serão apresentadas todas as informações iniciais relevantes para o estudo. A caracterização do estudo, método de programação adotado pela empresa, situação-problema, caracterização do modelo, dos parâmetros do problema, bem como a construção do modelo e sua resolução são as etapas contempladas nesta seção. Por fim, os resultados da capacidade produtiva adotada pela empresa e dos testes computacionais serão apresentados na seção 5.1.

A fim de entender todo esse estudo e viabilizar a redução do desperdício gerado pela execução de cortes de itens produzidos em uma indústria de corte e dobra do aço, torna-se necessário entender todo seu planejamento e controle para subsidiar o entendimento na construção de um modelo otimização para resolução do problema levantado.

Para compreensão, o estudo foi dividido em cinco etapas como pode ser observado na Figura 11:



Fonte: elaborado pelo autor.

As etapas, das quais foram levantadas na pesquisa, são descritas nas subseções a seguir:

4.3.2.1.1 Caracterização da empresa, produto e processo de fabricação

Descrição e análise de algumas informações relevantes ao estudo são subdivididas em:

i. Caracterização da empresa

Fundada em 2016, a empresa “Alpha” atua como prestadora de serviço no processo de corte e dobra do aço destinado às obras civis. Nestes mais de 5 anos de atuação, a visão da empresa é expandir os seus negócios e ser uma organização de referência neste serviço.

Atualmente gera emprego para mais de 30 famílias e contribui para economia local investindo em mão de obra.

Sua sede fica localizada na cidade de Maracanaú, Distrito Industrial da Região Metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará. A sua distância em relação à capital cearense é em torno de 24 km. A cidade é conhecida por ser o maior centro industrial do Estado, além de ser fonte de geração de empregos e renda.

A capacidade produtiva mensal é de cerca de 6 mil toneladas de aço dobrado e cortado. E a abrangência de mercado, é tanto local como transporta o produto para outras cidades e estados, essas variações ocorrem de acordo com as demandas dos clientes.

ii. Caracterização do produto

O aço é um material versátil que pode ser utilizado em diversos setores, como na indústria automobilística, na metalurgia, em utilidades domésticas e comerciais, dentre as quais na construção civil, que se destaca, por ser responsável por 41,2% da demanda de aço no Brasil, no ano de 2020 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

O aço, na construção civil, pode ser empregado de duas formas: nas estruturas metálicas, ou na forma de armaduras, integrando as estruturas de concreto armado. O material estudado é representado pela segunda forma, visto que são barras de aço o objeto de estudo desta dissertação. A Figura 12 ilustra o produto após o processo de corte e dobra.

Figura 12 – Barras de aço após o processo de corte e dobra



Fonte: elaborado pelo autor.

Os vergalhões (objeto em estoque) possuem um tamanho padrão comercial de 12 metros, os quais são comprados de fornecedores externos. O corte é realizado de acordo com os comprimentos solicitados pelos clientes. Os diâmetros sofrem variação de projeto para projeto e de elemento estrutural para elemento. As bitolas trabalhadas nas máquinas são de ϕ 12,5mm; ϕ 16,0mm; ϕ 20,0mm e ϕ 25,0mm. A figura 13 mostra o estoque dos vergalhões.

Figura 13 – Estoque de vergalhões de aço



Fonte: elaborado pelo autor.

iii. Caracterização do processo de fabricação

O corte dos vergalhões ocorre em uma máquina (Figura 14) com mais de 25 metros de comprimento. Os objetos em estoque são guinchados para um suporte ao lado de uma esteira motorizada. Um colaborador é responsável por injetar os vergalhões de aço na esteira de acordo com o pedido do operador da máquina que segue uma ordem de serviço (OS).

Figura 14 – Máquina de corte de aço



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao observar a Figura 14, percebe-se que ao centro existe uma guilhotina que irá realizar os cortes dos componentes. Logo, após o abastecimento, o operador é responsável pela operação da máquina. Assim, os vergalhões correm sobre a esteira, passam sobre uma garra ao lado da guilhotina e vão de encontro a uma placa metálica delimitadora de tamanho que existe no outro lado da máquina. Vale ressaltar que esse esbarro é controlado por comando e sofre variações de acordo com os tamanhos dos itens a serem cortados.

Após as barras estarem de acordo com tamanho solicitado, a garra através de outro comando operacional se fecha e conduz os vergalhões até a guilhotina, que por sua vez, realiza o corte. As barras cortadas seguem na esteira para o processo de identificação e rotulagem e os vergalhões que já não tem mais 12 metros aguardam os próximos comandos do operador para receberem um novo corte (o processo se repete) ou é gerado um desperdício (sobra).

4.3.2.1.2 Método de programação adotado pela empresa

Após o fechamento do pedido com o setor comercial, os colaboradores da sala técnica são responsáveis pelo planilhamento dos projetos. A etapa de planilhamento consiste em passar todas as informações contidas nos projetos estruturais para um *software* comercial que gerará as ordens de serviços e os romaneios, bem como informações gerenciais e comerciais.

As ordens de serviços apresentam informações referentes a cada peça que será cortada, por exemplo, identificação, quantidade, forma, bitola e o tamanho. A Figura 15 exemplifica uma ordem de serviço.

Figura 15 – Ordem de serviço (OS)

Posição 1		Elemento
Desenho 24-ARRANQUE		OS 1
		
Quantidade 268	Local Fundação	Bitola 12,50
OS 1	NOME DO PROJETO	Peso 425.84
OS 1	NOME DO PROJETO	Corte 162

Fonte: Empresa “Alpha” (2022, com adaptações).

Os romaneios são uma espécie de relatório que contempla as informações que já foram citadas acrescentando o peso (em kg) do pedido. Sua principal função, além de gerencial, é a confirmação de pedido junto ao cliente.

Após a confirmação do cliente, as OS são impressas e encaminhadas para o setor de produção. O encarregado da produção entrega as OS seguindo a ordem maior para menor ao operador da máquina, e este é responsável por realizar todos os padrões de cortes. O atual processo de corte é feito pelo método empírico, os arranjos são construídos e calculados simultaneamente ao corte por tentativa e erro.

O profissional que opera a máquina parte do real princípio de cortar as peças maiores para menores. Exemplificando, suponha-se que diante de uma demanda, ele irá executar o corte dos itens de comprimento 11,99m; 11,98m e assim por diante. Percebe-se que para estes tamanhos citados, não há sobras utilizáveis. Ou seja, para os itens que têm o tamanho próximo ao tamanho padrão dos objetos em estoque (12,00m), rapidamente o corte é executado. Mas quando se trata de tamanho menores, o colaborador precisa calcular a melhor forma que ele julga em encaixar esses itens no objeto em estoque.

De tal maneira que para fazer todo este estudo e cálculos algébricos são solicitadas paradas no processo produtivo. Essas paradas ao serem observadas e contabilizadas são consideradas excessivas, o que ocasiona uma perda considerável na carga horária trabalhada e na geração de produtos ao final do dia.

Por conseguinte, na programação de corte das primeiras barras é possível ter bons resultados quanto a eficiência da capacidade produtiva. Todavia, à medida que a demanda vai sendo atendida, as opções de simulação (tentativa e erro) vão diminuindo e a eficiência quanto à capacidade produtiva dos últimos cortes vão reduzindo. Além disso, devido à imensa gama de combinações e ao método algébrico usado pelo trabalhador para programar a produção, é notório que existe um certo desperdício de material dificultando a obtenção de solução ótima ao problema

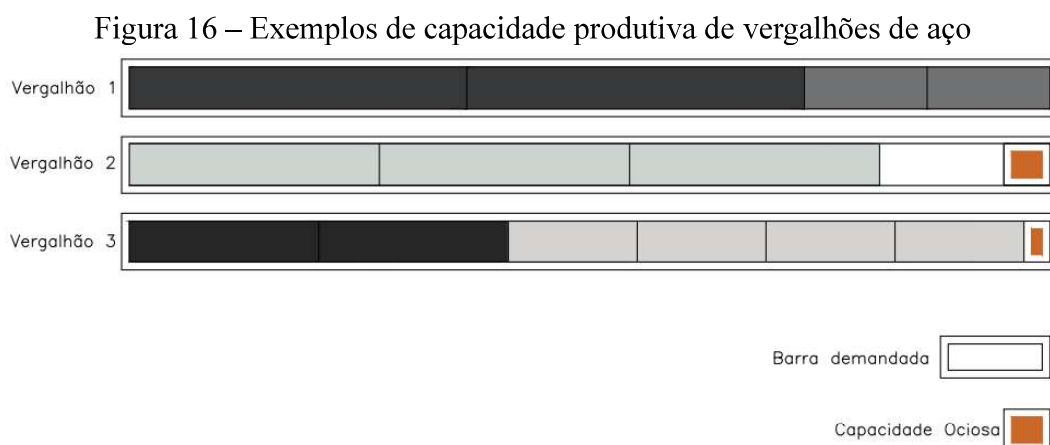
4.3.2.1.3 Situação-problema

Conforme já descrito acima, o método de programação adotado pela empresa é ineficiente, pois não existe nenhum tipo de planejamento prévio para executar os cortes bem como não é utilizado nenhum *software* para programar a produção. A forma como a empresa adota estas medidas empíricas nas suas simulações de tentativa e erro torna o processo com

baixa produtividade e com alto índice de desperdícios. Apesar do operador da máquina possuir experiência e expertise com essa atividade, o método não tem amparo quando comparado à otimização linear.

Dessa maneira, diversos fatores econômicos, ambientais, produtivos são afetados. Dentre eles, pode-se citar a ociosidade da capacidade produtiva, o desperdício de tempo, de matéria-prima e de mão de obra.

O desperdício da capacidade produtiva já foi mencionado no capítulo 3 ao tratar os padrões de corte elegíveis. Existem situações que são geradas as perdas pela não utilização completa do comprimento dos objetos em estoque. A ideia do problema consiste em encontrar a melhor maneira de encaixar os itens demandados no espaço de tamanho já determinado sem perda de material. Nota-se através da Figura 16 que o vergalhão 1 atingiu toda a sua capacidade produtiva enquanto os vergalhões 2 e 3 apresentam uma certa capacidade ociosa.



Fonte: elaborado pelo autor.

Já o desperdício de tempo é a soma das parcelas em que o trabalhador solicita parada para projetar os arranjos com as OS (muitas vezes essas combinações são organizadas sobre a máquina) e realizar os cálculos matemáticos. Essas ações contribuem para redução da produtividade desta atividade.

Quanto à matéria-prima, as pontas ou barras de aço que não voltam mais para o processo de produção de elementos estruturais demandados para utilização nas obras civis são consideradas como sobras. Na Figura 17 é possível ver a quantidade excessiva de desperdícios geradas pelo ineficiente planejamento de corte.

Figura 17 – Desperdício de matéria-prima



Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.2.1.4 Caracterização e construção do modelo

i. Caracterização do modelo

Observando toda a literatura já levantada e apresentada nos capítulos anteriores, quanto às variáveis do problema, o modelo de programação proposto possui duas características principais: problema unidimensional com objetivo de minimização. Seguem os detalhes das características do modelo:

a) Unidimensionalidade: a largura e altura são dimensões que não são consideradas no problema, pois o material em análise são vergalhões de aço. A espessura é que pode sofrer variações de acordo com pedido do cliente. Ainda assim, a única dimensão que sofre variação no corte é o comprimento das peças, o que torna o modelo unidimensional;

b) Problema de minimização: o principal objetivo do problema é utilizar a menor quantidade de objetos em estoque. O aproveitamento da capacidade produtiva está intimamente ligado ao objetivo citado. Ou seja, o aproveitamento da matéria-prima com a redução de espaços ociosos ao se realizar os cortes ou desperdícios é proporcional à resolução do problema.

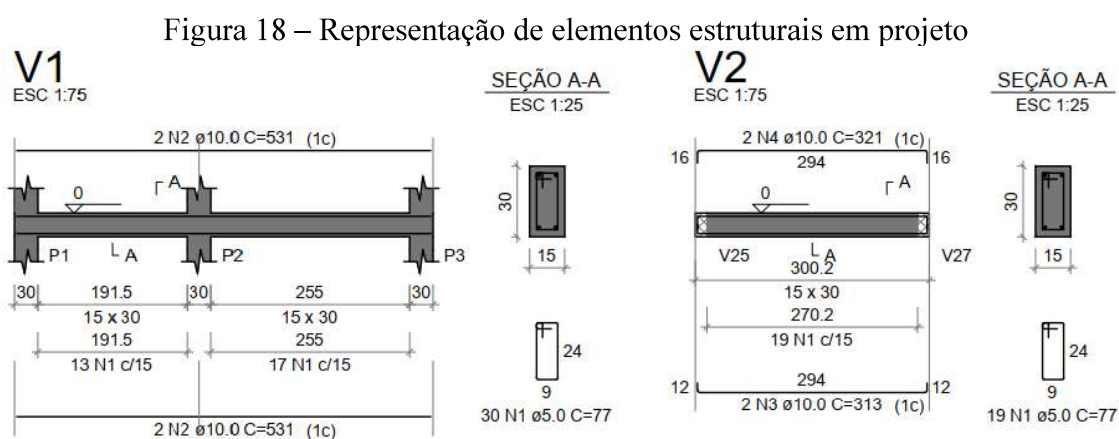
ii. Caracterização dos parâmetros do problema

Os projetos de engenharia não seguem padrões preestabelecidos e são relativamente complexos. Ou seja, não se pode repetir os parâmetros e dados de um projeto para outro ou até mesmo de um pavimento para outro pavimento.

O dimensionamento de elementos estruturais, por exemplo, de vigas, pilares, lajes e fundações pode sofrer mudanças quanto às espessuras de barras, forma, quantidade e tamanhos, visto que os parâmetros de projeto levantados sofrem alterações. As cargas permanentes e acidentais são paradigma desses padrões.

Desse modo, os projetos recebidos pela empresa contemplam uma demanda de barras de aço necessárias para execução de elementos estruturais. As empresas executoras dos serviços de engenharia determinam o prazo de entrega dos itens cortados de forma a atender as datas previstas em seus cronogramas.

Quanto à solicitação, pode-se observar na Figura 18 que os elementos estruturais são diferentes, ou seja, não seguem um padrão. Analogamente, os comprimentos são dessemelhantes. Organizar estes tamanhos da melhor forma possível em função da capacidade produtiva não é uma tarefa fácil, e por isso, é o objeto de análise para o modelo de otimização.



Fonte: elaborado pelo autor.

iii. Construção do modelo

Como já citado, o objetivo do uso da programação matemática nos problemas de corte é otimizar a função objetivo de forma a minimizar a quantidade de barras a serem usadas

em estoque e reduzir as perdas proporcionada pela etapa de corte. A formulação do modelo de programação linear referente ao problema de corte unidimensional é descrita a seguir:

a) Parâmetros do problema:

- n barras de tamanhos L disponíveis em estoque;
- Produzir m tipos de itens com tamanhos $l_1, l_2, \dots, l_m$;
- Demandas $b_1, b_2, \dots, b_m$.

b) Conjuntos e índices:

$$\begin{array}{ll} \mathcal{I} = \{1, 2, \dots, m\} & \text{Itens} \\ \mathcal{J} = \{1, 2, \dots, P\} & \text{Padrões de corte} \end{array}$$

c) Variáveis de decisão:

- x_j : número de barras cortadas conforme o padrão de corte $j \in \mathcal{J}$.

d) Função objetivo

- Minimizar o número de barras a ser usada.

$$\min \sum_{j \in \mathcal{J}} x_j$$

e) Restrições:

- Atendimento a demanda;

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} a_{ij} x_j \geq b_i, i \in \mathcal{I}$$

- Domínio das variáveis;

$$x_j \in \mathbb{Z}_+, j \in \mathcal{J}$$

Dessa forma, o modelo algébrico é formulado por:

$$\begin{array}{ll} \text{minimizar} & f(x) = \sum_{j \in \mathcal{J}} x_j \\ \text{sujeito a:} & \sum_{j \in \mathcal{J}} a_{ij} x_j \geq b_i, i \in \mathcal{I} \\ & x_j \in \mathbb{Z}_+, j \in \mathcal{J} \end{array}$$

4.3.2.1.5 Resolução do problema

Devido à grande quantidade de variáveis que formulam o problema, o método mais adequado e que apresenta vantagens para resolução do PCEU é o Geração de Colunas. Lembrando que a condição de integralidade sobre as variáveis torna este problema complexo até computacionalmente.

Uma das maneiras mais simples de obter a solução do PCEU é utilizando a heurística de arredondamento simples, na qual aproxima-se o valor real para o maior igual inteiro mais próximo desde que a condição da demanda seja atendida. Caso a demanda seja alta, que é o caso desta pesquisa, os arredondamentos realizados para se obter uma solução inteira não irão gerar grandes excessos de produção.

Assim, os modelos e procedimentos de solução foram implementados usando a linguagem de programação Python versão 3.8 com pacote de modelagem matemática Pyomo (<http://www.pyomo.org/>) e IBM® ILOG® CPLEX 20.1.0.0. Os experimentos foram conduzidos em uma máquina *Dell Inspiron 3421* com processador Intel® Core TM CPU i5-3337U CPU 1,80 GHz x 4, 128Gb de SSD, 6Gb de RAM, rodando no Windows 10 Pro.

A validação do modelo foi conduzida por meio da comparação entre os resultados obtidos com o modelo proposto e aqueles gerados pelo método empírico adotado pela empresa, permitindo avaliar ganhos operacionais, redução de desperdícios e impactos econômicos.

Portanto, o procedimento metodológico descrito neste capítulo estabelece a base para a análise dos resultados apresentada no capítulo seguinte, no qual são discutidos os impactos da aplicação do modelo proposto no contexto industrial estudado.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS

Neste capítulo, inicialmente, são apresentados os resultados do estudo de caso na empresa denominada ficticiamente de Empresa “Alpha”, logo em seguida será discorrido sobre os resultados computacionais obtidos através da implementação do modelo de programação linear baseado em geração de colunas. Para isso, baseou-se na teoria proposta nos capítulos anteriores. A metodologia utilizada para obtenção de resultados numéricos compreende em solucionar o Problema de Corte de Estoque Unidimensional com o algoritmo já explorado na literatura. O foco da pesquisa consiste em comparar esses resultados computacionais com o método empírico utilizado pela empresa. De tal maneira que, foi necessário coletar os dados reais nesta indústria especialista e testá-los em um modelo.

Por fim, é feita a análise dos resultados em uma abordagem gerencial, na qual a intenção é mostrar os extratos dos impactos causados pelas decisões administrativas adotadas pela organização e propor melhorias no gerenciamento da produção de barras de aço destinadas à construção civil.

5.1 Resultados Computacionais

Para a compreensão dos resultados computacionais apresenta-se alguns experimentos numéricos divididos em 6 (seis) projetos dos quais as iterações são geradas e resolvidas até encontrar a solução ótima para o problema em questão. A Tabela 2 traz informações dos projetos. O objeto em estoque (vergalhão de aço) possui o comprimento de 12 metros (1200 centímetros). As demandas e os tamanhos dos itens (barras) são definidos de acordo com os pedidos dos clientes.

De tal modo que existem projetos que há uma variação muito grande nos tamanhos dos itens como é o caso do projeto UCP 003 C (16,00 mm), em compensação existem aqueles que apresentam uma grande quantidade de itens demandados (UCP 002 – 12,50 mm). Os projetos mostram que não há uma relação entre a quantidade de barras solicitadas e a variação de tamanho entre as barras, essas características de projetos são parâmetros independentes.

Tabela 2 – Dados dos projetos analisados na pesquisa

Bitola	12,50 mm				16,00 mm	
Identificação do projeto	BSC 010	UCP 002	UCP 003 B	UCP 003 C	UCP 003 B	UCP 003 C
Quantidade de barras solicitadas	714	856	79	316	156	343
Variação de tamanho entre as barras	4	6	17	98	46	112

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 3 apresenta os resultados computacionais da implementação do modelo de programação linear baseado em geração de colunas incluindo as resoluções do Problema Mestre Restrito e dos Subproblemas do projeto BSC 010 (12,5 mm). Lembrando que os modelos e procedimentos de solução foram concebidos utilizando o solver CPLEX e um limite de 1000 (um mil) iterações foi imposto para o solver resolver o modelo, para os casos em que este limite é atingido retornam os resultados relativos.

A primeira coluna indica a iteração que está sendo avaliada seguido pela solução do Problema Mestre Restrito e solução do Subproblema. Nas próximas três colunas estão associadas ao tempo de processamento do PMR e do Subproblema e tempo total para o procedimento de solução, respectivamente. Os resultados dos demais projetos estão no Apêndice A desta pesquisa.

Tabela 3 – Resultados dos testes computacionais do projeto BSC 010 (12,5 mm)

Iteração	Sol. PMR	Sol. Sub.	Tempo PMR (ms)	Tempo Sub. (ms)	Tempo Total (ms)
1	714,00	9,00	0,003	0,004	0,007
2	685,56	8,00	0,004	0,005	0,009
3	671,56	8,00	0,004	0,004	0,008
4	613,81	3,13	0,003	0,004	0,007
5	211,81	1,13	0,004	0,004	0,008
6	203,56	1,11	0,004	0,005	0,009
7	200,00	1,00	0,004	0,003	0,007

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a Tabela 3, observa-se que, para todas as iterações avaliadas não houve muito esforço computacional pois o tempo total de procedimento não ultrapassou 5s para este

projeto. O modelo foi capaz de encontrar a solução do problema sem que o limite de iterações fosse atingido.

Por consequência, a Tabela 4 mostra o tempo geral do procedimento para obtenção dos resultados através da Geração de Colunas de cada projeto. Nota-se que os tempos de resolução das implementações é consideravelmente baixo. Diferente ao que é observado na indústria, onde o colaborador precisa desligar a máquina, portar as OS, folheá-las, rearranjá-las, de modo a encontrar o melhor padrão de corte. Além de que os cálculos matemáticos são providos de uma calculadora eletrônica ou digital.

Talvez uma parada consuma o tempo necessário para o modelo calcular todos os padrões de corte possíveis do projeto que apresenta o maior tempo de processamento. Considerando que cada parada tenha em média 3 minutos, o único projeto que ultrapassa o tempo de processamento é o UCP 003 C (12,50mm).

Tabela 4 – Tempo de procedimento geral

Projeto	12,50 mm				16,00 mm	
Identificação do projeto	BSC 010	UCP 002	UCP 003 B	UCP 003 C	UCP 003 B	UCP 003 C
Tempo geral (s)	4,64	6,72	15,92	348,61	35,18	173,61

Fonte: elaborado pelo autor.

O projeto que obteve o maior tempo de processamento foi o UCP 003 C (12,50 mm) e o menor foi BSC 010 (12,50 mm). Não se pode concluir que este tempo de processamento está intimamente ligado à quantidade de barras solicitadas e às variações dos tamanhos, devido ao projeto UCP 003 C (16,00 mm) apresentar números maiores com relação a quantidade e ao tamanho de barras comparado ao projeto que apresenta o maior tempo de processamento UCP 003 C (12,50 mm).

Ferreira (2016), através do seu estudo em otimização do corte de bobinas de aço, obteve uma resposta de resolução do modelo utilizado inferior a 60 segundos, a vista do tempo necessário de aproximadamente de 15 a 20 minutos para resolução do método empírico utilizado pelo planejador, seu método é superior em pelos menos 93,33% quando comparados.

Já Ribeiro (2018) com proposta na melhoria do processo de corte de barras de alumínio, o modelo proposto se mostrou rápido na resolução de resultados, demorando em média 6 segundos. Comparando com o método utilizado pelo planejador, há um significativa diferença de cerca de 30 minutos.

5.2 Análise dos resultados

Devido à variação nas espessuras (bitolas) dos vergalhões de aço em estoque, as observações serão debatidas e comparadas de acordo com esta especificação, isto significa que serão discutidos os resultados para as solicitações de barras com 12,50 mm e para as de 16,00 mm. Os pedidos dos clientes contemplam uma demanda de barras destinadas à execução de elementos estruturais como fundações, pilares e vigas, apresentando finalidades bem diversificadas.

Um exemplo que ocorre na Construção Civil é que na maioria das vezes existe um padrão na execução de pavimentos em obras verticais, no qual os pavimentos são replicados seguindo as características de um pavimento denominado “tipo”. Logo, para este caso, a probabilidade do dimensionamento estrutural ser o mesmo é muito forte. Todavia, nesta pesquisa, as barras de aço analisadas não estão inclusas neste padrão pois os tamanhos sofrem variação de projeto para projeto, bem como há projetos em que as barras são destinadas a execução de fundações. Isso pode ser facilmente identificado na Tabela 2, na qual foi ilustrada a variação na quantidade de barras solicitadas em cada projeto.

A Tabela 5 ilustra os dados do pedido do projeto UCP 002 (12,50 mm) cuja demanda para cada tamanho solicitado pelas construtoras pode ser observada. Por conseguinte, a demanda para os demais projetos está exposta no Apêndice B.

Tabela 5 – Dados do pedido do projeto UCP 002 (12,50 mm)

Tamanhos (em centímetros)	160	162	168	247	326	440
Demanda	80	520	76	20	80	80

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 6 mostra o comparativo entre as resoluções obtidas através da solução de otimização do modelo baseado em Geração de Colunas com o método empírico utilizado pela empresa. Os resultados de sobras e de perdas da capacidade produtiva são analisados.

Tabela 6 – Resultados da Otimização do Modelo vs. Método empírico usado pela empresa

Projeto	Solução do Modelo		Método Empírico	
	Desperdício (cm)	Perda da capacidade produtiva	Desperdício (cm)	Perda da capacidade produtiva
12,50 mm				
BSC 010	792	0,33%	13348	5,56%
UCP 002	6783	3,67%	56772	24,39%
UCP 003 B	9138	16,92%	20819	32,73%
UCP 003 C	939	0,51%	4755	2,87%
MÉDIA	4413,00	5,36%	23923,50	16,39%
16,00 mm				
UCP 003 B	16331	13,75%	20120	16,60%
UCP 003 C	17640	7,28%	31706	12,40%
MÉDIA	16985,50	10,52%	25913,00	14,50%

Fonte: elaborado pelo autor.

Confrontados os dados expostos pela Tabela 6, percebe-se que em todos os projetos a quantidade de desperdício e de perda por capacidade produtiva no método empírico são maiores. Então os resultados comprovam a eficiência da aplicação da programação linear com o método Geração de Colunas na resolução do problema de corte e empacotamento de barras de aços destinadas à construção civil, visto que foram obtidos melhores resultados de capacidade produtiva e redução de desperdício em todos os projetos.

Lembrando que a capacidade ociosa está atrelada ao padrão de corte, mas para ilustrar como os desperdícios são calculados, a formulação (4.7) traz:

$$c_j = L - (l_1 a_{1j} + l_2 a_{2j}, \dots, l_m a_{mj}),$$

Ou seja, o somatório deste desperdício ($\sum c_j$) para todos os padrões gerados consiste no resultado de desperdício apresentado na tabela 7.

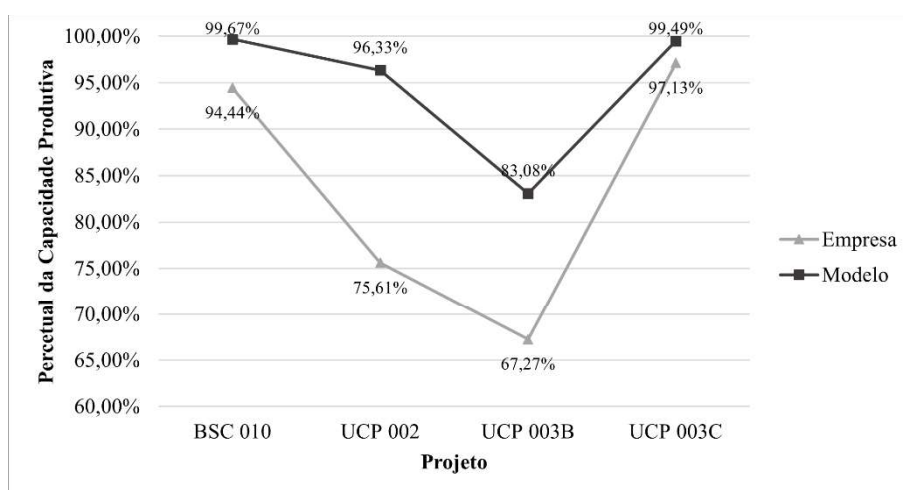
Exemplificando com os dados do pedido UCP 002 adotando padrões aleatórios $\mathbf{a}_1 = (2, 0, 0, 0, 0, 2)$, $\mathbf{a}_2 = (0, 1, 1, 2, 1, 0)$, observa-se que o primeiro padrão não gera desperdício consequentemente possui sua capacidade produtiva integral. Já o segundo gera um desperdício de 50 cm e produz uma ociosidade na capacidade produtiva de 4,17%.

Com isso, foi obtido um aumento de eficiência média do uso dos vergalhões de aço de 83,61% para 94,64% para a bitola de 12,50 mm e 85,50% para 89,48% para a bitola de 16,00mm através de uma redução da perda por capacidade média de 11,03% e 3,98%, respectivamente.

No trabalho de Marinho (2012), as perdas foram da ordem de 12,64% para as barras de 16,00mm e de 8,24% para as barras de 12,50mm. Ou seja, o modelo estudado apresenta resultados inferiores a empresa em estudo e ao corte realizado no canteiro de obras estudado pelo autor.

As figuras 19 e 20 mostram as capacidades produtivas alcançada entre os métodos analisados em todos os projetos. Quanto aos projetos que possuem o corte de bitolas menores, notoriamente, observa-se que existe um intervalo entre as linhas do modelo baseado em Geração de Colunas e a proposta usada pela empresa. O único projeto que não tem uma margem de pelo menos 5,00% de diferença é o UCP 003C.

Figura 19 – Capacidade produtiva dos projetos com cortes de bitolas de 12,50 mm

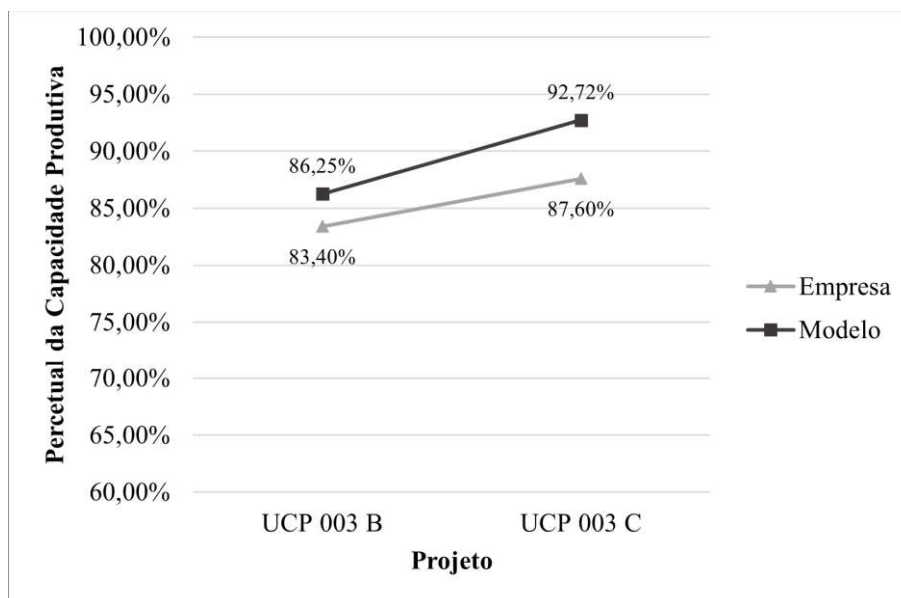


Fonte: elaborado pelo autor.

Examinando os resultados apresentados pelo modelo, o projeto BSC 010 apresenta a maior capacidade produtiva, com 99,67% de aproveitamento dos objetos em estoque. O projeto UCP 003 C também apresenta uma excelente margem, fatura 99,49%. Já o projeto UCP 003 B é o que apresenta o menor resultado, com 83,08%.

Quanto aos de bitolas maiores, a diferença entre o modelo e o método empírico é relativamente baixa. A maior diferença ocorre no projeto UCP 003 C com 5,12% seguida do UCP 003 B com 2,85%. Entretanto, não se pode aferir se essa diferença recai ou aumenta com o diâmetro das barras, visto que neste trabalho foram estudadas só as barras de 12,50mm e 16,00mm. Esta avaliação pode ficar como proposta para pesquisas futuras.

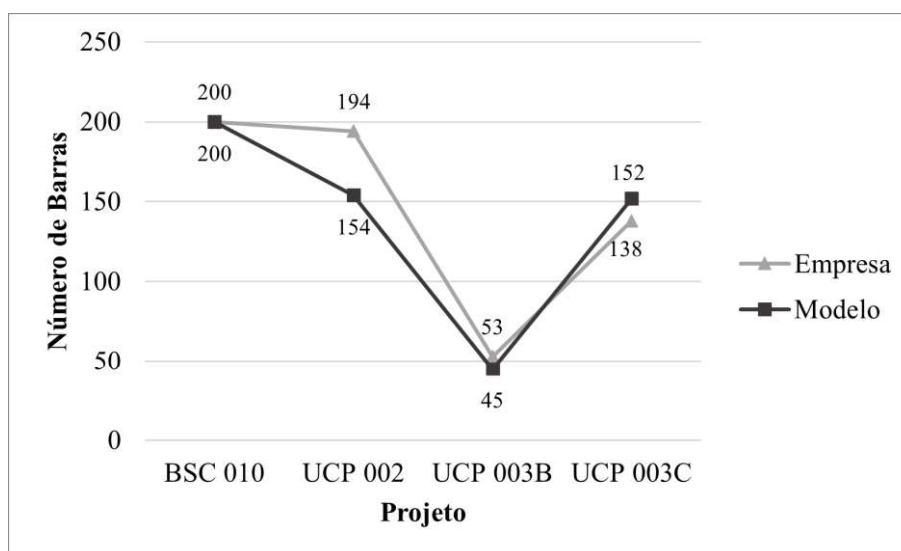
Figura 20 – Capacidade produtiva dos projetos com cortes de bitolas de 16,00 mm



Fonte: elaborado pelo autor.

Quanto ao número de barras utilizadas em estoque, as figuras 21 e 22 mostram o comparativo.

Figura 21 – Quantidade de barras utilizadas nos projetos de bitolas de 12,50 mm



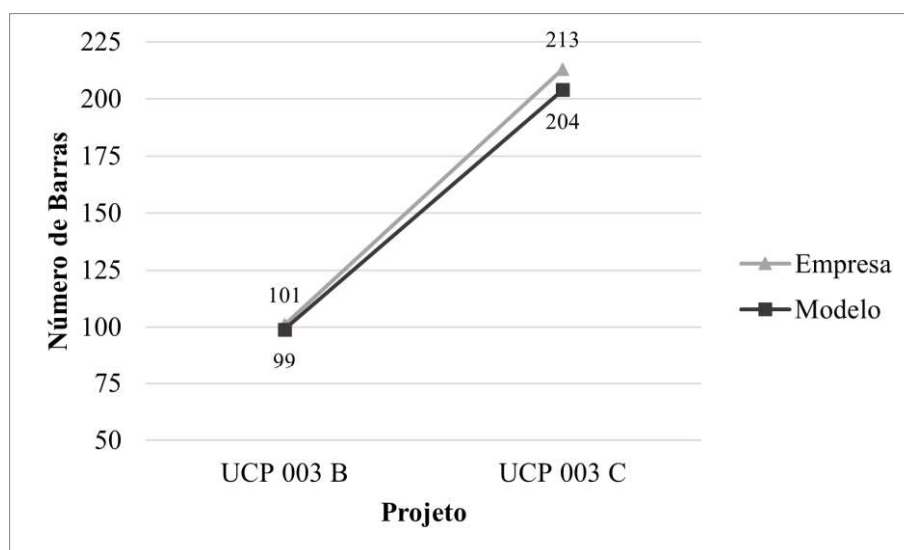
Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 21 apresenta o comparativo do número de barras consumidas em estoque entre o método empírico adotado pela empresa e a solução obtida pelo modelo, para os projetos com bitola de 12,50 mm.

No projeto BSC 010, ambos os métodos utilizam a mesma quantidade de barras, indicando que, nesse caso específico, não há ganhos associados à redução do consumo de barras. Em contrapartida, nos projetos UCP 002 e UCP 003 B observa-se redução no número de barras utilizadas pela solução do modelo, com destaque para o projeto UCP 002, no qual o consumo é significativamente reduzido (154 barras no modelo contra 194 no método empírico). Esse resultado está diretamente relacionado à melhor combinação dos padrões de corte, refletindo a expressiva diminuição do desperdício e da perda de capacidade produtiva já discutidas anteriormente.

No projeto UCP 003 C, a solução do modelo utiliza um número maior de barras em relação ao método adotado pela empresa. Contudo, esse aumento não implica perda de eficiência, uma vez que o modelo apresenta menor desperdício total e maior capacidade produtiva. Tal resultado evidencia que a quantidade de barras utilizadas não é, isoladamente, um critério suficiente para avaliar o desempenho do processo de corte, pois o modelo prioriza padrões com maior aproveitamento dos vergalhões, ainda que isso resulte no uso de mais peças de estoque.

Figura 22 – Quantidade de barras utilizadas nos projetos de bitolas de 16,00 mm



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 22 apresenta os resultados referentes aos projetos com bitola de 16,00 mm. Observa-se que, no projeto UCP 003 B, o modelo utiliza 99 barras, enquanto o método empírico consome 101 unidades. Para o projeto UCP 003 C, o consumo é de 204 barras na solução do modelo contra 213. Embora as diferenças absolutas sejam menores quando comparadas às observadas nos projetos com bitola de 12,50 mm, o modelo ainda demonstra melhor

desempenho em ambos os casos, utilizando menos barras e, conseqüentemente, contribuindo para a redução do desperdício e da perda de capacidade produtiva.

Segue os demais benefícios obtidos com a aplicação do modelo implementado:

5.2.1 Economia de matéria-prima

A implementação e utilização do modelo PCEU baseado em geração de colunas pode implicar ganhos significativos à empresa, entre eles, a economia de matéria-prima. Alguns desses ganhos, serão discutidos. A Tabela 7 mostra as projeções de receitas com a implementação do modelo em uma situação real.

Tabela 7 – Projeções de ganhos com a redução da utilização de objetos em estoque através da introdução do modelo de programação baseado em geração de colunas

Bitolas	Redução no número de barras em estoque (unidades)	Custo do vergalhão (R\$)	Economia diária (R\$)	Projeção semanal (R\$)	Projeção mensal (R\$)	Projeção anual (R\$)
12,50 mm	34	75,60	856,83	4.284,16	17.136,64	205.639,67
16,00 mm	11	123,88	454,24	2.271,22	9.084,90	109.018,79

Fonte: elaborado pelo autor.

A segunda coluna da Tabela 8 mostra a diferença entre a quantidade de barras utilizadas pela empresa e pelo modelo para atender a demanda. Em seguida, ilustra o extrato dos valores de compra dos vergalhões, a empresa obtém este material de fornecedores terceirados. A economia diária é calculada a partir da razão entre o resultado da redução no número de barras em estoque e o custo do vergalhão. Contudo, como os dados dos projetos foram obtidos ao longo de três dias, esse montante é dividido de forma igualitária. A projeção semanal considera cinco dias úteis, a mensal quatro semanas e a anual doze meses.

Os ganhos só em reduzir a utilização dos objetos em estoque nesta pesquisa é de R\$ 314.658,46 anualmente.

Quanto aos desperdícios a Tabela 8 traz o horizonte dos resultados obtidos através do modelo.

Tabela 8 – Projeções de ganhos com a redução do desperdício através da introdução do modelo de programação baseado em geração de colunas

Bitolas	Desperdício (m)	Custo unitário do aço (R\$/m)	Perdas diárias (R\$)	Projeção semanal (R\$)	Projeção mensal (R\$)	Projeção anual (R\$)
12,50 mm	239,24	6,30	502,41	2.512,06	10.048,24	120.578,94
16,00 mm	259,13	10,32	891,73	4.458,66	17.834,62	214.015,45

Fonte: elaborado pelo autor.

A segunda coluna da Tabela 8 elucida o desperdício, em metros, do método empírico. Em seguida, tem-se o valor unitário do aço, também em metros. A perda diária é calculada entre a razão do valor do desperdício com o custo unitário do aço, entretanto, como esses dados de projetos foram obtidos em três dias, é necessário dividir esse resultado de forma igualitária. A projeção semanal considera cinco dias úteis, a mensal quatro semanas e a anual doze meses.

A projeção anual foi calculada e retorna um valor de R\$ 334.594,39 anualmente de desperdício. Entretanto, este material é vendido para sucata, que custa em média R\$ 0,80/kg. A Tabela 9 traz os dados de quanto a empresa ganha vendo este material como sucata.

Tabela 9 – Projeções de ganhos com a venda do material desperdiçado como sucata

Bitolas	Desperdício (m)	Massa do aço (kg/m)	Custo da sucata (kg/R\$)	Ganho diário (R\$)	Projeção semanal (R\$)	Projeção mensal (R\$)	Projeção anual (R\$)
12,50 mm	239,24	0,963	0,80	61,44	307,18	1.228,71	14.744,53
16,00 mm	259,13	1,578	0,80	109,04	545,21	2.180,84	26.170,06

Fonte: elaborado pelo autor.

O ganho decorrente da venda do material desperdiçado como sucata é inicialmente determinado a partir do produto entre o comprimento de aço desperdiçado e a respectiva massa linear do material, possibilitando a conversão do desperdício da unidade de comprimento (m) para massa (kg), uma vez que a comercialização da sucata é realizada com base no peso. Em seguida, o ganho financeiro é obtido pela multiplicação da massa total de sucata pelo custo de venda praticado. Considerando que os dados dos projetos analisados foram coletados ao longo de três dias de produção, o ganho diário apresentado corresponde à divisão equitativa desse montante. As projeções de ganhos semanal, mensal e anual são realizadas com base em cinco dias úteis por semana, quatro semanas por mês e doze meses por ano.

Apesar de parte do material desperdiçado ser comercializada como sucata, o ganho financeiro obtido com essa prática não é suficiente para compensar integralmente as perdas econômicas decorrentes do desperdício. A partir das projeções realizadas, estima-se um ganho anual de R\$ 40.914,59 com a venda deste material. Entretanto, mesmo considerando essa recuperação financeira, persiste uma perda anual significativa associada ao desperdício de matéria-prima, estimada em R\$ 293.679,80, evidenciando o impacto econômico negativo do desperdício no processo produtivo.

Todavia, mesmo considerando esse ganho, observa-se que a maior parcela do valor associado ao desperdício não é recuperada, permanecendo uma perda anual significativa para a empresa. Assim, a venda da sucata configura-se apenas como um mecanismo de mitigação parcial das perdas, reforçando a necessidade de estratégias mais eficazes de redução do desperdício na etapa de planejamento e corte e dobra das barras.

A Tabela 10 apresenta uma comparação entre o método empírico utilizado pela empresa, os valores reportados na literatura e os resultados obtidos pelo modelo proposto nesta pesquisa, considerando o volume de sobras geradas no processo de corte e dobra de barras de aço.

Tabela 10 – Comparativo entre métodos quanto ao desperdício

Parâmetro	Método empírico adotado pela empresa	Souza (2006) – 6%	Souza (2006) – 14%	Praça e Barros Neto (2001) – 10%
Sobras (cm)	49836,50	52826,69	56813,61	54820,15
Sobras Modelo (cm)	21398,50			
Diferença	28438,00	31428,19	35415,11	33421,65

Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se que o método empírico adotado pela empresa resulta em 49.836,50 cm de sobras. Valores semelhantes são encontrados na literatura, como os apresentados por Souza (2006), com taxas de desperdício estimadas em 6% e 14%, e por Praça e Barros Neto (2001), com estimativa de 10%.

Em contraste, o modelo proposto nesta pesquisa apresentou um total de sobras de 21.398,50 cm, evidenciando uma redução expressiva de desperdício quando comparado tanto ao método empírico da empresa quanto aos valores reportados na literatura. As diferenças observadas indicam ganhos superiores a 50% em todos os cenários analisados.

5.2.2 Economia de atividades que não agregam valor

Em busca de um arranjo viável para execução de cada corte, o operador precisa planejar cada cenário de possibilidades a fim de otimizar a capacidade produtiva dos vergalhões. Entretanto, isso requer tempo, e a operação desta atividade não tem tempo disponível, isso quer dizer que são realizadas paradas dentro do percurso de corte para prever os próximos passos.

De tal modo que, durante as visitas foi observado por diversas vezes, em torno de 10 ocorrências, ocorriam essas paradas. Principalmente, quando estava se aproximando ao fim do processo de corte de um projeto, onde as OS iam reduzindo em quantidades e minimizando a possibilidade da criação de combinações.

Como já mencionado, cada parada tem em média 3 minutos, o que resulta em um tempo perdido de 30 minutos. Ressalta-se que em um processo de corte, em média 1 minuto é gasto. Ou seja, com este tempo poderiam ter sido produzidos 30 cortes. Assim, fora o desperdício com a despesa com a mão de obra, tem-se com o produto que deixou de ser produzido.

Portanto, considerando a média de dois vergalhões no processo de corte e o valor de R\$ 0,75/m no serviço de corte e dobra do aço – R\$ 84,60 (12,50mm)/R\$ 132,88(16,00mm) –, utilizando a metade da soma entre os valores deste serviço, o prejuízo com essas paradas custa R\$ 6.524,40 ao dia com produção e R\$ 7,14 com mão de obra ao dia. Anualmente, isso causa um prejuízo de R\$ 1.957.320,00 aos cofres da empresa.

Estes valores constituem apenas uma previsão do que foi observado durante a execução destes projetos. Uma análise mais rigorosa no tempo perdido deve ser feita para obter um resultado mais fiel além de analisar de forma minuciosa uma amostragem maior.

5.2.3 Outros benefícios

Um dos outros benefícios da utilização do modelo é a facilidade de implementar novas soluções a qualquer momento, visto que o tempo computacional de processamento é consideravelmente baixo, e isso pode ser uma grande vantagem competitiva e gerencial para empresas de pequeno porte, como configura-se esta que está sendo estudada. Para Poldi (2003) muitas empresas pequenas que atuam neste ramo estão associadas a pequenas demandas e acabam aceitando pedidos de outros clientes a qualquer momento. Para a autora, isto é crucial para essas pequenas indústrias pois representa cerca da metade do seu faturamento mensal.

Segundo o responsável pelo setor comercial da empresa “Alpha”, cerca de 30 a 40% são considerados projetos com urgência, ou seja, a empresa se classifica nesta configuração. De tal maneira que, as novas possíveis entradas de cliente no rol de planejamento de corte proporcionam uma dinâmica que poderá reduzir mais ainda o desperdício de materiais e da utilização de objetos em estoque, pois a possibilidade de gerar excelentes padrões de corte é maior em vista da disponibilidade de barras para simular estes novos arranjos.

Quanto à produção e através das observações feitas no chão de fábrica é relativamente fácil identificar as barras já cortadas, assim, estende para os quais projetos pertencem cada material, em caso de dois ou mais. Isso só é permitido devido às OS serem bem detalhadas, mas Poldi (2003) pensa de forma análoga, há algumas dificuldades de produção.

Outro benefício, como a linguagem Python é muito usada pelo meio acadêmico e industrial, para facilitar o entendimento dos agentes envolvidos neste problema é possível integrar o algoritmo com outros *softwares* ou *frameworks* para facilitar a visualização ao planejador das ordens e sequência dos padrões no processo de corte, pois em casos em que existe uma variabilidade muito grande nas barras solicitadas, este padrão é relativamente grande.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em atendimento aos objetivos propostos, os resultados obtidos permitiram comparar o desempenho do modelo de programação linear baseado em geração de colunas com o método empírico adotado pela empresa, evidenciando diferenças substanciais no que se refere à redução de desperdícios e à otimização dos custos operacionais.

A formulação baseada em geração de colunas possibilitou a identificação de padrões de corte ótimos em baixos tempos computacionais, confirmando a viabilidade da abordagem em ambiente industrial real.

A aplicação do modelo revelou-se uma ferramenta robusta de apoio à tomada de decisão, contribuindo para a minimização da utilização de objetos em estoque, redução de desperdícios e diminuição do esforço de planejamento produtivo. Além disso, a metodologia proposta apresenta potencial de adaptação a outros contextos industriais que envolvam problemas de corte e empacotamento, ampliando sua aplicabilidade no setor de pré-fabricados e na indústria da construção civil.

Em termos quantitativos, essa superioridade é corroborada pelos resultados computacionais obtidos. O tempo médio requerido pelo solver para a obtenção de soluções ótimas foi de 97,45 segundos. Isso representa um ganho considerável do ponto de vista prático, pois há uma diminuição em mais de 45,86% do esforço gasto para planejar os próximos padrões de cortes a serem executados em cada parada solicitada. Esta falta de planejamento causa um prejuízo anual de R\$ 1.957.320,00 aos cofres da empresa analisada.

Com relação à capacidade produtiva, o método previu a redução da perda por capacidade, em média de 11,03% e 3,98%, para as barras com bitolas de 12,50mm e 16,00mm, respectivamente. Em termos monetários, a aplicação do modelo para geração dos padrões de corte resultou em reduções significativas de custos. A análise dos dados indicou que a minimização da utilização das barras em estoque proporcionou uma economia anual estimada em R\$ 314.658,46.

E, a projeção anual para redução dos desperdícios alcança um valor de R\$ 334.594,39 anualmente. Ainda que a comercialização da sucata resulte em um ganho anual estimado de R\$ 40.914,59, esse valor representa apenas uma recuperação parcial do material desperdiçado. Dessa forma, subsiste uma perda anual expressiva associada ao desperdício de matéria-prima, estimada em R\$ 293.679,80.

Os resultados obtidos pelo modelo implementado mostram melhorias consideráveis no objetivo definido. Além de uma redução da utilização desnecessária dos vergalhões em estoque, o valor de desperdício é expressivamente inferior.

Como as soluções ótimas foram encontradas em um baixo tempo computacional, acredita-se que essas abordagens são promissoras para serem aplicadas nas indústrias deste ramo. Acredita-se que a proposta do trabalho foi atendida pois evidenciou-se que existem métodos eficientes e alternativos que reduzam os custos operacionais. Então utilizar um método de PCEU baseado em geração de colunas é uma prática que favorece a redução do desperdício, aumento da qualidade, redução das atividades que não agregam valor, bem como atende as exigências dos clientes.

Além de que, do ponto de vista científico, o trabalho contribui ao aplicar um método clássico da Pesquisa Operacional a dados reais da indústria, ampliando evidências empíricas sobre sua aplicabilidade.

Espera-se que a empresa pesquisada analise os resultados apresentados nesta dissertação como iniciativa para reestruturar as metodologias de planejamento e posturas gerenciais para manter o padrão competitivo. A decisão em adotar a aplicação do modelo alcança vantagens em termos da qualidade de solução ao problema.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Considerando a relevância do tema e a necessidade de ampliação de estudos aplicados a casos reais, recomenda-se a realização das seguintes pesquisas relacionadas ao Problema de Corte de Estoque Unidimensional (PCEU):

- a) A extensão aos problemas de corte com sobras reaproveitáveis;
- b) Modelo para contemplar restrições de prazo, integrando o PCEU ao sequenciamento da produção e ao atendimento das datas de vencimentos exigidas pelos clientes;
- c) A investigação da viabilidade técnica e econômica da alteração das bitolas das barras de aço, integrando o modelo de otimização com análises estruturais realizadas pelo calculista, de modo a avaliar possíveis ganhos na eficiência do corte sem comprometer a segurança estrutural.

REFERÊNCIAS

- ABRAMAT, Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção. **PERFIL DA CADEIA 2020**. Disponível em: <https://abramat.org.br/wp-content/uploads/2022/03/ABRAMAT-Perfil-da-Cadeia-Produtiva-da-Construcao-e-Industria-de-Materiais-2021-Resumo.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2022.
- ALMEIDA, Leonardo Soares Francisco de; VIEIRA NETO, Julio; SALLES, Mara Telles; SOARES, Carlos Alberto Pereira; ESTEVES, Yohans de Oliveira. Análise comparativa entre o EVA® e os indicadores financeiros (contábeis) tradicionais de empresas da construção civil brasileira: um estudo documental. **Gestão & Produção**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 733-756, 12 dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530x1722-15>.
- ANDERSSON, Niclas; LESSING, Jerker. The Interface between Industrialized and Project Based Construction. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 196, p. 220-227, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.193>.
- ARAI, Hiroshi; HARAGUCHI, Harumi. A Study on Skip Flow Shop Scheduling Considering with a Cutting Process in Reinforcing Bar Manufacturing. **2019 IEEE International Conference On Industrial Engineering And Engineering Management (IEEE)**, [S.L.], p. 1270-1274, dez. 2019. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ieem44572.2019.8978565>.
- ARENALES, Marcos; ARMENTANO, Vinícius; MORABITO, Reinaldo; YANASSE, Horacio. **Pesquisa Operacional**. 6. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 524 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017. 86 p.
- BEKTAŞ, Tolga; EHMKE, Jan Fabian; PSARAFTIS, Harilaos N.; PUCHINGER, Jakob. The role of operational research in green freight transportation. **European Journal of Operational Research**, [S.L.], v. 274, n. 3, p. 807-823, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2018.06.001>.
- BENJAORAN, Vacharapoom; BHOKHA, Sdhabhon. Three-step solutions for cutting stock problem of construction steel bars. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [S.L.], v. 18, n. 5, p. 1239-1247, 20 maio 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-014-0238-3>.
- BENNEL, J.A.; CABO, M.; MARTÍNEZ-SYKORA, A.. A beam search approach to solve the convex irregular bin packing problem with guillotine cuts. **European Journal of Operational Research**, [S.L.], v. 270, n. 1, p. 89-102, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2018.03.029>.
- CÂNDIDO, Luis Felipe. **ANÁLISE DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: OPORTUNIDADES DE MELHORIA A PARTIR DA LITERATURA E DA EXPERIÊNCIA DE CONSTRUTORAS CEARENSES**. 2015. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

CAO, Xinying; LI, Xiaodong; ZHU, Yimin; ZHANG, Zhihui. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 109, p. 131-143, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.120>.

CARVALHO, José Valério de. GERAÇÃO DE COLUNAS. **Boletim APDIO 54**, [S. L] p. 7-9, jun. 2016.

CBIC, Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **PIB por Unidade da Federação - NOVA SÉRIE (incluindo a Construção Civil)**. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. PARTICIPAÇÃO DO VALOR ADICIONADO BRUTO DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO VAB TOTAL. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-por-unidade-da-federacao-nova-serie-incluindo-a-construcao-civil>. Acesso em: 20 jun. 2022.

CHAUHAN, Krishna; PELTOKORPI, Antti; BERGHEDE, Klas. Combining Takt Planning With Pre- Fabrication for Industrialized. **Proc. 26th Annual Conference of the International. Group for Lean Construction (IGLC)**, p. 848–857, 2018.

CLAUTIAUX, François; SADYKOV, Ruslan; VANDERBECK, François; VIAUD, Quentin. Pattern-based diving heuristics for a two-dimensional guillotine cutting-stock problem with leftovers. **Euro Journal on Computational Optimization**, [S.L.], v. 7, n. 3, p. 265-297, 10 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13675-019-00113-9>.

COMPUTATIONAL INFRASTRUCTURE FOR OPERATIONS RESEARCH. **Download**. COIN-OR. Disponível em: <https://www.coin-or.org/downloading/>. Acesso em: 22 maio 2021.

CUI, Yaodong; SONG, Xiang; CHEN, Yan; CUI, Yi-Ping. New model and heuristic solution approach for one-dimensional cutting stock problem with usable leftovers. **Journal of the Operational Research Society**, [S.L.], v. 68, n. 3, p. 269-280, mar. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1057/s41274-016-0098-y>.

DANTZIG, George. Linear programming and extensions. 1963. Princeton University Press. <http://dx.doi.org/10.1515/9781400884179>.

DANTZIG, George B.; WOLFE, Philip. Decomposition Principle for Linear Programs. **Operations Research**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 101-111, fev. 1960. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <http://dx.doi.org/10.1287/opre.8.1.101>.

DYCKHOFF, Harald. A typology of cutting and packing problems. **European Journal of Operational Research**, [S.L.], v. 44, n. 2, p. 145-159, jan. 1990. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90350-k](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90350-k).

FERREIRA, Pedro Miguel Teixeira. **OTIMIZAÇÃO DO CORTE DE BOBINES DE AÇO**. 2016. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016.

FORD, L. R.; FULKERSON, D. R.. A Suggested Computation for Maximal Multi-Commodity Network Flows. **Management Science**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 97-101, out. 1958. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.5.1.97>.

FSF, Free Software Foundation. **GLPK – GNU Linear Programming Kit**. Disponível em: <https://www.gnu.org/software/glpk/>. Acesso em: 30 abr. 2021.

GASPARRI, Eugenia; AITCHISON, Mathew. Unitised timber envelopes. A novel approach to the design of prefabricated mass timber envelopes for multi-storey buildings. **Journal of Building Engineering**, [S.L.], v. 26, p. 1-13, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2019.100898>.

GIBB, Alistair G.F.. **Off-site Fabrication**: prefabrication, pre-assembly and modularisation. New York, 1999. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=uTiN_aGtXzwC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 23 abr. 2020.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008. 220 p.

GILMORE, P. C.; GOMORY, R. E.. A Linear Programming Approach to the Cutting-Stock Problem. **Operations Research**, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 849-859, dez. 1961. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <http://dx.doi.org/10.1287/opre.9.6.849>.

GILMORE, P. C.; GOMORY, R. E.. A Linear Programming Approach to the Cutting Stock Problem—Part II. **Operations Research**, [S.L.], v. 11, n. 6, p. 863-888, dez. 1963. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <http://dx.doi.org/10.1287/opre.11.6.863>.

GOH, Edward; LOOSEMORE, Martin. The impacts of industrialization on construction subcontractors: a resource based view. **Construction Management and Economics**, [S.L.], v. 35, n. 5, p. 288-304, 8 nov. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01446193.2016.1253856>.

HILLIER, Frederick. S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9º ed. São Paulo: Editora Bookman, 2013.

HOUGH, Michael J; LAWSON, R Mark. Design and construction of high-rise modular buildings based on recent projects. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, [S.L.], v. 172, n. 6, p. 37-44, 1 nov. 2019. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/jcien.18.00058>.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Estatísticas Estruturais e Temáticas em Empresas, **Pesquisa Anual da Indústria da Construção 2019/2020**. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=754> Acesso em: 25 abr. 2022

IBM Corporation. **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Documentation**. Disponível em: <https://www.ibm.com/docs/en/icos/>. Acesso em: 30 abr. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **AÇO & ECONOMIA**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2021. Folder Aço Brasil Econômico 2021. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/ECON_digital_2021.pdf. Acesso em: 02 jun. 2022.

JAHANGIRI, Bardia. **GENERATING OPTIMIZED CUTTING LAYOUTS OF DRYWALL PANELS USING BUILDING INFORMATION MODELING**. 2016. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência, Office of Graduate and Professional Studies, Texas A&M University, Texas, 2016.

KANTOROVICH, L. V.. Mathematical Methods of Organizing and Planning Production. **Management Science**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 366-422, 1939. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.6.4.366>. Translated in Management Science 6 jul. (1960).

KARSU, Özlem; MORTON, Alec. Inequity averse optimization in operational research. **European Journal of Operational Research**, [S.L.], v. 245, n. 2, p. 343-359, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.02.035>.

KIM, Byung-In; KI, Youngmin; SON, Donghee; BAE, Byungjoo; PARK, Jun-Seo. An algorithm for a cutting problem in window frame production. **International Journal of Production Research**, [S.L.], v. 54, n. 14, p. 4327-4339, 24 fev. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2016.1148279>.

LAWSON, Mark; OGDEN, Ray; GOODIER, Chris. **Design in Modular Construction**. New York: CRC Press, 2014. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=w8XLBQAAQBAJ&pg=PA69&hl=pt-BR&source=gbs_selected_pages&cad=3#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 20 abr. 2020.

LESSING, Jerker. **Industrialised house-building**: conceptual orientation and strategic perspectives. 2015. 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Structural Engineering, Department Of Building And Environmental Engineering, Lund University, Sweden, 2015.

LI, Long; LI, Zhongfu; LI, Xiaodong; ZHANG, Shengxi; LUO, Xiaowei. A new framework of industrialized construction in China: towards on-site industrialization. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 244, p. 118469, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118469>.

LI, Zhengdao; SHEN, Geoffrey Qiping; XUE, Xiaolong. Critical review of the research on the management of prefabricated construction. **Habitat International**, [S.L.], v. 43, p. 240-249, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.04.001>.

MAHVASH, Batoul; AWASTHI, Anjali; CHAUHAN, Satyaveer. A column generation-based heuristic for the three-dimensional bin packing problem with rotation. **Journal of The Operational Research Society**, [S.L.], v. 69, n. 1, p. 78-90, 5 dez. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1057/s41274-017-0186-7>.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. 310 p.

MARINHO, Leandro Borges. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PROCESSOS DE CORTE E DOBRA DE VERGALHÕES PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO COMO APOIO À TOMADA DE DECISÃO**. 2012. 58 f. Monografia (Especialização) - Curso de Gerenciamento e Execução de Obras, Instituto IDD, Curitiba, 2012.

MARTINEZ-SYKORA, A.; ALVAREZ-VALDES, R.; BENNELL, J.A.; RUIZ, R.; TAMARIT, J.M.. Matheuristics for the irregular bin packing problem with free rotations. **European Journal of Operational Research**, [S.L.], v. 258, n. 2, p. 440-455, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.043>.

MARTUCCI, Ricardo. **Projeto tecnológico para edificações habitacionais: utopia ou desejo?**. 1990. 438 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

MUNARI JUNIOR, Pedro Augusto. **Técnicas computacionais para a implantação eficiente e estável de métodos tipo simplex**. 2009. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências de Computação e Matemática Computacional, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MUNARI JUNIOR, Pedro Augusto. **Theoretical and computational issues for improving the performance of linear optimization methods**. 2013. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências de Computação e Matemática Computacional, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MUTER, İbrahim; SEZER, Zeynep. Algorithms for the one-dimensional two-stage cutting stock problem. **European Journal of Operational Research**, [S.L.], v. 271, n. 1, p. 20-32, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2018.04.042>.

NADIM, Wafaa. Industrialising the construction industry: A collaborative training and education model. 2009. Tese (Doutorado) - School of the Built Environment, University of Salford, 2009.

NEIMAN, Zysman; RABINOVICI, Andrea; SOLA, Fernanda. A questão ambiental, a sustentabilidade e inter, pluri ou transdisciplinaridade. In: CUNHA, B. P. de; AUGUSTIM, S. **Sustentabilidade ambiental: estudos jurídicos e sociais**. Caxias do Sul: Educs, 2014. p. 24-47.

OGUNRANTI, Gbemileke A.; OLULEYE, Ayodeji E.. Minimizing waste (off-cuts) using cutting stock model: the case of one dimensional cutting stock problem in wood working industry. **Journal of Industrial Engineering and Management**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 834, 22 set. 2016. Omnia Publisher SL. <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.1653>.

OLIVEIRA, Ana Beatriz de Figueiredo. **Processo de produção integrado: aplicabilidade na construção industrializada**. 2019. 309 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

OLIVIERI, Hylton; BARBOSA, Ivan Carlos Alves; ROCHA, Antonio Carlos da; GRANJA, Ariovaldo Denis; FONTANINI, Patricia Stella Pucharelli. A utilização de novos sistemas construtivos para a redução no uso de insumos nos canteiros de obras: light steel framing. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 17, n. 4, p. 45-60, dez. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400184>.

PEINADO, Hugo Sefrian; MORI, Luci Mercedes de; MIOTTO, José Luiz. **Aço cortado e dobrado de fábrica para estruturas em concreto armado**. 195. ed. São Paulo: Editora Pini, 2013.

PESSOA, Ronaldo Lage. **CONTRIBUTIONS TO THE TWO-DIMENSIONAL GUILLOTINE CUTTING STOCK PROBLEMA**. 2017. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Modelagem e Métodos Quantitativos, Departamento de Estatística e Matemática Aplicada, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

PITOMBEIRA NETO, Anselmo Ramalho. **Solução do Problema de Corte de Estoque por Geração de Colunas**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2022. Color.

PITOMBEIRA-NETO, Anselmo Ramalho; PRATA, Bruno de Athayde. A matheuristic algorithm for the one-dimensional cutting stock and scheduling problem with heterogeneous orders. **Top**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 178-192, 16 set. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11750-019-00531-3>.

POLDI, Kelly Cristina. **Algumas extensões do problema de corte de estoque**. 2003. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências de Computação e Matemática Computacional, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

POLDI, Kelly Cristina; ARENALES, Marcos Nereu. Heurísticas para o problema de corte de estoque unidimensional inteiro. **Pesquisa Operacional**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 473-492, dez. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0101-74382006000300003>.

PRAÇA, Eduardo Rocha; BARROS NETO, José de Paula. ESTUDO COMPARATIVO DE CUSTOS DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO E EXECUÇÃO DE ARMADURAS DE AÇO TRADICIONAL EM RELAÇÃO AO PROCESSO DE FORNECIMENTO INDUSTRIALIZADO DE AÇO MOLDADO FORA DO CANTEIRO DE OBRAS. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 21., 2001, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: ABEPRO, 2001.

PRATA, Bruno de Athayde; PITOMBEIRA-NETO, Anselmo Ramalho; SALES, Caio Jucá de Moraes. An Integer Linear Programming Model for the Multiperiod Production Planning of Precast Concrete Beams. **Journal of Construction Engineering and Management**, [S.L.], v. 141, n. 10, out. 2015. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000991](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000991).

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013. 277 p.

QUAGLIO, Jaqueline de Pieri. **Produção em escala da habitação e racionalização de canteiros de obras**. 2018. 225 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

RAZKENARI, Mohamad; FENNER, Andriel; SHOJAEI, Alireza; HAKIM, Hamed; KIBERT, Charles. Perceptions of offsite construction in the United States: an investigation of current practices. **Journal of Building Engineering**, [S.L.], v. 29, p. 101138, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101138>.

RIBEIRO, Hélder Filipe Martins. **MELHORIA DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE ALUMÍNIO**. 2018. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Gestão Industrial, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2018.

SILVA, Cassandra Ribeiro de O. e. **Metodologia e Organização do projeto de pesquisa: guia prático**. Fortaleza: Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará, 2004.

SOUZA, Ubiraci Espinelli Lemes de. **Consumo de Aço**. Equipe da Obra ed. 06. Editora PINI. São Paulo, 2006.

SPADETO, Tatiana Freitas. **Industrialização na construção civil: uma contribuição à política de utilização de estruturas pré-fabricadas em concreto**. 2011. 212 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

UUSITALO, Petri; LAVIKKA, Rita. Overcoming Path Dependency in an Industrialised House-Building Company through Entrepreneurial Orientation. **Buildings**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 45, 6 mar. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings10030045>.

VASSOLER, Ângelo Henrique Dinhan; POLTRONIERE, Sônia Cristina; ARAËJO, Silvio Alexandre de. Modelagem matemática para o problema de produção de vigotas na indústria de lajes treliçadas. **C.Q.D. – Revista Eletrônica Paulista de Matemática**, [S.L.], v. 7, p. 68-77, dez. 2016. C.Q.D.- Revista Eletronica Paulista de Matematica. <http://dx.doi.org/10.21167/cqdvol7ermac201623169664ahdvscpsar6877>.

WANG, Tao; GAO, Shangde; LI, Xiaodong; NING, Xin. A meta-network-based risk evaluation and control method for industrialized building construction projects. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 205, p. 552-564, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.127>.

WÄSCHER, Gerhard; HAUßNER, Heike; SCHUMANN, Holger. An improved typology of cutting and packing problems. **European Journal of Operational Research**, [S.L.], v. 183, n. 3, p. 1109-1130, dez. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.047>.

WAVRZYNCZAK, Hione Cleder; ULBRICHT, Gerson; TEIXEIRA, Edson Sidnei Maciel. MODELO MATEMÁTICO PARA CORTES DE BARRAS DE AÇO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE TRIÂNGULOS. **Holos**, [S.L.], v. 8, p. 252, 13 jan. 2016. Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2015.3605>.

YANG, Zhitian; MA, Zhiliang; WU, Song. Optimized flowshop scheduling of multiple production lines for precast production. **Automation in Construction**, [S.L.], v. 72, p. 321-329, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.021>.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. 320 p.

ZABIHI, Hossein; HABIB, Farah; MIRSAEEDIE, Leila. Definitions, concepts and new directions in Industrialized Building Systems (IBS). **KSCE Journal of Civil Engineering**, [S.L.], v. 17, n. 6, p. 1199-1205, 17 ago. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-0020-y>.

ZHANG, Jinyue; LONG, Yating; LV, Siquan; XIANG, Yunchao. BIM-enabled Modular and Industrialized Construction in China. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 145, p. 1456-1461, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.183>.

ZHAO, Yinghui; HAAS, Carl T.. A 3D Irregular Packing Algorithm Using Point Cloud Data. **Computing in Civil Engineering 2019**, [S.L.], p. 201-208, 13 jun. 2019. American Society of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784482438.026>.

APÊNDICE A – TESTES COMPUTACIONAIS

a) Projeto UCP 002 (12,50 mm)

Tabela 11 – Resultados dos testes computacionais do projeto UCP (12,50 mm)

Iteração	Sol. PMR	Sol. Sub.	Tempo PMR (ms)	Tempo Sub. (ms)	Tempo Total (ms)
1	856,00	7,00	0,005	0,003	0,008
2	787,43	7,00	0,004	0,005	0,009
3	341,71	7,00	0,004	0,004	0,008
4	276,57	4,14	0,003	0,004	0,007
5	260,86	3,14	0,004	0,004	0,008
6	203,71	2,29	0,003	0,004	0,007
7	156,81	1,25	0,004	0,004	0,008
8	153,29	1,06	0,003	0,005	0,008
9	153,14	1,04	0,003	0,004	0,007
10	152,29	1,00	0,004	0,004	0,008

Fonte: elaborado pelo autor.

b) Projeto UCP 003 B (12,50 mm)

Tabela 12 – Resultados dos testes computacionais do projeto UCP 003 B (12,50 mm)

Iteração	Sol. PMR	Sol. Sub.	Tempo PMR (ms)	Tempo Sub. (ms)	Tempo Total (ms)
1	79,00	5,00	0,004	0,004	0,008
2	76,67	3,00	0,004	0,004	0,008
3	74,67	3,00	0,003	0,007	0,010
4	72,67	3,00	0,005	0,005	0,010
5	70,67	3,00	0,004	0,004	0,008
6	56,67	3,00	0,004	0,004	0,008
7	55,33	2,00	0,004	0,005	0,009
8	54,33	1,67	0,003	0,004	0,007
9	54,27	1,50	0,003	0,004	0,007
10	54,27	3,00	0,004	0,004	0,008
11	53,60	1,40	0,003	0,004	0,007
12	53,50	2,00	0,003	0,004	0,007
13	53,00	1,33	0,003	0,004	0,007
14	52,33	1,33	0,003	0,004	0,007
15	51,67	1,33	0,004	0,003	0,007
16	50,67	1,33	0,004	0,004	0,008
17	46,67	1,33	0,005	0,003	0,008
18	46,00	1,33	0,004	0,004	0,007
19	45,33	1,33	0,004	0,005	0,009
20	44,67	1,33	0,004	0,004	0,008
21	43,67	1,33	0,005	0,005	0,010
22	43,00	1,00	0,005	0,004	0,009

Fonte: elaborado pelo autor.

c) Projeto UCP 003 C (12,50 mm)

Tabela 13 – Resultados dos testes computacionais do projeto UCP 003 C (12,5 mm)

Iteração	Sol. PMR	Sol. Sub.	Tempo PMR (ms)	Tempo Sub. (ms)	Tempo Total (ms)
1	316,00	6,00	0,004	0,005	0,009
2	314,33	6,00	0,003	0,004	0,007
3	312,67	5,00	0,004	0,005	0,009
4	311,07	5,00	0,005	0,005	0,010
5	309,47	5,00	0,004	0,004	0,008
6	307,87	5,00	0,004	0,005	0,009
7	306,27	5,00	0,003	0,003	0,006
8	304,67	4,17	0,004	0,005	0,009
9	303,08	4,00	0,004	0,005	0,009
10	301,08	4,00	0,003	0,004	0,007
11	299,58	4,00	0,004	0,004	0,008
12	298,58	4,00	0,004	0,004	0,008
13	295,58	4,00	0,003	0,004	0,007
14	294,08	4,00	0,004	0,004	0,008
15	291,08	3,21	0,004	0,005	0,009
16	289,61	3,21	0,004	0,005	0,009
17	287,40	3,20	0,004	0,004	0,009
18	284,47	3,20	0,004	0,004	0,008
19	283,00	3,17	0,004	0,006	0,010
20	281,56	3,00	0,005	0,005	0,010
21	278,89	3,00	0,005	0,003	0,008
22	278,23	3,00	0,004	0,005	0,009
23	275,56	3,00	0,004	0,003	0,007
24	272,23	3,00	0,004	0,005	0,009
25	269,56	3,00	0,005	0,006	0,011
26	268,23	3,00	0,005	0,006	0,011
27	266,89	3,00	0,005	0,006	0,011
28	265,56	3,00	0,004	0,005	0,009
29	264,23	3,00	0,003	0,004	0,007
30	262,89	3,00	0,003	0,004	0,007
31	261,56	2,33	0,005	0,004	0,009
32	259,03	2,37	0,004	0,004	0,008
33	256,68	2,33	0,003	0,004	0,007
34	255,18	2,33	0,004	0,005	0,009
35	255,18	2,33	0,004	0,004	0,008
36	253,85	2,33	0,004	0,004	0,008
37	252,52	2,33	0,004	0,004	0,008
38	251,52	2,33	0,004	0,004	0,008

39	251,02	2,33	0,004	0,004	0,008
40	247,85	2,33	0,004	0,004	0,007
41	243,85	2,25	0,004	0,004	0,008
42	241,35	2,25	0,003	0,004	0,007
43	238,02	2,33	0,004	0,004	0,008
44	236,68	2,33	0,004	0,004	0,008
45	232,35	2,25	0,004	0,004	0,008
46	230,77	2,20	0,004	0,004	0,008
47	229,57	2,17	0,004	0,004	0,008
48	228,40	2,17	0,003	0,004	0,007
49	226,73	2,00	0,004	0,004	0,008
50	224,73	2,00	0,004	0,005	0,009
51	222,73	2,00	0,004	0,005	0,009
52	221,73	2,00	0,004	0,004	0,008
53	219,73	2,00	0,004	0,004	0,008
54	218,73	2,00	0,004	0,004	0,008
55	216,73	2,00	0,005	0,004	0,009
56	215,23	2,00	0,004	0,004	0,009
57	214,23	2,00	0,004	0,004	0,008
58	210,23	2,00	0,004	0,004	0,008
59	208,23	2,00	0,004	0,005	0,009
60	207,23	2,00	0,004	0,003	0,008
61	206,23	2,00	0,004	0,004	0,008
62	205,23	2,00	0,005	0,004	0,009
63	203,23	2,00	0,004	0,005	0,009
64	199,23	2,00	0,004	0,004	0,008
65	198,23	2,00	0,004	0,004	0,008
66	197,23	2,00	0,004	0,003	0,007
67	195,23	2,00	0,005	0,007	0,012
68	193,23	2,00	0,005	0,005	0,010
69	189,23	1,53	0,006	0,006	0,012
70	188,37	1,53	0,005	0,006	0,011
71	187,34	1,53	0,005	0,009	0,014
72	185,61	1,50	0,006	0,007	0,013
73	184,33	1,53	0,004	0,008	0,012
74	183,61	1,50	0,007	0,004	0,011
75	183,43	1,53	0,004	0,005	0,009
76	183,27	1,54	0,005	0,006	0,011
77	182,90	1,53	0,007	0,009	0,016
78	182,37	1,67	0,004	0,004	0,008
79	181,57	1,53	0,004	0,005	0,008
80	181,43	1,53	0,004	0,004	0,008

81	180,73	1,53	0,004	0,004	0,007
82	180,20	1,53	0,004	0,005	0,008
83	180,05	1,53	0,004	0,004	0,008
84	179,67	1,50	0,004	0,004	0,008
85	178,67	1,50	0,004	0,004	0,008
86	178,67	1,50	0,004	0,005	0,009
87	178,00	1,50	0,005	0,005	0,010
88	176,67	1,50	0,005	0,005	0,010
89	175,50	1,50	0,005	0,005	0,010
90	175,42	1,50	0,004	0,005	0,009
91	173,67	1,50	0,004	0,005	0,010
92	173,04	1,50	0,007	0,005	0,012
93	172,04	1,50	0,005	0,004	0,009
94	171,04	1,50	0,005	0,005	0,010
95	169,54	1,50	0,005	0,006	0,011
96	168,63	1,50	0,004	0,005	0,009
97	168,29	1,50	0,006	0,006	0,011
98	167,29	1,50	0,006	0,018	0,025
99	166,98	1,50	0,005	0,005	0,010
100	166,06	1,43	0,004	0,005	0,010
101	164,82	1,42	0,003	0,005	0,008
102	164,36	1,50	0,004	0,005	0,009
103	164,36	1,50	0,004	0,004	0,009
104	163,86	1,50	0,004	0,005	0,009
105	163,36	1,50	0,005	0,004	0,009
106	162,86	1,50	0,004	0,004	0,008
107	162,36	1,50	0,005	0,004	0,009
108	162,04	1,38	0,004	0,006	0,010
109	161,79	1,50	0,006	0,009	0,015
110	161,72	1,50	0,011	0,005	0,016
111	159,85	1,41	0,004	0,004	0,008
112	159,07	1,38	0,004	0,006	0,010
113	159,07	1,38	0,004	0,004	0,008
114	158,32	1,50	0,004	0,004	0,008
115	157,85	1,50	0,004	0,004	0,008
116	157,82	1,37	0,005	0,004	0,009
117	157,71	1,39	0,004	0,004	0,008
118	157,09	1,33	0,004	0,004	0,008
119	156,42	1,33	0,004	0,004	0,008
120	155,76	1,33	0,004	0,004	0,009
121	155,42	1,33	0,004	0,004	0,008
122	154,76	1,33	0,004	0,004	0,008

123	154,42	1,33	0,004	0,005	0,010
124	153,80	1,44	0,005	0,006	0,011
125	153,66	1,38	0,007	0,005	0,011
126	153,64	1,38	0,005	0,005	0,010
127	153,48	1,30	0,007	0,009	0,016
128	153,20	1,50	0,005	0,004	0,009
129	152,60	1,30	0,005	0,006	0,011
130	152,17	1,33	0,005	0,004	0,009
131	151,59	1,28	0,005	0,006	0,011
132	151,35	1,25	0,004	0,005	0,010
133	151,10	1,25	0,004	0,006	0,010
134	150,60	1,25	0,005	0,006	0,011
135	150,60	1,25	0,004	0,005	0,009
136	150,56	1,26	0,004	0,004	0,009
137	149,91	1,25	0,004	0,004	0,008
138	149,68	1,25	0,004	0,005	0,009
139	148,91	1,25	0,005	0,004	0,009
140	148,68	1,25	0,004	0,007	0,011
141	148,68	1,25	0,004	0,005	0,009
142	148,68	1,25	0,004	0,006	0,010
143	148,43	1,25	0,005	0,006	0,011
144	148,41	1,25	0,006	0,005	0,011
145	148,18	1,23	0,005	0,005	0,010
146	147,97	1,20	0,004	0,004	0,008
147	147,78	1,27	0,003	0,005	0,008
148	147,66	1,37	0,004	0,004	0,009
149	147,35	1,25	0,004	0,004	0,009
150	147,33	1,22	0,004	0,004	0,009
151	147,11	1,40	0,004	0,004	0,009
152	146,86	1,25	0,004	0,004	0,008
153	146,83	1,20	0,004	0,004	0,008
154	146,63	1,27	0,005	0,004	0,009
155	146,43	1,20	0,004	0,004	0,008
156	146,43	1,20	0,004	0,004	0,008
157	146,43	1,13	0,005	0,004	0,009
158	146,43	1,13	0,005	0,008	0,013
159	146,43	1,13	0,005	0,005	0,011
160	146,34	1,18	0,005	0,007	0,012
161	146,30	1,13	0,005	0,006	0,012
162	146,18	1,15	0,009	0,007	0,016
163	146,17	1,11	0,004	0,006	0,011
164	146,07	1,18	0,004	0,004	0,008

165	145,87	1,14	0,004	0,005	0,009
166	145,77	1,13	0,005	0,006	0,011
167	145,77	1,12	0,005	0,006	0,011
168	145,68	1,10	0,005	0,012	0,017
169	145,63	1,11	0,004	0,013	0,017
170	145,63	1,10	0,004	0,011	0,016
171	145,57	1,17	0,004	0,004	0,008
172	145,55	1,11	0,004	0,006	0,010
173	145,42	1,11	0,006	0,006	0,012
174	145,26	1,11	0,006	0,007	0,012
175	145,22	1,11	0,005	0,012	0,018
176	145,17	1,10	0,005	0,013	0,018
177	145,17	1,13	0,008	0,005	0,013
178	145,13	1,13	0,006	0,006	0,011
179	145,10	1,10	0,005	0,006	0,011
180	144,95	1,13	0,005	0,004	0,009
181	144,93	1,13	0,004	0,004	0,008
182	144,89	1,11	0,004	0,005	0,009
183	144,82	1,14	0,004	0,004	0,008
184	144,61	1,10	0,005	0,011	0,016
185	144,26	1,33	0,004	0,004	0,008
186	144,21	1,10	0,005	0,012	0,016
187	144,21	1,10	0,005	0,006	0,011
188	144,09	1,10	0,005	0,007	0,012
189	144,09	1,10	0,006	0,006	0,011
190	144,01	1,10	0,004	0,007	0,011
191	143,90	1,09	0,004	0,008	0,012
192	143,81	1,20	0,004	0,006	0,011
193	143,68	1,10	0,012	0,006	0,018
194	143,63	1,10	0,006	0,006	0,012
195	143,63	1,10	0,005	0,008	0,013
196	143,63	1,10	0,007	0,013	0,020
197	143,63	1,10	0,007	0,008	0,016
198	143,63	1,10	0,004	0,004	0,008
199	143,50	1,08	0,003	0,005	0,008
200	143,33	1,14	0,004	0,004	0,008
201	143,32	1,08	0,004	0,008	0,011
202	143,28	1,06	0,004	0,006	0,010
203	143,24	1,06	0,005	0,006	0,011
204	143,21	1,05	0,005	0,006	0,011
205	143,18	1,07	0,005	0,005	0,010
206	143,18	1,06	0,005	0,006	0,011

207	143,18	1,06	0,005	0,004	0,009
208	143,15	1,06	0,005	0,004	0,010
209	143,12	1,06	0,004	0,004	0,008
210	143,09	1,06	0,004	0,004	0,008
211	143,09	1,06	0,003	0,005	0,008
212	143,08	1,09	0,005	0,004	0,009
213	143,08	1,05	0,005	0,006	0,011
214	143,07	1,06	0,004	0,006	0,010
215	143,07	1,06	0,004	0,005	0,009
216	143,05	1,07	0,005	0,004	0,010
217	143,05	1,05	0,004	0,005	0,008
218	143,05	1,06	0,004	0,004	0,008
219	143,04	1,06	0,004	0,006	0,010
220	143,02	1,07	0,004	0,005	0,009
221	142,99	1,05	0,004	0,005	0,009
222	142,94	1,05	0,004	0,006	0,010
223	142,93	1,07	0,004	0,004	0,008
224	142,92	1,05	0,004	0,005	0,008
225	142,91	1,07	0,004	0,005	0,009
226	142,90	1,05	0,004	0,006	0,011
227	142,88	1,05	0,004	0,007	0,011
228	142,88	1,08	0,005	0,005	0,011
229	142,79	1,07	0,005	0,004	0,009
230	142,78	1,04	0,003	0,004	0,008
231	142,75	1,04	0,004	0,004	0,008
232	142,75	1,04	0,004	0,004	0,008
233	142,74	1,04	0,004	0,007	0,010
234	142,66	1,05	0,004	0,005	0,008
235	142,65	1,04	0,004	0,005	0,009
236	142,62	1,04	0,004	0,005	0,009
237	142,62	1,04	0,004	0,006	0,010
238	142,61	1,04	0,005	0,005	0,010
239	142,61	1,03	0,004	0,006	0,010
240	142,56	1,04	0,004	0,005	0,009
241	142,52	1,06	0,004	0,005	0,009
242	142,52	1,06	0,004	0,004	0,008
243	142,49	1,07	0,004	0,005	0,009
244	142,49	1,08	0,005	0,004	0,009
245	142,45	1,04	0,004	0,006	0,010
246	142,44	1,03	0,004	0,005	0,010
247	142,43	1,04	0,004	0,005	0,009
248	142,39	1,04	0,004	0,006	0,009

249	142,38	1,03	0,004	0,008	0,012
250	142,37	1,03	0,005	0,006	0,011
251	142,35	1,03	0,005	0,006	0,010
252	142,34	1,03	0,005	0,004	0,009
253	142,34	1,03	0,005	0,006	0,010
254	142,32	1,03	0,005	0,005	0,010
255	142,32	1,04	0,004	0,005	0,008
256	142,32	1,03	0,004	0,009	0,013
257	142,31	1,02	0,003	0,009	0,012
258	142,28	1,03	0,005	0,005	0,010
259	142,26	1,04	0,004	0,005	0,009
260	142,26	1,03	0,005	0,006	0,011
261	142,26	1,03	0,004	0,006	0,010
262	142,25	1,02	0,005	0,011	0,017
263	142,25	1,02	0,004	0,006	0,009
264	142,25	1,02	0,004	0,008	0,013
265	142,24	1,03	0,005	0,005	0,010
266	142,23	1,02	0,004	0,006	0,010
267	142,23	1,04	0,004	0,005	0,009
268	142,23	1,02	0,004	0,006	0,010
269	142,23	1,02	0,005	0,006	0,011
270	142,22	1,02	0,004	0,006	0,010
271	142,22	1,02	0,005	0,005	0,010
272	142,21	1,02	0,005	0,006	0,011
273	142,21	1,02	0,005	0,009	0,014
274	142,21	1,02	0,005	0,015	0,019
275	142,20	1,02	0,004	0,006	0,011
276	142,20	1,03	0,004	0,010	0,014
277	142,20	1,02	0,005	0,006	0,011
278	142,19	1,04	0,003	0,005	0,008
279	142,18	1,02	0,004	0,005	0,009
280	142,18	1,01	0,004	0,010	0,013
281	142,18	1,01	0,004	0,006	0,010
282	142,17	1,01	0,005	0,005	0,010
283	142,16	1,01	0,005	0,006	0,012
284	142,16	1,01	0,006	0,009	0,015
285	142,16	1,01	0,003	0,013	0,017
286	142,15	1,01	0,004	0,011	0,015
287	142,15	1,02	0,004	0,008	0,013
288	142,14	1,01	0,004	0,007	0,011
289	142,14	1,01	0,005	0,007	0,012
290	142,14	1,01	0,004	0,011	0,016

291	142,14	1,01	0,005	0,007	0,012
292	142,14	1,01	0,006	0,013	0,018
293	142,13	1,01	0,004	0,008	0,012
294	142,13	1,01	0,003	0,012	0,015
295	142,13	1,01	0,004	0,009	0,014
296	142,12	1,01	0,004	0,011	0,015
297	142,12	1,01	0,004	0,009	0,013
298	142,11	1,00	0,005	0,009	0,014
299	142,11	1,00	0,004	0,009	0,013
300	142,11	1,00	0,004	0,012	0,017
301	142,11	1,00	0,004	0,009	0,013
302	142,11	1,00	0,005	0,009	0,014
303	142,11	1,00	0,005	0,009	0,014
304	142,11	1,00	0,003	0,010	0,013

Fonte: elaborado pelo autor.

d) Projeto UCP 003 B (16,00 mm)

Tabela 14 – Resultados dos testes computacionais do projeto UCP 003 B (16,00 mm)

Iteração	Sol. PMR	Sol. Sub.	Tempo PMR (ms)	Tempo Sub. (ms)	Tempo Total (ms)
1	156,00	600,00	0,004	0,006	0,010
2	136,03	5,10	0,004	0,004	0,008
3	135,21	4,15	0,004	0,004	0,007
4	131,45	4,00	0,005	0,007	0,012
5	130,70	4,00	0,005	0,004	0,009
6	129,20	3,25	0,004	0,004	0,008
7	123,95	3,20	0,003	0,004	0,007
8	123,22	3,00	0,004	0,004	0,008
9	121,22	3,00	0,003	0,004	0,007
10	120,22	2,50	0,004	0,003	0,007
11	119,97	3,00	0,003	0,004	0,007
12	119,88	2,27	0,003	0,005	0,008
13	118,62	2,25	0,003	0,004	0,007
14	114,96	2,22	0,004	0,004	0,007
15	113,95	2,20	0,003	0,004	0,007
16	112,75	2,00	0,003	0,004	0,008
17	110,75	2,00	0,004	0,004	0,008
18	110,75	2,00	0,004	0,004	0,007
19	110,25	2,00	0,003	0,004	0,007
20	109,25	2,00	0,004	0,004	0,008
21	108,75	1,50	0,005	0,004	0,008
22	108,08	1,50	0,003	0,004	0,007
23	105,75	1,50	0,004	0,004	0,008
24	104,88	1,50	0,004	0,004	0,007
25	104,88	1,50	0,004	0,005	0,009
26	104,38	1,50	0,004	0,004	0,007
27	103,38	1,50	0,004	0,004	0,008
28	102,72	1,53	0,004	0,005	0,008
29	101,92	1,50	0,004	0,004	0,007
30	100,95	1,55	0,004	0,003	0,007
31	99,58	1,33	0,003	0,004	0,007
32	99,54	1,50	0,004	0,011	0,014
33	99,25	1,33	0,004	0,004	0,008
34	99,08	1,50	0,003	0,004	0,007
35	98,92	1,33	0,004	0,004	0,008
36	98,58	1,50	0,003	0,005	0,008
37	98,08	1,50	0,004	0,004	0,009
38	98,03	1,50	0,004	0,004	0,008

39	97,58	1,50	0,003	0,003	0,007
40	97,33	1,33	0,006	0,003	0,010
41	97,25	1,50	0,003	0,008	0,012
42	97,00	1,33	0,004	0,004	0,009
43	96,67	1,33	0,004	0,003	0,007
44	96,33	1,33	0,003	0,004	0,007
45	96,33	1,33	0,003	0,006	0,009
46	96,29	1,29	0,004	0,004	0,009
47	96,00	1,00	0,004	0,004	0,007

Fonte: elaborado pelo autor.

e) Projeto UCP 003 C (16,00 mm)

Tabela 15 – Resultados dos testes computacionais do projeto UCP 003 C (16,00 mm)

Iteração	Sol. PMR	Sol. Sub.	Tempo PMR (ms)	Tempo Sub. (ms)	Tempo Total (ms)
1	343,00	5,00	0,004	0,004	0,008
2	341,40	5,00	0,003	0,004	0,007
3	339,00	4,00	0,004	0,004	0,008
4	337,00	4,00	0,004	0,004	0,008
5	336,00	4,00	0,004	0,004	0,008
6	333,00	4,00	0,004	0,004	0,008
7	331,00	4,00	0,004	0,004	0,008
8	330,00	4,00	0,004	0,004	0,008
9	329,00	4,00	0,004	0,004	0,008
10	322,00	3,20	0,003	0,004	0,008
11	321,76	3,00	0,004	0,004	0,008
12	318,76	3,00	0,004	0,004	0,008
13	313,76	3,00	0,004	0,005	0,009
14	311,26	3,00	0,004	0,004	0,009
15	309,26	3,00	0,004	0,005	0,009
16	306,76	3,00	0,003	0,004	0,007
17	304,76	3,00	0,003	0,004	0,008
18	303,42	3,00	0,003	0,004	0,007
19	302,09	3,00	0,004	0,004	0,008
20	300,09	3,00	0,004	0,004	0,008
21	298,09	3,00	0,004	0,004	0,008
22	296,09	3,00	0,004	0,004	0,008
23	294,09	3,00	0,004	0,004	0,008
24	292,09	3,00	0,004	0,004	0,008
25	290,09	2,50	0,004	0,004	0,008
26	288,09	3,00	0,003	0,004	0,007
27	287,92	2,33	0,004	0,004	0,008
28	285,92	2,33	0,003	0,004	0,007
29	282,42	2,33	0,004	0,004	0,008
30	280,84	2,27	0,004	0,004	0,008
31	279,25	2,33	0,003	0,004	0,007
32	278,58	2,33	0,004	0,004	0,008
33	276,92	2,33	0,003	0,004	0,007
34	272,96	2,25	0,004	0,004	0,008
35	267,71	2,24	0,003	0,004	0,007
36	265,84	2,24	0,004	0,004	0,008
37	264,60	2,20	0,004	0,004	0,008
38	259,26	2,20	0,003	0,004	0,007

39	256,86	2,20	0,004	0,004	0,007
40	255,66	2,00	0,003	0,004	0,008
41	254,16	2,00	0,003	0,004	0,008
42	252,16	2,00	0,005	0,004	0,009
43	247,66	2,00	0,004	0,004	0,009
44	246,66	2,00	0,003	0,004	0,008
45	245,66	2,00	0,003	0,004	0,007
46	244,66	2,00	0,003	0,004	0,007
47	243,66	2,00	0,004	0,004	0,008
48	242,66	2,00	0,004	0,004	0,008
49	242,16	2,00	0,004	0,004	0,007
50	241,16	2,00	0,004	0,004	0,008
51	240,16	2,00	0,003	0,004	0,007
52	239,16	2,00	0,004	0,004	0,008
53	238,16	2,00	0,004	0,004	0,008
54	236,66	2,00	0,003	0,004	0,007
55	235,66	1,72	0,004	0,004	0,007
56	234,50	1,67	0,004	0,004	0,007
57	234,31	1,56	0,004	0,005	0,008
58	233,22	1,67	0,004	0,004	0,008
59	232,92	1,83	0,004	0,004	0,008
60	232,40	1,50	0,003	0,005	0,008
61	231,40	1,50	0,004	0,004	0,009
62	231,33	1,67	0,004	0,003	0,007
63	231,26	1,50	0,004	0,004	0,008
64	230,42	1,50	0,003	0,004	0,008
65	229,92	3,00	0,004	0,004	0,008
66	229,26	1,50	0,004	0,006	0,009
67	227,76	1,50	0,005	0,005	0,010
68	227,76	1,50	0,004	0,006	0,010
69	227,37	1,56	0,004	0,004	0,008
70	226,92	1,50	0,003	0,004	0,008
71	226,26	1,50	0,005	0,004	0,008
72	225,76	1,50	0,003	0,004	0,007
73	225,26	1,50	0,003	0,004	0,007
74	224,76	1,50	0,003	0,004	0,008
75	223,26	1,50	0,003	0,004	0,007
76	222,76	1,50	0,003	0,004	0,008
77	222,26	1,50	0,004	0,004	0,008
78	221,76	1,50	0,003	0,005	0,008
79	221,40	1,50	0,004	0,004	0,009
80	220,40	1,50	0,004	0,004	0,008

81	219,40	1,50	0,005	0,004	0,008
82	218,40	1,50	0,003	0,004	0,007
83	217,56	1,50	0,005	0,004	0,008
84	216,36	1,50	0,003	0,004	0,007
85	214,86	1,50	0,003	0,004	0,007
86	213,86	1,50	0,003	0,004	0,007
87	212,86	1,50	0,005	0,004	0,010
88	212,86	1,50	0,003	0,005	0,008
89	212,36	1,50	0,004	0,004	0,008
90	211,36	1,50	0,004	0,004	0,008
91	210,86	1,50	0,004	0,004	0,008
92	210,36	1,50	0,004	0,004	0,008
93	209,36	1,42	0,003	0,004	0,008
94	208,97	1,37	0,004	0,004	0,008
95	208,59	1,50	0,004	0,004	0,009
96	208,59	1,50	0,004	0,004	0,008
97	208,59	1,50	0,003	0,004	0,007
98	207,97	1,37	0,003	0,004	0,007
99	207,27	1,33	0,003	0,004	0,007
100	206,56	1,50	0,004	0,004	0,009
101	206,35	1,33	0,004	0,006	0,009
102	206,20	1,36	0,004	0,004	0,008
103	205,63	1,33	0,004	0,004	0,008
104	205,60	1,50	0,004	0,004	0,008
105	205,27	1,50	0,004	0,003	0,007
106	204,97	1,33	0,003	0,004	0,007
107	204,80	1,33	0,003	0,004	0,007
108	204,30	1,33	0,003	0,004	0,007
109	204,13	1,33	0,004	0,004	0,008
110	204,13	1,33	0,004	0,004	0,009
111	203,63	1,33	0,003	0,004	0,008
112	203,47	1,33	0,004	0,004	0,008
113	203,47	1,33	0,004	0,004	0,007
114	203,47	1,33	0,004	0,004	0,008
115	202,97	1,33	0,004	0,004	0,008
116	202,80	1,33	0,005	0,004	0,009
117	202,47	1,33	0,004	0,004	0,008
118	202,30	1,33	0,004	0,004	0,008
119	201,80	1,33	0,004	0,004	0,008
120	201,80	1,33	0,003	0,004	0,007
121	201,63	1,33	0,004	0,004	0,008
122	201,30	1,33	0,004	0,004	0,008

123	201,13	1,33	0,005	0,004	0,009
124	200,97	1,33	0,004	0,004	0,008
125	200,80	1,33	0,004	0,004	0,008
126	200,63	1,33	0,004	0,004	0,009
127	200,63	1,33	0,004	0,004	0,008
128	200,30	1,33	0,004	0,004	0,008
129	200,13	1,33	0,003	0,004	0,007
130	199,80	1,33	0,004	0,004	0,008
131	199,63	1,33	0,004	0,004	0,008
132	199,30	1,33	0,004	0,004	0,008
133	198,97	1,33	0,006	0,005	0,011
134	198,63	1,33	0,004	0,004	0,008
135	198,63	1,33	0,003	0,004	0,008
136	198,63	1,33	0,004	0,004	0,008
137	198,47	1,33	0,004	0,004	0,008
138	198,47	1,33	0,003	0,004	0,008
139	198,13	1,33	0,003	0,004	0,007
140	197,98	1,31	0,004	0,004	0,008
141	197,86	1,31	0,004	0,005	0,009
142	197,78	1,37	0,004	0,004	0,008
143	197,59	1,33	0,004	0,004	0,008
144	197,59	1,33	0,004	0,004	0,009
145	197,42	1,33	0,004	0,004	0,007
146	197,42	1,33	0,004	0,004	0,008
147	197,28	1,37	0,005	0,004	0,008
148	197,09	1,27	0,004	0,004	0,008
149	196,71	1,33	0,004	0,004	0,008
150	196,50	1,67	0,004	0,004	0,007
151	196,33	1,67	0,004	0,004	0,008
152	196,07	1,27	0,004	0,004	0,008
153	196,07	1,27	0,004	0,004	0,008
154	196,00	1,50	0,004	0,004	0,008
155	195,84	1,21	0,004	0,004	0,008
156	195,43	1,20	0,004	0,004	0,007
157	195,43	1,20	0,004	0,004	0,009
158	195,24	1,25	0,004	0,005	0,009
159	195,24	1,25	0,004	0,004	0,008
160	195,20	1,25	0,005	0,004	0,010
161	194,80	1,33	0,004	0,004	0,008
162	194,80	1,25	0,004	0,004	0,007
163	194,80	1,25	0,004	0,004	0,008
164	194,76	1,25	0,004	0,004	0,008

165	194,22	1,33	0,004	0,004	0,007
166	194,22	1,33	0,004	0,004	0,008
167	194,13	1,20	0,004	0,005	0,009
168	194,13	1,20	0,004	0,004	0,008
169	193,83	1,20	0,004	0,004	0,008
170	193,73	1,20	0,003	0,004	0,008
171	193,67	1,22	0,004	0,004	0,008
172	193,57	1,20	0,004	0,004	0,008
173	193,18	1,20	0,004	0,004	0,008
174	193,00	1,50	0,005	0,004	0,009
175	192,88	1,25	0,004	0,003	0,008
176	192,88	1,50	0,003	0,004	0,008
177	192,75	1,17	0,003	0,004	0,008
178	192,73	1,20	0,004	0,004	0,008
179	192,71	1,25	0,004	0,005	0,010
180	192,63	1,20	0,005	0,005	0,010
181	192,63	1,20	0,004	0,004	0,008
182	192,53	1,20	0,003	0,004	0,007
183	192,46	1,25	0,004	0,007	0,010
184	192,43	1,20	0,004	0,004	0,008
185	192,33	1,17	0,004	0,004	0,008
186	192,33	1,33	0,006	0,004	0,010
187	192,25	1,17	0,004	0,004	0,007
188	192,17	1,17	0,004	0,004	0,008
189	192,17	1,17	0,004	0,004	0,008
190	192,17	1,17	0,004	0,004	0,008
191	192,10	1,20	0,004	0,004	0,007
192	192,00	1,17	0,004	0,004	0,008
193	192,00	1,17	0,004	0,004	0,008
194	192,00	1,08	0,005	0,003	0,008
195	191,92	1,08	0,004	0,004	0,007
196	191,83	1,17	0,004	0,003	0,007
197	191,83	1,17	0,004	0,004	0,008
198	191,83	1,17	0,004	0,004	0,009
199	191,79	1,08	0,004	0,007	0,011
200	191,75	1,08	0,008	0,005	0,013
201	191,75	1,00	0,005	0,004	0,009

Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – DEMANDAS DOS PROJETOS

a) Projeto BSC 010 (12,50 mm)

Tabela 16 – Dados do pedido do projeto BCS 010 (12,50 mm)

Tamanhos (em centímetros)	Demanda
132	32
137	16
146	66
351	600

Fonte: elaborado pelo autor.

b) Projeto UCP 003 B (12,50 mm)

Tabela 17 – Dados do pedido do projeto UCP 003 B (12,50 mm)

Tamanhos (em centímetros)	Demanda
220	2
251	1
336	3
342	21
345	2
400	2
406	2
418	2
561	2
654	16
692	14
732	2
752	2
795	2
807	2
819	2
839	2

Fonte: elaborado pelo autor.

c) Projeto UCP 003 C (12,50 mm)

Tabela 18 – Dados do pedido do projeto UCP 003 C (12,50 mm)

Tamanhos (em centímetros)	Demanda
177	2
188	2
208	2
223	2
227	2
233	2
240	2
251	2
276	2
288	2
291	2
292	4
298	2
299	4
309	2
315	3
321	4
326	2
338	2
348	4
350	1
354	4
375	5
378	4
379	2
381	2
384	2
390	2
399	2
400	2
403	4
407	2
415	2
417	3
419	2
420	2
427	2
433	6
434	6
437	4

447	6
457	2
461	8
471	3
477	2
493	2
497	3
502	4
510	4
513	2
519	4
524	2
526	4
528	3
531	2
545	8
550	4
551	2
556	2
560	2
561	4
564	8
579	2
580	2
583	4
584	4
599	8
605	4
616	4
630	6
631	6
637	4
649	2
655	6
661	4
666	2
680	2
687	4
690	4
703	4
713	3
717	6
746	6
749	2
796	2

803	2
816	2
825	4
830	2
836	2
841	4
842	4
853	2
873	4
883	2
889	2
893	4
898	2

Fonte: elaborado pelo autor.

d) Projeto UCP 003 B (16,00 mm)

Tabela 19 – Dados do pedido do projeto UCP 003 B (16,00 mm)

Tamanhos (em centímetros)	Demanda
166	20
215	1
255	5
270	1
275	2
305	7
320	1
370	1
375	2
395	1
410	1
435	2
452	6
467	2
470	2
480	2
485	1
491	2
549	1
630	2
633	14
669	14
673	2
677	4
707	2
761	3
787	2
811	2
839	2
847	2
855	2
884	6
890	2
904	2
1060	10
1064	2
1069	2
1071	2
1097	2
1107	2

1110	2
1118	3
1135	4
1141	2
1162	2
1194	2

Fonte: elaborado pelo autor.

e) Projeto UCP 003 C (16,00 mm)

Tabela 20 – Dados do pedido do projeto UCP 003 C (16,00 mm)

Tamanhos (em centímetros)	Demanda
235	2
240	3
255	8
256	1
259	1
270	2
275	3
294	1
298	2
320	5
324	5
326	2
328	3
335	3
339	2
340	2
343	3
350	2
358	3
360	3
380	3
390	5
394	3
397	3
398	3
412	3
413	3
420	3
430	6
431	3
433	3
436	1
442	3
453	10
457	3
459	2
470	6
475	10
476	4

478	2
479	3
490	4
492	9
502	2
520	2
531	2
533	2
540	2
545	1
550	2
554	2
555	2
557	2
579	3
595	2
602	2
605	4
608	8
618	4
623	2
627	4
628	2
645	2
646	2
654	2
656	2
670	2
672	3
675	5
680	2
683	4
696	3
721	2
728	1
744	2
786	2
805	2
808	2
816	2
820	2
825	4
830	2
845	7
850	4

863	6
868	3
870	8
872	2
885	2
890	2
895	6
921	2
952	8
974	3
999	2
1021	2
1042	2
1045	2
1049	2
1058	2
1059	4
1075	2
1079	2
1081	4
1082	2
1085	2
1110	2
1118	3
1135	2
1162	2
1194	2
1200	2

Fonte: elaborado pelo autor.