

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**CENTRO TECNOLÓGICO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**KAREN JESUS GOMES DA SILVA**

**LARA MOURA MACHADO SANTOS**

**PLANEJAMENTO DA FILA DE NAVIOS CONSIDERANDO A DESIGNAÇÃO  
DE ÁREAS DE PÁTIO DE GRANEL PARA ATENDIMENTO À USINA  
PELOTIZADORA**

**VITÓRIA – ES**

**2024**

KAREN JESUS GOMES DA SILVA  
LARA MOURA MACHADO SANTOS

**PLANEJAMENTO DA FILA DE NAVIOS CONSIDERANDO A DESIGNAÇÃO  
DE ÁREAS DE PÁTIO DE GRANEL PARA ATENDIMENTO À USINA  
PELOTIZADORA**

Trabalho de Graduação de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA – ES  
2024

KAREN JESUS GOMES DA SILVA  
LARA MOURA MACHADO SANTOS

**PLANEJAMENTO DA FILA DE NAVIOS CONSIDERANDO A DESIGNAÇÃO  
DE ÁREAS DE PÁTIO DE GRANEL PARA ATENDIMENTO À USINA  
PELOTIZADORA**

Aprovada em 12 de Julho de 2024 por:

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa  
Universidade Federal do Espírito Santo

**Orientador**

---

Prof. Dr. Thiago de Almeida Rodrigues  
Universidade Federal do Espírito Santo

**Examinador**

---

Profa. Dra. Thiara Cezana Gomes  
Universidade Federal do Espírito Santo

**Examinadora**

Vitória – ES  
2024

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, por nos permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho. Sem Ele nós não teríamos conseguido chegar até aqui.

Aos nossos pais, Amarildo e Margareth, e Gilmar e Cilene, que não mediram esforços para nos incentivar e apoiar nos momentos difíceis desta jornada acadêmica. Vocês foram nossa base, sempre nos motivando a buscar pelos nossos objetivos. Sem o amor incondicional de vocês, nada disso seria possível.

Aos nossos colegas de curso, pela amizade e pelo apoio demonstrado ao longo de todos os anos de faculdade. Cada experiência compartilhada e cada desafio superado juntos tornaram nossa caminhada mais leve e significativa.

Agradecemos ao nosso professor e orientador, Rodrigo de Alvarenga Rosa, pelo apoio constante durante toda a realização do trabalho, pela confiança em nós, pela compreensão e paciência durante nossas dificuldades e por compartilhar seu vasto conhecimento ao longo desta jornada. Suas orientações foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Nossos sinceros agradecimentos.

Agradecemos à Universidade Federal do Espírito Santo, instituição que foi essencial no nosso processo de formação, e a todo o seu corpo docente pela excelência no ensino oferecido, que foi fundamental para o nosso crescimento acadêmico e pessoal.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste projeto, nosso muito obrigada.

*“Assim, brilhe vossa luz diante dos homens,  
para que vejam as vossas boas obras e  
glorifiquem vosso Pai que está nos céus”.*

(São Mateus, 5:16)

## RESUMO

As pelotas de minério de ferro são uma das *commodities* minerais mais produzidas mundialmente e utilizadas como carga nos altos-fornos para a obtenção de ferro primário. O processo de produção das pelotas ocorre de forma contínua por lotes, sem possibilidade de interrupção, sendo armazenadas nos pátios de produtos acabados do porto. Portanto, é essencial garantir um espaço disponível para estocagem antes de iniciar a produção de um novo lote, pois a falta de espaço resulta na interrupção da operação da usina, acarretando em perdas financeiras significativas. Assim, para liberar espaço no pátio, é necessário escoar este produto, o que neste trabalho será realizado por transporte marítimo. Dessa maneira, é fundamental planejar cuidadosamente a fila de navios que chegarão ao porto, integrando esse planejamento com a liberação de espaço no pátio para assegurar a produção contínua dos lotes de pelotas. Na literatura, o planejamento das localizações das cargas nos pátios é denominado como *Yard Assignment Problem* (YAP), enquanto o planejamento da sequência de atracação dos navios é conhecido como *Berth Allocation Problem* (BAP). Apesar da extensa quantidade de estudos sobre o BAP na literatura, a integração entre o BAP e o YAP ainda está em desenvolvimento. Sendo assim, diferentemente dos demais previstos em literatura, esse estudo focou na análise de sensibilidade entre o tempo de espera da formação da pilha e o tempo de espera do navio, com variações entre as prioridades desses dois fatores. Desse modo, elaborou-se uma ferramenta matemática que evidenciou a distribuição dos lotes de pelotas de minério nos pátios de um porto, integrando-se aos horários de chegada, atracação e desatracação dos navios. Para isso, utilizou-se como objeto de estudo o Porto de Ubu, pertencente à empresa Samarco Mineração S/A. O modelo matemático apresentou resultados satisfatórios, demonstrando sua aplicabilidade como método para planejar a alocação das pilhas de produto acabado nos pátios de estocagem e integrar-se ao planejamento da fila de navios. Visou-se fornecer ao gestor uma ferramenta que facilite a tomada de decisão quanto à priorização entre a produção das usinas pelletadoras e os atrasos na atracação de navios.

Palavras-chave: *Berth Allocation Problem*, *Yard Assignment Problem*, Estocagem de pelotas, Pátios de armazenamento.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Especificações Técnicas do Porto .....	27
<b>Tabela 2</b> - Instâncias de Teste consideradas.....	30
<b>Tabela 3</b> - Dimensões dos Pátios A, B,C .....	31
<b>Tabela 4</b> - Parâmetros principais dos navios .....	31
<b>Tabela 5</b> - Parâmetros principais das pilhas .....	32
<b>Tabela 6</b> - Resultados obtidos pelo solver CPLEX .....	43
<b>Tabela 7</b> - Sequenciamento de navios do Grupo 1 proposto pelo solver CPLEX .....	45
<b>Tabela 8</b> - Sequenciamento de navios do Grupo 2 proposto pelo solver CPLEX .....	50

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Representação do BAP discreto, contínuo e híbrido.....	16
<b>Figura 2</b> - Etapas para execução do estudo .....	21
<b>Figura 3</b> - Evolução da movimentação de SH4:2601 no Porto de Ubu.....	24
<b>Figura 4</b> - Evolução das atracções para a carga SH4:2601 no Porto de Ubu .	24
<b>Figura 5</b> - Tempos Médios no Porto de Ubu, para o ano de 2023.....	25
<b>Figura 6</b> - Vista aérea da planta de processamento da Pelotizadora em Anchieta (ES) .....	26
<b>Figura 7</b> - Pátios de estocagem de pelotas da Pelotizadora no Porto de Ubu...	27
<b>Figura 8</b> - Representação gráfica das balizas nos pátios .....	28
<b>Figura 9</b> - Roteamento de Veículos Múltiplos Depósitos .....	33
<b>Figura 10</b> - Representação gráfica dos principais parâmetros e variáveis de decisão relacionadas às pilhas.....	34
<b>Figura 11</b> - Representação gráfica dos conjuntos aos navios e berços .....	36
<b>Figura 12</b> - Análise da escolha do primeiro navio a atracar.....	46
<b>Figura 13</b> - Análise dos tempos de espera para atracção em relação aos navios 5 e 9 .....	48
<b>Figura 14</b> – Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 1 .....	49
<b>Figura 15</b> - Comparação dos atrasos totais (pilhas e navios) do Grupo 1 x Grupo 2 .....	51
<b>Figura 16</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 16 .....	52
<b>Figura 17</b> - Variação dos atrasos das pilhas em relação aos valores de $\alpha$ e $\beta$ para o Grupo 1 .....	54
<b>Figura 18</b> - Variação dos atrasos das pilhas em relação aos valores de $\alpha$ e $\beta$ para o Grupo 2 .....	54
<b>Figura 19</b> - Variação dos atrasos nas atracções dos navios em relação aos valores de $\alpha$ e $\beta$ para o Grupo 1 .....	55
<b>Figura 20</b> - Variação dos atrasos nas atracções dos navios em relação aos valores de $\alpha$ e $\beta$ para o Grupo 2.....	56
<b>Figura 21</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 2	

.....	72
<b>Figura 22</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 3 .....	73
<b>Figura 23</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 4 .....	74
<b>Figura 24</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 5 .....	75
<b>Figura 25</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 6 .....	76
<b>Figura 26</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 7 .....	77
<b>Figura 27</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 8 .....	78
<b>Figura 28</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 9 .....	79
<b>Figura 29</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 11 .....	80
<b>Figura 30</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste de Teste 12 .....	80
<b>Figura 31</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 13 .....	81
<b>Figura 32</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 14 .....	81
<b>Figura 33</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 15 .....	82
<b>Figura 34</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 17 .....	82
<b>Figura 35</b> - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 18 .....	83

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Objetivos Gerais .....	13
1.1.2	Objetivos Específicos .....	13
1.2	Justificativa .....	13
1.3	Estrutura do Trabalho .....	14
2.	REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
3.	METODOLOGIA DE PESQUISA.....	21
4.	PROBLEMA ESTUDADO E INSTÂNCIAS DE TESTE UTILIZADAS .....	23
5.	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO .....	33
6.	RESULTADOS E ANÁLISES.....	43
7.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
	APÊNDICE 1 – CÓDIGO PYTHON PARA APRESENTAÇÃO GRÁFICA DA ALOCAÇÃO DAS PILHAS NOS PÁTIOS.....	65
	APÊNDICE 2 – CÓDIGO PYTHON PARA APRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VARIAÇÃO DOS ATRASOS DE ACORDO COM $\alpha$ E $\beta$ .....	69
	APÊNDICE 3 – FIGURAS .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro desempenha um papel crucial no desenvolvimento industrial de qualquer país. Sendo a principal matéria-prima na produção de aço, ele é amplamente utilizado na fabricação de máquinas e equipamentos, na construção civil e na indústria de bens de consumo (Lamoso, 2015).

Em 2023, a produção de minério de ferro alcançou cerca de 2,5 bilhões de toneladas métricas, destacando-se como uma das *commodities* minerais mais produzidas globalmente. No mesmo ano, a Austrália liderou a produção com 960 milhões de toneladas métricas, seguida pelo Brasil, com 440 milhões de toneladas métricas. Ambos os países também se destacaram por possuírem as maiores reservas de minério de ferro do mundo: a Austrália detém aproximadamente 58 bilhões de toneladas de minério bruto, enquanto o Brasil possui cerca de 34 bilhões de toneladas de minério bruto, consolidando-se como líderes mundiais na disponibilização dessa matéria-prima essencial para a indústria siderúrgica (Statista, 2023).

Sob essa ótica, nota-se que a indústria de minério de ferro apresenta grande destaque no cenário nacional, sendo responsável pela maior receita brasileira da indústria brasileira (Portela, 2023). Dentre as empresas que têm destaque nessa área, a Samarco apresenta relevância, tendo em 2023 produzido 9,4 milhões de toneladas de pelotas e finos de minério de ferro (Samarco, 2023).

O beneficiamento de minérios é uma etapa que envolve diversos procedimentos destinados a purificar o minério, modificar sua granulometria, sua forma ou a concentração relativa dos minerais presentes, sem alterar a constituição química ou física dos minerais (Luz; Lins, 2010). Os produtos resultantes do processo de beneficiamento apresentam diferentes características e granulometrias. Os finos de minério de ferro, conhecidos como *Pellet Feed*, possuem dimensões variando entre 0,015 mm e 6,3 mm.

Contudo, devido à sua granulometria, essas partículas não podem ser

empregadas diretamente nos altos fornos. Por isso, submetem-se a um processo denominado pelotização, que consiste na aglomeração das partículas ultrafinas de minério de ferro, culminando na formação das pelotas, que se apresentam como esferas com granulometria e qualidade adequadas. Essas pelotas são utilizadas como principal carga de alimentação dos fornos de redução, visando à produção do ferro primário.

Dessa maneira, ressalta-se que o processo de produção das pelotas se dá de maneira contínua, em que, uma vez que ocorre o início do processo de produção de um respectivo lote, essa atividade não pode ser interrompida. Assim, é importante que haja planejamento e coordenação dos processos (Braga, 2020).

Além disso, sob uma perspectiva logística, vale citar que esse insumo necessita de armazenagem em ambientes específicos do pátio para produtos acabados. Tais áreas apresentam capacidades baseadas em suas respectivas dimensões, de maneira que deve sempre haver um equilíbrio entre o que é produzido e o espaço disponível para a estocagem. Deve-se garantir que, antes de iniciar a produção de um novo lote, haja espaço em pátio disponível para tal armazenagem.

No que tange ao escoamento desse produto, vê-se que as ferrovias se tornam cruciais para conectar as áreas mineradoras aos portos, os quais servem como ponte para o carregamento de navios graneleiros que transportam a carga para o comércio internacional. Dessa maneira, o planejamento da chegada dos navios deve estar alinhado com a liberação de espaço no pátio para a produção contínua dos lotes de pelotas, garantindo a continuidade do processo produtivo e evitando interrupções nas pelotizadoras. Portanto, a gestão eficiente do espaço de estocagem é fundamental para evitar hiatos na produção das pelotas e evitar perdas financeiras (Braga, 2020).

Sob essa perspectiva, é notável que atenuar o entrave de equilíbrio entre os tempos de produção e estocagem das pilhas com a data estimada de chegadas dos navios, designada de *Estimated Time of Arrival* (ETA), se torna um grande desafio no âmbito da gestão e logística portuária.

Entender de forma clara qual a melhor escolha de ocupação dos pátios pelas respectivas pilhas e a sequência em que devem atracar os navios, levando em consideração a otimização da liberação dos pátios e o tempo de espera para atracação do navio, se torna importante objetivo a ser alcançado pelos gestores dos complexos portuários.

No presente trabalho, é proposta uma modelagem matemática que busca associar a questão do planejamento das localizações das cargas nos pátios, denominada na literatura como *Yard Assignment Problem* (YAP), e o planejamento da sequência de atracação dos navios, proposto como *Berth Allocation Problem* (BAP).

O BAP lida com a determinação de em quais berços os navios que chegam ao porto devem atracar e quando isso deve ocorrer (Guo *et al.*, 2024). Já o YAP envolve designar a melhor maneira de posicionar cargas nos pátios de armazenamento de portos ou centros de distribuição.

Portanto, diferente dos estudos presentes na literatura, os quais são apresentados no Referencial Teórico, este estudo propõe uma análise de sensibilidade entre as variações na priorização do tempo de espera para a formação das pilhas de minério e o tempo de espera dos navios, ajudando o gestor portuário na tomada de decisões quanto à priorização entre a produção das pelotas e os atrasos na atracação de navios. Para isso, utiliza-se uma ferramenta que emprega o *Vehicle Routing Problem* (VRP) como método que integra o planejamento da fila de navios, para determinar a alocação das pilhas nos pátios de estocagem. Para isso, será utilizado como objeto de estudo o Porto de Ubu, terminal marítimo localizado no município de Anchieta, no estado do Espírito Santo. Esse porto pertence à empresa Samarco Mineração S/A.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivos Gerais

Analisar a sensibilidade entre as prioridades do tempo de espera na formação da pilha de minério e o tempo de espera dos navios, por meio do uso de ferramenta matemática que foque na distribuição dos lotes de pelotas de minério nos pátios de um porto, integrando-a aos horários de chegada, atracação e desatracação dos navios.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

No que diz respeito aos objetivos específicos, tem-se:

- Elaborar modelo computacional para apoio a tomada de decisão do gestor portuário entre priorizar a produção de pelotas ou o não atraso do navio;
- Elaborar Instâncias de Teste para o modelo com base nas informações do Porto de Ubu, objeto de estudo do trabalho;
- Estruturar uma ferramenta computacional para exibir graficamente a alocação das pilhas nos pátios.

## 1.2 Justificativa

As questões ligadas ao mau gerenciamento de infraestrutura e logística portuária têm sido fatores determinantes para a influenciar em atrasos e prejuízos de exportação e competição no mercado internacional (Mourão, 2022).

Sob essa perspectiva, é notório que um gerenciamento ineficiente dentro do contexto do porto pode acarretar em pausas no processo de produção de pelotas de minério, atividade essa que deve ser evitada e que gera prejuízos financeiros, como o pagamento de *demurrage* - sobreestadia do navio ou do equipamento em relação ao acordado no contrato de arrendamento (Parreiras, 2012). Tais prejuízos englobam também em desgastes mercatórios, como rompimento de acordos comerciais (contratos).

Dessa maneira, a temática de estudo deste projeto de graduação se torna extremamente pertinente, no contexto atual, uma vez que foca em entender questões reais e propor análises estratégicas, baseada em modelagem matemática. Além também de atingir uma lacuna científica, por meio de ferramenta que associe o BAP com o *Vehicle Routing Problem with Multi-Depots* (VRP-MD).

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

Com o propósito de atender aos objetivos do trabalho, o conteúdo a ser desenvolvido está estruturado em seis capítulos, englobando o atual capítulo introdutório (Capítulo 1), onde são delineadas as considerações iniciais, os objetivos, a justificativa do assunto e a organização do trabalho.

No Capítulo 2, será apresentada uma revisão bibliográfica abordando os conceitos relacionados ao problema em questão, discorrendo sobre o *Berth Allocation Problem* (BAP), *Yard Assignment Problem* (YAP) e *Vehicle Routing Problem* (VRP).

O Capítulo 3 discorrerá sobre a metodologia adotada para a realização do estudo, detalhando as etapas que foram executadas ao longo do processo.

O Capítulo 4 descreverá o problema abordado neste trabalho, bem como a elaboração das Instâncias de Teste utilizadas na pesquisa.

O Capítulo 5 se destina a descrever o modelo matemático proposto para análise do problema.

No Capítulo 6, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, por meio da aplicação do modelo proposto nas Instâncias de Teste desenvolvidas. Busca-se, então, avaliar os resultados comparando as variações de Instâncias de Teste rodadas.

Por fim, o Capítulo 7 trará as conclusões fundamentadas nas análises dos

resultados, as principais sugestões para futuros trabalhos de continuidade da pesquisa e as referências bibliográficas utilizadas.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

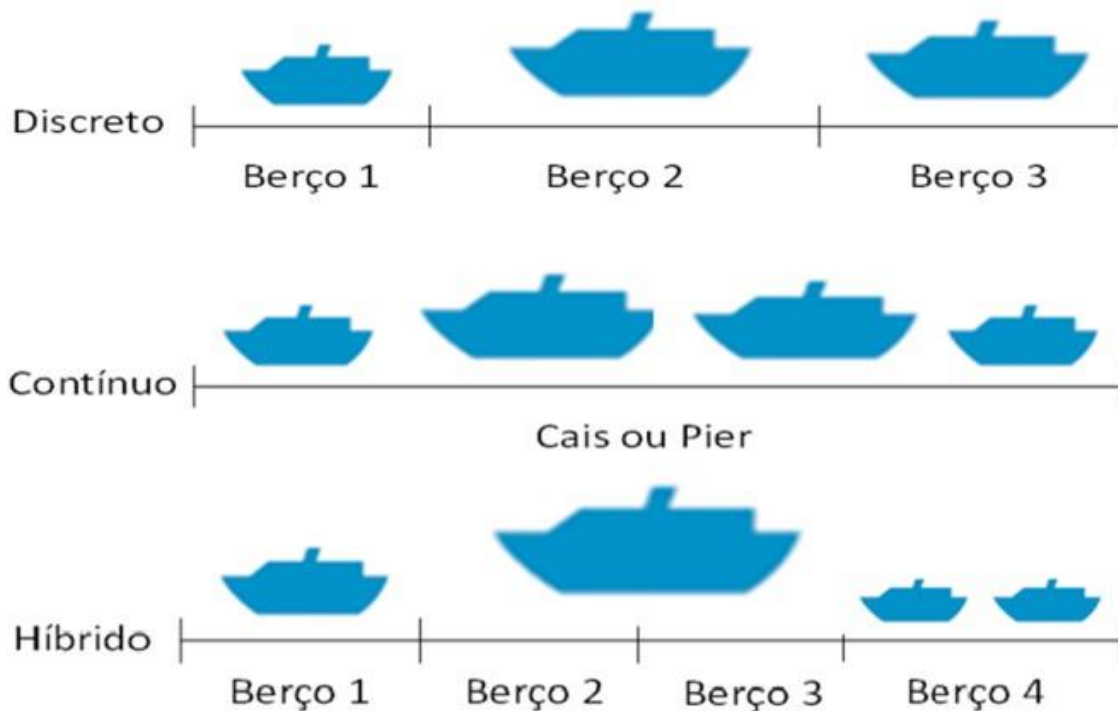
O *Berth Allocation Problem* (BAP) compreende a determinação eficaz das posições de atracação disponíveis para os navios que chegam ao porto ao longo de um horizonte de planejamento específico. Dentro desse contexto, as decisões fundamentais no BAP incluem a determinação tanto do local quanto do momento ideal para que os navios sejam atracados (Cordeau *et al.*, 2005).

A maioria dos estudos relacionados ao BAP tem como principal objetivo a minimização do tempo de permanência das embarcações no porto. De modo geral, os diversos modelos que abordam o BAP consideram dois tipos de restrições: as restrições temporais e espaciais (Bierwirth; Meisel, 2010).

As restrições temporais se referem à data de chegada dos navios no porto e a data de atracação. A chegada dos navios no porto pode ser classificada em estática ou dinâmica. Na chegada estática, presume-se que os navios já estão posicionados na área de fundeio, preparados para atracação. Por outro lado, na chegada dinâmica, os navios só podem atracar após o horário previsto para a sua chegada ao porto, sendo proibido atracar antes do horário designado (Bierwirth; Meisel, 2010; Imai; Nishimura; Papadimitriou; 2001).

Já as restrições espaciais estão relacionadas ao *layout* do cais acostável do porto, à profundidade da água (calado admissível) e ao tamanho do navio (Cordeau *et al.*, 2005). Assim, o BAP é referente ao arranjo físico do local de atracação do navio, podendo ser categorizado como BAP com *layout* discreto (BAPD), BAP com *layout* contínuo (BAPC) e BAP com *layout* híbrido (BAPH) (Rodrigues *et al.*, 2016).

**Figura 1** - Representação do BAP discreto, contínuo e híbrido.



Fonte: Rodrigues *et al.*, (2016)

Para o caso sobre BAPD, a área de atracação é segmentada em várias partes chamadas de berços, onde apenas um navio pode ser atendido por vez. Cada navio deve respeitar a restrição de que seu comprimento não pode exceder o comprimento do berço onde ele está atracado (Rodrigues *et al.*, 2016).

No BAPC, a área de atracação não é segmentada, permitindo que os navios possam atracar em qualquer ponto ao longo do cais ou píer (Bierwirth; Meisel, 2010).

Por fim, no BAPH, há o particionamento da área acostável em berços, equivalente ao BAPD, entretanto há possibilidade de que um navio de porte maior ocupe múltiplos berços, e um berço pode ser compartilhado por mais de um navio.

Sob essa ótica, ressalta-se que diversos estudos têm explorado diferentes aspectos e particularidades no que tange ao BAP. Nesse contexto, há diferentes formulações matemáticas que contemplam tanto casos discretos quanto

contínuos, focando também numa perspectiva real.

No estudo realizado, é tomada a premissa que de um navio pode ser atendido por vez no berço, ou seja, o cenário BAPD. Isso se dá, principalmente, porque, pela literatura, portos que movimentam carga a granel possuem restrição espacial discreta, diferente de portos que operam cargas em contêiner, por exemplo, que possuem restrição espacial híbrida ou contínua.

Diversos são os estudos relacionados à temática do *Berth Allocation Problem*. Rodrigues *et al.* (2015) desenvolveram modelo matemático que tem como objetivo contribuir com o planejamento da atracação de navios nos portos, em especial, os que têm a característica de ter descontinuidades ao longo do cais oriundas seja pela expansão de um trecho que ficou mais largo do que o restante seja pelo porto ter duas margens. O modelo proposto foi aplicado nos terminais públicos do Porto de Vitória (Cais Comercial de Vitória e Terminal CODESA).

Rodrigues *et al.* (2016) elaboraram um modelo matemático para solucionar o problema de alocação de berços em portos com limitações operacionais de carga ao longo do cais.

Bacalhau (2016) propôs estudar o BAPD e BAPC, primeiramente, elaborando o modelo de maneira discreta e, posteriormente, ampliando-o para abranger o cenário contínuo, visando sua utilização em situações práticas. Utilizou-se dados disponibilizados pela Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA), para o modelo contínuo.

Nascimento (2016) apresentou um modelo de simulação discreta para o caso de um porto de exportação de produtos a granel, tomando como base o Terminal de Ponta da Madeira.

Banos *et al.* (2016) propuseram um modelo matemático e uma meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) para resolver o Problema de Alocação de Berços com Múltiplas Cargas (PAB-MC), com base no modelo desenvolvido por Cordeau *et al.* (2005). O estudo foi realizado utilizando os dados do Complexo Portuário de

Tubarão.

Mazioli *et al.* (2019) desenvolveram um modelo matemático e uma meta-heurística para planejar a melhor ordem de atracação dos navios e determinar a posição de cada navio no cais, com base nas cláusulas do *Charter Party*. O estudo foi aplicado ao Terminal Portocel, situado no porto de Barra do Riacho, em Aracruz, que possui um cais contínuo e opera sob um regime de chegadas dinâmicas, caracterizando um problema de Planejamento de Atracação de Navios com Cais Contínuo e Chegadas Dinâmicas (PABC-D).

Xiang e Liu (2021) desenvolveram um modelo de otimização quase robusto (ARO) para resolver o problema integrado de alocação de berços e atribuição de guindastes de cais discretos integrados, introduzindo a função de penalização.

Cheimanoff *et al.* (2022) propuseram um modelo de programação linear inteira mista para modelar e resolver o BAP em terminais de granéis com múltiplos cais contínuos, considerando as restrições operacionais e as variações de maré específicas.

Chang *et al.* (2024) estudaram o BAP em cenários com cais contínuo e chegadas dinâmicas, propondo um modelo matemático com base em empacotamento bidimensional para atingir uma solução globalmente ótima. O objetivo principal do modelo foi reduzir o tempo de espera e conclusão do serviço das embarcações. Dragović *et al.* (2024) realizaram uma análise bibliométrica abrangente e avaliaram estudos de alto impacto sobre a alocação de berços em terminais marítimos. Song, Ji e Yu (2024) estudaram o *Multi-port Berth Allocation Problem* (MBAP), enriquecendo o problema tradicional de BAP com a *Vessel Speed Optimization* (VSO). Assim, propuseram um novo modelo de *Mixed-integer Linear Programming* (MILP) para o MBAP e um algoritmo inovador de *Variable Neighborhood Search* (VNS) para resolver o problema proposto.

Apesar de vasta literatura sobre o BAP, o referencial teórico em que associa o BAP com o YAP ainda está em ascensão e é tido como tendência, haja vista a eficiência deste nas operações portuárias (Bierwirth; Meisel, 2010). Robenek *et*

*al.* (2014) utilizaram como base o trabalho realizado por Umang *et al.* (2013), em que foi abordado o BAPH em um terminal de múltiplos tipos de granéis, visando a minimização dos tempos totais de serviço aos navios. Entretanto, Robenek *et al.* (2014) estenderam o trabalho por meio da integração do BAP com o YAP. O trabalho permitiu designar qual tipo de carga será alocada em cada área do pátio durante o horizonte de planejamento.

Braga (2020) desenvolveu um modelo matemático para otimizar a disposição dos lotes de pelotas de minério de ferro nos pátios de um porto, considerando a previsão de produção da usina pelotizadora e o planejamento das chegadas e atracações dos navios. Barbosa (2020) introduziu uma meta-heurística para integrar o planejamento da fila de navios e a alocação de áreas no pátio de armazenagem em um porto de carga a granel, com o propósito de atender à capacidade de produção de uma usina de pelotização, inspirado no estudo anterior de Braga (2020).

Cheimanoff *et al.* (2023) desenvolveram métodos exatos e metaheurísticas para solucionar o problema integrado de programação de produção, alocação de berços e pátio de armazenamento. O estudo foi realizado em um complexo industrial marítimo localizado no Marrocos, especializado na produção e exportação de fertilizantes. Este trabalho compreendeu a elaboração de um modelo eficaz de programação linear inteira mista para situações de menor porte, junto com uma abordagem metaheurística que produz soluções de qualidade para contextos industriais mais complexos. Guo *et al.* (2024) propuseram um *Mixed-integer Linear Programming* com o intuito de explorar uma questão que envolve a alocação de berços, a designação de pátios e a alocação de guindastes de cais em vários terminais cooperativos.

No estudo realizado por Cordeau *et al.* (2005), foram abordadas as duas versões do BAP, o caso discreto e o caso contínuo. O DBAP foi modelado como um *Vehicle Routing Problem with Multi-Depots* (VRP-MD) e, para resolver este modelo, foi desenvolvida uma meta-heurística *Tabu Search* (TS). As instâncias usadas no estudo foram criadas utilizando dados de tráfego e alocação de berços coletados no Porto de Gioia Tauro. Os resultados da heurística foram comparados

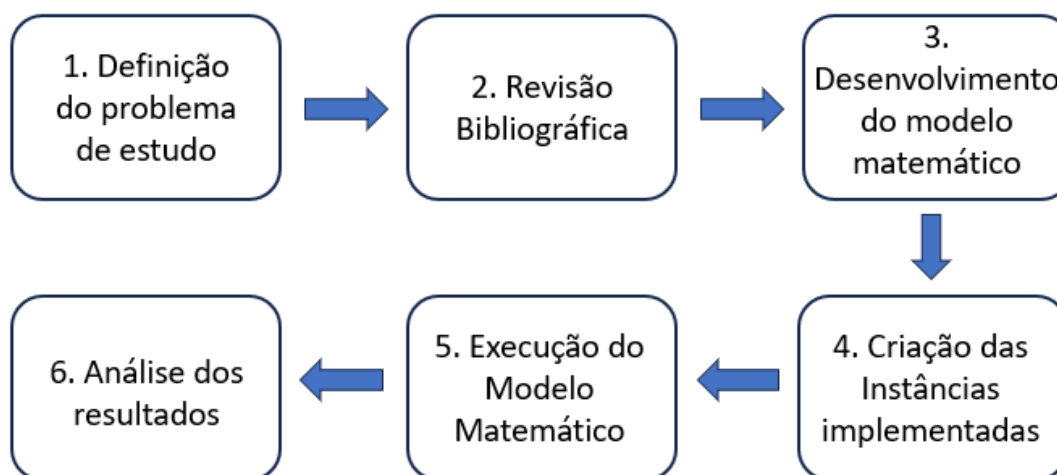
com os do modelo resolvido pelo *solver* CPLEX. A meta-heurística alcançou soluções ótimas em instâncias pequenas e, em instâncias maiores, superou as soluções do *solver* dentro dos limites de tempo estipulados.

Após a realização de uma revisão teórica, objetivou-se criar uma ferramenta matemática que realizará uma análise de sensibilidade, considerando a priorização entre o tempo de espera para a formação da pilha e o tempo de espera dos navios. Ela servirá de apoio os gestores portuários na decisão de priorizar a produção de pelotas ou evitar atrasos nos navios e determinará a alocação dos lotes de pelotas nos pátios e o planejamento da fila de navios para atracação.

### 3. METODOLOGIA DE PESQUISA

No presente t3pico, ser3o explicados os est3gios de desenvolvimento do estudo. A pesquisa foi conduzida em seis etapas, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Etapas para execu3o do estudo



Fonte: Autoras (2024).

Como mencionado na introdu3o, o objeto de estudo (1) 3 o Porto de Ubu, pertencente 3 empresa Samarco Minera3o S/A. No cap3tulo 4, foi apresentada a descri3o detalhada desse problema, com 3nfase no processo produtivo de pelotas de min3rio de ferro no porto, conforme descrito por Braga (2020).

A revis3o bibliogr3fica (2) consistiu em um levantamento das pesquisas publicadas sobre os temas relacionados ao problema em quest3o. Para realiz3-la, foram consultados recursos como peri3dicos CAPES, *Google Scholar* e *Science Direct*. Inicialmente, foram utilizadas palavras-chave como “*Berth Allocation*”, “*Berth Assignment*” e “Planejamento da fila de navios” para encontrar estudos relacionados ao BAP. Al3m disso, termos como “*Yard Assignment Problem*” e “*Yard Allocation*”, foram empregados para identificar estudos sobre a atribu3o de 3reas nos p3tios de armazenamento, em associa3o com o BAP.

O modelo matem3tico proposto (3) foi inspirado em Braga (2020), que objetiva reduzir tanto o tempo total de perman3ncia dos navios no porto quanto o tempo total de disponibiliza3o das 3reas nos p3tios para os lotes de pelotas. No entanto,

para a modelagem desenvolvida, o BAP foi analisado como um *Multiple Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP), vertente diferente do que foi proposto por Braga (2020).

Para avaliar o modelo desenvolvido, foram estabelecidos parâmetros gerais, assim como parâmetros específicos tanto para os navios quanto para as pilhas. Nesse contexto, foi usado como base os dados das Instâncias de Teste desenvolvidas por Braga (2020) para montar as implementadas neste trabalho. O objetivo foi realizar testes matemáticos para reproduzir um cenário próximo do real ao objeto de estudo, o Porto de Ubu. Em cada Instância de Teste, variaram-se os valores atribuídos aos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , que priorizam, respectivamente, o não atraso da produção ou do navio, assim como o tamanho do pátio, enquanto os demais parâmetros foram mantidos fixos.

Após definir os parâmetros iniciais e definir as Instâncias de Teste a serem utilizadas, foram realizados experimentos computacionais (5) utilizando o *solver* IBM CPLEX na versão 22.1.0. Esses experimentos foram executados em um computador equipado com um processador Intel Xeon Silver 4116, com dois processadores operando a 2.10 GHz, 16 núcleos e 128 GB de memória RAM, disponível no Laboratório de Modelagem Matemática e Meta-Heurísticas Aplicadas à Engenharia de Produção (LAMMEP), localizado na Universidade Federal do Espírito Santo – Campus Goiabeiras.

Por fim, os resultados obtidos (6) foram apresentados e discutidos no Capítulo 6 com o objetivo de avaliar e confirmar a eficácia do modelo proposto.

#### 4. PROBLEMA ESTUDADO E INSTÂNCIAS DE TESTE UTILIZADAS

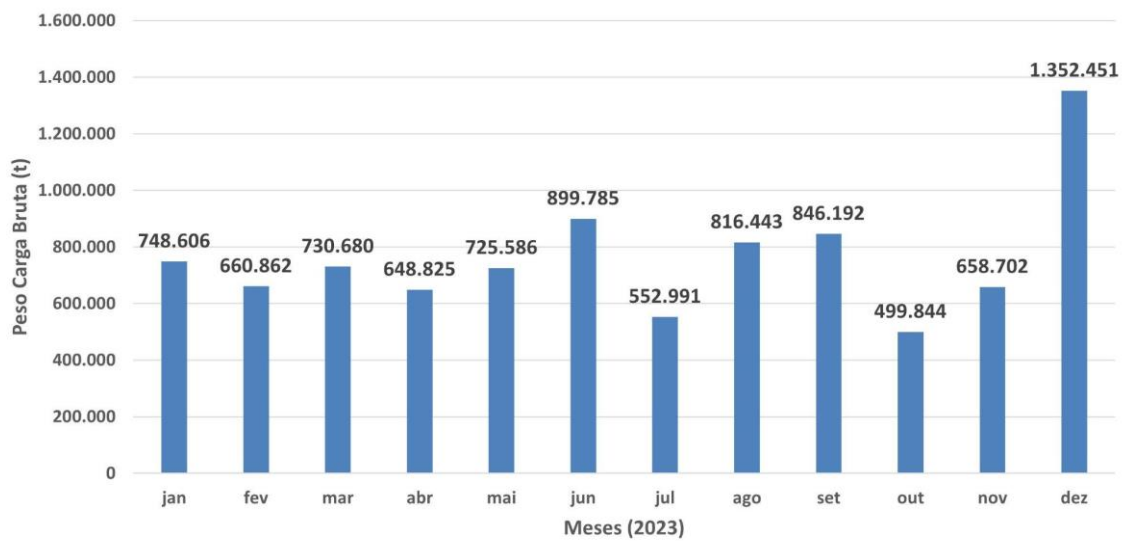
Neste capítulo, será abordado o objeto de estudo deste problema, que diz respeito ao Porto de Ubu, propriedade da empresa Samarco. Além disso, será discutida a elaboração das Instâncias de Teste utilizadas nesta pesquisa.

##### 4.1 PROBLEMA ESTUDADO

A Samarco é uma empresa brasileira do setor de mineração, com operações tanto no estado do Espírito Santo quanto em Minas Gerais, cujo principal produto são as pelotas de minério de ferro, principal matéria-prima utilizada na produção do aço (Samarco, 2024a).

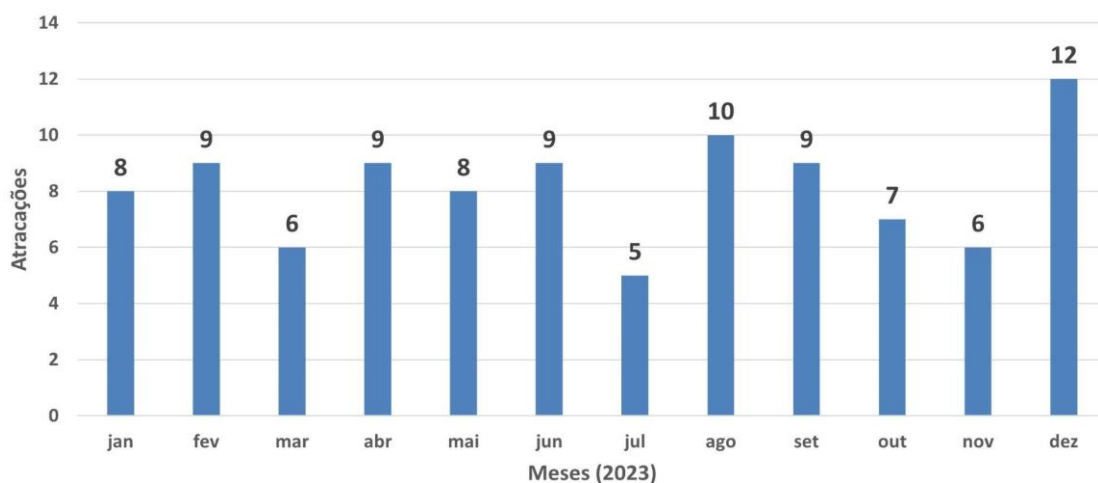
Nesse sentido, o terminal marítimo Porto de Ubu possui pátios de estocagem alfandegados para a venda e recebimento de insumos, um píer principal com dois berços de atracação exclusivos, além de um atracadouro para diversas cargas. O porto está apto a receber navios de até 210 mil toneladas, e o seu *shiploader* possui uma capacidade nominal de cerca de 12 mil toneladas por hora (Samarco, 2024b).

No que diz respeito à evolução de movimentação dos produtos de Código SH4 - 2601: Minérios de ferro e seus concentrados, incluídas as pirites de ferro ustuladas (cinzas de pirites), consoante à Agência Nacional de Transportes Aquaviários, no ano de 2023, a movimentação portuária do Porto de Ubu foi de 9.140.967 toneladas, um crescimento de 11,13% em relação ao ano anterior (8.225.494). Assim, os valores de peso de carga bruta por mês são apresentados na Figura 3.

**Figura 3** - Evolução da movimentação de SH4:2601 no Porto de Ubu

Fonte: Adaptado de ANTAQ (2024).

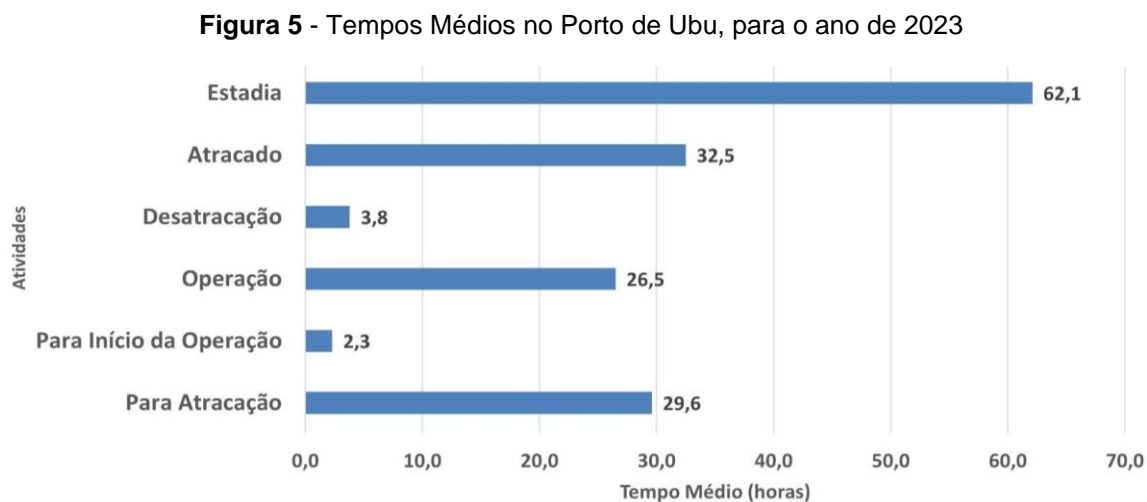
Além disso, a evolução das atracções com movimentação de carga do Porto foram consideradas para a elaboração das Instâncias de Teste do modelo matemático, para que fossem seguidos números realistas. Nesse sentido, a média desse indicador é de oito atracções por mês para o ano de 2023, como segue na Figura 4.

**Figura 4** - Evolução das atracções para a carga SH4:2601 no Porto de Ubu

Fonte: Adaptado de Estatístico Aquaviário - ANTAQ (2024).

Vale citar também os tempos médios de acordo com a atividade a ser realizada no porto, indicadores cruciais para a gestão eficiente dos portos. Esses indicadores fornecem informações detalhadas sobre a eficiência operacional,

ajudando na tomada de decisões estratégicas e na otimização dos processos portuários. Os dados relacionados ao Porto de Ubu são evidenciados na Figura 5.



Fonte: Adaptado de Estatístico Aquaviário - ANTAQ (2024).

No que diz respeito ao processo produtivo da Samarco, nota-se que ele começa com a extração e o beneficiamento do minério de ferro no Complexo do Germano, situado nos municípios de Mariana e Ouro Preto, em Minas Gerais. Após a extração, o minério de ferro é transportado por correias até a etapa de peneiramento e britagem. Durante o peneiramento, o minério é classificado conforme o tamanho dos grãos e, caso o material não esteja no tamanho adequado, ele passa pela britagem, onde é fragmentado até atingir a granulometria desejada (Samarco, 2024a).

Em seguida, o material proveniente do peneiramento e britagem é armazenado nas pilhas de regularização. Essas pilhas alimentam o concentrador, onde ocorre o processo de enriquecimento do minério, cujo objetivo é aumentar a concentração e o teor de ferro. O minério em estado de polpa, contendo 30% de água, é então bombeado pela estação de bombas até os minerodutos, que o transportam de Minas Gerais até o Complexo de Ubu, em Anchieta, no Espírito Santo (Samarco, 2024).

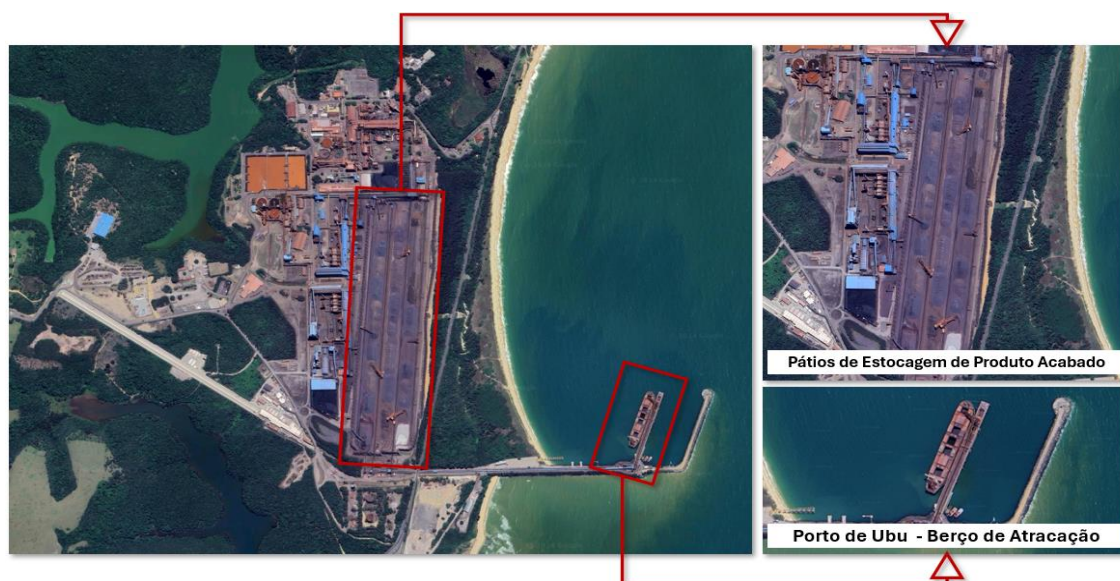
Em Ubu, a polpa de minério de ferro é densificada pelo processo de espessamento e, em seguida, encaminhada para os tanques de homogeneização. Nos tanques, a polpa passa por filtragem, o que resulta na separação da água do minério de ferro moído. Para assegurar a uniformidade dos grãos, o minério é

conduzido para prensas em formato de rolos. Após essa etapa, o material é armazenado e misturado com insumos necessários para prepará-lo para o processo de produção das pelotas (Samarco, 2024a).

O processo de pelotização transforma os finos de minério em pelotas com granulometria variando entre 0,010 mm e 0,015 mm e, durante o manuseio e a queima das pelotas, ocorre a geração de partículas ultrafinas, que são capturadas pelos precipitadores eletrostáticos, impedindo sua emissão na atmosfera. Neste contexto, nos fornos de endurecimento, as pelotas são queimadas e adquirem as propriedades de endurecimento adequadas para o embarque. Em seguida, são encaminhadas para as peneiras classificadoras, que irão separar as pelotas que estão dentro da faixa de tamanho ideal (Samarco, 2024a).

Por fim, as pelotas são transportadas para o pátio de estocagem, onde serão empilhadas, separadas e armazenadas até o momento do seu escoamento, realizado no Porto de Ubu, com destino ao seu cliente final. A Figura 6 mostra a vista aérea da planta de processamento da Pelotizadora em Anchieta, no Espírito Santo, destacando o porto de Ubu e os pátios de estocagem de produtos acabados (Samarco, 2024a).

**Figura 6** - Vista aérea da planta de processamento da Pelotizadora em Anchieta (ES)



Fonte: Adaptado de Google Maps (2024).

Além disso, o Porto de Ubu possui dois berços (leste e oeste) com capacidades

diferentes, ambos atendidos por um único sistema de carregamento de navios. O estudo de caso em questão avalia atualmente um berço discreto para as Instâncias de Teste. Todavia, o modelo permite a avaliação de múltiplos berços.

**Tabela 1 - Especificações Técnicas do Porto**

<b>Especificações para Navios</b>	<b>Berço Oeste (m)</b>	<b>Berço Leste (m)</b>
Comprimento Total	301,99	225,99
Boca Máxima	52,99	32,35
Calado Máximo Bacia de Evolução	10,20	12,40

Fonte: Adaptado de Samarco (2024).

Ademais, é possível notar que a área de armazenagem das pelotas é formada por três pátios distintos (Pátio A, Pátio B e Pátio C), com uma capacidade total estimada de 1.800.000 toneladas.

**Figura 7 - Pátios de estocagem de pelotas da Pelotizadora no Porto de Ubu**

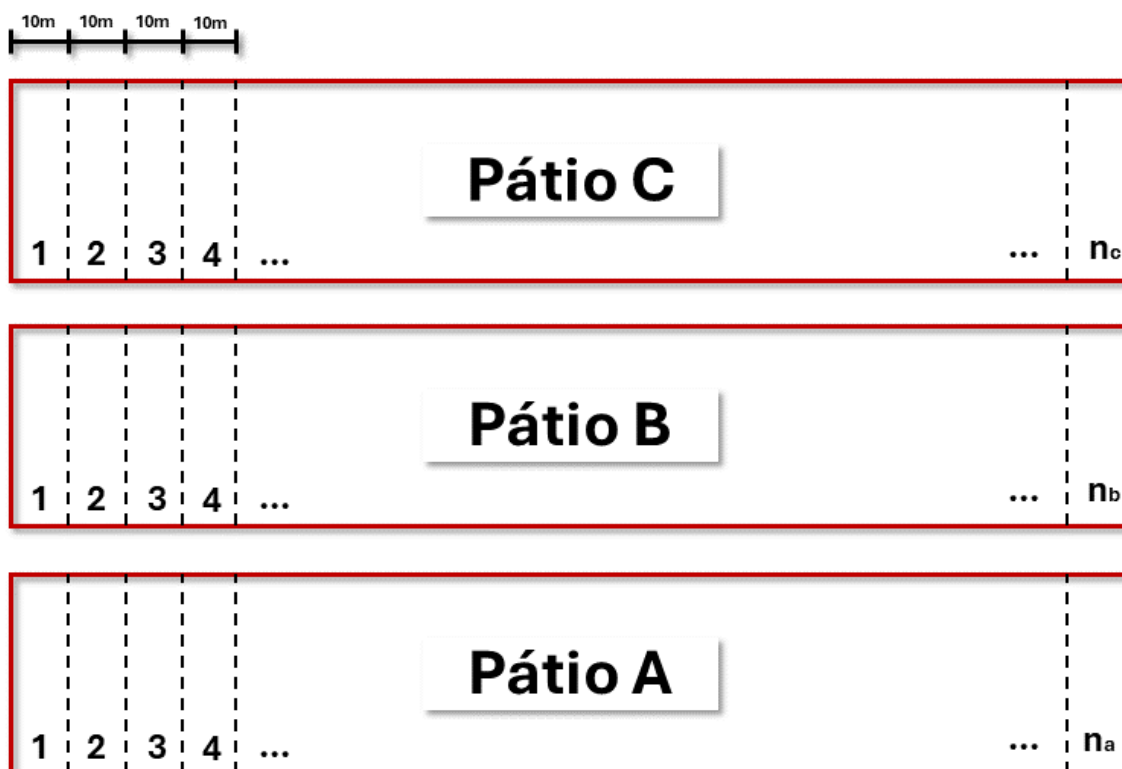


Fonte: Adaptado de Google Maps (2024).

No pátio de um porto, as balizas são estruturas ou marcas utilizadas para demarcar áreas específicas de armazenagem. Elas funcionam como pontos de referência que ajudam a organizar e gerenciar o espaço de forma eficiente. Cada baliza representa uma subdivisão dentro do pátio, permitindo que diferentes lotes de carga sejam separados e identificados com precisão.

Nesse sentido, cada pátio é subdividido em balizas a cada 10 metros. Dependendo do volume, os lotes de pelotas são alocados em uma área demarcada por um conjunto de balizas, sendo que caso um lote ocupe uma fração de uma baliza, é considerado como utilizando a baliza inteira em sua extensão de comprimento, largura e altura (Braga, 2020).

**Figura 8** - Representação gráfica das balizas nos pátios



Fonte: Adaptado de Braga (2020).

Para o modelo matemático, definiu-se que há três pátios numericamente sequenciados, mas discretizados e com limites definidos. O modelo permite também que uma ou mais pilhas sejam alocadas para o mesmo navio, proporcionando maior flexibilidade no uso do pátio. Além disso, o modelo pode ser ajustado para alterar a quantidade de pátios (aumentando ou diminuindo) e modificar a extensão de cada pátio individualmente.

Outra premissa considerada é que o *Estimated Time Of Arrival* (ETA) de cada navio é o mesmo do *Notice Of Readiness* (NOR). Sendo assim, a data estimada em que o navio chegará no porto é a mesma da sua data de prontidão para atracação. São informadas ao modelo as datas de ETA e cabe a ele definir qual a melhor sequência e posições de atracação dos navios no porto.

Para o caso das pilhas de pelotas de minérios, são informadas também para o modelo a data de necessidade de início de formação da pilha e seu respectivo tempo de formação. O modelo responderá com as suas posições e seus momentos de alocação no pátio. É proposto que as pilhas permaneçam no pátio até o momento em que são destinadas ao carregamento no navio de destino.

Ressalta-se que cada navio só pode ser autorizado para atracar após a conclusão da produção e armazenagem do seu lote correspondente. Assim, caso o navio receba mais de uma pilha, sua atracação só se dará assim que ambas estiverem prontas no pátio.

Por fim, é enfatizado o fato de que o modelo busca realizar uma programação eficiente da fila de navios para garantir um fluxo contínuo e ordenado de escoamento da produção. Uma boa gestão da fila também ajuda a minimizar o tempo de espera dos navios, reduzindo custos operacionais e otimizando a utilização dos recursos portuários.

#### 4.2 INSTÂNCIAS DE TESTE UTILIZADAS

Para a criação das Instâncias de Teste, tomou-se como base os dados das instâncias de Braga (2020), para montar aquelas utilizadas no presente trabalho. Sendo assim, são considerados 10 navios, 20 pilhas, 3 pátios e 1 berço discreto para todas as instâncias analisadas, bem como um horizonte de tempo de 800 unidades de tempo (u.t). Para o modelo matemático apresentado, uma unidade de tempo equivale a uma hora.

Estruturou-se, inicialmente, o Grupo 1, onde variou-se 9 vezes os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , os quais priorizavam o não atraso da produção ou do navio, respectivamente, mantendo os demais fixos. O objetivo principal é entender como a variância

desses dois pesos influenciam nas soluções do modelo.

Posteriormente, rodou-se as mesmas 9 Instâncias de Teste, mas com a redução dos pátios pela metade do tamanho (Grupo 2), representado, assim, um cenário real onde os pátios de estocagem são entregues para manutenção. Assim, ao todo, foram analisadas 18 Instâncias de Teste (Tabela 2), com as dimensões em pátio apresentadas na Tabela 3.

Ressalta-se que os valores adotados para os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  seguiram a proposição de uma escala de razão, onde estabeleceu-se um valor baixo, um médio e um alto.

**Tabela 2** - Instâncias de Teste consideradas

Grupo	Instância	Disponibilidade do Pátio	Peso para dar maior ênfase a priorização do não atraso do navio( $\alpha$ )	Peso para dar maior ênfase a priorização do não atraso da formação da pilha ( $\beta$ )
1	1	100%	100	100
	2	100%	100	500
	3	100%	100	1000
	4	100%	500	100
	5	100%	500	500
	6	100%	500	1000
	7	100%	1000	100
	8	100%	1000	500
	9	100%	1000	1000
2	10	50%	100	100
	11	50%	100	500
	12	50%	100	1000
	13	50%	500	100
	14	50%	500	500
	15	50%	500	1000
	16	50%	1000	100
	17	50%	1000	500
	18	50%	1000	1000

Fonte: Autoras (2024).

**Tabela 3 - Dimensões dos Pátios A, B,C**

<b>Pátio</b>	<b>Limite inferior da Seção do Pátio</b>	<b>Limite Final da Seção do Pátio</b>
<b>Grupo 1</b>		
1	1	100
2	101	200
3	201	300
<b>Grupo 2</b>		
1	1	50
2	51	100
3	101	150

Fonte: Autoras (2024).

Os principais parâmetros considerados em todas as Instâncias de Teste tanto para os navios quanto para as pilhas são apresentados nas Tabela 4 e Tabela 5.

**Tabela 4 - Parâmetros principais dos navios**

<b>Nº Navio</b>	<b>Tempo de Operação (u.t)</b>	<b>Horário de Chegada (ETA) (u.t)</b>
1	28	24
2	18	24
3	30	31
4	31	38
5	30	71
6	20	72
7	25	96
8	18	96
9	30	101
10	20	120

Fonte: Adaptado de Braga (2020).

**Tabela 5 - Parâmetros principais das pilhas**

<b>Nº Pilha</b>	<b>Data de necessidade de início de formação das Pilhas (u.t)</b>	<b>Tempo de Formação da Pilha (u.t)</b>	<b>Qual navio pertence a pilha</b>	<b>Tamanho da Pilha (un)</b>
1	25	23	1	11
2	40	8	2	4
3	29	26	3	12
4	35	27	4	13
5	71	25	5	12
6	87	9	6	4
7	102	18	7	9
8	112	8	8	4
9	100	25	9	12
10	131	13	10	6
11	3	22	1	11
12	34	6	2	3
13	7	22	3	11
14	9	26	4	13
15	47	24	5	12
16	79	8	6	4
17	84	18	7	9
18	106	6	8	3
19	75	25	9	12
20	121	10	10	5

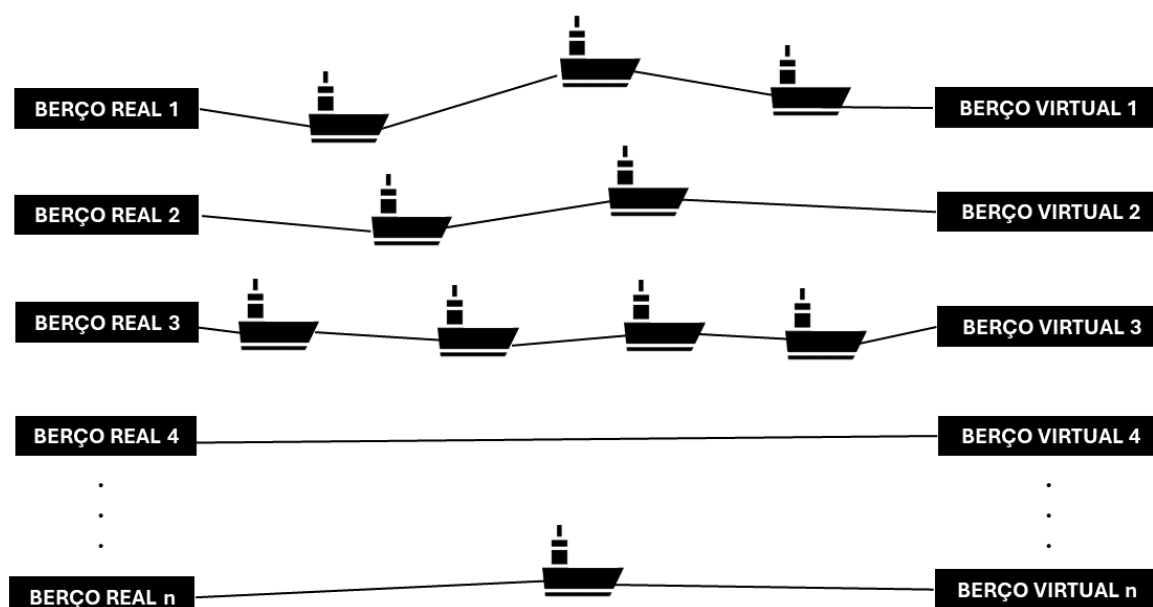
Fonte: Adaptado de Braga (2020).

## 5. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto foi desenvolvido com o fito de verificar a priorização entre o tempo de espera da formação da pilha e o tempo de espera do navio, por meio de uma análise de sensibilidade. Dessa maneira, integra o planejamento da sequência de atracação dos navios previstos para operar no porto de Ubu com a alocação eficiente dos lotes de pelotas nas áreas de pátio de armazenagem. Assim, proporciona ao gestor portuário uma ferramenta que auxilia na tomada de decisão sobre a priorização entre a produção das usinas pelletizadoras e os atrasos na atracação dos navios.

A ferramenta computacional inspira-se em Braga (2020) no que tange ao objetivo de diminuir tanto o tempo total de permanência dos navios no porto quanto o tempo total de disponibilização da área nos pátios para os lotes de pelotas. Entretanto, para a modelagem elaborada, há análise do BAP como um *Multiple Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP), extensão do VRP, consoante Cordeau *et al.* (2005). Sendo assim, cada veículo fictício começa sua rota em um vértice de origem (berço), atende a uma sequência de navios (clientes) e retorna ao vértice de destino (mesmo berço).

Figura 9 - Roteamento de Veículos Múltiplos Depósitos



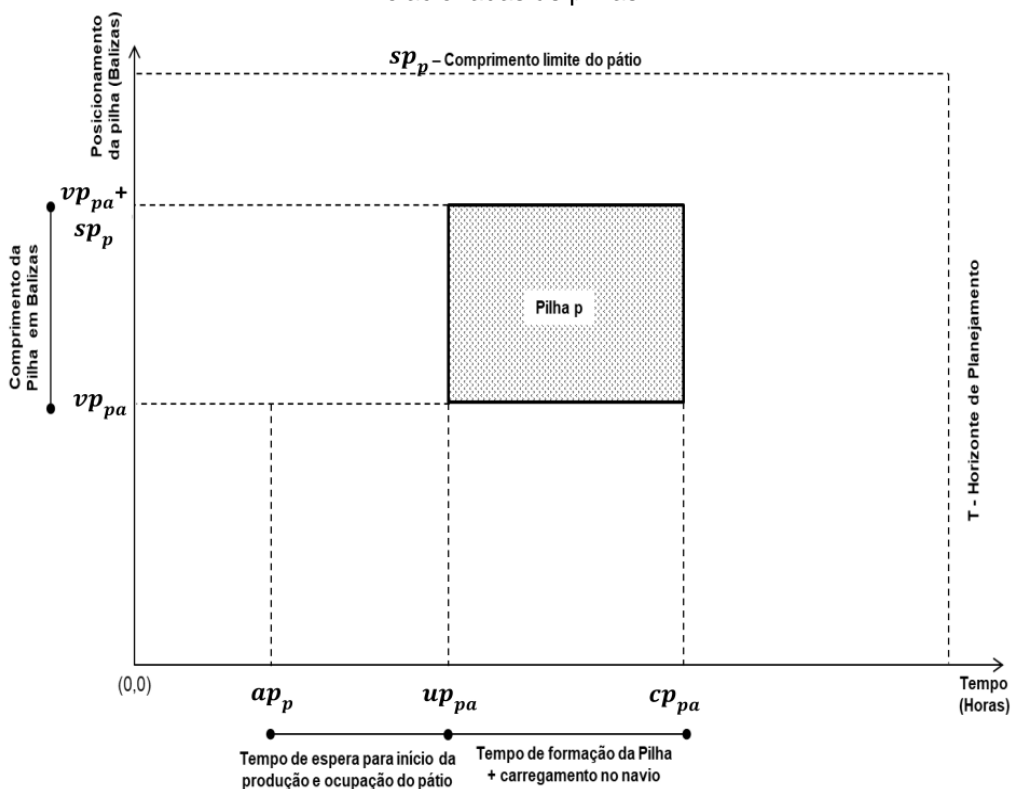
Fonte: Autoras (2024).

Além disso, os principais parâmetros e variáveis de decisão podem ser apresentados em um gráfico espaço-tempo para a parte do modelo referente ao Pátio (Parte II da função objetivo). Uma pilha é representada por um retângulo, cujo comprimento (número de balizas utilizadas) é paralelo ao eixo Y. Também é possível observar a posição de empilhamento da pilha no pátio ( $vp_{pa}$ ).

No eixo X, que representa o tempo, é possível identificar a data de necessidade da alocação da produção da pilha ( $ap_p$ ), o tempo de espera para o início da produção, o momento de início da produção e alocação da pilha no pátio ( $up_{pa}$ ), e o tempo total de formação da pilha e utilização do pátio até o carregamento do navio e liberação da área para uma nova pilha ( $cp_{pa}$ ).

O gráfico (Figura 10) também mostra os limites estabelecidos, como comprimento total do pátio e o horizonte de planejamento. O modelo considera as pilhas como retângulos, e as restrições definidas impedem a sobreposição entre duas pilhas.

**Figura 10** - Representação gráfica dos principais parâmetros e variáveis de decisão relacionadas às pilhas



Fonte: Braga, (2020).

Considerando,  $nn$  como sendo a quantidade de navios e  $nb$  a quantidade de berços, a seguir são apresentados os conjuntos, os parâmetros, as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições.

### Conjuntos

Navios e Berços

$NN$  - conjunto de navios -  $NN = \{nb + 1, \dots, nb + nn\}$ ;

$DR$  - conjunto de berços reais -  $DR = \{1, \dots, nb\}$ ;

$DNV$  - conjunto de navios e berços fictícios -  $DNV = \{nb + 1, \dots, 2 \times nb + nn\}$ ;

$DNR$  - conjunto de berços reais e navios -  $DNR = \{1, \dots, nb + nn\}$ ;

$DT$  - conjunto de berços reais, navios e berços fictícios -  $DT = \{1, \dots, 2 \times nb + nn\}$ .

Pilhas e Pátios

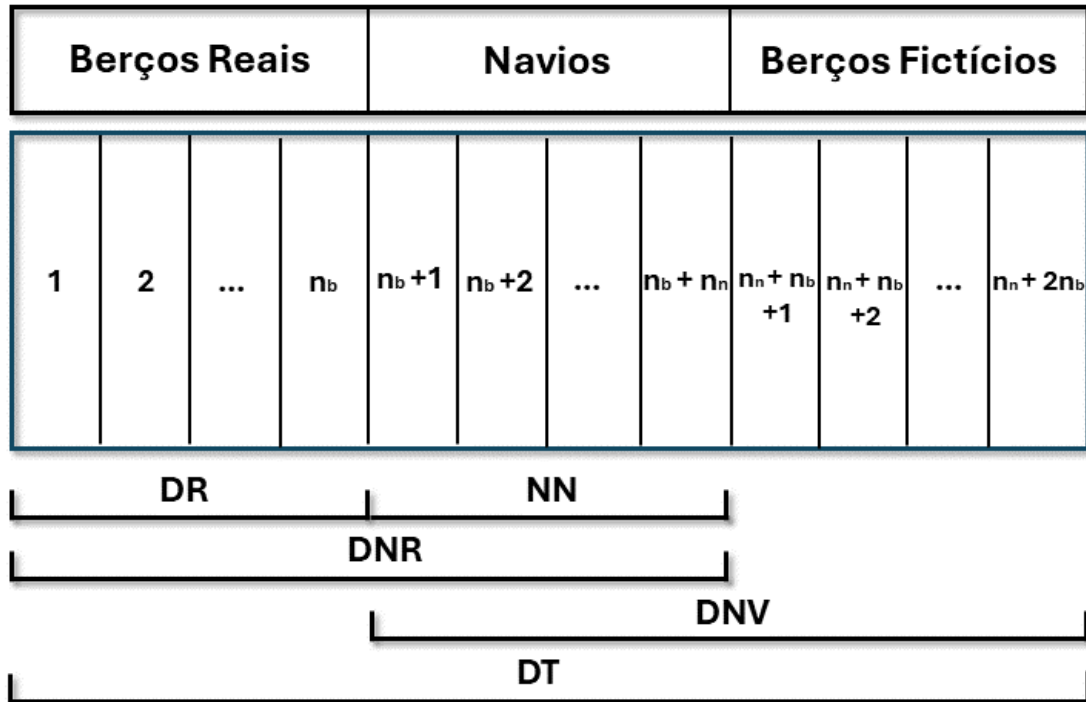
$NP$  - conjunto de pilhas -  $NP = \{1, \dots, np\}$ ;

$LP$  - conjunto de pátios -  $LP = \{1, \dots, npatio\}$ ;

$NT$  - conjunto de tempo -  $DT = \{1, \dots, hp\}$ .

Em relação aos conjuntos referentes aos navios e berços, a Figura 11 apresenta como eles se interrelacionam.

Figura 11 - Representação gráfica dos conjuntos aos navios e berços



Fonte: Autoras (2024).

### Parâmetros

$H_p$  - horizonte de tempo de planejamento;

$M$  - valor muito grande para lógica do modelo;

$\alpha$  - peso utilizado na função objetivo para dar maior ênfase a priorização do não atraso do navio;

$\beta$  - peso utilizado na função objetivo para dar maior ênfase a priorização do não atraso de produção da pilha;

$t_i^k$  - tempo de operação do navio  $i$  no berço  $k$ ;

$a_i$  - horário de chegada (ETA) do navio  $i$ ;

$np$  - quantidade de pilhas;

$n_{patio}$  - número de pátios;

$posip_{lp}$  - limite inicial da seção do pátio  $lp \in LP$  em unidade de pátio (1 baliza);

$posfp_{lp}$  - limite final da seção do pátio  $lp \in LP$  em unidade de pátio (1 baliza);

$pp_p$  - tempo de processamento pilha (alocação da produção)  $p \in NP$  no pátio em unidade tempo;

$pqnv_p$  - define o número do navio ao qual a pilha  $p \in NP$  pertence;

$sp_p$  - tamanho da pilha  $p \in NP$  em unidade de pátio (1 baliza);

$ap_p$  - data de necessidade de início de formação da pilha  $p \in NP$ .

### Variáveis de decisão

$x_{i,j}^k$  - é uma variável binária. Assume valor 1 se o navio  $j$  é atendido após o navio  $i$  no berço  $k$ , e 0 caso contrário;

$T_i^k$  - momento de atracação do navio  $i$  no berço  $k$ ;

$up_p^{lp}$  - momento de início de formação da pilha  $p \in NP$  no pátio  $lp \in LP$ ;

$vp_p^{lp}$  - posição inicial da pilha  $p \in NP$  em unidade de pátio (1 baliza) no pátio  $lp \in LP$ ;

$cp_p^{lp}$  - momento de liberação do pátio  $lp \in LP$  após o carregamento da pilha  $p \in NP$  no navio a qual pertence;

$\theta p_p^{lp}$  - define qual seção do pátio  $lp \in LP$  será utilizada pela pilha  $p \in NP$ ;

Considerando-se o diagrama espaço-tempo com o tempo como abscissa e o tamanho da pilha como ordenada, têm-se as seguintes variáveis de decisão binárias:

$\sigma_{p,q}^{lp}$  - assume valor igual a 1 se o retângulo da próxima pilha  $q \in NP$  a atracar estiver totalmente acima do retângulo referente ao navio  $p \in NP$  no diagrama espaço-tempo e não houver sobreposição, estando ambas no pátio  $lp \in LP$ . Caso contrário, assume 0;

$\Delta_{p,q}^{lp}$  - assume valor igual a 1 se o retângulo do próximo navio  $q \in NP$  a atracar estiver totalmente à direita do retângulo referente ao navio  $p \in NP$  no diagrama espaço-tempo e não houver sobreposição estando ambas no pátio  $lp \in LP$ . Caso contrário, assume 0.

A função objetivo, apresentada na Equação 1, tem como propósito minimizar a soma das duas partes componentes. A Parte I corresponde ao tempo de espera do navio para atracar, calculado pela diferença entre o momento em que o navio atraca no berço e o momento de sua chegada, considerando um peso de priorização de não atraso do navio.

A parte II refere-se ao tempo total de espera para início da formação e ocupação do pátio, determinado pela diferença entre o momento de formação da pilhas e o momento em que a área do pátio se torna necessária para a pilha.

### Função Objetivo

$$\alpha \sum_{i \in NN} \sum_{k \in DR} \left( T_i^k - (a_i \sum_{j \in DNV} x_{ij}^k) \right) + \beta \sum_{p \in NP} \sum_{lp \in LP} (up_p^{lp} - (\theta p_p^{lp} ap_p)) \quad (1)$$

Parte I Parte II

### Restrições

$$\sum_{k \in DR} ((\sum_{j \in NN} x_{ij}^k) + x_{i,(k+nn+nb)}^k) = 1 \quad \forall i \in NN \quad (2)$$

$$(\sum_{j \in NN} x_{k,j}^k) + x_{k,(k+nn+nb)}^k = 1 \quad \forall k \in DR \quad (3)$$

$$(\sum_{i \in NN} x_{i,(k+nn+nb)}^k) + x_{k,(k+nn+nb)}^k = 1 \quad \forall k \in DR \quad (4)$$

$$\sum_{ka \in DR} \sum_{i \in DNR} x_{i,(k+nn+nb)}^{ka} = 1 \quad \forall k \in DR \quad (5)$$

$$(\sum_{i \in NN} x_{(k+nn+nb),i}^k) + x_{(k+nn+nb),k}^k = 0 \quad \forall k \in DR \quad (6)$$

$$(\sum_{j \in NN} x_{j,k}^k) + x_{(k+nn+nb),k}^k = 0 \quad \forall k \in DR \quad (7)$$

$$\left( \sum_{j \in NN} x_{i,j}^k + x_{i,(k+nn+nb)}^k \right) - \left( \sum_{j \in NN} x_{j,i}^k + x_{k,i}^k \right) = 0 \quad \forall k \in DR, \forall i \in NN \quad (8)$$

$$T_j^k + ((1 - x_{i,j}^k)M) \geq T_i^k + t_i^k x_{i,j}^k \quad \forall k \in DR, \forall i \in NN, \forall j \in NN \quad (9)$$

$$T_i^k \geq a_i \left( \sum_{j \in DNV} x_{i,j}^k \right) \quad \forall k \in DR, \forall i \in NN \quad (10)$$

$$T_i^k \leq hp \left( \sum_{k \in DR} \sum_{j \in DNV} x_{i,j}^k \right) \quad \forall k \in DR, \forall i \in NN \quad (11)$$

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1 \quad \forall k \in DR, \forall i, j \in DT \quad (12)$$

$$T_i^k \geq 0 \quad \forall k \in DR, \forall i \in NN \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \theta p_p^{lp} = 1 \wedge \theta p_q^{lp} = 1 \rightarrow & \quad \forall p, q \in NP, \\ ((up_p^{lp} - cp_p^{lp} - (\sigma_{p,q}^{lp} - 1)hp) \geq 0) & \quad \forall lp \in LP \mid q \neq p \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \theta p_p^{lp} = 1 \wedge \theta p_q^{lp} = 1 \rightarrow & \quad \forall p, q \in NP, \\ ((vp_p^{lp} - vp_p^{lp} - sp_p - (\Delta_{p,q}^{lp} - 1)posfp_{lp}) \geq 0) & \quad \forall lp \in LP \mid q \neq p \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \theta p_p^{lp} = 0 \wedge \theta p_q^{lp} = 0 \rightarrow & \\ \Delta_{p,q}^{lp} = 1 & \quad \forall p, q \in NP, \forall lp \in LP \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} (\sigma_{p,q}^{lp} + \sigma_{q,p}^{lp} + \Delta_{p,q}^{lp} + \Delta_{q,p}^{lp} \geq 1) & \quad \forall p, q \in NP, \\ \forall lp \in LP \mid q \neq p & \end{aligned} \quad (18)$$

$$\Delta_p^{lp} = 1 \rightarrow ap_p \leq up_p^{lp} \leq (hp - pp_p + 1) \quad \forall p \in NP, \forall lp \in LP \quad (19)$$

$$vp_p^{lp} - (1 - \Delta_p^{lp})M \leq posfp_{lp} - sp_p \quad \forall p \in NP, \forall lp \in LP \quad (20)$$

$$vp_p^{lp} + (1 - \Delta_p^{lp})M \geq posip_{lp} \quad \forall p \in NP, \forall lp \in LP \quad (21)$$

$$\begin{aligned} (vp_p^{lp} \geq posip_{lp} + 1) \rightarrow & \\ (\Delta_p^{lp} = 0) & \quad \forall p \in NP, \forall lp \in LP \end{aligned} \quad (22)$$

$$vp_p^{lp} \geq posip_{lp} \wedge vp_p^{lp} \leq posfp_{lp} \rightarrow (\Delta_p^{lp} = 1) \quad \forall p \in NP, \forall lp \in LP \quad (23)$$

$$(vp_p^{lp} \leq posip_{lp} - 1) \rightarrow (\Delta_p^{lp} = 0) \quad \forall p \in NP, \forall lp \in LP \quad (24)$$

$$\sum_{lp \in LP} \Delta_p^{lp} = 1 \quad \forall p \in NP \quad (25)$$

$$\Delta_p^{lp} = 1 \rightarrow cp_p^{lp} \geq up_p^{lp} + pp_p - 1 \quad \forall p \in NP, \forall lp \in LP \quad (26)$$

$$0 \leq cp_p^{lp} \leq hp \quad \forall p \in NP, \forall lp \in LP \quad (27)$$

$$vp_p^{lp} \geq 0 \quad \forall p \in NP, \forall lp \in LP \quad (28)$$

$$\left( \left( \sum_{j \in NN} x_{i,j}^k \right) + x_{i,(k+nn+nb)}^k \right) = 1 \wedge (\Delta_p^{lp} = 1) \rightarrow T_i^k \geq up_p^{lp} + pp_p - 1 \quad \forall i \in NN, \forall p, q \in NP, \forall k \in DR \mid pqnv_p = i \quad (29)$$

$$cp_p^{lp} \geq (T_i^k + t_i^k) - (1 - \Delta_p^{lp})M \quad \forall i \in NN, \forall p, q \in NP, \forall k \in DR \mid pqnv_p = i \quad (30)$$

$$cp_p^{lp} \leq (T_i^k + t_i^k) + (1 - \Delta_p^{lp})M \quad \forall i \in NN, \forall p, q \in NP, \forall k \in DR \mid pqnv_p = i \quad (31)$$

$$0 \leq \Delta_p^{lp} \leq 1 \quad \forall p \in NP, \forall lp \in LP \quad (32)$$

Assim, apresenta-se, a seguir, as explicações referentes às restrições propostas no modelo matemático, o qual teve como base os modelos propostos por Braga (2020) e Cordeau *et al.* (2005).

As Restrições 2 garantem que cada navio  $i$  seja atendido por apenas um berço  $k$ . As Restrições 3 e 4 garantem, respectivamente, que um navio será o primeiro a ser atendido em cada berço, e outro será o último, enquanto a conservação do fluxo (atendimento para os demais navios) é assegurada pela Restrição 8.

As Restrições 5 garantem que para cada berço, um navio atraque antes do berço fictício. As Restrições 6 e 7 garantem, respectivamente, que o fluxo de atendimento de navios comece em um berço real e termine em um berço fictício.

As Restrições 9 fazem o cálculo do horário de atracação dos navios. Assim, a consistência da variável  $T_i^k$  com a sequência no berço é garantida pelas restrições.

As Restrições 10 e 11 garantem, respectivamente, que o horário de atracação seja após a chegada do navio e anterior ao horário limite para a atracação do navio, sendo que nas situações em que o navio não atraca seu valor é zero.

As Restrições 12 definem a variável  $x_{i,j}^k$  como binária e as Restrições 13 garantem que a variável  $T_i^k$  seja sempre maior do que zero.

As Restrições 14 garantem que, caso duas pilhas estejam na mesma seção de pátio, então, o início do tempo de armazenagem de uma deverá ser maior que o fim da outra.

As Restrições 15 garantem que, caso duas pilhas estejam na mesma seção de pátio, o início da localização de uma deverá ser maior que o fim da outra menos o seu comprimento.

As Restrições 16 asseguram que se uma pilha não está em uma seção de pátio, então seu momento de início da alocação da produção da pilha neste pátio é zero.

As Restrições 17 garantem que se pelo uma das duas pilhas não estão na mesma seção de pátio, então não haverá sobreposição entre elas.

As Restrições 18 obrigam que pelo menos uma dessas variáveis seja igual a 1, garantindo assim, que os lotes de pelotas ocupem balizas no pátio sem que haja sobreposição com outras balizas já utilizadas em tempo e espaço.

As Restrições 19 asseguram que a data de início do empilhamento no pátio seja maior ou igual à data de necessidade de alocação da produção desta pilha. Assegura também que a data de início do empilhamento no pátio seja menor ou igual que horizonte de tempo de planejamento menos o tempo de armazenamento dela.

As Restrições 20 garantem que se uma pilha está numa seção do pátio, então sua posição final na seção deve ser menor que o fim da seção menos seu comprimento.

As Restrições 21 garantem que se uma pilha está numa seção do pátio, sua posição inicial na seção deve ser maior que o início da seção.

As Restrições 22 garantem que se a posição inicial de uma pilha seja maior que a posição final de uma seção, então esta pilha não pode estar nesta seção.

As Restrições 23 garantem que se a posição de atracação do navio está depois da posição inicial da seção do cais e antes da posição final do cais, o navio está nesta seção do cais.

As Restrições 24 garantem que se a posição de atracação do navio está antes da posição inicial da seção do cais, o navio não está nesta seção do cais.

As Restrições 25 asseguram que uma pilha pode estar em somente uma seção de pátio.

As Restrições 26 calculam que o tempo de fim de armazenagem da pilha seja igual ao seu tempo de início mais o tempo de armazenagem da pilha.

As Restrições 27 garantem que o fim de armazenagem seja menor que o horizonte de planejamento.

As Restrições 28 definem que  $vp_p^{lp}$  é maior do que zero. As Restrições 29 asseguram que a carga tem que estar pronta antes que o navio seja atracado.

As Restrições 30 e 31 definem que a atracação do navio só deve ocorrer após o início da formação da pilha acrescida ao seu tempo total de produção, bem como que as áreas alocadas pelas pilhas só sejam consideradas livres para um novo empilhamento após a desatracação do navio referido àquela pilha. Já as Restrições 32 definem a variável  $\Delta_p^{lp}$  como binária.

## 6. RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo tem como objetivo mostrar os resultados alcançados com a aplicação do modelo matemático detalhado no Capítulo 5 às Instâncias de Teste desenvolvidas. Os resultados encontrados utilizando o *solver* CPLEX 22.1.0. estão apresentados a seguir, na Tabela 6.

Nessa tabela, a primeira e a segunda colunas mostram, respectivamente, os grupos e os números das Instâncias de Teste avaliadas. A terceira coluna reflete os valores obtidos em horas para o *Upper Bound* (limite superior) (UB), que é a Função Objetivo. A quarta coluna representa o *Lower Bound* (limite inferior) (LB).

A quinta coluna representa o tempo de execução do CPLEX (TE) em segundos. A sexta coluna apresenta o Gap da solução encontrada que pode ser encontrado pela subtração do valor obtido com a operação na sequência.

$$Gap (\%) = \frac{Upper\ Bound - Lower\ Bound}{Upper\ Bound} \quad (33)$$

A sétima coluna e oitava coluna expressam, respectivamente, os atrasos relacionado ao tempo de atracação dos navios ( $Atraso_{navio}$ ) e para a formação das pilhas ( $Atraso_{pilha}$ ).

$$Atraso_{navio} = \sum(T_i^k - a_i) \quad (34)$$

$$Atraso_{pilha} = \sum(up_p - ap_p) \quad (35)$$

**Tabela 6** - Resultados obtidos pelo solver CPLEX

(continua)

Grupo	Instância	UB (h)	LB (h)	TE (s)	Gap (%)	$Atraso_{navio}$ (h)	$Atraso_{pilha}$ (h)
1	1	84.100	63.400,00	43.198,98	24,61	841	0
	2	84.100	84.100,00	15.277,02	0,00	841	0
	3	84.100	50.482,55	43.228,16	39,95	841	0
	4	420.500	265.554,78	43.235,63	36,82	841	0
	5	420.500	275.282,36	43.238,98	34,53	841	0
	6	420.500	250.368,92	43.252,86	40,46	841	0

(conclusão)

Grupo	Instância	UB (h)	LB (h)	TE (s)	Gap (%)	$Atraso_{navio}$ (h)	$Atraso_{pilha}$ (h)
1	7	841.000	841.000,00	22.409,26	0,00	841	0
	8	841.000	841.000,00	16.122,53	0,00	841	0
	9	841.000	579.621,77	43.211,05	31,15	841	0
2	10	84.800	56.110,32	43.236,13	33,83	848	0
	11	84.100	84.100,00	12.574,77	0,00	841	0
	12	84.100	84.100,00	32.341,97	0,00	841	0
	13	426.900	247.500,00	43.196,72	42,02	861	0
	14	426.000	255.758,66	43.194,33	39,96	852	0
	15	428.500	252.335,08	43.197,64	41,11	857	0
	16	846.900	501.835,11	43.187,47	40,74	841	59
	17	854.000	522.809,84	43.199,52	38,78	854	0
	18	841.000	841.000,00	16.022,16	0,00	841	0

Fonte: Autoras (2024).

Como pode ser notado pela Tabela 6, seis Instâncias de Teste executadas apresentaram gap de 0,00%. Além disso, analisando os resultados do Grupo 1, nota-se que, apesar das variações de priorizações, com os pesos  $\alpha$  e  $\beta$ , os valores de  $Atraso_{navio}$  foram iguais para todas as nove primeiras Instâncias de Teste (841 horas).

Todavia, para o Grupo 2, houve variações desses atrasos entre as Instâncias testadas. Essa variação nos resultados entre os grupos sugere que, inicialmente, não havia necessidade de competição por espaço no pátio, indicando que não era necessário gerar atrasos na formação da pilha.

A sequência proposta de atracação, no Grupo 1, é expressa na Tabela 7.  $AT$  refere-se a hora de atracação do respectivo navio e  $ES$  ao tempo de espera para ele ser atracado.

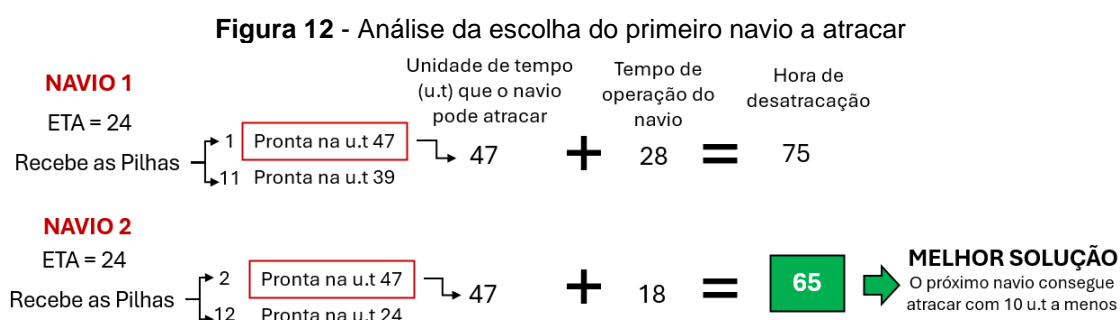
**Tabela 7** - Sequenciamento de navios do Grupo 1 proposto pelo *solver* CPLEX

Grupo	Instância	Sequenciamento dos Navios																																							
		2	3	6	1	8	10	7	5	↔	9	4	2	3	6	1	8	10	7	9	↔	5	4																		
1	1	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 134	AT 236	ES 135	AT 266	ES 288	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 134	AT 236	ES 135	AT 266	ES 288
	2	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 134	AT 236	ES 135	AT 266	ES 288	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 134	AT 236	ES 135	AT 266	ES 288
	3	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 105	AT 236	ES 164	AT 266	ES 288	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 105	AT 236	ES 164	AT 266	ES 288
	4	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 105	AT 236	ES 164	AT 266	ES 288	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 105	AT 236	ES 164	AT 266	ES 288
	5	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 105	AT 236	ES 164	AT 266	ES 288	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 105	AT 236	ES 164	AT 266	ES 288
	6	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 134	AT 236	ES 135	AT 266	ES 288	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 134	AT 236	ES 135	AT 266	ES 288
	7	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 105	AT 236	ES 164	AT 266	ES 288	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 105	AT 236	ES 164	AT 266	ES 288
	8	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 134	AT 236	ES 135	AT 266	ES 288	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 134	AT 236	ES 135	AT 266	ES 288
	9	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 134	AT 236	ES 135	AT 266	ES 288	AT 47	ES 23	AT 65	ES 34	AT 95	ES 23	AT 115	ES 91	AT 143	ES 47	AT 161	ES 41	AT 181	ES 85	AT 206	ES 134	AT 236	ES 135	AT 266	ES 288

Fonte: Autoras (2024).

Observando a Tabela 7, é possível notar que as Instâncias de Teste 1, 2, 6, 8 e 9 são iguais, assim como as Instâncias de Teste 3, 4, 5 e 7. A diferença entre elas se dá na inversão dos navios 5 e 9, demarcados pela seta, diferença essa que será melhor explicada na sequência.

Inicialmente, realizando a análise de forma gradativa, vê-se que o navio 2 é o primeiro a ser atracado em todas as instâncias. Sob essa ótica, observa-se que tanto o navio 2 quanto o navio 1 são os primeiros a chegarem ao porto ( $a_1 = a_2 = 24$ ), conforme apresentado na Tabela 4. Entretanto, se o navio 1 fosse o primeiro a atracar, o segundo navio a ser atracado só poderia atracar 10 unidades de tempo depois, se comparado com o tempo do navio 2 (Figura 12). Desse modo, o navio ideal para ser atracado primeiro é o navio 2, informação essa que está em consonância com o valor obtido pelo modelo.



Fonte: Autoras (2024).

O navio 3 chega no porto na unidade de tempo 31 e suas pilhas ficam prontas em 54 u.t e 27 u.t. Sendo assim, sua atracação já poderia ocorrer desde 54 u.t. Entretanto, berço fica disponível em 65 u.t, com a desatracação do navio 2. Dessa maneira, atracando em 65 u.t e com o tempo de operação de 30 u.t, libera o berço em 95 u.t, exatamente na hora que as pilhas do navio 6 estão prontas.

Assim, o melhor navio a vir antes do navio 6 é de fato o navio 4, uma vez que a partir do momento em que suas pilhas estão prontas, já pode haver a sua atracação.

O navio 5 tem as suas pilhas prontas no mesmo momento que o navio 6, de modo que ele poderia ser cogitado para atracar no lugar do 6. Todavia, seu tempo de

operação é 10 u.t maior, atrasando assim a próxima atracação. Nessa perspectiva, torna-se inviável essa escolha, se comparado com o tempo do navio escolhido.

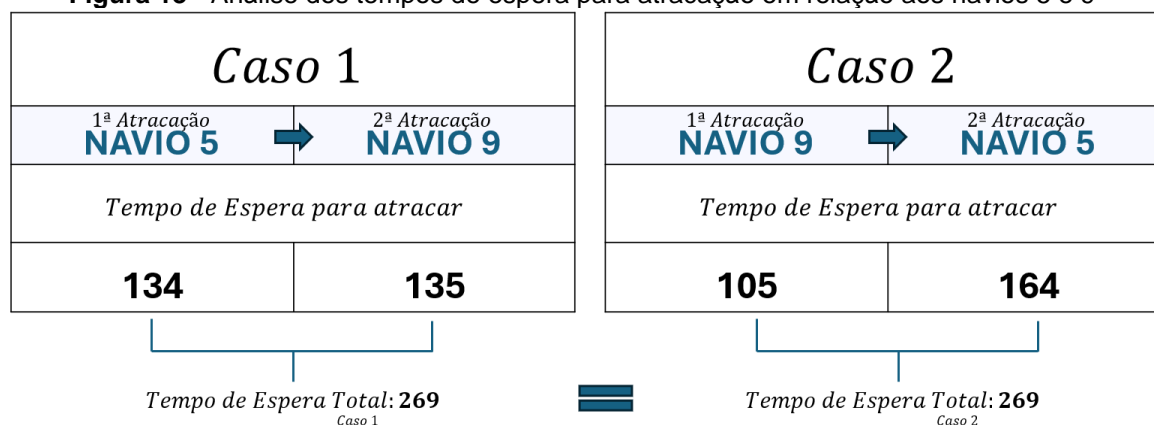
O navio 6 desatraca em 115 u.t. Nessa unidade de tempo, os disponíveis para atracar com pilhas prontas são os navios 1 e 4. Sendo assim, o navio 1 é a melhor escolha, haja vista que estava com maior tempo de espera e libera o berço 3h antes do que o navio 4.

Posteriormente, é dada a prioridade ao navio 8, pois libera o berço no menor tempo, em relação aos demais ( $t_8^1 = 18$ ). Na sequência, sob essa mesma lógica, atracam os navios 10 e 7, respectivamente.

A modificação entre as Instâncias de Teste se deu nos navios 9 e 5, conforme ressaltado pela Tabela 7. Para as Instâncias de Teste 1, 2, 6, 8 e 9, o navio 5 atraca antes do navio 9. Já para a 3, 4, 5 e 7, o navio 9 atraca antes do navio 5. Tal inversão acontece porque como o navio 7 desatraca na hora 206 ( $T_i^k + t_i^k = 181 + 25 = 206$ ), tanto as pilhas do navio 5 quanto as pilhas do navio 9 já estão prontas, nos tempos 71 e 100, respectivamente.

Assim, entendendo também que o tempo de operação dos dois navios é o mesmo ( $t_9^1 = t_5^1 = 30$ ) e que pela disposição das pilhas nos pátios, há espaço disponível a ponto de não haver competição entre eles, o modelo passa a ter duas soluções equivalentes. O tempo de espera para os dois navios serem atracados somados ao tempo de espera das pilhas, que é de zero, é o mesmo para os dois cenários. Assim, leva-se em conta o tempo de espera dos navios.

**Figura 13** - Análise dos tempos de espera para atracação em relação aos navios 5 e 9



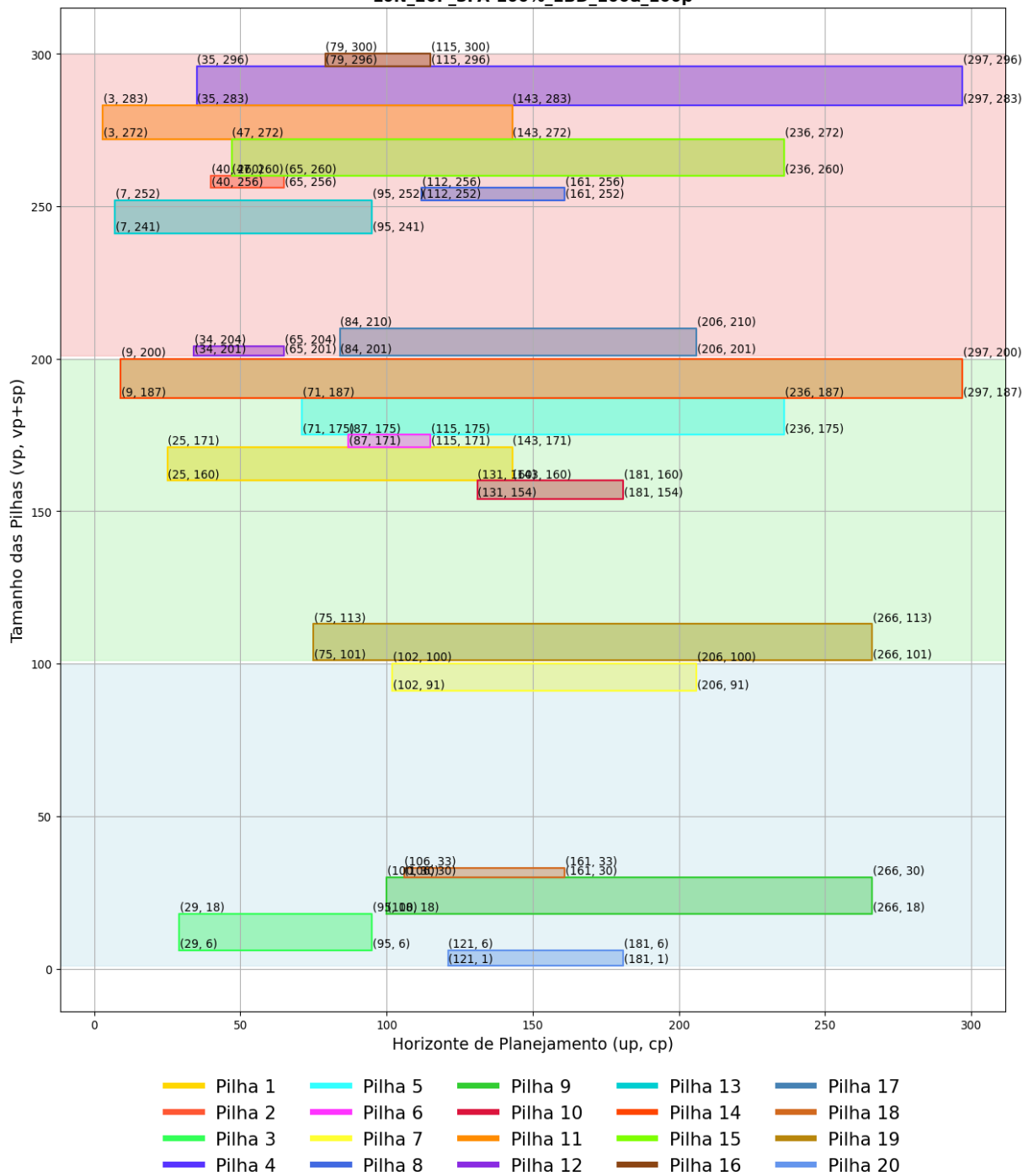
Fonte: Autoras (2024).

Por fim, é atracado o navio 4, com a liberação do berço em 297 u.t e encerramento da sequência dos navios solicitados para atracação.

É importante que a questão da disposição das pilhas nos pátios tornou-se fator de discussão após a análise do Grupo 1. Com a plotagem das pilhas nos pátios desse grupo, observou-se que como havia muito espaço disponível para que elas fossem formadas, não havia necessidade de competição por espaço. Dessa maneira, os pesos dados na Função Objetivo retornaram com atrasos em navios, mas não tempo de início de formação da pilha ( $up_{pa}$ ). O tempo de  $up_{pa}$  foi sempre igual ao tempo de  $ap_{pa}$  para esse grupo.

Na sequência, é apresentado, de forma ilustrativa, o planejamento de alocação das pilhas nos pátios para a Instância de Teste 1. Nele, é possível ver a questão de folga de espaço nos 3 pátios disponíveis, onde o posicionamento das pilhas têm mobilidade considerável para escolherem suas posições. As demais Instâncias de Teste que não são apresentadas ao longo do trabalho, constam no Apêndice 2.

**Figura 14 – Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 1**  
**10N\_20P\_3PA-100%\_1BD\_100α\_100β**



No que diz respeito ao Grupo 2, conforme já citado, executou-se as mesmas 9 Instâncias de Teste, mas com a redução dos pátios pela metade do tamanho para que houvesse uma análise de como o modelo computacional se comportaria com metade dos pátios de estocagem sendo entregues para manutenção. A sequência proposta de atracação, no Grupo 2, é expressa na Tabela 8.

Tabela 8 - Sequenciamento de navios do Grupo 2 proposto pelo solver CPLEX

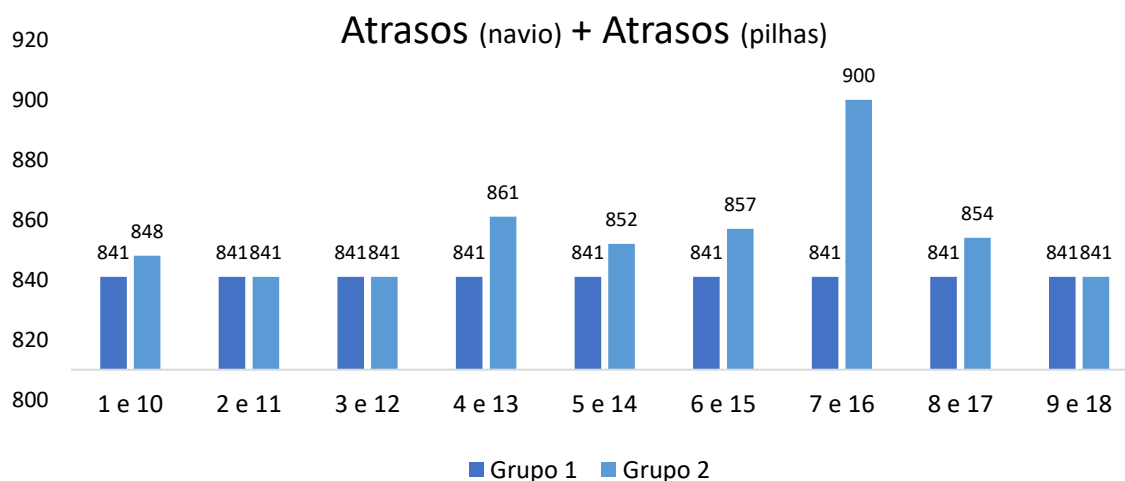
Grupo	Instância	Sequenciamento dos Navios																			
		2	3	1	8	6	10	7	9	4	5	2	3	6	1	8	10	7	9	5	4
2	10	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>
		47	23	65	34	95	71	123	27	141	69	161	41	181	85	206	105	236	198	267	195
	11	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>
		47	23	65	34	95	23	115	91	143	47	161	41	181	85	206	105	236	164	266	228
	12	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>
		47	23	65	34	95	23	115	91	143	47	161	41	181	85	206	134	236	135	266	228
	13	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>
		47	23	65	41	93	55	124	28	142	70	162	42	182	86	207	176	237	165	267	166
	14	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>
		47	23	65	34	95	71	123	51	143	23	163	67	181	85	206	134	236	198	267	166
	15	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>
		47	23	65	27	96	72	124	52	144	48	162	42	182	86	207	135	237	136	267	236
	16	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>
		47	23	65	34	95	23	115	91	143	47	161	41	181	85	206	105	236	164	266	228
	17	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>
		47	23	65	27	96	24	119	23	137	41	162	42	182	158	210	179	240	139	270	198
	18	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>	<i>AT</i>	<i>ES</i>
		47	23	65	34	95	23	115	91	143	47	161	41	181	85	206	105	236	135	266	228

Fonte: Autoras (2024).

Pelos resultados obtidos, é possível notar, inicialmente, que, assim como o Grupo 1, todo o Grupo 2 apresentou como resposta o navio 2 para ser o primeiro navio a atracar no berço. A partir da segunda atracação, houve diferenças entre todas as Instâncias de Teste rodadas, consoante as mudanças de pesos (variações entre 100, 500 e 1000).

É importante ressaltar também que, com metade dos pátios de estocagem sendo entregues para manutenção, os resultados encontrados pelo CPLEX apresentaram variações nos atrasos se comparados com as instâncias onde toda a extensão dos pátios era disponibilizada. Tal verificação é expressa pela Figura 15, as quais ilustram comparativamente os dados expressos na Tabela 6.

**Figura 15** - Comparação dos atrasos totais (pilhas e navios) do Grupo 1 x Grupo 2

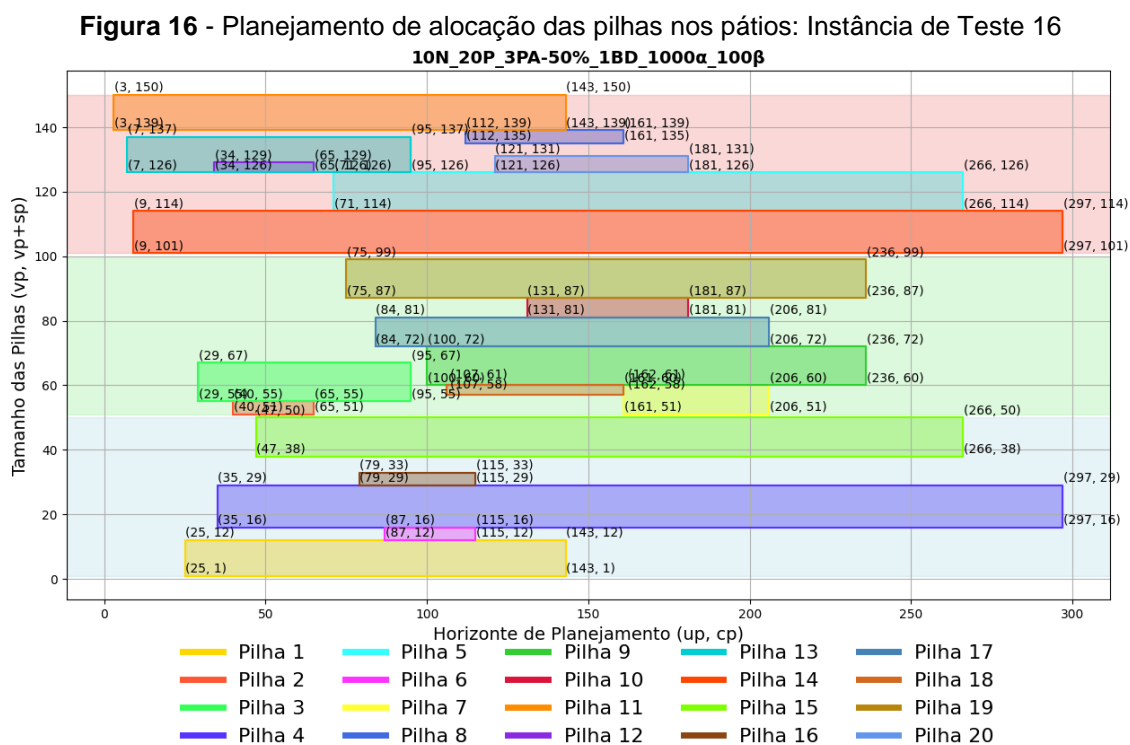


Fonte: Autoras (2024).

Na Figura 15, vê-se a questão do aumento do valores dos atrasos totais para o Grupo 2. Dos valores obtidos, três das nove Instâncias de Teste rodadas posteriormente obtiveram os mesmos valores de atrasos do Grupo 1, e as outras seis denotaram em valores superiores.

Vale citar que a Instância de Teste 16 foi a que mais apresentou uma diferença significativa de valor em comparação com as demais. Isso porque, conforme indicado na Tabela 8, tal Instância de Teste foi apresentada atraso na formação da pilha, com um  $Atraso_{pilha}$  valor de 59.

Esse atraso da pilha é oriundo da pilha 7, que é recebida pelo navio 7. Pelo resultado do modelo, ela foi alocada no pátio 1 e tem data de necessidade de início de formação  $ap_7^2 = 102$ . Entretanto, seu tempo de início de formação é  $up_7^2 = 161$ , ou seja, 59 unidades de tempo depois. Assim, o navio atraca na hora 181, que é quando o navio anterior (10) desatraca. Sendo assim, o tempo de espera da pilha em pátio depois de ter sido finalizada é somente de 2 u.t. Na sequência, é expresso o planejamento de alocação das pilhas no pátio para a Instância de Teste citada.



Nota-se que essa Instância de teste possui um peso  $\alpha$  de 1000 e um peso  $\beta$  de 100. Portanto, há 10 vezes maior priorização do não atraso na atracação dos navios, em detrimento do não atraso da formação da pilha. Com tamanha diferença entre os pesos, tais modificações resultaram, além de atrasos na atracação do navio, em atrasos no tempo de formação das pilhas, já que o  $\beta$  dado era bem inferior ao valor de  $\alpha$ .

Sendo assim, com a redução de 50% da disponibilidade de uso pátios, a mobilidade que existia para a formação das pilhas foi drasticamente reduzida e

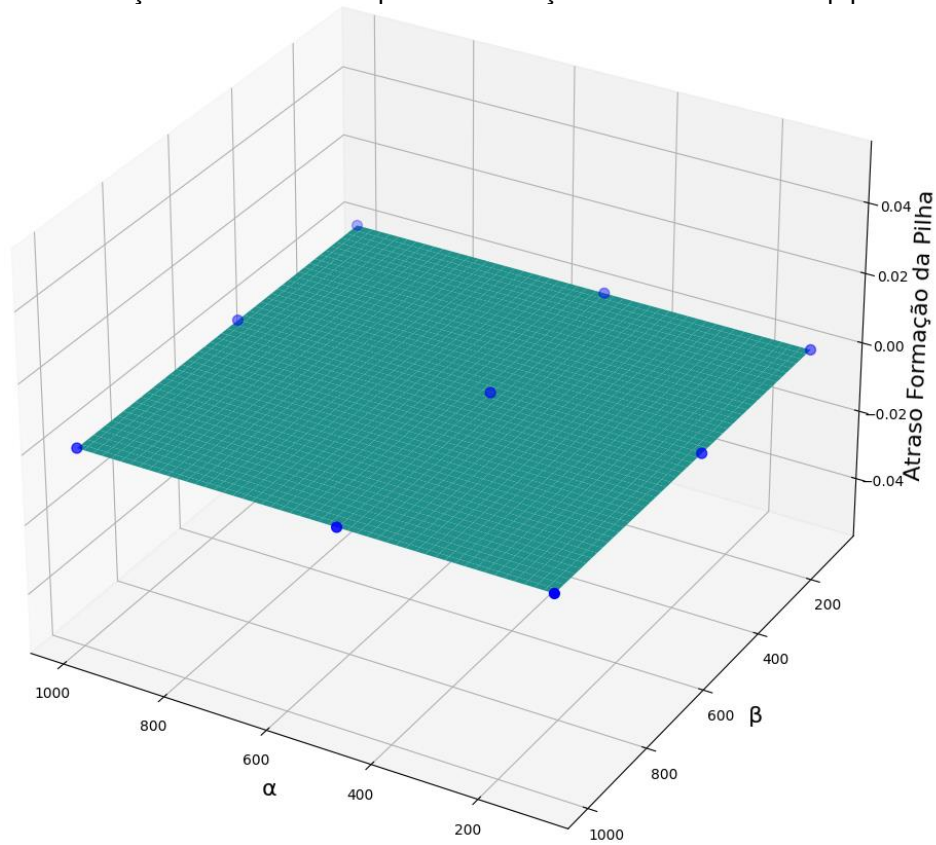
com isso, geração de maiores tempos de espera. Desse modo, os valores previstos em modelo estão em consonância com o esperado.

Conforme visto na Figura 16, os limites das pilhas estão muito bem definidos, sem que haja tanta possibilidade de alteração entre as pilhas, conforme visto no exemplo do pátio com 100% de disponibilidade de uso para os mesmos pesos (Figura 14).

Além disso, no que diz respeito à questão dos efeitos dos pesos para dar maior ênfase a priorização do não atraso do navio e para dar maior ênfase a priorização do não atraso de produção da pilha, na Figura 17 e na Figura 18 são apresentadas a variação dos atrasos referentes às formações das pilhas, para o Grupo 1 e o Grupo 2, respectivamente. O gráfico tridimensional exemplifica a sensibilidade desses atrasos em relação às variações de valores dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , que variam entre 100, 500 e 1000.

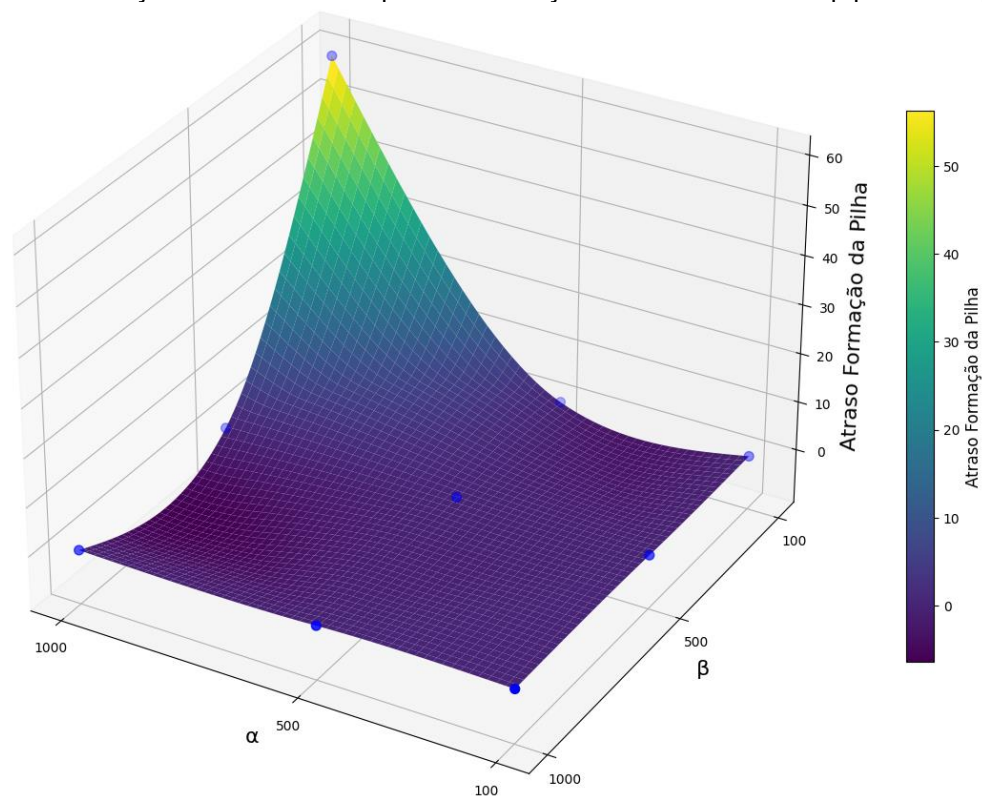
Os nove pontos, expressos na cor azul, marcam as coordenadas desses indicadores e a superfície colorida representa a magnitude do atraso. Nota-se que, quando há variações, os tons de roxo indicam valores mais baixos e a os tons amarelados indicam valores mais altos, como pode ser observado pela escala de cores.

Figura 17 - Variação dos atrasos das pilhas em relação aos valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para o Grupo 1



Fonte: Autoras (2024).

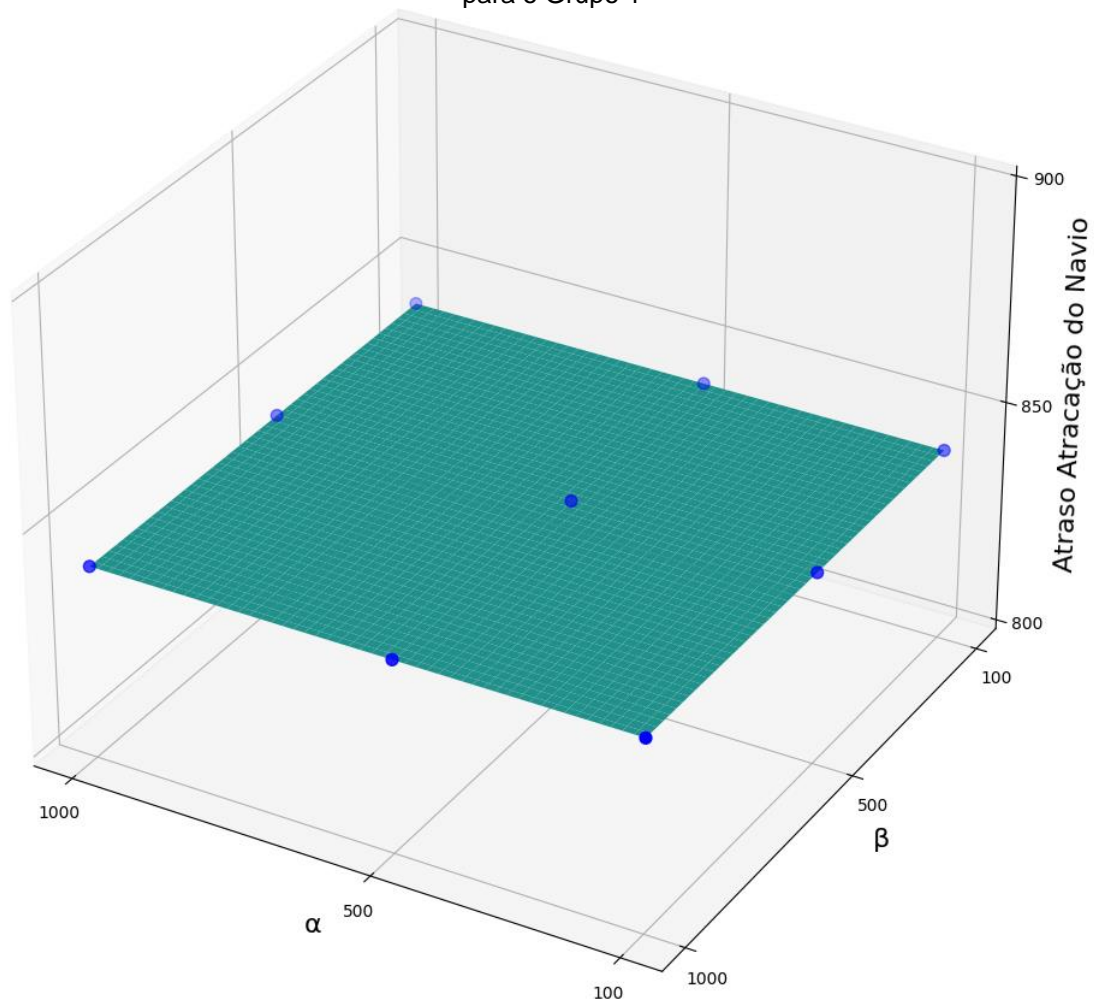
Figura 18 - Variação dos atrasos das pilhas em relação aos valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para o Grupo 2



Fonte: Autoras (2024).

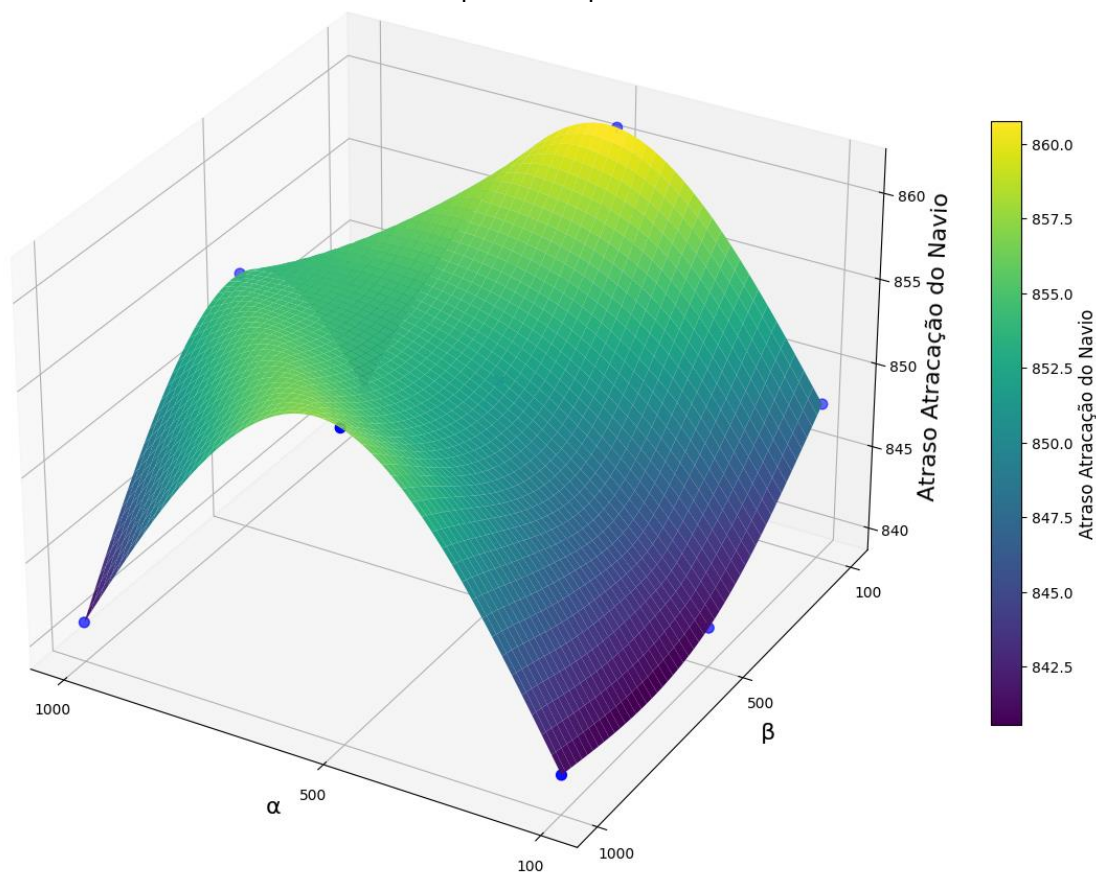
De maneira análoga, para o caso dos atrasos referentes às atracções dos navios, as variações foram evidentes no Grupo 2, conforme é apresentado. Houve constância desse atraso total para as nove primeiras intâncias (841h) e variabilidade para as outras nove finais, onde os pátios tinham metade da disponibilidade de uso.

**Figura 19** - Variação dos atrasos nas atracções dos navios em relação aos valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para o Grupo 1



Fonte: Autoras (2024).

**Figura 20** - Variação dos atrasos nas atracções dos navios em relação aos valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para o Grupo 2



Fonte: Autoras (2024).

Desse modo, com base nos resultados apresentados, o modelo matemático desenvolvido revela-se uma ferramenta importante sob o âmbito de análise gerencial, de modo a facilitar o planejamento integrado do armazenamento da produção de pelotas e a atracção de navios no porto.

O efeito de proposição de pesos na Função Objetivo torna a ferramenta computacional mecanismo de análise para o gestor portuário, onde pode ser verificado quais são as melhores escolhas a serem tomadas, baseadas na melhor decisão estratégica para o porto em questão.

Ao considerar também a necessidade de alocação de carga no pátio, juntamente com as escolhas de atracção dos navios, o modelo possibilita a alocação otimizada da produção em lotes, com a escolha viável da fila de navios.

Sob essa ótica, nota-se que o modelo proposto vai além do problema específico estudado e pode ser aplicado a portos com *layouts* diferentes. Ele possibilita a inserção de variáveis cenários de análise, sendo útil para empresas produtoras de pelotas de ferro ou minério de ferro.

## 7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O foco desta pesquisa foi examinar a sensibilidade entre as prioridades do tempo de espera na formação da pilha de minério e o tempo de espera de atracação dos navios, utilizando uma ferramenta matemática focada na distribuição dos lotes de pelotas de minério nos pátios portuários, em conjunto com o planejamento da fila de navios que chegam ao porto.

A ferramenta computacional é inspirada no trabalho de Braga (2020) com o objetivo de reduzir tanto o tempo total de permanência dos navios no porto quanto o tempo necessário para liberar as áreas nos pátios para os lotes de pelotas. No entanto, diferente da abordagem de Braga (2020), a modelagem desenvolvida neste estudo analisa o BAP como um Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos (MDVRP), uma extensão do VRP, conforme descrito por Cordeau *et al.* (2005). Além disso, diferente dos estudos presentes em literatura, o modelo matemático elaborado acrescenta a vertente de análise das prioridades do tempo de espera entre pilhas e navios.

A ferramenta elaborada nesta pesquisa demonstrou eficácia na solução dos desafios relacionados à estocagem de lotes de pelotas nos pátios das usinas pelotizadoras e no planejamento da sequência de atracação dos navios. Para a representação gráfica da alocação das pilhas nos pátios, estruturou-se código em Python, que representou a armazenagem das pilhas nos pátios e permitiu uma análise das restrições nas áreas de estocagem. Sob a mesma ótica, a plotagem da superfície que relaciona os pesos aos atrasos também foi feita em Python e facilitou a análise das variações de atrasos encontradas em modelo.

É importante destacar que o modelo desenvolvido é aplicável em qualquer usina pelotizadora, adaptando-se a diferentes configurações de pátio de estocagem, tanto em quantidade quanto em tamanho. Além disso, pode ser utilizado por usinas que utilizam diferentes modos de transporte para o escoamento, como trens ou caminhões.

Como recomendação de trabalhos futuros, sugere-se aumentar o tempo de

execução do estudo para alcançar um gap de 0,00% e atingir a solução ótima em todas as Instâncias de Teste. Além disso, propõe-se explorar uma variedade mais ampla de valores para os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , a fim de ampliar o espaço amostral e permitir uma análise mais detalhada dos efeitos dos pesos. Por fim, sugere-se a elaboração de um algoritmo computacional para resolver o problema abordado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). *Estatístico Aquaviário*, 2024. Disponível em: <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html#pt>. Acesso em: 19 de jun. de 2024.

BACALHAU, E. T. *Modelagem e estratégias de resolução para o problema de alocação de berços*, 2016. Disponível em: [https://docs.ufpr.br/~bacalhau/Projeto\\_PAB.pdf](https://docs.ufpr.br/~bacalhau/Projeto_PAB.pdf). Acesso em: 25 de mai. de 2024.

BANOS, R. S.; ROSA, R. A.; MAURI, G. R.; RIBEIRO, G. M. Modelo matemático e meta-heurística Simulated Annealing para o problema de alocação de berços com múltiplas cargas. *TRANSPORTES*, v. 24, n. 1, p. 51–62, 2016. Disponível em: <https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/980/576>. Acesso em: 23 de jun. de 2024.

BARBOSA, J. P. *Meta-heurística aplicada ao planejamento de fila de navios integrado à designação de áreas de pátio de granel para atender ao plano de produção de uma usina de pelotização*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

BRAGA, T.; BARBOSA, J. P.; ROSA, R. A.; NEVES, B. S. Planejamento de portos graneleiros para atender a produção de usina pelotizadora considerando designação de áreas de pátio e fila de navios. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019. *Anais do 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*. Balneário Camboriú: ANPET, 2019. p. 2533-2544.

BRAGA, T. B. O. *Planejamento de portos graneleiros para atender a produção de usina pelotizadora considerando designação de áreas de pátio e fila de navios*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade

Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória.

BIERWIRTH, C.; MEISEL, F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, v. 202, p. 615-627, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221709003579>. Acesso em 24 de mai. de 2024.

CHANG, S. C.; LIN, M. H.; TSAI, J. F. An optimization approach to berth allocation problems. *Mathematics*, v. 12, n. 5, 2024.

CHEIMANOFF, N.; FONTANE, F.; KITRI, M. N.; TCHERNEV, N. Exact and heuristic methods for the berth allocation problem with multiple continuous quays in tidal bulk terminals. *Expert systems with applications*, v. 201, p. 117141, 2022.

CHEIMANOFF, N.; FÉNIÈS, P.; KITRI, M. N.; TCHERNEV, N. Exact and metaheuristic approaches to solve the integrated production scheduling, berth allocation and storage yard allocation problem. *Computers & Operations Research*, v. 153, p. 106174, 2023.

CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G.; LEGATO, P.; MOCCIA, L. Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem. *Transportation Science*, v. 39, n. 4, p. 526-538, 2005. Disponível em: <https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/trsc.1050.0120>. Acesso em 12 de jan.de 2024.

DRAGOVIĆ, B.; ZRNIĆ, N.; DRAGOVIĆ, A.; TZANNATOS, E.; DULEBENETS, M. A. A comprehensive bibliometric analysis and assessment of high-impact research on the berth allocation problem. *Ocean engineering*, v. 300, p. 117163, 2024.

GUO, L.; ZHENG, J.; DU, J.; GAO, Z.; FAGERHOLT, K. Integrated planning of berth allocation, quay crane assignment and yard assignment in multiple cooperative terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and*

*Transportation Review*, v. 183, p. 103456, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103456>. Acesso em 23 de mai. de 2024.

IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 35, n. 4, p. 401-407, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0191261599000570>. Acesso em 25 de mai. de 2024.

LAMOSO, L. P. A exploração de minério de ferro no Brasil e no Mato Grosso do Sul. São Paulo: Paco Editorial, 2015.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. A. Introdução ao tratamento de minérios. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Orgs.). *Tratamento de Minérios*. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. p. 3-20. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/712/3/CCL00220010.pdf>. Acesso em: 19 de jun. de 2024.

MAZIOLI, F. C.; ROSA, R. A.; SAGRILO, R. C. V.; VITORUGO, L. R.; NEVES, B. S. Assessment of the impact of Charter Party clauses and port's characteristics on the port's financial result. *Computers & Industrial Technology*, v. 128, p. 70-90, 2019.

MOURÃO, J. M. Aspectos conceituais relativos à pelotização de minérios de ferro. 2a. ed. São Paulo: Blucher, 2022. Disponível em: <https://pdf.blucher.com.br/freepdf/apectos-abm.pdf>. Acesso em: 23 de jun. de 2024.

NASCIMENTO, D. N. C. R. *Problema de alocação de berços: diferentes políticas através da simulação*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Maranhão, São Luís. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/3581/1/DAYSON-NASCIMENTO.pdf>. Acesso em: 25 de mai. de 2024.

PARREIRAS, F. B. Logística dos contêineres e o pagamento de “demurrage”: Um estudo de caso. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Logística Estratégica e Sistemas de Transporte) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C5GFG/1/monografia\\_f\\_bio\\_parreiras.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C5GFG/1/monografia_f_bio_parreiras.pdf). Acesso em: 23 de jun. de 2024.

PORTELA, M. *Minério de ferro é o principal produto da indústria brasileira*, 2023. Disponível em: <https://www.noticiasdemineracao.com/minerio-de-ferro/news/1455608/minerio-ferro-principal-produto-da-industria-brasileira>. Acesso em: 19 de jun. de 2024.

ROBENEK, T.; UMANG, N.; BIERLAIRE, M.; ROPKE, S. A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports. *European Journal of Operational Research*, v. 235, n. 2, p. 399-411, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.015>.

RODRIGUES, P. H. L.; ROSA, R. A.; ARPINI, B. P.; BISSOLI, A. L. C.; RIBEIRO, G. M. Planejamento de atracação de navios por meio de um modelo matemático para o problema de alocação de berços contínuos com descontinuidade do cais. *TRANSPORTES*, v. 23, n. 1, p. 37–46, 2015. DOI: [10.14295/transportes.v23i1.861](https://doi.org/10.14295/transportes.v23i1.861). Acesso em: 23 de jun. de 2024.

RODRIGUES, I. B. G.; ROSA, R. A.; GOMES, T. C.; RIBEIRO, G. M. Modelo matemático para o Problema de Alocação de Berços em portos com limitações de operação de carga ao longo do cais. *Gestão & Produção*, v. 23, n. 4, p. 771–786, 2016.

SAMARCO. Relatório da Administração 2023. Disponível em: [https://www.Samarco.com/wp-content/uploads/2024/04/11.Samarco\\_Relatorio-da-Administracao-2023-22042024-2307.pdf](https://www.Samarco.com/wp-content/uploads/2024/04/11.Samarco_Relatorio-da-Administracao-2023-22042024-2307.pdf). Acesso em: 19 de jun. de 2024.

SAMARCO. *Processo produtivo*, 2024a. Disponível em:

<https://www.Samarco.com/processo-produtivo/>. Acesso em: 18 de jun. de 2024.

SAMARCO. *Especificações técnicas para navios*, 2024b. Disponível em: <https://www.Samarco.com/wp-content/uploads/2024/03/EspecificacoesTecnicasDoPortoParaNavios.pdf>. Acesso em: 19 de jun. de 2024.

STATISTA. *Statista: Empowering people with data*. Disponível em: <https://www.statista.com/>. Acesso em: 19 de jun. de 2024.

SONG, Y.; JI, B.; YU, S. S. Variable neighborhood search for multi-port berth allocation with vessel speed optimization. *Marine science and engineering*, v. 12, n. 4, p. 688-715, 2024.

UMANG, N.; BIERLAIRE, M.; VACCA, I. Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, v. 54, p. 14-31, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.03.003>.

XIANG, X.; LIU, C. An almost robust optimization model for integrated berth allocation and quay crane assignment problem. *Omega*, v. 104, p. 102445, 2021.

## APÊNDICE 1 – CÓDIGO PYTHON PARA APRESENTAÇÃO GRÁFICA DA ALOCAÇÃO DAS PILHAS NOS PÁTIOS

O presente apêndice expressa o código utilizado para plotagem das pilhas em pátio das dezoito instâncias elaboradas.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

def plot_retangulos(coordenadas):
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(15, 20))
    cores = [
        '#FFD700', '#FF5733', '#33FF57', '#5733FF', '#33FFFF', '#FF33FF', '#FFFF33',
        '#4169E1', '#32CD32', '#DC143C', '#FF8C00', '#8A2BE2', '#00CED1', '#FF4500',
        '#7FFF00', '#8B4513', '#4682B4', '#D2691E', '#B8860B', '#6495ED', '#FF1493',
        '#00FF7F', '#4B0082', '#20B2AA', '#7B68EE', '#00FA9A', '#FF6347', '#EE82EE',
        '#6B8E23', '#FF69B4', '#CD5C5C', '#ADD8E6', '#E0FFFF', '#FFDAB9', '#98FB98',
        '#AFEEEE', '#DB7093', '#FFE4B5'
    ] # Cores em hexadecimal para os retângulos

    # Define um conjunto para armazenar as posições dos textos já usadas
    used_text_positions = set()

    # Define um conjunto para armazenar as posições dos retângulos já desenhados
    used_rectangle_positions = set()

    for i, coord in enumerate(coordenadas):
        x = [coord[0][0], coord[1][0], coord[2][0], coord[3][0], coord[0][0]]
        y = [coord[0][1], coord[1][1], coord[2][1], coord[3][1], coord[0][1]]

        # Converte as coordenadas do retângulo em tuplas
        coord_tuples = tuple(tuple(pos) for pos in coord)
```

```

# Verifica se as coordenadas do retângulo já foram utilizadas
while any(pos in used_rectangle_positions for pos in coord_tuples):
    for j in range(4):
        coord[j] = (coord[j][0] + 1, coord[j][1] + 1)
    # Atualiza as tuplas de coordenadas após a modificação
    coord_tuples = tuple(tuple(pos) for pos in coord)

ax.plot(x, y, color=cores[i % len(cores)], label=f'Pilha {i+1}') # Altera o nome da
legenda para "Pilha"
ax.fill(x, y, color=cores[i % len(cores)], alpha=0.5)

# Adiciona as coordenadas do retângulo (como tuplas) ao conjunto de posições
usadas
used_rectangle_positions.update(coord_tuples)

for j, point in enumerate(coord):
    # Deslocamento inicial para o texto
    x_offset = 0.2
    y_offset = 0.2

    # Inicializa a posição do texto
    text_position = (point[0] + x_offset, point[1] + y_offset)

    # Ajusta a posição do texto para evitar sobreposição
    while text_position in used_text_positions:
        x_offset += 0.1 # Ajusta o deslocamento conforme necessário
        y_offset += 0.1 # Ajusta o deslocamento conforme necessário
        text_position = (point[0] + x_offset, point[1] + y_offset)

    # Adiciona a posição final ao conjunto de posições usadas
    used_text_positions.add(text_position)

# Adiciona numeração aos pontos fora do retângulo

```

```

ax.text(text_position[0], text_position[1], f'({point[0]}, {point[1]}),
        fontsize=10, verticalalignment='bottom', horizontalalignment='left')

ax.set_aspect('equal')
ax.set_xlabel('Horizonte de Planejamento (up, cp)', fontsize=14) # Rótulo do eixo X
ax.set_ylabel('Tamanho das Pilhas (vp, vp+sp)', fontsize=14) # Rótulo do eixo Y
plt.title('10N_20P_3PA-100%_1BD_100 $\alpha$ _100 $\beta$ ', fontsize=14, fontweight='bold',
loc='center') # Define o título em negrito e centralizado
plt.grid(True)
legend = plt.legend(loc='upper center', bbox_to_anchor=(0.5, -0.05), ncol=5,
frameon=False, fontsize=16) # Posiciona a legenda abaixo do gráfico e disposta
horizontalmente
for handle in legend.legendHandles:
    handle.set_linewidth(5.0) # Define a espessura da borda da legenda

# Adiciona áreas coloridas para as partes específicas do gráfico
ax.axhspan(1, 100, color='lightblue', alpha=0.3) # y de 1 a 100
ax.axhspan(101, 200, color='lightgreen', alpha=0.3) # y de 101 a 200
ax.axhspan(201, 300, color='lightcoral', alpha=0.3) # y de 201 a 300

plt.savefig('grafico_retangulos.png') # Salva o gráfico como um arquivo PNG
plt.show()

# Exemplo de coordenadas dos pontos dos retângulos
# [[up, vp], [up, vp+sp], [cp, vp+sp], [cp, vp]]
coordenadas = [
    [[25, 160], [25, 171], [143, 171], [143, 160]],
    [[40, 256], [40, 260], [65, 260], [65, 256]],
    [[29, 6], [29, 18], [95, 18], [95, 6]],
    [[35, 283], [35, 296], [297, 296], [297, 283]],
    [[71, 175], [71, 187], [236, 187], [236, 175]],

```

```
[[87, 171], [87, 175], [115, 175], [115, 171]],  
[[102, 91], [102, 100], [206, 100], [206, 91]],  
[[112, 252], [112, 256], [161, 256], [161, 252]],  
[[100, 18], [100, 30], [266, 30], [266, 18]],  
[[131, 154], [131, 160], [181, 160], [181, 154]],  
[[3, 272], [3, 283], [143, 283], [143, 272]],  
[[34, 201], [34, 204], [65, 204], [65, 201]],  
[[7, 241], [7, 252], [95, 252], [95, 241]],  
[[9, 187], [9, 200], [297, 200], [297, 187]],  
[[47, 260], [47, 272], [236, 272], [236, 260]],  
[[79, 296], [79, 300], [115, 300], [115, 296]],  
[[84, 201], [84, 210], [206, 210], [206, 201]],  
[[106, 30], [106, 33], [161, 33], [161, 30]],  
[[75, 101], [75, 113], [266, 113], [266, 101]],  
[[121, 1], [121, 6], [181, 6], [181, 1]]
```

```
]
```

```
plot_retangulos(coordenadas)
```

## APÊNDICE 2 – CÓDIGO PYTHON PARA APRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VARIAÇÃO DOS ATRASOS DE ACORDO COM $\alpha$ E $\beta$

O apêndice descreve o código utilizado para plotagem do gráfico de superfície que analisa os atrasos na atracação do navio e na formação das pilhas, consoante as variações dos pesos.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from scipy.interpolate import griddata

# Definindo coordenadas como conjuntos de valores (alfa, FO, beta)
coordenadas = [
    (100,848,100),
    (100,841,500),
    (100,841,1000),
    (500,861,100),
    (500,852,500),
    (500,857,1000),
    (1000,841,100),
    (1000,854,500),
    (1000,841,1000)
]

# Separando as coordenadas em arrays de beta, FO e alfa
beta_values = np.array([coord[0] for coord in coordenadas])
fo_values = np.array([coord[1] for coord in coordenadas])
alfa_values = np.array([coord[2] for coord in coordenadas])

# Criando uma malha tridimensional usando meshgrid com mais pontos para suavizar a
superfície
beta_mesh, alfa_mesh = np.meshgrid(np.linspace(min(beta_values), max(beta_values),
```

```
200),  
  
        np.linspace(min(alfa_values), max(alfa_values), 200))  
  
# Interpolando os valores da função objetiva (FO) para a malha tridimensional  
fo_mesh = griddata((beta_values, alfa_values), fo_values, (beta_mesh, alfa_mesh),  
method='cubic')  
  
# Criando a figura e o gráfico 3D com um tamanho maior  
fig = plt.figure(figsize=(15, 15))  
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')  
  
# Adicionando um degradê de cor azul na superfície com base nos valores de FO  
surf = ax.plot_surface(beta_mesh, alfa_mesh, fo_mesh, cmap='viridis', edgecolor='none')  
  
# Adicionando a barra de cores ao lado do gráfico  
cbar = fig.colorbar(surf, ax=ax, shrink=0.5, aspect=20, location='right')  
cbar.set_label('Atraso Atracação do Navio', fontsize=12)  
  
# Plotando os pontos das coordenadas como marcadores  
ax.scatter(beta_values, alfa_values, fo_values, color='blue', s=50, label='_nolegend_')  
  
# Marcando os eixos de alfa e beta com valores específicos  
ax.set_xticks([100, 500, 1000])  
ax.set_yticks([100, 500, 1000])  
  
# Configurando rótulos dos eixos com tamanho maior  
ax.set_xlabel('α', fontsize=16)  
ax.set_ylabel('β', fontsize=16)  
ax.set_zlabel('Atraso Atracação do Navio', fontsize=16)  
  
# Invertendo a direção dos eixos  
ax.invert_xaxis()  
ax.invert_yaxis()
```

```
# Configurando o título do gráfico com fonte maior
ax.set_title('Variação dos Atrasos no Navio de acordo com o  $\alpha$  e  $\beta$  para o Grupo 2',
            fontsize=16,fontweight='bold', loc='center')

# Configurando o fundo do gráfico para branco e mantendo a grade visível
ax.set_facecolor('white')
ax.grid(True)

# Salvando a figura em alta qualidade (300 dpi)
plt.savefig('superficie_3d_pilhas.png', dpi=1000)

# Exibindo o gráfico
plt.show()
```

### APÊNDICE 3 – FIGURAS

Na sequências, são postas as figuras que auxiliam no entendimento do estudo tratado neste trabalho.

**Figura 21 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 2**

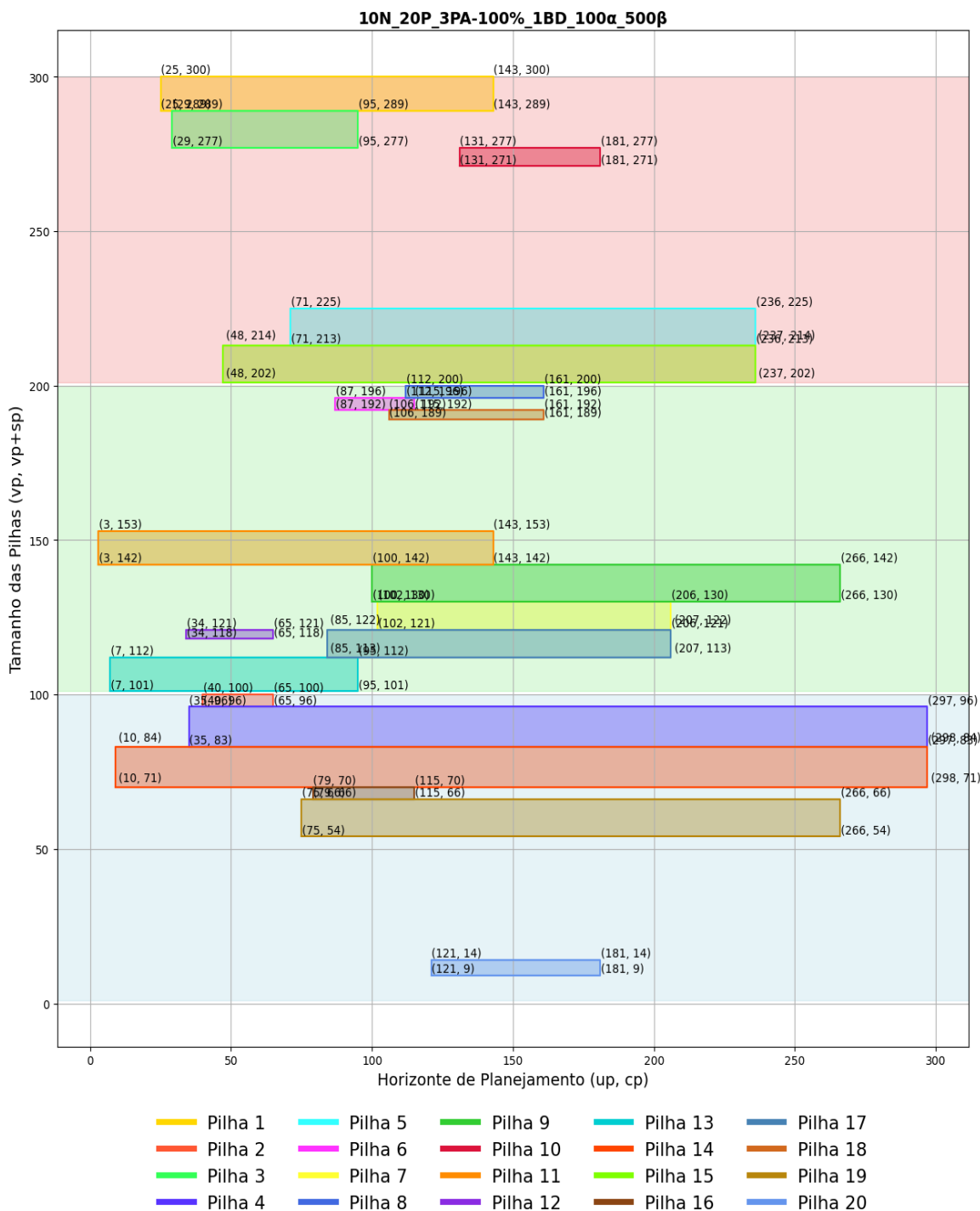
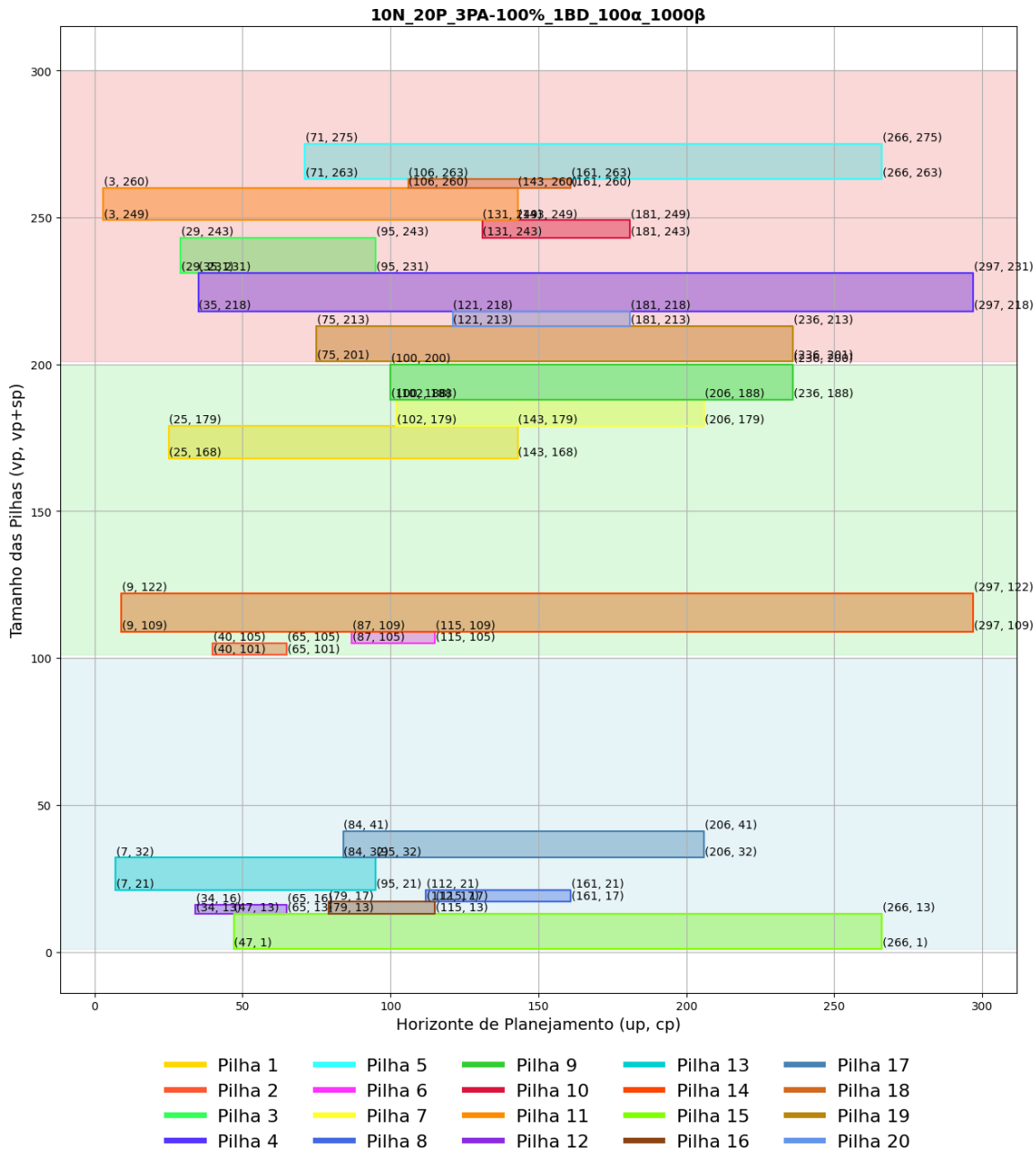
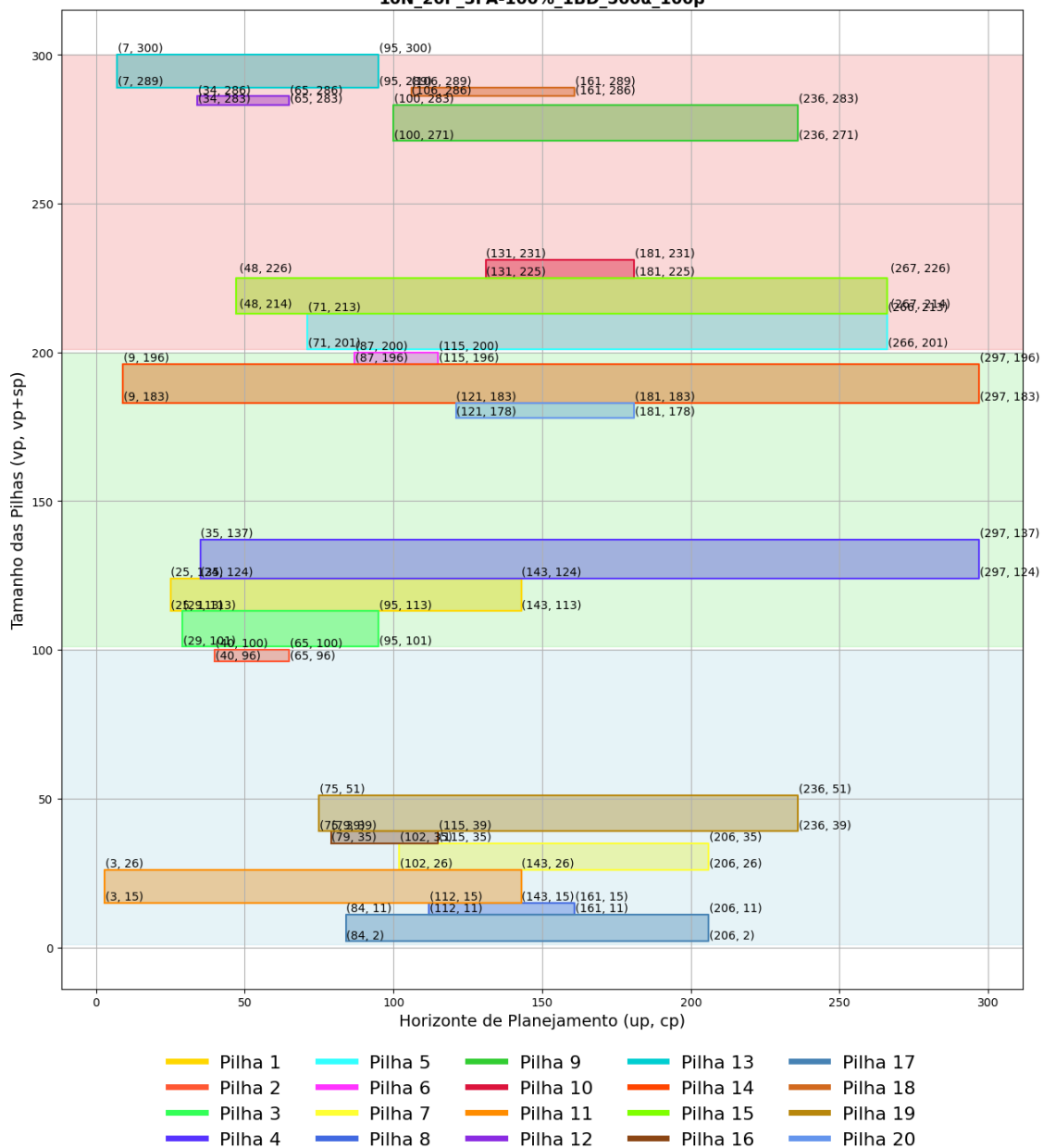


Figura 22 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 3



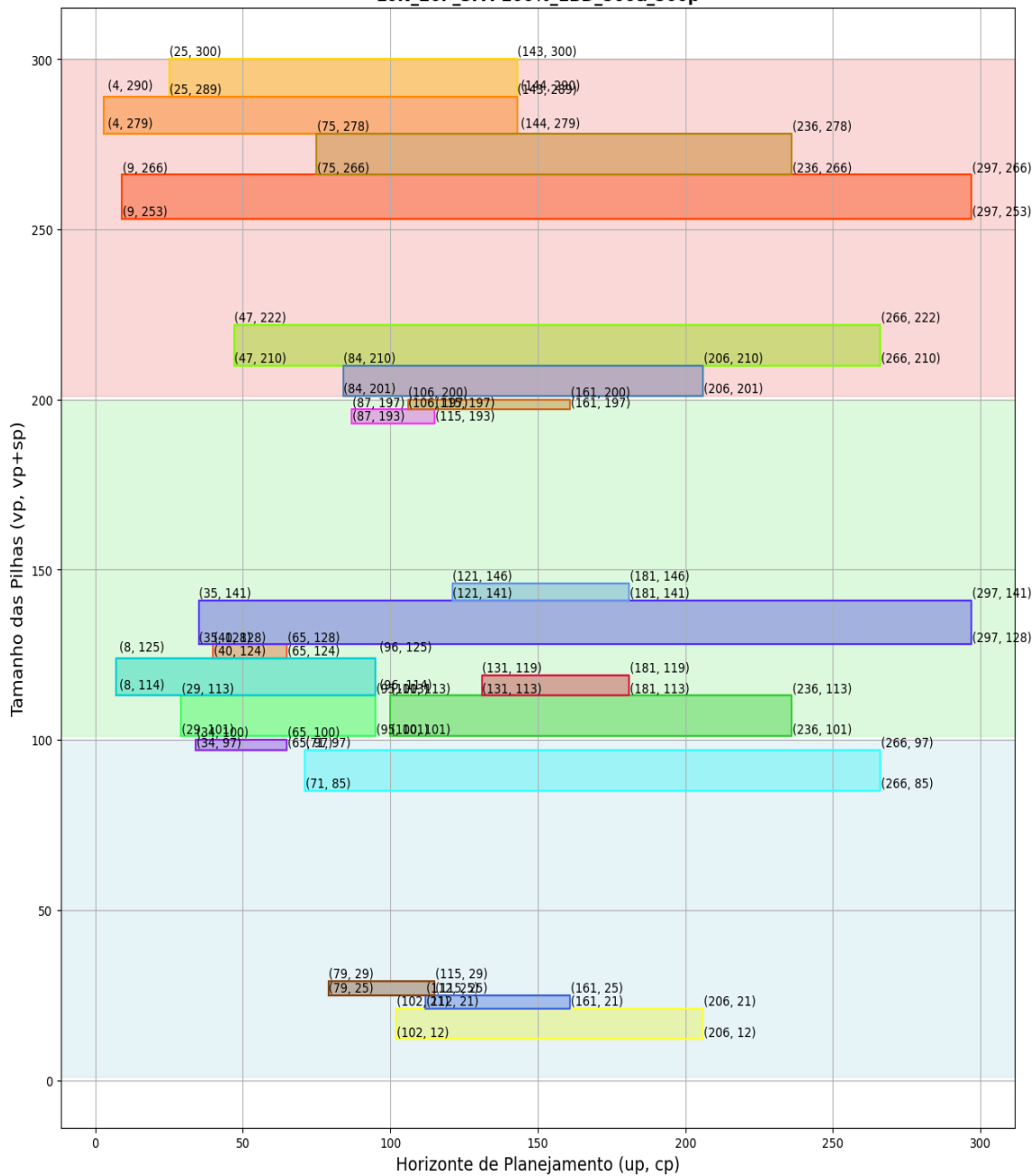
Fonte: Autoras (2024).

**Figura 23 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 4**  
**10N\_20P\_3PA-100%\_1BD\_500α\_100β**



Fonte: Autoras (2024).

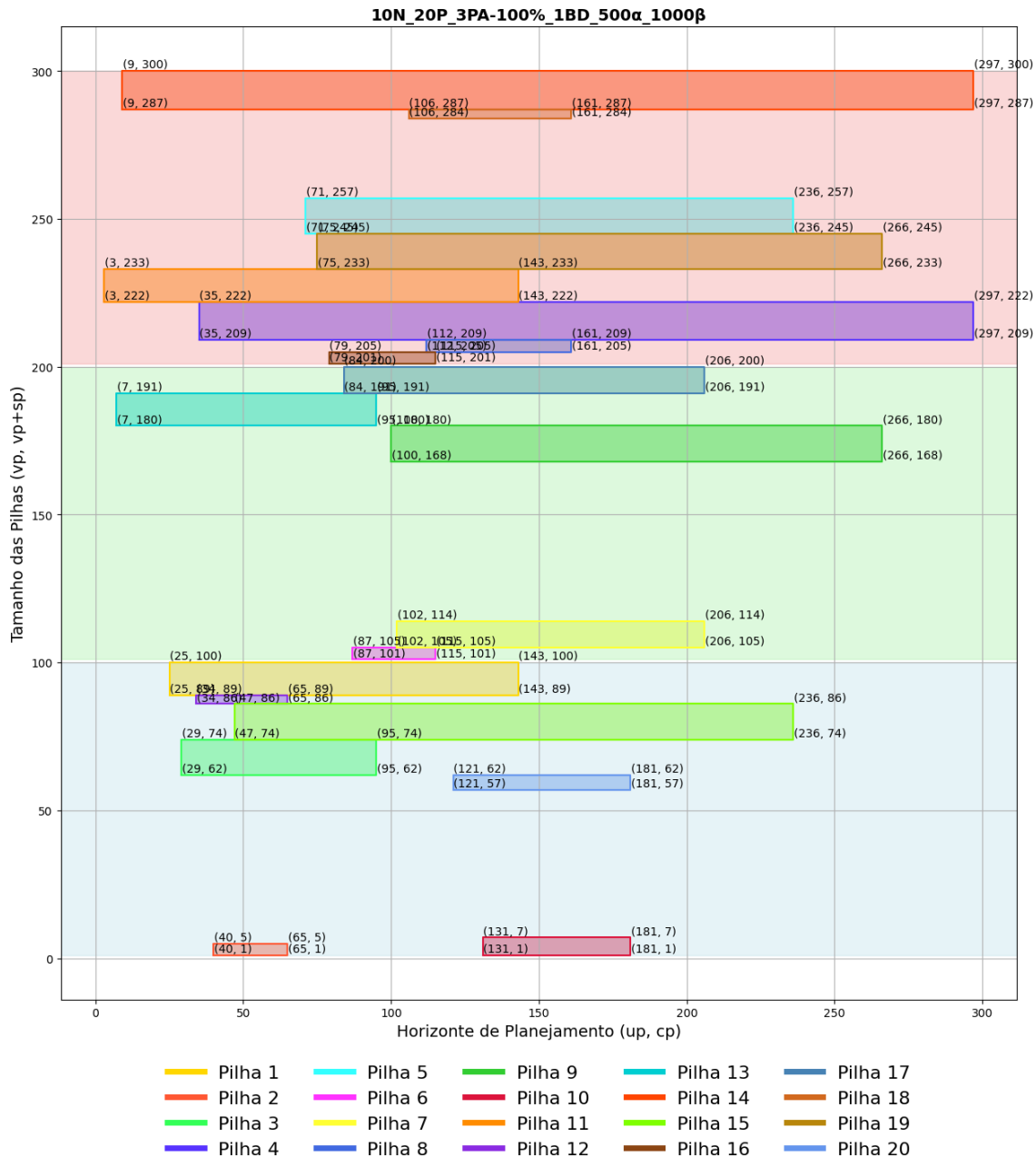
**Figura 24 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 5**  
**10N\_20P\_3PA-100%\_1BD\_500α\_500β**



- Pilha 1
- Pilha 5
- Pilha 9
- Pilha 13
- Pilha 17
- Pilha 2
- Pilha 6
- Pilha 10
- Pilha 14
- Pilha 18
- Pilha 3
- Pilha 7
- Pilha 11
- Pilha 15
- Pilha 19
- Pilha 4
- Pilha 8
- Pilha 12
- Pilha 16
- Pilha 20

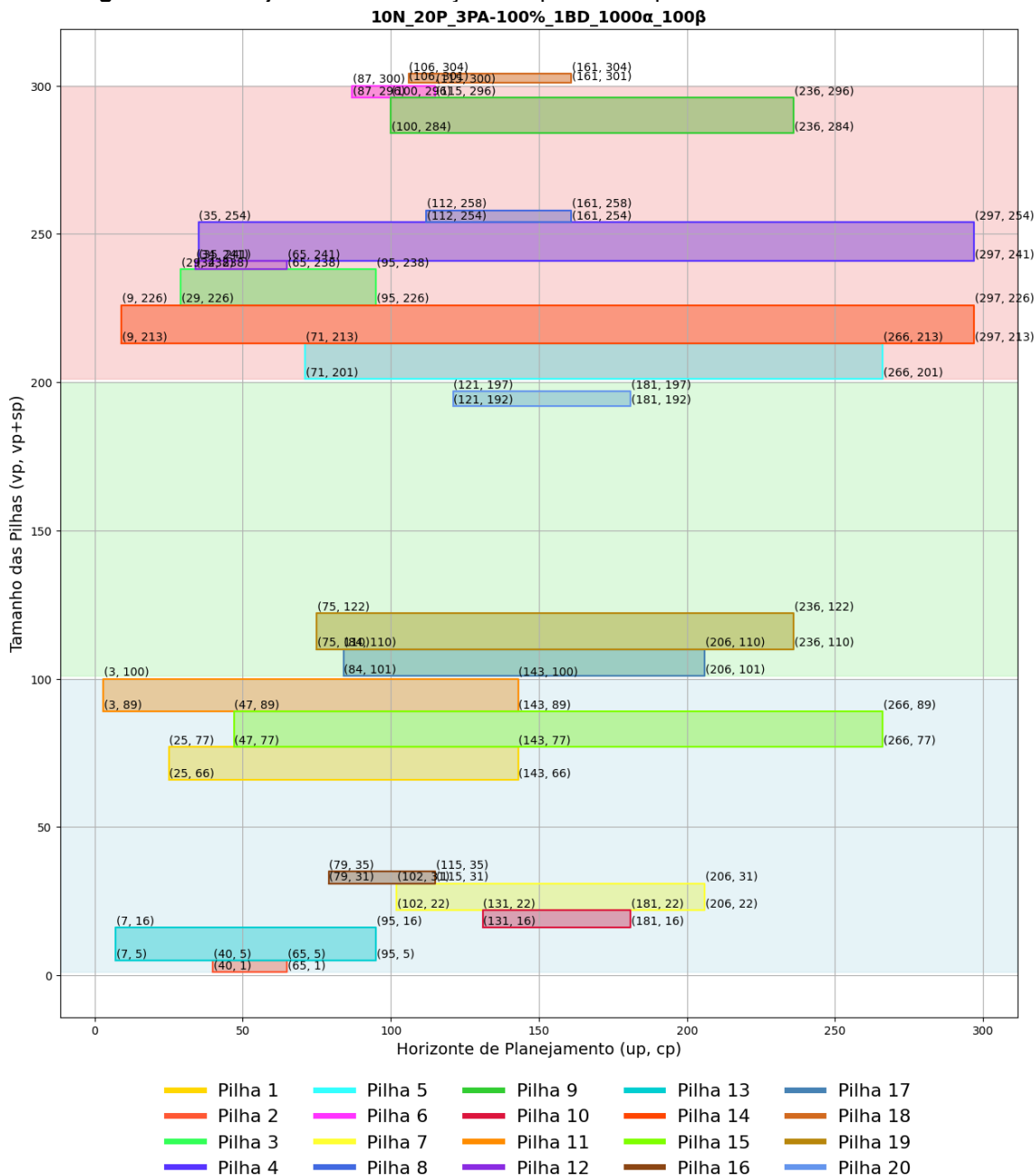
Fonte: Autoras (2024).

Figura 25 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 6



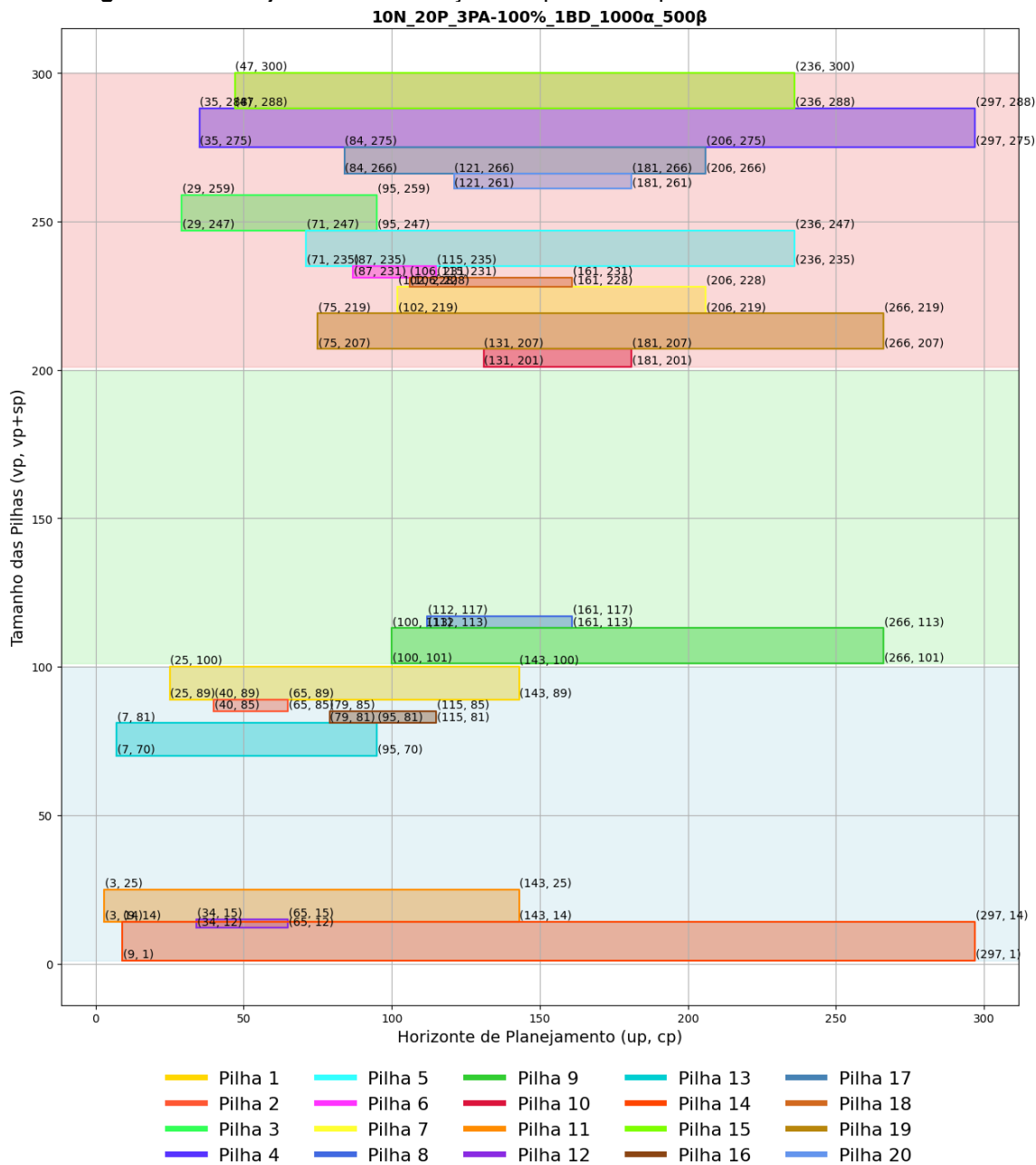
Fonte: Autoras (2024).

**Figura 26 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 7**

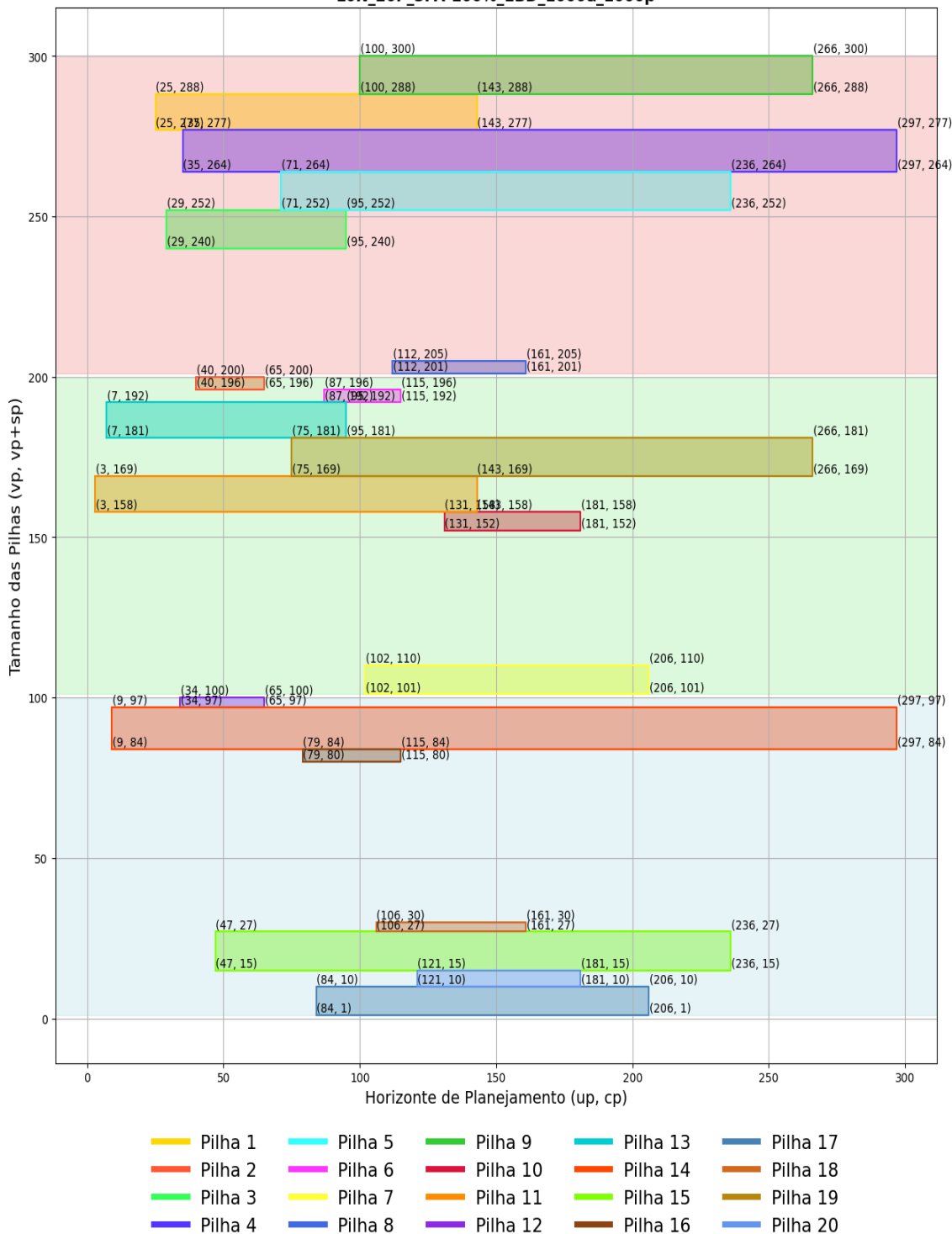


Fonte: Autoras (2024).

Figura 27 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 8

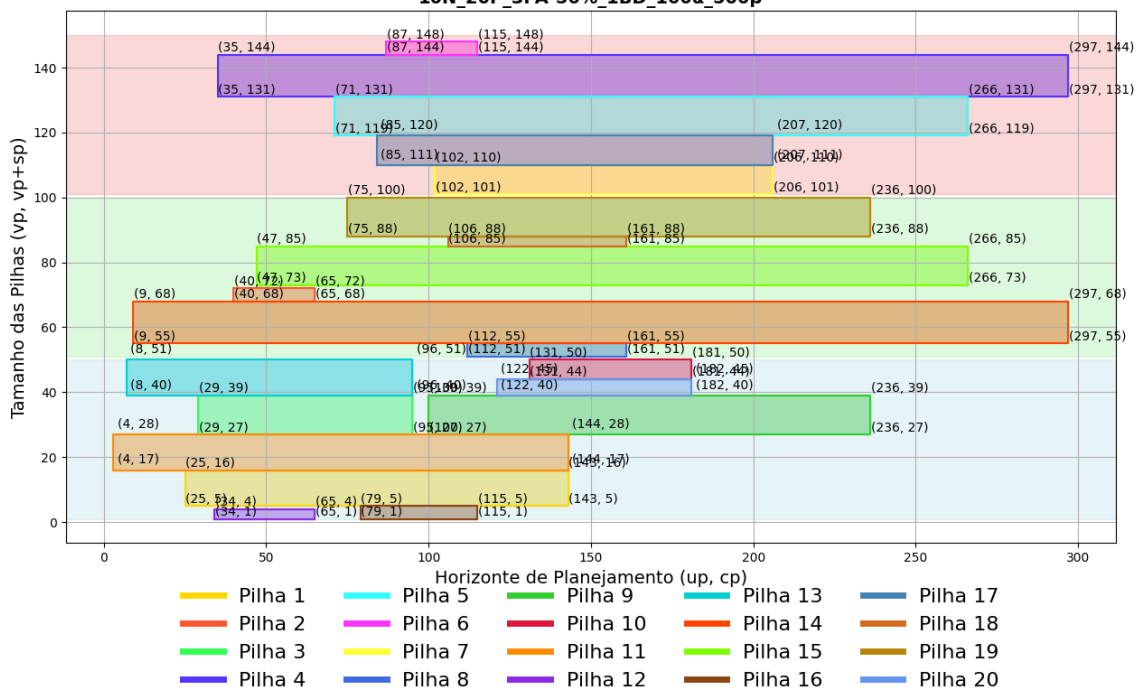


**Figura 28 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 9**  
**10N\_20P\_3PA-100%\_1BD\_1000 $\alpha$ \_1000 $\beta$**



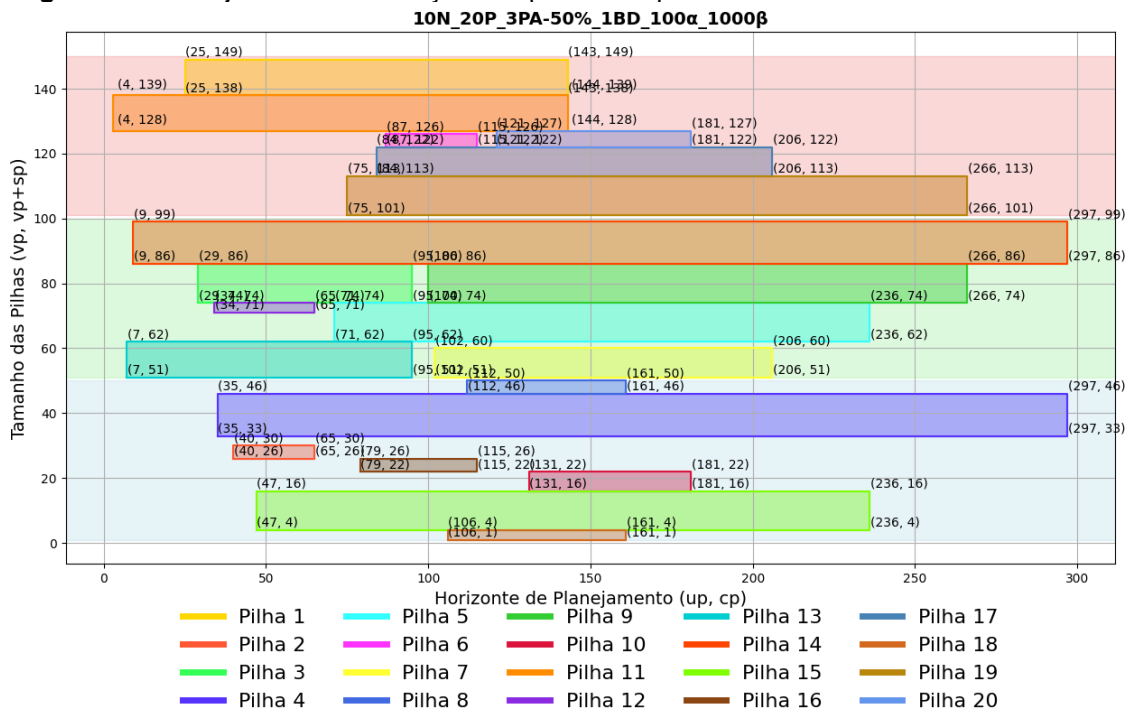
Fonte: Autoras (2024).

**Figura 29 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 11**  
**10N\_20P\_3PA-50%\_1BD\_100α\_500β**



Fonte: Autoras (2024).

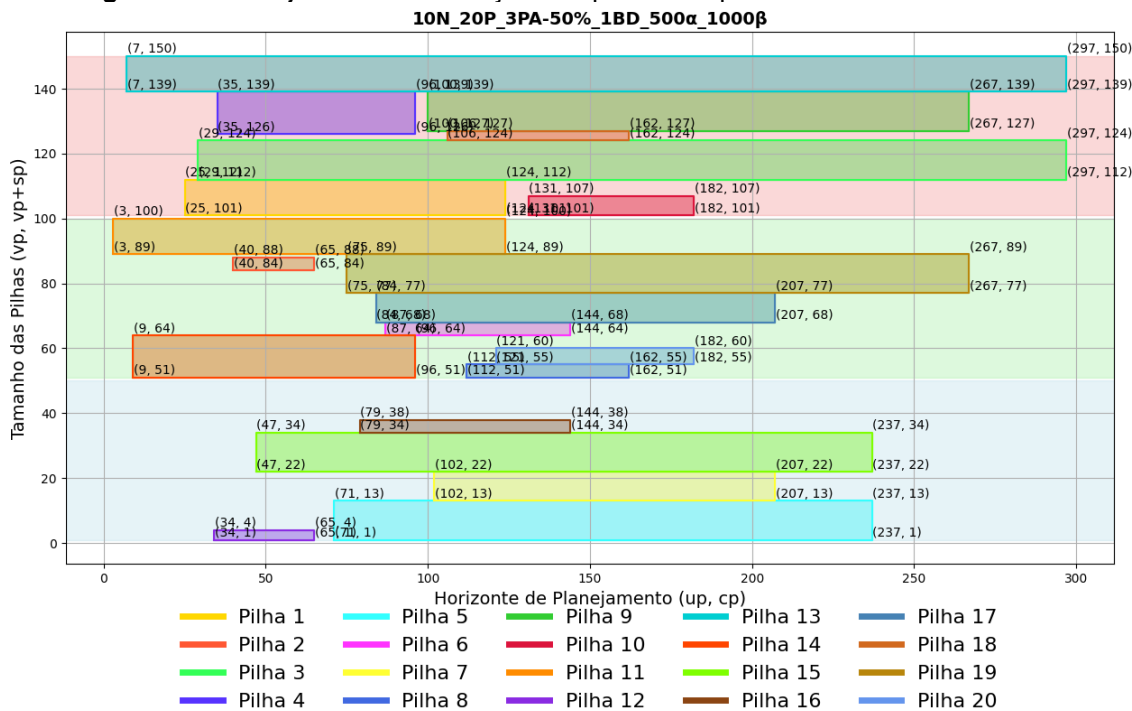
**Figura 30 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste de Teste 12**  
**10N\_20P\_3PA-50%\_1BD\_100α\_1000β**



Fonte: Autoras (2024).

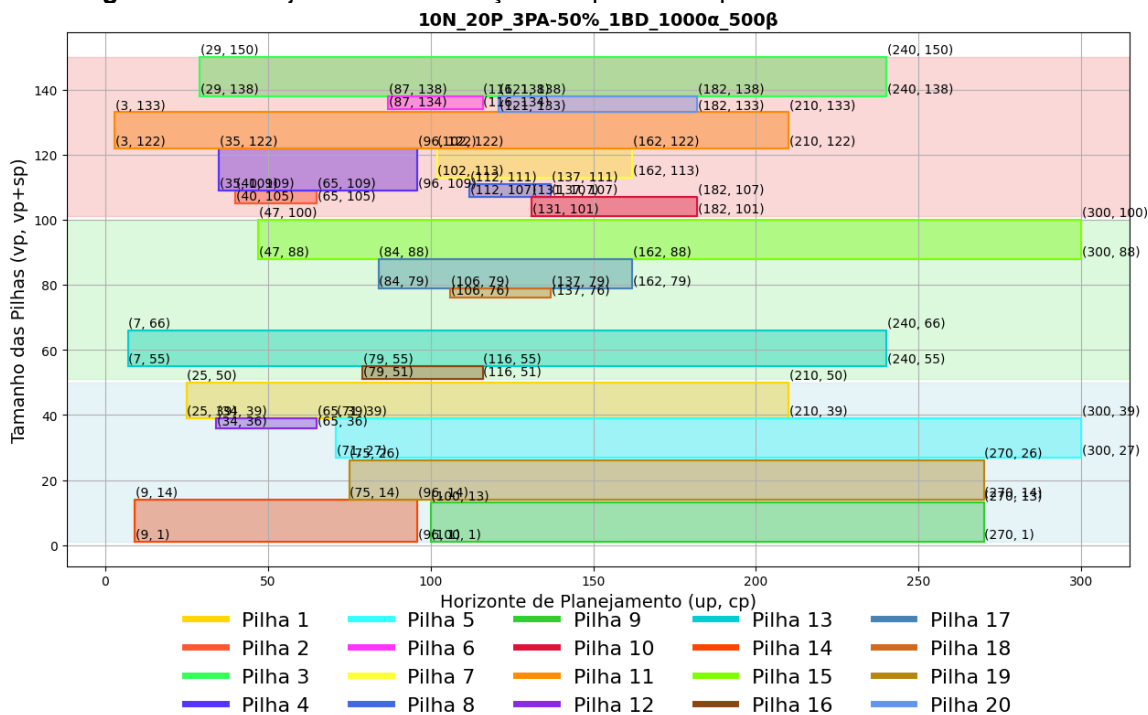


Figura 33 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 15



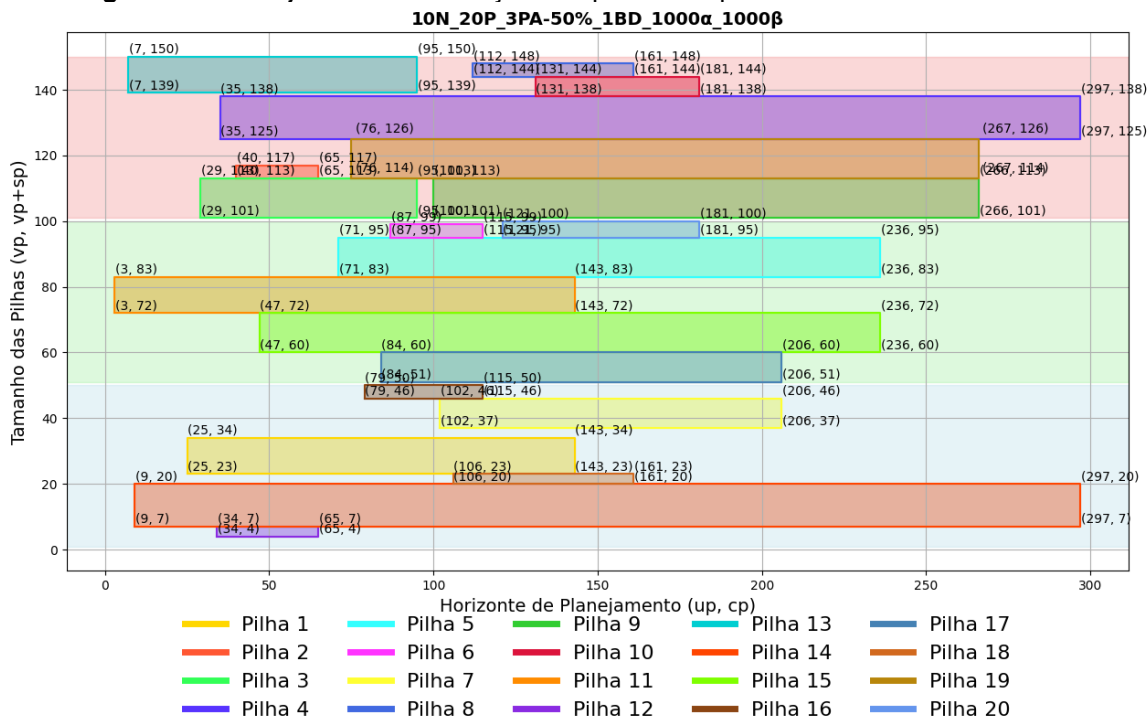
Fonte: Autoras (2024).

Figura 34 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 17



Fonte: Autoras (2024).

Figura 35 - Planejamento de alocação das pilhas nos pátios: Instância de Teste 18



Fonte: Autoras (2024).