

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE MESTRADO EM LOGÍSTICA E PESQUISA OPERACIONAL**

**PROGRAMAÇÃO DE CAMINHÕES DE MÚLTIPLOS TIPOS NO**  
**TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO PARA A CONSTRUÇÃO DE**  
**RODOVIAS**

**JOSÉ LUCIANO LOPES DA COSTA FILHO**

**FORTALEZA – CE**

**2014**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE MESTRADO EM LOGÍSTICA E PESQUISA OPERACIONAL**

**JOSÉ LUCIANO LOPES DA COSTA FILHO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Logística e Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata

**FORTALEZA – CE**

**2014**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós Graduação em Engenharia

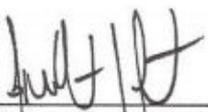
- 
- C872p Costa Filho, José Luciano Lopes da.  
Programação de caminhões de múltiplos tipos no transporte de derivados de petróleo para a construção de rodovias / José Luciano Lopes da Costa Filho. – 2014.  
79 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós – Graduação em Logística e Pesquisa Operacional, Fortaleza, 2014.  
Área de Concentração: Logística e Pesquisa Operacional.  
Orientação: Dr. Bruno de Athayde Prata.
1. Logística. 2. Caminhões - Programação. 3. Rodovias – Projetos e Construção. I.  
Título.

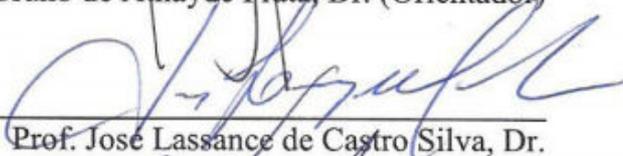
**PROGRAMAÇÃO DE CAMINHÕES DE MÚLTIPLOS TIPOS NO  
TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO PARA A CONSTRUÇÃO DE  
RODOVIAS**

José Luciano Lopes da Costa Filho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE MESTRADO EM LOGÍSTICA E PESQUISA OPERACIONAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM LOGÍSTICA E PESQUISA OPERACIONAL.

Aprovada por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Bruno de Athayde Prata, Dr. (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. José Lassance de Castro Silva, Dr.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Mário Angelo Nunes de Azevedo Filho, Dr.

**FORTALEZA, CE - BRASIL**

**NOVEMBRO/2014**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará (UFC), instituição que possibilitou minha formação como engenheiro e mestre, e onde pude crescer como pessoa e como profissional. Sinto-me orgulhoso e realizado pela oportunidade de estudar na UFC e sempre me lembrarei dela em todas as fases de minha vida acadêmica e nas etapas que ainda virão.

Ao professor Bruno de Athayde Prata pelo aprendizado e ideias trocadas durante a disciplina de Logística Urbana e, sobretudo, durante o período de mais de um ano na orientação da minha Dissertação de Mestrado. Agradeço também ao professor Bruno pela paciência no ensino de programação matemática básica, o que tornou possível desenvolver com qualidade e eficiência os estudos do meu trabalho.

Aos professores Lassance e Mário Angelo pela consideração, pela paciência na leitura do meu texto e na condução dos argumentos e sugestões de melhorias do meu trabalho. Suas considerações e conselhos permitiram o aperfeiçoamento, tanto da forma quanto do conteúdo, desta Dissertação.

A minha mãe, Rita Sales, que sempre me incentivou a seguir os estudos e me dá suporte na busca pelos meus sonhos.

A minha querida esposa, Marília Gladstone, e a minha filha, Maria Clara, pela enorme paciência durante este período, por me apoiarem sempre e acreditarem na conclusão de mais uma importante etapa na minha vida.

Resumo da Dissertação submetida ao GESLOG/UFC como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Logística e Pesquisa Operacional.

## **PROGRAMAÇÃO DE CAMINHÕES DE MÚLTIPLOS TIPOS NO TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO PARA A CONSTRUÇÃO DE RODOVIAS**

José Luciano Lopes da Costa Filho

Novembro/2014

**Orientador:** Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata

O problema de programação de caminhões é um tema de grande relevância na gestão de frota das empresas. Estas enfrentam dificuldades em gerenciar seus veículos devido às diversas variáveis inerentes ao processo, tais como o tamanho ideal da frota, os diversos tipos de caminhões disponíveis, a capacidade de carga do caminhão, as informações técnicas do cliente e o agendamento das viagens. No que se refere ao transporte de derivados de petróleo, existem diversas características operacionais que dificultam a programação de caminhões. Embora a literatura sobre a programação de veículos seja vasta, as abordagens para a programação de caminhões para este tipo de transporte ainda é limitada. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de programação inteira para a otimização da programação de veículos de múltiplos tipos para o transporte de derivados de petróleo para obras de construção de rodovias. Dados reais sobre uma empresa de transporte desse setor foram coletados. Foi desenvolvido um modelo que buscasse a minimização da frota de caminhões disponíveis. Como conclusões, pode-se ressaltar que a metodologia empregada serviu para minimizar a frota necessária no período analisado. O desenvolvimento de indicadores de desempenho permitiu avaliar a qualidade das soluções geradas.

**Palavras-chave:** Programação de Caminhões, Dimensionamento de Frota, Programação Inteira.

Abstract of Thesis submitted to GESLOG/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree Master of Science (M.Sc.) in Logistics and Operational Research.

**MULTI-TYPE TRUCK SCHEDULING FOR THE TRANSPORTATION OF OIL PRODUCTS FOR ROAD CONSTRUCTION SITES**

José Luciano Lopes da Costa Filho

2014 / November

**Advisor:** Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata

The truck scheduling problem is an important topic in the companies' fleet management. Many companies face difficulties to manage their vehicles due to several variables inherent to the management process, such as the optimal fleet size, multiple types of trucks available, trucks capacity, the technical information from the client's construction site and trips scheduling. In terms of the transportation of oil products, there are many operational characteristics that make the truck scheduling difficult. Despite the extensive literature about vehicle scheduling, truck scheduling for this type of transport is limited. The purpose of this research study was to develop an Integer Programming model to optimize the multi-type truck scheduling for the transportation of oil products for road construction sites. Data from a real company were gathered. A model that aimed to minimize the truck fleet available was developed. The method used has minimized the available fleet in the period under review. The development of key performance indicators allows to evaluate the quality of the solutions created.

**Keywords:** Truck scheduling, Fleet Size and Mix, Integer Programming.

**LISTA DAS FIGURAS**

Figura 1: A rota de transporte do petróleo .....	12
Figura 2: As atividades desenvolvidas pelos atores relacionados ao transporte de petróleo e seus derivados .....	13
Figura 3: O fluxo do petróleo e suas atividades detalhadas nos derivados.....	14
Figura 4: Gráfico de Gantt com a solução ótima obtida .....	30
Figura 5: Utilização da frota.....	46
Figura 6: Utilização dos veículos de 35 toneladas.....	46
Figura 7: Utilização dos veículos de 30 toneladas.....	47
Figura 8: Utilização dos veículos de 25 toneladas.....	47

**LISTA DAS TABELAS**

Tabela 1: Características do problema .....	18
Tabela 2: Tabela de horários para o exemplo proposto. ....	29
Tabela 3: Composição da frota de caminhões .....	33
Tabela 4: Distância das principais obras .....	34
Tabela 5: Resultados computacionais.....	37
Tabela 6: Indicadores de desempenho.....	44
Tabela 7: Utilização dos caminhões.....	45

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Programação da Semana 1.....	38
Quadro 2: Programação da Semana 2.....	38
Quadro 3: Programação da Semana 3.....	39
Quadro 4: Programação da Semana 4.....	40
Quadro 5: Programação da Semana 5.....	40
Quadro 6: Programação da Semana 6.....	41
Quadro 7: Programação da Semana 7.....	41
Quadro 8: Programação da Semana 8.....	42
Quadro 9: Programação da Semana 9.....	43

**LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES**

ADP	Asfalto Diluído de Petróleo
AMB	Asfaltos Modificados por Borracha de Pneus
AMP	Asfaltos Modificados por Polímeros
AR	Agentes Rejuvenescedores
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CLP	<i>Constraint Logic Programming</i> (Programação Lógica com Restrições)
CM	Cura Média
CTRC	Conhecimento de Transporte Rodoviário de Cargas
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	Emulsões Asfálticas de Petróleo
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
Petrobras	Petróleo Brasileiro S.A.
RMC	<i>Ready Mixed Concrete</i> (Concreto Misto Pronto)
SPP	<i>Set Partitioning Problem</i> (Problema de Partição de conjuntos)
VSP	<i>Vehicle Scheduling Problem</i> (Problema de Programação de Veículos)

## SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	ix
Lista de Quadros.....	x
Lista de Nomenclaturas e Abreviações.....	xi
Sumário.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Justificativas.....	3
1.3 Definição do problema de pesquisa.....	4
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo geral.....	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
1.5 Etapas da pesquisa.....	5
1.6 Estrutura da dissertação.....	6
2. O TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO PARA A CONSTRUÇÃO DE RODOVIAS.....	7
2.1 Considerações iniciais.....	7
2.2 Derivados de petróleo para a construção de rodovias.....	8
2.3 A operação na usina.....	9
2.4 O transporte de derivados de petróleo para a construção de rodovias.....	10
2.5 A operação na obra.....	15
2.6 Abordagens para o problema.....	16
2.7 Considerações finais.....	24
3. O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS DE MÚLTIPLOS TIPOS.....	25
3.1 Descrição do problema.....	25
3.2 Formulação matemática.....	26
3.3 Exemplo de aplicação.....	29

	xiii
3.4 Considerações finais .....	30
4. ESTUDO DE CASO.....	32
4.1 Apresentação do Estudo de Caso .....	32
4.2 Aplicação do modelo .....	35
4.3 Avaliação de desempenho das soluções propostas.....	43
4.3.1 Proposição dos indicadores de desempenho.....	43
4.3.2 Discussão dos indicadores obtidos.....	44
4.4 Considerações Finais.....	48
5. CONCLUSÕES.....	49
5.1 Relevância, originalidade e resultados obtidos na pesquisa.....	49
5.2 Limitações da pesquisa.....	49
5.3 Proposições para futuros estudos.....	50
5.4 Considerações finais.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
ANEXOS	
ANEXO 1 – Modelo matemático para o exemplo proposto.....	56
ANEXO 2 – Capacidade de carga dos caminhões da empresa X .....	57
ANEXO 3 – Tabelas de horário referente à programação das 9 semanas.....	58
ANEXO 4 – Gráfico de Gantt para a Semana 1.....	67

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações iniciais

A implantação, na década de 50, da indústria automotiva no Brasil levou à intensificação da pavimentação de rodovias. Desde então, o modo rodoviário se expandiu bastante e hoje é o mais expressivo modo de transporte no país (Fleury, Wanke e Figueiredo, 2000).

Além dos projetos de expansão da malha pavimentada, as rodovias já existentes demandam manutenção para recuperar as falhas e problemas ao longo dos trechos, incrementando a demanda por asfalto. Adiciona-se, ainda, a necessidade de melhorias em aeroportos e portos, empreendimentos que compõem o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Segundo o Portal do Ministério do Planejamento, este programa promoveu a retomada do planejamento e execução de grandes obras de infraestrutura social, urbana, logística e energética do país, contribuindo para o seu desenvolvimento acelerado e sustentável. A demanda citada acima cresceu com um grande evento ocorrido em 2014, a Copa do Mundo de Futebol, e deve seguir crescendo com os Jogos Olímpicos que ocorrerão em 2016, visto que a procura pelo transporte rodoviário deve aumentar.

O setor em questão possui especificidades que influem com grande peso na dinâmica de suas atividades. Um exemplo é o crescimento da demanda em anos eleitorais, com a continuidade e conclusão de várias obras nas cidades, enquanto que em períodos chuvosos há dificuldade no progresso das obras, reduzindo a demanda pelos produtos. Há, ainda, o problema das condições de oferta, que envolve produção e estoque, cujo impacto ocorre diretamente no planejamento das obras. Em alguns períodos é interessante que estoques sejam mantidos para períodos com maior demanda, ou seja, em que há maior fluxo de caminhões. Em períodos de forte demanda, em que as distribuidoras não conseguem atender satisfatoriamente aos pedidos, é necessário importar os produtos para manter o atendimento às obras.

Ressalta-se que a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento de estradas na maioria dos países. Conforme relatório do DNIT (2006), no Brasil, cerca de 95% das estradas são revestidas por asfalto. Entretanto, segundo Bernucci *et al.* (2007),

a competitividade da economia brasileira é prejudicada pela falta de investimentos em infraestrutura, levando a acidentes devido ao estado da malha viária em grande parte das rodovias, além de acidentes, gastos com manutenção de veículos e consumo excessivo de combustíveis.

A programação de caminhões de derivados para a construção de rodovias é uma questão importante dentro do estudo de otimização do transporte rodoviário. No caso, voltado especificamente ao transporte de derivados de petróleo. A importância é notada na necessidade de se cumprir os prazos estabelecidos pelas construtoras para o recebimento dos produtos e atendimento das diversas obras. Para tal, faz-se necessário desenvolver uma metodologia que assegure o devido carregamento dos produtos, de forma a alocar o caminhão certo para o atendimento, verificando capacidade de carga do veículo e tamanho do pedido do cliente.

Após uma revisão bibliográfica, pôde-se salientar que a literatura atual mostra-se insuficiente na abordagem do tema em questão e que há necessidade de estudos nesta área. A distribuição eficiente dos derivados de petróleo pode trazer ganhos consideráveis às empresas envolvidas e muitos gestores não atentam para este fato, trabalhando com gestão ineficaz e não buscando melhorias nos processos internos.

Para solucionar o problema de programação de veículos em sistemas de transporte público, destacam-se alguns trabalhos. Métodos de otimização exata e heurísticas são apresentados por Carraresi e Gallo (1984), Beaujon e Turnquist (1991), Wang e Shen (2007). Para abordagens relacionadas à solução de problemas de programação de veículos com múltiplos tipos, Ferlang e Michelon (1988) desenvolveram modelos com tarefas a serem executadas por uma frota de veículos. Bauschet *et al.* (1994) também citam problemas de veículos de variados tipos, tais como variações em sua estrutura, o que alteram as características de cada veículo. Eliiyi *et al.* (2008) tratam das viagens que percorrem somente um percurso com o caminhão carregado, ou seja, este leva o produto a um determinado cliente e precisa retornar vazio para realizar uma nova coleta. Ceder (2011) aborda a programação de veículos com múltiplos tipos cujas viagens devem seguir uma tabela de horários. O interesse é alocar os veículos de forma a atender os horários das viagens, minimizando os custos operacionais.

## 1.2 Justificativa

O estudo da programação (*scheduling*) de veículos para o transporte de asfalto e derivados é de grande importância para as empresas do setor, pois uma alocação inadequada pode acarretar em alguns problemas, tais como acréscimo nos custos operacionais, aumento dos tempos de entrega dos produtos e atraso no retorno dos veículos bem como em uma maior ociosidade da frota. O atraso mencionado pode ser referente ao erro na alocação de um caminhão com destino a uma determinada obra, cuja demanda é menor que a carga transportada. Assim, é provável que o veículo fique algum tempo na obra, até descarregar todo o produto, ocasionando atraso em seu retorno.

O desenvolvimento de um *scheduling* de caminhões para as diversas obras de construção de rodovias e o estudo de suas particularidades é fundamental para a melhoria da gestão de uma transportadora deste segmento. O interesse é trabalhar a gestão da frota de uma transportadora de derivados de petróleo e apresentar os benefícios da programação adequada dos caminhões. As consequências serão a redução de custos operacionais, dos tempos de viagem entre refinaria e obra ou entre usina e obra, a minimização das incompatibilidades existentes entre as viagens, tais como o problema relacionado ao tamanho dos tanques (tanto dos caminhões quanto das obras).

O desenvolvimento de um modelo de programação matemática que vise otimizar e automatizar a alocação de veículos para o transporte de derivados de petróleo trás uma contribuição para a área de logística de transportes de cargas, visto que um modelo desta natureza pode mitigar os impactos negativos elucidados *a priori*. É pertinente destacar que são escassos os estudos nessa área, notadamente no Brasil.

Ressalta-se que a abordagem proposta proporciona benefícios para o sistema de transporte de derivados de petróleo, que vão além da redução dos custos, passando pelo planejamento adequado dos veículos para carregamento conforme dimensões da carreta e a demanda do cliente, evitando a designação de um veículo cuja capacidade não é adequada para o atendimento do pedido. É necessário evitar que a carreta alocada para o atendimento de um pedido tenha capacidade inferior ao pedido do cliente.

Outra vantagem da abordagem refere-se ao planejamento com foco na obra, ou seja, a alocação do veículo cuja capacidade é adequada à capacidade dos tanques, evitando enviar veículos com possibilidade de gerar uma estadia na obra. É necessário evitar que a carreta alocada para o atendimento de um pedido tenha capacidade maior que a capacidade do tanque da obra.

De acordo com a experiência do autor vivenciada em uma empresa do setor, a grande maioria dos carregamentos não seguiam nenhum tipo de planejamento e, com certa frequência, ocorriam problemas no carregamento da carreta na usina e na entrega nas obras. Veículos com capacidade inferior ao pedido do cliente chegavam para carregar e era necessário negociar com a construtora um novo carregamento para suprir a demanda semanal programada. O problema era verificado quando não havia veículo com a capacidade igual ao que restava carregar, sendo necessário enviar caminhão com carga excedente, resultando em ineficiência operacional e em desgaste com o cliente.

### **1.3 Definição do problema de pesquisa**

Para o sucesso das empresas é necessário que sua mercadoria esteja sempre à disposição do consumidor. Assim, as empresas devem planejar o transporte de seus produtos. De acordo com Nazário (2000), para que o produto seja competitivo, é indispensável um sistema de transporte eficiente, pois o custo de transporte é uma parcela considerável do valor deste produto.

Segundo Christopher (2001), a finalidade principal de qualquer sistema logístico é a satisfação dos clientes. Assim, a missão do gerenciamento logístico é planejar e coordenar todas as atividades necessárias para alcançar níveis desejáveis dos serviços e qualidade ao custo mais baixo possível.

Dentro da conjuntura apresentada, pode ser formulado o seguinte problema de pesquisa: “Como alocar caminhões para o transporte de derivados de petróleo destinados à construção de rodovias de modo a minimizar os custos de distribuição?”

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo adaptar um modelo de Programação Inteira existente para a otimização da programação de veículos para o transporte de derivados de petróleo para obras de construção de rodovias.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos, podem ser destacados:

- a) identificar as variáveis e restrições envolvidas no problema de programação de caminhões para o transporte de derivados de petróleo;

- b) aplicar a abordagem proposta em um estudo de caso real, de modo a validá-la sob o ponto de vista prático; e
- c) comparar as soluções geradas pelo modelo proposto com soluções reais implementadas pela empresa estudada, de modo a avaliar os benefícios da abordagem proposta.

### **1.5 Etapas da pesquisa**

A pesquisa foi composta por cinco etapas, apresentadas a seguir:

(i) Revisão bibliográfica

A revisão da literatura da presente pesquisa consistiu na busca de trabalhos que tratassem do transporte de derivados e que auxiliassem no desenvolvimento do modelo para otimização do problema abordado.

(ii) Coleta de dados

Os dados foram coletados através de trabalho realizado durante determinado período em empresa transportadora de derivados de petróleo para obras de construção de rodovias.

(iii) Formulação matemática

Foi desenvolvido um modelo de programação matemática para apoiar o trabalho e buscar melhorias relacionadas ao transporte dos derivados e suas particularidades.

(iv) Estudo de caso

Foram caracterizadas as variáveis relacionadas ao transporte de derivados de petróleo, com dados reais referentes aos custos envolvidos, as particularidades das carretas e as informações técnicas das obras, além da forma de gestão existente.

(v) Conclusões

Nesta etapa, os esforços foram dirigidos para a explicitação das principais conclusões, recomendações e sugestões acerca do modelo proposto. Por fim, foram concebidas as considerações finais.

## **1.6 Estrutura da Dissertação**

A Dissertação é composta por cinco capítulos, descritos a seguir. O primeiro Capítulo constitui a introdução do trabalho. No segundo Capítulo são apresentados conceitos acerca do transporte de derivados de petróleo, abordando suas particularidades, a dificuldade do transporte relacionada ao tipo de produto e os problemas operacionais, tanto da frota, como das obras. No terceiro Capítulo é apresentado o desenvolvimento do modelo. No quarto Capítulo é apresentado o estudo de caso. Por fim, no quinto Capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho em questão, bem como sugestões para futuros estudos.

## CAPÍTULO 2

# O TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETRÓLEO PARA A CONSTRUÇÃO DE RODOVIAS

### 2.1 Considerações iniciais

Há várias formas de transportar os derivados de petróleo do centro produtor (refinarias ou petroquímica central) às bases de armazenamento (distribuidoras). Para isso, devem-se utilizar meios que possam levar os produtos originados nas fábricas aos seus clientes finais, no caso, os variados modos de transporte, tais como rodoviário, ferroviário, dutoviário e hidrovioário. Será dada ênfase ao transporte rodoviário, por ser utilizado em larga escala no território brasileiro, bem como por ser o único que permite o transporte porta-a-porta, no caso da construção de rodovias.

Segundo Cardoso (2004), no Brasil, o transporte de cargas, de um modo geral, é realizado preponderantemente pelo modo rodoviário. Em algumas regiões, o índice de utilização do modo rodoviário ultrapassa 90%. Isto ocorre porque o país adotou, notadamente no Governo Juscelino Kubitschek, uma política de investimentos amplamente voltada para a construção de estradas, com vistas a interligar as unidades federativas, bem como para escoar a produção agroindustrial. Sendo assim, o transporte rodoviário foi privilegiado em relação aos outros modais.

O transporte de derivados de petróleo, pelo modo rodoviário, é feito em caminhões-tanque. Alguns apresentam apenas um único tanque, enquanto outros já apresentam tanques segmentados, possibilitando o transporte de mais de um tipo de produto, atendendo às solicitações dos clientes. As capacidades dos tanques também variam, sendo estabelecidas pelo INMETRO. Os derivados oriundos de uma refinaria normalmente são enviados para as distribuidoras através de oleodutos e armazenados em tanques. Posteriormente, a distribuidora atenderá a seus clientes nas quantidades necessárias através dos caminhões-tanque.

A programação de caminhões (*truck scheduling*) para as obras de construção de rodovias envolve particularidades que devem entrar na problemática em questão, tais como as dificuldades de acesso às obras, as características dos caminhões, como, por exemplo, a capacidade de carga e o consumo de combustível. Vale ressaltar que as

características de cada obra devem ser levadas em conta, pois há variadas quantidades de tanques com capacidades distintas para receber os produtos.

## **2.2 Derivados de petróleo para a construção de rodovias**

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem, sendo conhecidas mais de 100 aplicações, desde a agricultura até a indústria. Segundo DNIT (2006), na maioria dos países a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento das estradas. No Brasil, cerca de 95% das rodovias pavimentadas são revestidas por asfalto e o modo rodoviário é o mais expressivo meio de transporte de cargas.

Conforme Senço (1997), o asfalto é um material aglutinante de consistência variável e cor pardo-escura ou negra, no qual o principal constituinte é o betume, podendo ocorrer na natureza ou ser obtido através da refinação do petróleo, como uma das últimas frações obtidas na torre de destilação. O asfalto pode ser encontrado em estado sólido, pastoso ou líquido, podendo ser de uso industrial e em pavimentação. Por sua vez, o asfalto de petróleo é obtido a partir do refino do petróleo de base asfáltica, isento de impurezas, e constitui o produto mais empregado no mundo nos serviços de pavimentação.

Os ligantes asfálticos são produtos derivados do asfalto por processos industriais, utilizados na pavimentação. Os principais ligantes existentes no mercado são:

- a) Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP);
- b) Asfalto Diluído de Petróleo (ADP);
- c) Emulsões Asfálticas de Petróleo (EAP);
- d) Asfaltos oxigenados ou soprados de uso industrial;
- e) Asfaltos Modificados por Polímeros (AMP);
- f) Asfaltos Modificados por Borracha de pneus (AMB);
- g) Agentes Rejuvenescedores (AR).

São empregados frequentemente em pavimentação os CAP's, ADP's e EAP's, sendo tais ligantes descritos a seguir.

Os cimentos asfálticos, derivados do petróleo, são designados, no Brasil, de acordo com a sua consistência, medida mediante o ensaio de penetração (DNER, 1973). No território brasileiro, os tipos mais produzidos são classificados como CAP 50/60,

CAP 85/100, CAP 100/120 e CAP 150/200. Ainda conforme o Ensaio de Penetração do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER ME 03/73), os CAP's são aplicados em diversos tipos de misturas asfálticas empregadas na construção da capa de rolamento e, em alguns casos, na camada de base do pavimento. Os CAP's, em suas aplicações, devem estar livres de água e serem homogêneos em suas características. Atualmente, o CAP produzido nas diversas refinarias da Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRÁS) é do tipo CAP 50/70 (mais consistentes). Ressalta-se que, para utilização em misturas asfálticas, o produto deve ser aquecido em usinas, numa faixa de temperatura adequada, para que possa ser manipulado, pois na temperatura ambiente apresenta consistência sólida.

Os asfaltos diluídos são produzidos através da adição de um diluente volátil, obtido do próprio petróleo, que varia conforme o tempo necessário para a perda desse componente adicionado, restando o asfalto residual após a aplicação (IBP, 1999; HUNTER, 2000; SHELL, 2003). Bernucci *et al.* (2007) citam que, no Brasil, são fabricados dois tipos de ADP's, chamados de cura média e cura rápida. O termo cura refere-se à perda dos voláteis e depende da natureza do diluente utilizado.

As emulsões asfálticas consistem na mistura heterogênea entre dois ou mais líquidos imiscíveis, porém, quando mantidos em suspensão por meio de agitação ou por adição de um agente emulsificante, formam uma mistura estável (ABEDA, 2001).

Segundo Bernucci *et al.* (2007), os dois líquidos presentes na mistura das emulsões asfálticas são asfalto e água, as quais representam uma classe particular de emulsão óleo-água. A fase óleo tem alta viscosidade e os materiais não formam uma emulsão pela simples mistura entre ambos, sendo necessária a adição de um agente emulsificante, para garantir a estabilidade da solução.

### **2.3 A operação na usina**

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é um tipo de revestimento asfáltico que consiste em uma mistura de um ou mais agregados minerais e cimento asfáltico de petróleo, espalhado e comprimido a quente (SENÇO, 2001).

A produção de CBUQ é realizada a partir da mistura a quente do CAP aos agregados minerais (brita e pó de brita). A usina utiliza silos dosadores para realizar o controle das quantidades necessárias. Os agregados citados são movimentados com o uso do secador, que consiste em um cilindro horizontal rotativo. A mistura dos agregados ao CAP é realizada fora do tambor secador. Aquece-se o CAP em uma

caldeira térmica e os agregados, após a secagem, recebem a adição de CAP 20 e CAP 30, sendo esta mistura homogeneizada, resultando-se, portanto, na formação da massa asfáltica (DNIT, 2006).

#### **2.4 O transporte de derivados de petróleo para a construção de rodovias**

O transporte do produto para o cliente é precedido por algumas etapas importantes, tais como o abastecimento de combustível, o carregamento do veículo, a liberação da nota fiscal do produto e a definição do roteiro de viagem.

O abastecimento de combustível ocorre logo quando o transportador é informado do destino da carga e do produto a ser carregado. Após a definição do produto a ser transportado, bem como do cliente, é efetuado o abastecimento do veículo, conforme especificações do caminhão e do produto que será carregado na usina. As variáveis que influenciam no abastecimento do caminhão são a capacidade de carga do veículo, o tipo de produto transportado e a distância da usina à obra, as quais serão fundamentais no cálculo do combustível requerido. O tempo de abastecimento varia com a quantidade de combustível necessária. Ressalta-se que não é viável abastecer os tanques de combustível do caminhão por completo, ao menos que a viagem seja longa, pois o peso extra pode reduzir o tempo de entrega do produto na obra.

A segunda etapa é o carregamento do veículo, em que o caminhão, devidamente abastecido, estaciona na balança para emissão de documento com o peso da carreta vazia, posicionando-se na plataforma para o início do carregamento. Então, após o carregamento, o caminhão posiciona-se novamente na balança para aguardar a emissão de nota fiscal.

A terceira etapa é a liberação da nota fiscal. Deve-se observar que a duração da emissão da nota fiscal depende da eficiência e da disponibilidade do órgão responsável em cada Estado. Quando ocorre algum problema na emissão da nota fiscal eletrônica, o transportador pode esperar horas para receber a nota fiscal. Ressalta-se que o transportador, ao receber a nota fiscal da distribuidora, ainda necessita emitir o Conhecimento de Transporte Rodoviário de Cargas (CTRC), que será anexado à nota fiscal que seguirá com o motorista.

A última etapa consiste na definição do roteiro de viagem, embora esta atividade também possa ser realizada durante o carregamento. Quando não é possível, pelo fato do motorista estar acompanhando o carregamento do veículo, a conversa com o gestor de Logística deve ser realizada após a liberação da nota fiscal e do CTRC. Esta

orientação precisa ser bastante objetiva, evitando conversas demoradas e prejudicando o início da viagem. Nesta fase, são discutidos os seguintes temas: plano de viagem, tempo estimado de chegada à obra, comunicação durante todo o percurso e comunicação ao chegar à obra.

O plano de viagem consiste na definição de um itinerário, concebido com base na experiência do motorista e do gerente de Logística, que leve a uma boa solução, no que concerne ao tempo de viagem e ao consumo de combustível.

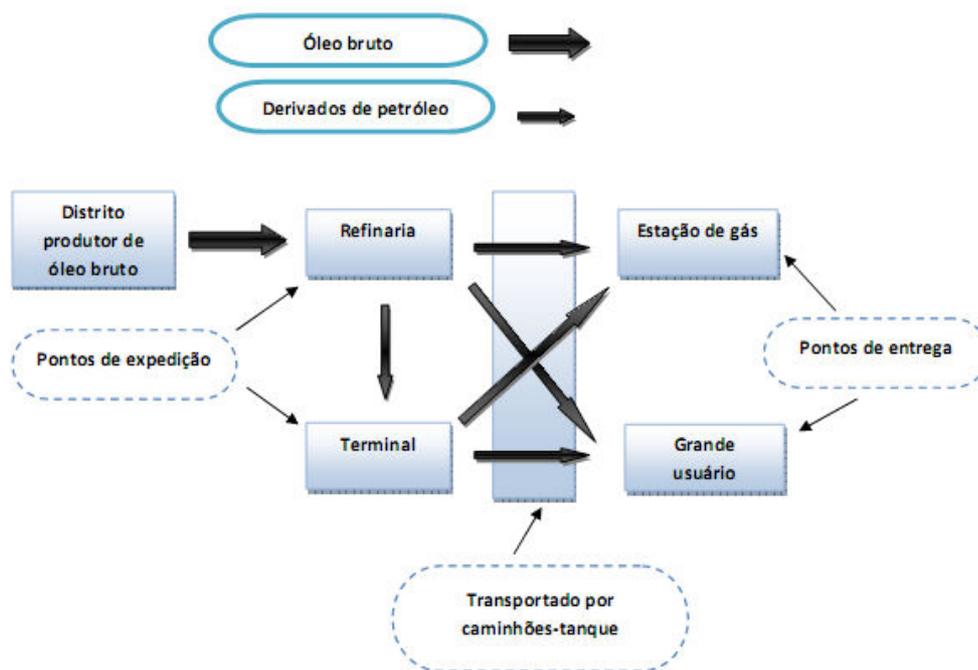
O tempo estimado de chegada à obra inclui qualquer parada a ser realizada, seja para reabastecimento do veículo ou para descansos por parte do motorista. É importante que os cálculos deste tempo aproximem-se o máximo possível da realidade, pois o responsável na obra disponibilizará um funcionário para receber o produto, e, em algumas situações, o veículo chega ao local à noite ou nos finais de semana.

Sempre que houver mudanças significativas no tempo de chegada ao cliente, todos os atores envolvidos no processo devem ser comunicados imediatamente. O motorista deve contatar o gestor de Logística e este entra em contato com a distribuidora, a qual, por fim, informa o novo prazo de chegada do caminhão no cliente.

O motorista deve manter contato constante com o gerente de Logística, informando-o em caso de problemas mecânicos, elétricos ou hidráulicos detectados no caminhão, necessidade de abastecimento extra ou demais alterações no roteiro previamente acertado, bem como em caso de novo prazo para chegada à obra.

O contato do motorista com o gestor de Logística é fundamental na chegada do veículo ao destino, pois serão transmitidas informações do estado atual da obra, da capacidade de tancagem da mesma, da situação do produto carregado (se a temperatura está adequada para a descarga ou há necessidade de aquecer a carga) e demais problemas técnicos verificados no local.

Conforme Hatori (2000), o petróleo bruto é transportado do distrito produtor para a refinaria, onde é separado nos seus vários derivados, tais como gasolina, querosene e óleo pesado. Estes produtos são transportados da refinaria diretamente ou via terminais para os usuários. Normalmente, o transporte é executado por caminhões-tanque, que coletam o produto nas refinarias ou nos terminais (chamados pontos de expedição). Na Figura 1, é ilustrada a rota do petróleo desde a sua produção até a chegada ao consumidor.

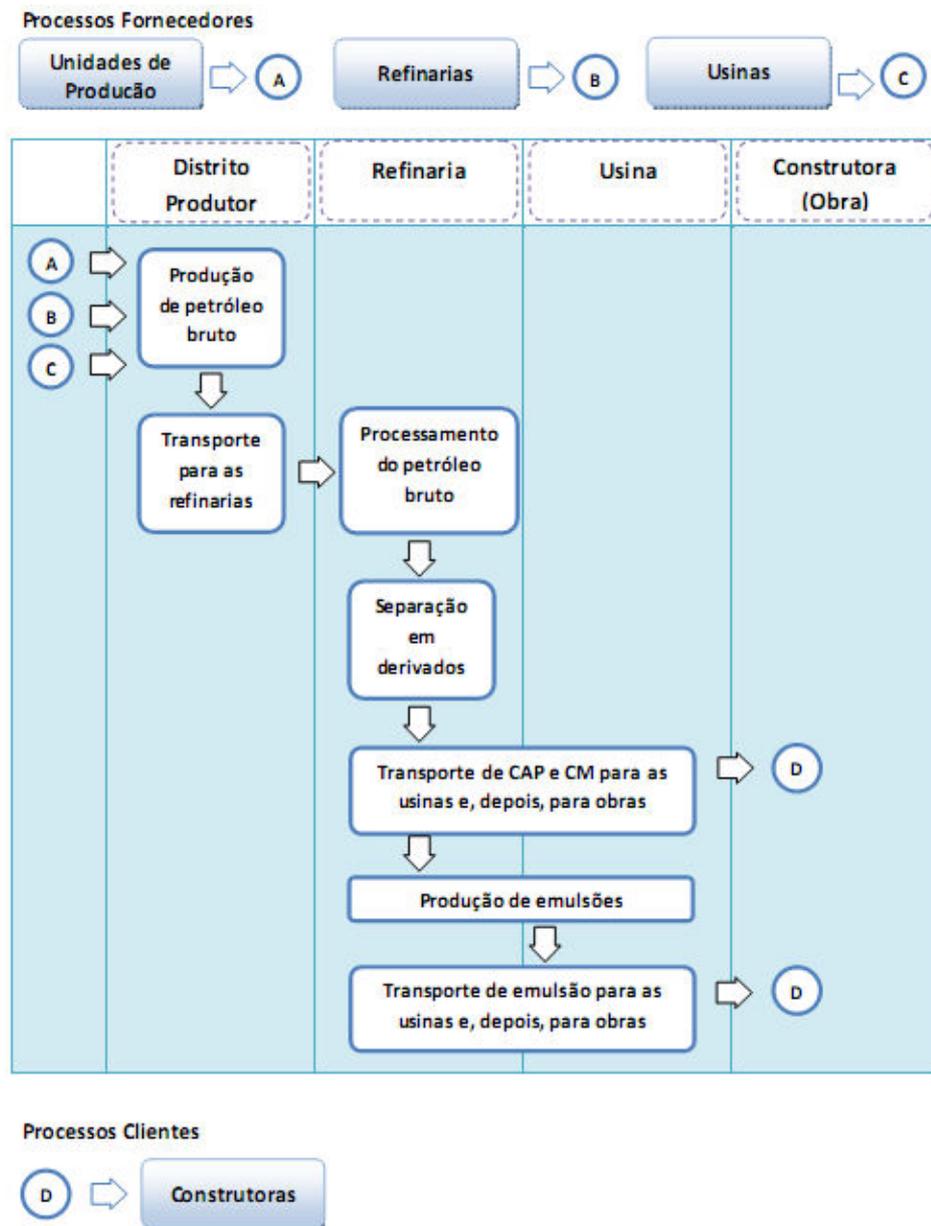


**Figura 1:** A rota de transporte do petróleo e derivados.

**Fonte:** Hatori (2000).

Hatori (2000) afirma que os produtos são carregados em um caminhão-tanque a partir do ponto de expedição do produto. Na etapa seguinte, o caminhão segue até os pontos de entrega, desembarca os produtos e segue até o próximo ponto de expedição. Este roteiro é denominado viagem e cada uma tem, normalmente, um ponto de expedição de carga, embora possam existir pontos de entrega de pequenas quantidades dos produtos, visando a uma entrega eficiente.

Na Figura 2 é apresentado um esquema referente às atividades desenvolvidas pelos atores (distrito produtor, refinaria, usina e construtora) desde a produção do petróleo até a entrega dos derivados aos clientes. Tem-se o início do processo nas unidades de produção, que são os distritos produtores, onde ocorre a produção e extração do petróleo bruto. Este é, então, transportado para as refinarias, onde sofrerá o processamento e a separação em diversos derivados. Os principais produtos aproveitados pela indústria do asfalto são o CAP e o CM. Quando há grande demanda, estes produtos são carregados e transportados diretamente para as construtoras; caso contrário, são levados às usinas para abastecimento dos tanques internos. Neste caso, o objetivo consiste em abastecer os tanques que produzirão as emulsões.

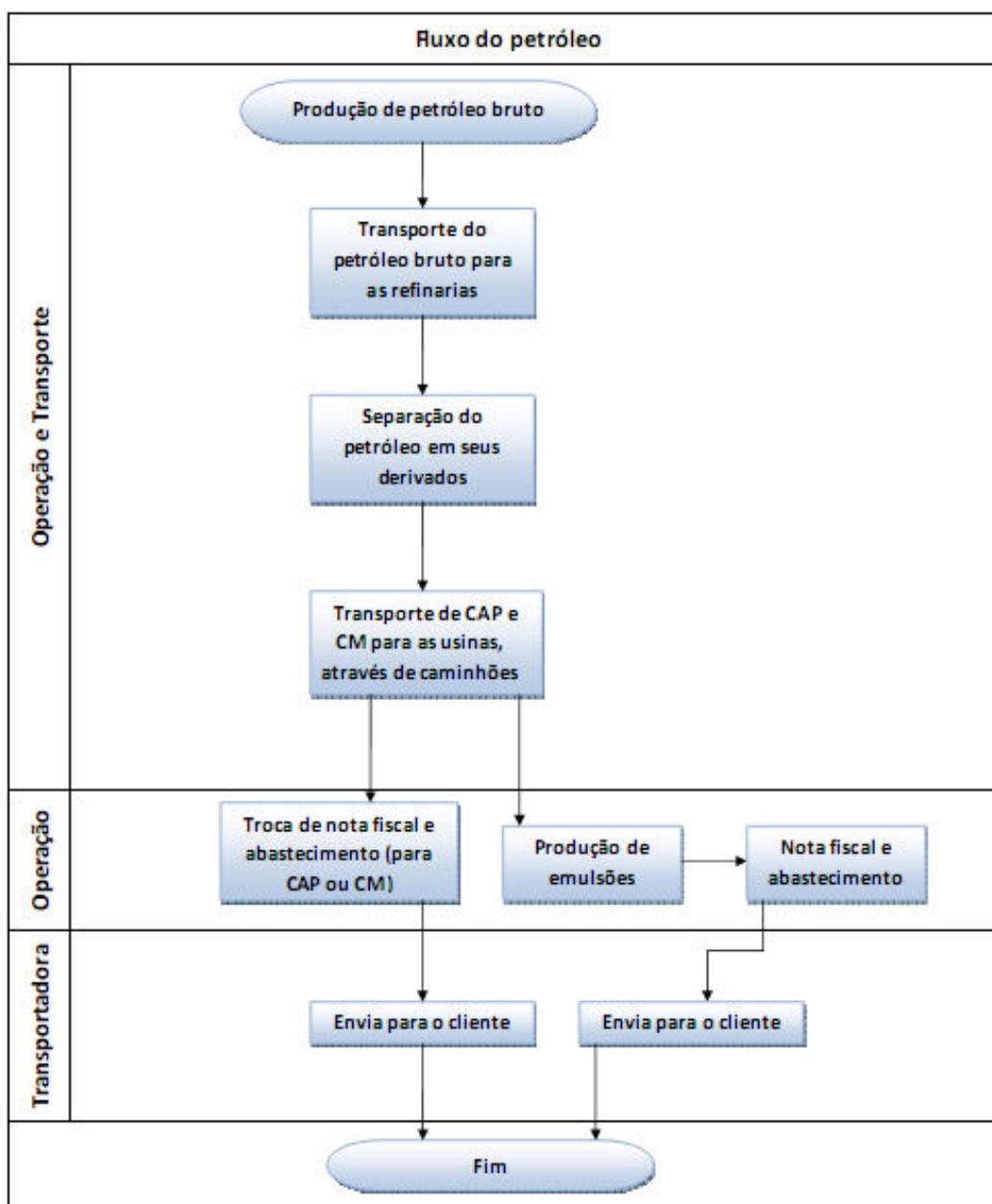


**Figura 2:** As atividades desenvolvidas pelos atores relacionados ao transporte do petróleo e seus derivados.

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Na Figura 3 é ilustrado um fluxograma mais detalhado, mostrando a divisão do fluxo do petróleo em duas atividades: operação (que envolve, além da produção do petróleo bruto, o refino e a devida separação do produto bruto nos derivados) e transporte (da refinaria para a usina e desta para a construtora). Após o início do processo, o petróleo bruto chega às refinarias, que recebem o produto para, então, processá-lo e separá-lo em derivados. Inicia-se, então, a atividade do transporte. O CAP e o CM são transportados para as usinas e estocados nos tanques, visando à produção de emulsões. Quando a demanda é muito grande, estes produtos são carregados na refinaria

e os caminhões seguem até a usina para abastecer combustível, trocar a nota fiscal e coletar o CTTC. Contudo, é possível que o veículo já chegue devidamente abastecido na refinaria, com o objetivo de reduzir o tempo de início de viagem. Assim, a distribuidora providencia o envio da documentação necessária para o motorista seguir viagem.



**Figura 3:** O fluxo do petróleo e suas atividades detalhadas nos derivados.  
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

## 2.5 A operação na obra

Após a chegada do caminhão à obra, tem-se o posicionamento do veículo na balança e a conferência da nota fiscal pelo encarregado. Este verificará todos os dados do carregamento, tais como o peso da carga, o tipo de produto, origem e destino. Ressalta-se que é de fundamental importância a verificação do relatório técnico do produto, anexado à nota fiscal. Neste constam os seguintes itens relacionados às especificações técnicas do produto carregado:

- i) penetração (100g, 5s, 25°C);
- ii) viscosidade (em determinadas temperaturas);
- iii) ponto de fulgor (mínimo), sendo medido em °C para o CAP;
- iv) ductilidade (a 25°C, no mínimo);
- v) ponto de amolecimento (°C);
- vi) temperatura de carregamento (°C);
- vii) temperatura adequada de transporte (°C); e
- viii) temperatura ideal para a descarga (°C).

É possível que o encarregado rejeite o recebimento de uma carga caso algum dos indicadores acima não satisfaça as especificações inerentes às normas relacionadas a cada produto transportado. Em casos assim, em problemas relacionados do item “i” ao item “vi”, a distribuidora é acionada e responsabilizada, pois são características intrínsecas do produto. Em caso de problemas relacionados aos demais itens, a construtora acionará a distribuidora e esta entrará em contato imediatamente com a sua transportadora, solicitando providências relacionadas ao não cumprimento das normas envolvidas com a temperatura. No caso, é possível que o motorista tenha deixado de aquecer a carga em algum período, fazendo com que a mesma chegasse ao cliente em uma temperatura abaixo daquela esperada.

Normalmente, não há problemas quanto à documentação apresentada e o motorista é designado à área de espera para descarregar o produto. Nesta etapa, têm-se duas situações distintas: na primeira, não havendo outros veículos, o caminhão já é orientado para descarregar no tanque designado pela construtora, enquanto que na segunda o motorista pode aguardar a sua vez, devido à existência de outros veículos presentes na obra, que também aguardam a ordem de descarga.

É importante citar outros problemas não relacionados à documentação, como, por exemplo, os problemas operacionais. O problema mais recorrente refere-se à

quantidade e ao tamanho dos tanques existentes na obra, destinados ao recebimento dos produtos. É comum um caminhão chegar à obra de determinada construtora e ter problemas quanto ao tamanho do tanque para receber o produto carregado, o qual, em diversas situações, possui capacidade insuficiente para receber o descarregamento e o veículo precisa ficar alguns dias no local.

Quando o tamanho do tanque é menor que a carga a ser recebida, apenas uma parte da entrega é descarregada, ficando a outra parte dentro da carreta, gerando diversos problemas como a estadia em obra. Nestes casos, há a necessidade de cobrança de diária para a construtora e pagamento de hora-extra para o motorista, a partir de 24 horas na obra.

Outro problema frequente consiste na necessidade de reaquecimento do produto, no caso do CAP, até que seja liberado espaço para descarga, gerando fornecimento extra de óleo diesel para efetuar o aquecimento da carga. Outra dificuldade se refere às relações comerciais, visto que, em muitas situações, foi efetuada *a priori* toda uma programação de carregamento para um dado veículo, sendo necessário renegociar com os clientes ou contratar outra transportadora para realizar o carregamento e o transporte.

## **2.6 Abordagens para o problema**

Nesta seção, são apresentadas abordagens que visem solucionar problemas relacionados ao transporte de derivados de petróleo, bem como problemas correlatos. Foram realizadas buscas em *journals*, tais como *Journal of Business Logistics*, *The Journal of the Operational Research Society*, *Economic Annals*, *European Journal of Operational Research*, *International Journal of Production Economics*, *Journal of Automation in Construction*, bem como o congresso *Asia Pacific Decision Sciences Institute*, além de anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP).

Para a pesquisa por trabalhos relacionados ao tema em questão, foram usadas as seguintes palavras-chave: *fleet size and mix*, *truck scheduling*, *vehicle scheduling*, *dispatching shipments*, *multiple vehicles types*, *truck modeling*, *transport management*, *ready mixed concrete*, sendo selecionados os trabalhos que se aproximam do problema em estudo.

Carraresi e Gallo (1984) tratam de modelos para programação de veículos e tripulação. Os autores abordam o VSP, que se refere a uma grande classe de problemas de otimização, em que os veículos são designados a viagens conforme uma tabela de

horários, na qual: cada viagem é realizada por um veículo, um dado número de restrições é satisfeito e uma função custo é minimizada.

Powell *et al.* (1984) estudaram o problema de alocação dinâmica de veículos para o transporte rodoviário de cargas. Foi apresentado um modelo Programação Dinâmica Não-Linear e foram levadas em conta as incertezas nas previsões de demanda.

Powell (1987) apresentou um modelo alternativo para utilização em ambiente operacional, com o objetivo de gerenciar uma frota de veículos traçando estratégias de aceitação ou rejeição de certas cargas através da análise da margem de contribuição em enviar veículos vazios para atender a demandas futuras.

Powell (1988) aborda o despacho e reposicionamento de veículos visando às demandas futuras que já estão previstas no planejamento logístico. A revisão do problema de alocação dinâmica de veículos, relacionado ao transporte de cargas por caminhões, foi necessária para a elaboração de modelos determinísticos, que o autor citado considera viáveis na prática.

Ferland e Michelon (1988) apresentam o problema de programação de veículos com múltiplos tipos de veículos. O problema é especificado em termos de um conjunto  $T$  de tarefas a serem executadas por uma frota de veículos. Cada tarefa  $i$  tem as seguintes características de tempo e espaço específicos: uma localização inicial ou origem  $L_i$ , uma localização final ou destino  $L_f$ , e um tempo de início  $T_i$ .

Os autores supracitados preocupam-se com problemas nos quais um número variado de tipos de veículos é disponível. São propostas heurísticas para a solução do problema. Para uma maior compreensão, as equações serão detalhadas no Capítulo 3.

Para Ferland e Michelon (1988), são estendidos três métodos diferentes de heurísticas e o primeiro envolve a solução de uma aproximação discreta do problema em questão. O segundo método é um procedimento de duas fases, em que a primeira gera uma solução viável, enquanto que a fase 2 aplica uma melhoria na solução encontrada na fase anterior. O terceiro método encontra uma solução viável através da solução de uma sequência de problemas de transporte, em que o foco é a minimização do custo total do transporte necessário para abastecer  $n$  centros consumidores ou destinos, cada qual com uma demanda, a partir de  $m$  origens, cada qual com uma capacidade de oferta.

Beaujon e Turnquist (1991) apresentam a formulação de um modelo matemático para representar o problema de dimensionamento da frota e alocação dinâmica de

veículos. O interesse do modelo é responder questões como: de qual forma e onde os veículos devem ser alocados (ou distribuídos), quais os tamanhos desses agrupamentos de veículos e em quais períodos e como os veículos devem ser alocados entre movimentos cheios, vazios e agrupamentos.

Bausch, Brown e Ronen (1994) citam que muitas empresas estão envolvidas com a distribuição de mercadorias, e, quando há possibilidade de alternativas de escolha de modal, a seleção do tipo apropriado de transporte poderá resultar em uma significativa redução de custos. Os autores em questão descrevem um sistema de despacho bastante flexível que seleciona o modo de embarque para cada transporte e que resulta na minimização dos custos totais. A literatura aborda, em sua maioria, problemas com frota homogênea, buscando minimizar distâncias, horas de viagem e números de caminhões utilizados.

Os autores supracitados ainda afirmam que os caminhões diferem em tamanho, características físicas, equipamentos, compartimentos, modo de operação e estruturas de custo (isto significa que uma mesma viagem pode variar em custos em se utilizando veículos diferentes). A Tabela 1 apresenta as características do problema em questão, em que cada coluna mostra, independentemente, as particularidades existentes para cada tipo de origem.

Por exemplo, o problema em estudo, o qual vai ser descrito no Capítulo 4, possui uma origem (usina), um ponto de carregamento (usina), operação de entrega (os caminhões voltam vazios), frota heterogênea (caminhões de capacidades e tipos diferentes), vários pontos de descarga (múltiplos clientes a serem atendidos) e rotas simples (o caminhão atende a um único cliente por vez e retorna à usina para novo carregamento).

**Tabela 1:** Características do problema de programação de caminhões.

<b>Origem</b>	<b>Pontos de carregamento</b>	<b>Operação</b>	<b>Frota</b>	<b>Pontos de descarga</b>	<b>Rotas</b>
Única	Único	Coleta	Homogênea	Única	Única
Múltiplas	Múltiplos	Entrega	Heterogênea	Múltiplas	Múltiplas

Bausch, Brown e Ronen (1994) citam três possíveis abordagens de solução para os problemas de despacho: otimização, heurísticas e simulação. Afirmam ainda que se deve optar por modelos de otimização sempre que possível, pois, deste modo, assegura-

se a obtenção da melhor solução. O modelo de otimização utilizado pelos autores é o *Elastic Set Partitioning Problem* (ESPP).

Powell *et al.* (1995) estendem o estudo do problema de alocação de veículos e consideram três tipos de atividades: movimento do caminhão cheio, movimento vazio e posição de espera (sem operação).

Freling e Paixão (1995) apresentam métodos para solucionar o problema de programação de veículo (VSP) com a restrição de tempo. Tais problemas consistem em minimizar os custos relacionados à designação de veículos para desempenhar uma lista de viagens. O método consiste no pressuposto de que os veículos estão localizados em um único depósito e deve-se considerar a restrição adicional que nenhum veículo pode estar afastado do depósito por mais tempo que o limite máximo determinado.

O problema de programação de veículo com a restrição de tempo é uma generalização do VSP envolvendo uma variável: o tempo máximo que o veículo poderá estar ausente do depósito. Neste caso, devem-se considerar os problemas encontrados nas transportadoras, que poderão justificar a ausência do veículo, tais como o transporte suburbano ou restrição de combustível, manutenção do veículo e outros problemas.

Freling, Huisman e Wagelmans (1999) mencionam que a programação de veículos é o processo de designar veículos a uma lista predeterminada de viagens com tempos fixos de partida e chegada, buscando a minimização do capital investido e dos custos operacionais envolvidos. Discutem, ainda, as diversas maneiras de lidar com um grande número de conexões viáveis entre as viagens, que se tornam um gargalo na programação de veículos.

Segundo Baita *et al.* (2000), o VSP consiste em designar uma lista de viagens agendadas a um grupo de veículos, satisfazendo um conjunto de restrições e otimizando uma função objetivo. Ressalta-se que requisições práticas para o problema em questão, normalmente não mencionadas na literatura, incluem considerar diversos critérios que produzirão diferentes soluções alternativas. Problemas deste tipo possuem diferentes funções objetivo, como minimizar o custo fixo ou maximizar a utilização dos veículos.

Hatori (2000) indica que a programação de despacho de caminhões é um tipo de problema de otimização combinatória; assim, técnicas de Pesquisa Operacional são de grande utilidade para a resolução deste problema. Entretanto, é difícil obter soluções que satisfaçam a todos os requisitos do problema devido ao elevado número de restrições.

O autor supracitado afirma que a programação de despacho consiste em alocar todas as ordens nos caminhões para, então, decidir os pontos de embarque e a sequência de entrega, determinando a disponibilidade de tempo para cada caminhão.

As restrições em questão são, conforme Hatori (2000), descritas a seguir:

- a) Restrições quanto ao tempo: cada ordem tem um período de tempo designado de entrega, assim como cada ponto de embarque tem seu período de tempo determinado para a operação de embarque.
- b) Restrições quanto aos caminhões: cada tanque de um caminhão é dividido em compartimentos, portanto um caminhão-tanque não tem apenas uma limitação em quantidade de produto carregado (massa), mas também uma limitação de tipos e tamanho dos compartimentos.
- c) Restrições quanto aos pontos de embarque: alguns pontos de embarque possuem restrições quanto ao tipo de produto recebido. Além disso, cada ponto de embarque tem um limite máximo de caminhões que podem ser embarcados simultaneamente.

Hatori (2000) comenta, ainda, que a programação por restrições (*Constraint Logic Programming* - CLP) é útil para resolver problemas de otimização combinatória com várias restrições em um curto espaço de tempo. Uma programação de despacho de caminhões é um exemplo destes problemas e a CLP é aplicada para sua resolução.

Haghani *et al.* (2003) apresentam uma análise comparativa de três modelos de programação de veículos, os quais incluem um modelo de múltiplos depósitos e dois de um único depósito. Os autores trabalham com estas comparações e demonstram que, sob determinadas condições, o modelo de programação de veículos para um único depósito tem melhor desempenho.

Wang e Shen (2007) abordam o problema de programação de transporte público com restrições de rota e de tempo para abastecimento, que pode ser resolvido por aproximações heurísticas. Citam que a programação em trânsito, na realidade, é bastante complexa. O elevado número de viagens, conexões e rotas a serem consideradas rapidamente aumentam o número de variáveis e restrições em qualquer modelo desenvolvido.

Os autores supracitados indicam que o problema em questão pertence a uma classe geral de problemas de programação de veículos e consiste em designar uma lista de viagens agendadas a um grupo de veículos disponíveis, que tem início em um ou mais terminais, tendo que visitar um certo número de pontos (clientes) e, então, retornar

ao terminal de início. Em geral, estes problemas são resolvidos por heurísticas. Algumas condições devem ser atendidas para o problema em questão, tais como: uma função objetivo dada é otimizada, cada viagem é realizada por exatamente um veículo, cada veículo só pode fazer uma viagem por vez; atender ao tempo entre as viagens que cada veículo realiza, cada grupo de viagens inicia e termina no mesmo terminal, e cada veículo precisa ser reabastecido quando não puder fazer mais viagens.

Verifica-se, portanto, que o problema descrito acima pode se relacionar com o problema de programação de caminhões, pois este também considera um número elevado de viagens e clientes a serem atendidos. Ainda, as viagens são designadas aos veículos disponíveis, mas o ponto de início é sempre na mesma origem, ou seja, a usina.

Eliiyi, Ornek e Karakütük (2008) consideram um agendamento a custo mínimo de veículos de diversos tipos em um conjunto de viagens de um sentido (caminhão faz a entrega e retorna vazio). As viagens têm horários determinados, *deadlines* e demandas associadas. Os autores consideram, ainda, o problema de determinar o número ótimo de diferentes tipos de veículos a um custo mínimo que deverá se ajustar a um agendamento de viagens dadas com demandas variadas.

Bunte e Kliewer (2009) tratam da definição do problema de programação de veículos, em que são dadas viagens em uma tabela de horários com tempos fixos de saída e chegada dos veículos, além dos pares origem e destino, bem como os tempos de viagens entre todos os pares. O objetivo é encontrar uma designação de viagens para os veículos, em que cada viagem é atendida somente uma vez e em que cada veículo desempenha uma sequência viável de viagens, sendo os custos totais minimizados.

Quanto aos custos totais mencionados, Bunte e Kliewer (2009) dividem em custos fixos de veículos (como investimento e manutenção) e custos operacionais (como combustível). Estes podem ser compostos de diversas formas: distância total pode ser considerada, bem como o tempo produtivo ou o tempo de espera.

Outra abordagem importante é sobre o problema de dimensionamento e alocação de veículos no transporte rodoviário de cargas. Morabito e Vasco (2011) tratam de alguns movimentos, tais como veículos vazios para reposicionamento, veículos carregados com carga completa ou veículos mantidos em um terminal como provisão para abastecimento de demandas futuras. A proposta destes autores é apresentar modelos matemáticos que apoiarão as decisões na gestão de frota em empresas de transporte rodoviário de cargas. O objetivo da proposta é otimizar a utilização dos veículos nos transportes de cargas entre origem e destino, satisfazendo as restrições,

tais como capacidade de carga do caminhão e outras características, buscando maximizar a utilização dos recursos disponíveis na operação.

Stojanovic, Nikolicic e Milicic (2011) indicam que uma das tarefas mais importantes nos sistemas de distribuição logística é a modelagem do transporte pela capacidade e estrutura. No intuito de conciliar as demandas, os transportadores utilizam sua própria frota, operadores logísticos ou ambos.

Os autores supracitados supõem ainda que as demandas de transporte são estocásticas e estacionárias. Tal questão ocorre quando o mercado é relativamente estável com flutuações sazonais e a empresa não considera mudanças significativas, tais como entrar em um novo mercado ou perder mercado. Em tais condições, o método proposto deve responder a uma pergunta: de que forma uma frota constituída de veículos próprios minimizará os custos totais de transporte. O *mix* de frota ótimo é definido por duas condições: (i) utilizar caminhões próprios ao invés de contratar operadores em um período de planejamento diário, e (ii) caminhões próprios devem obter uma margem mínima de rentabilidade em um médio ou longo prazo, ou as unidades de transporte serão exteriorizadas.

A função objetivo, neste caso, é minimizar os custos totais de transporte a longo prazo através da distribuição das atividades de transporte entre frota própria e operadoras contratadas, enquanto deve manter um nível aceitável na qualidade do serviço prestado.

Ceder (2011) afirma que o roteiro para a programação de veículos está ligado à elaboração de cadeias de viagens, na qual cada cadeia refere-se a um *scheduling* de veículo de acordo com as tabelas de horários dadas. Cita, ainda, que este tipo de problema deve determinar a alocação ótima dos veículos para conduzir todas as viagens em uma dada tabela de horários. Uma cadeia de viagens é designada a cada veículo, embora algumas delas sejam improdutivas, com o intuito de alcançar o desempenho ótimo. O número de soluções viáveis para este problema é extremamente alto, especialmente no caso em que veículos têm como base múltiplos depósitos.

Em relação a outra atividade que também considera a programação de caminhões, os autores Feng, Cheng e Wu (2004) afirmam que a entrega do concreto misto pronto (*Ready Mixed Concrete* – RMC) para as obras de construção são problemas importantes de gerenciamento de planta, cujo responsável deve considerar a oportunidade e a flexibilidade para desenvolver uma programação eficiente de despacho dos caminhões envolvidos na operação. Estes autores informam que as requisições de

entregas do RMC vindas de diferentes obras de construção normalmente ficam na planta durante algumas horas. Como resultado, o gerente precisa decidir rapidamente uma programação de despacho que possa suprir as necessidades das diferentes obras de construção.

Feng e Wu (2006) afirmam que o desenvolvimento da cadeia de suprimentos da indústria da construção civil leva a um processo eficiente de entrega de RMC nas plantas e nas obras. Entretanto, é muito difícil o gerente de planta do RMC desenvolver rapidamente uma programação balanceada e eficiente de despacho dos caminhões carregados de RMC, enquanto várias obras de construção solicitam a entrega do produto em um mesmo período de tempo.

Os autores supracitados comentam que inúmeros estudos têm mostrado que uma programação eficiente de despacho pode aumentar a produtividade tanto da planta quanto das obras; porém, os resultados desses estudos não são eficientes o bastante para o uso prático.

Yan e Lai (2007) trazem a tona o problema do suprimento de RMC e sua distribuição para obras de construção civil. Eles abordam que a incorporação de considerações extras na produção e o despacho de tal produto é um problema complexo real. Na pesquisa em questão, os autores desenvolveram um modelo de fluxo em redes para o transportador do RMC, de acordo com a situação de operação em Taiwan, que integra a programação da produção de tal produto e o despacho de caminhões na mesma estrutura, a ser decidida em uma programação de suprimento ótima do RMC, que também integra considerações extras. Os autores supracitados, para construir o modelo, empregaram uma técnica de rede tempo-espaço para formular a produção de RMC e os fluxos da frota de caminhões. Na literatura publicada ainda não existe um modelo que formula a programação da produção do RMC conforme estabelecido acima.

Lin *et al.* (2010) realizaram um estudo sobre operações de despacho de caminhões de RMC como um problema *job shop* com recirculação, o que inclui janelas de tempo e adiamento de demanda, bem como o custo externo de transporte, em um modelo de programação com múltiplos objetivos. O estudo dos autores divide fatores que afetam o despacho de caminhões das plantas de RMC em restrições intrínsecas e impostas. As primeiras se referem aos limites que devem ser satisfeitos durante o processo de distribuição de concreto, enquanto as outras restrições são aquelas que devem ser satisfeitas ao seu nível máximo durante o despacho.

Choi e Nieto (2011) apresentam um estudo baseado em um novo *software*, denominado GEOHARTS, cujo objetivo é otimizar as rotas dos caminhões pesados nas obras de construção civil.

Yan *et. al.* (2011) apresentam um modelo de fluxo em redes, desenhado para auxiliar os transportadores de RMC a ajustar efetivamente as programações de transporte. Uma técnica denominada de rede espaço-tempo é empregada para formular a produção de RMC e dos fluxos da frota de caminhões na dimensão de espaço e tempo. Um algoritmo de solução, incorporando uma técnica de decomposição do problema e utilizando programação matemática, é desenvolvido para resolver o problema de forma eficiente.

## **2.7 Considerações finais**

Neste Capítulo foi apresentado o problema do transporte de derivados de petróleo para a construção de rodovias. Foram apresentados os principais tipos de derivados empregados em obras de construção rodoviária. Discorreu-se sobre a operação na usina, o transporte dos derivados e a operação na obra. Por fim, foi apresentada uma revisão sobre os modelos de programação de veículos existente na literatura e constatou-se que existe uma escassez de referências desta natureza na área do presente trabalho.

A revisão das abordagens tradicionais para problemas de programação de veículos foi de grande importância para a compreensão dos tipos de funções objetivo, variáveis e restrições que podem ser relacionadas ao problema em estudo.

No próximo Capítulo, será proposta uma nova formulação para a programação de veículos de múltiplos tipos, voltada para o transporte de cargas.

## CAPÍTULO 3

# O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS COM MÚLTIPLOS TIPOS

### 3.1 Descrição do problema

O problema de programação de veículos consiste em um conjunto de viagens  $T$  que devem ser executadas por um determinado número de veículos  $n$ . Cada viagem  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) tem características de tempo e espaço (localização) específicas, tais como: (i) um ponto de partida  $SL_i$ , (ii) um ponto de chegada  $EL_i$ , (iii) um tempo de início  $ST_i$ .

Em alguns casos, o tempo de início não é fixo, mas pode pertencer a um intervalo de tempo dado  $[a_i, b_i]$ , que é denominado janela de tempo. Sendo assim, para cada viagem  $i$ ,  $a_i$  e  $b_i$  são o tempo de início mais cedo e o tempo de início mais tarde, respectivamente. Seja  $q_i$  a demanda do cliente  $i$ , ressalta-se, também, que a viagem  $i$  só poderá ser executada por um veículo com capacidade de carga igual a  $q_i$ .

A frota de veículos disponíveis pode ser caracterizada pelo seu tamanho, ou seja, pelo número de veículos, ou pelos tipos de veículos existentes. Neste trabalho, tem-se uma frota com alguns tipos de veículos, ou seja, veículos com variadas capacidades de carga. Cada veículo de tipo  $k$  ( $1 \leq k \leq K$ ) é caracterizado pela sua capacidade de carga  $h_k$ .

Para executar a viagem  $i$ , um veículo de tipo  $k$  precisa estar em um ponto  $SL_i$  no tempo  $ST_i$ , e tal veículo necessita de  $D_{ik}$  unidades de tempo para executar o serviço demandado. Sendo assim, no tempo  $ST_i + D_{ik}$ , o veículo estará em  $EL_i$ , que deve ser o destino da viagem, e disponível para executar outras tarefas. Na sequência, o veículo pode executar a viagem  $j$  se, levando-se em consideração o tempo  $t_{ijk}$  necessário para o veículo sair de  $EL_i$  para  $SL_j$ , o mesmo estiver disponível no tempo  $ST_j$  no ponto de partida  $SL_j$ , ou seja,

$$ST_i + D_{ik} + t_{ijk} + \varepsilon \leq ST_j \quad (1)$$

Vale destacar ainda que as viagens estão listadas em uma tabela de horários, em que: (i) cada viagem é realizada por um veículo, (ii) um dado número de restrições é satisfeito, (iii) uma função custo é minimizada.

Na equação (1) tem-se que  $\varepsilon \geq 0$  é um parâmetro para considerar possíveis atrasos na realização de uma dada viagem.

### 3.2 Formulação matemática

Na revisão de literatura realizada, foi possível constatar que a utilização de modelos matemáticos para programação de veículos para o suprimento de obras de pavimentação é bastante escassa. Neste trabalho, busca-se suprir esta escassez, considerando algumas características práticas do problema, preservando a utilidade do modelo. É importante apresentar algumas notações para o modelo proposto, conforme segue:

#### *Conjuntos*

$N$  – clientes

$K$  – veículos

#### *Parâmetros*

$c_{ijk}$  – custo de transporte no arco  $(i,j)$  pelo caminhão de tipo  $k$ .

Para valores de  $c_{ijk}$  iguais a 0 ou 1, o objetivo é reduzir o custo capital. Assim, tem-se o equivalente a minimizar o tamanho da frota. Para valores diferentes de 0 e 1 o objetivo é reduzir os custos operacionais.

#### *Variáveis de decisão binárias*

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo do tipo } k \text{ atravessa o arco } (i, j) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{se o cliente } i \text{ é atendido por um veículo de tipo } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Neste problema, busca-se minimizar a frota de caminhões destinada a atender um conjunto de clientes. Devem ser atendidos todos os clientes utilizando os recursos (caminhões) disponíveis.

Um modelo matemático para este problema pode ser elaborado utilizando um grafo  $(N_k, A_k)$  das viagens associadas com os veículos do tipo  $k$ , sendo caracterizado da seguinte forma:

- i) com cada viagem  $i$ , no qual  $q_i \leq h_k$ , associa à um nó  $i \in N_k$ . Dois nós,  $s$  e  $t$ , são inseridos em  $N_k$  para indicar que os veículos iniciam e finalizam a viagem na usina;
- ii) um arco  $(i, j) \in A_k$  se a viagem  $j$  pode ser executada após a viagem  $i$  por um veículo do tipo  $k$ , isto é, se

$$a_i + D_{ik} + t_{ijk} \leq b_j \quad (2)$$

- iii) Para cada viagem  $i \in N_k$ , devem ser introduzidos os arcos  $(s, i)$  e  $(i, t)$  em  $A_k$ , permitido que  $i$  seja a primeira ou a última viagem em uma sequência, de viagens a serem realizadas pelo veículo de tipo  $k$ .

Seja  $\Lambda_i = \{k: q_i \leq h_k, 1 \leq k \leq K\}$ ,  $\bar{A}_k = \{(i, j) \in A_k : i \neq s, t; j \neq s, t\}$ . Para  $i \in N_k$ ,  $P_{ik} = \{J \in N_k: (i, j) \in A_k\}$  e  $S_{ik} = \{J \in N_k: (i, j) \in A_k\}$ .

Para este grafo, tem-se que os nós estão agrupados em caminhos ou sequências, com cada uma iniciando em  $s$  e terminando em  $t$ . As restrições da janela de tempo devem ser satisfeitas para todas as tarefas e o objetivo é minimizar o custo de capital. O modelo matemático pode ser enunciado como segue:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j) \in A_k} c_{ijk} x_{ijk} \quad (3)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in \Lambda_i} y_{ik} = 1 \quad 1 \leq i \leq n \quad (4)$$

$$\sum_{i \in P_{jk}} x_{ijk} = y_{jk} \quad j \in N_k - \{s, t\}, 1 \leq k \leq K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in S_{ik}} x_{ijk} = y_{ik} \quad i \in N_k - \{s, t\}, 1 \leq k \leq K \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} h_k y_{ik} = q_i \quad 1 \leq i \leq n \quad (7)$$

$$x_{ijk} > 0 \quad ST_i + D_{ik} + t_{ijk} \leq ST_j \quad (i, j) \in \bar{A}_k, 1 \leq k \leq K \quad (8)$$

$$a_i \leq ST_i \leq b_i, 1 \leq i \leq n \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (i, j) \in A_k, 1 \leq k \leq K \quad (10)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq K \quad (11)$$

A função objetivo (3) a ser minimizada representa o custo de capital dos veículos, de múltiplos tipos. O conjunto de restrições do tipo (4) impõe que cada cliente é atendido por um veículo de um dado tipo. Os conjuntos de restrições dos tipos (5) e (6) determinam a combinação ótima de tarefas para cada veículo de tipo  $k$ . O conjunto de restrições do tipo (7) assegura que cada cliente será atendido por um veículo cuja capacidade é igual a sua demanda. Os conjuntos de restrições dos tipos (8) e (9) dizem respeito às janelas de tempo. Por fim, os conjuntos de restrições dos tipos (10) e (11) dizem respeito à definição das variáveis de decisão.

É importante ressaltar que o modelo foi proposto por Ferland e Michelon (1988), sendo adicionado o conjunto de restrições do tipo (8). A adaptação foi necessária para trabalhar com o transporte de cargas, nos moldes do problema em estudo. A inserção desta restrição visa garantir que cada pedido colocado por um cliente possa ser atendido somente por um caminhão, e este precisa ter capacidade de carga igual ao tamanho deste pedido. Ainda deve ser ressaltado que um caminhão precisa trafegar com sua carga completa, evitando assim de tombamentos no percurso.

De acordo com Ceder (2011), o problema de programação de veículos com múltiplos tipos é pertencente à classe de problemas NP-difícil. Deste modo, não existe garantia de que métodos exatos podem obter soluções ótimas para o problema em tempo computacional admissível, para problemas de médio e grande porte. No caso prático que será estudado no presente trabalho, pode-se observar que a quantidade de clientes e a quantidade de tipos de veículos são da ordem de grandeza de dezenas, de modo que a quantidade de variáveis de decisão binárias é da ordem de poucas centenas. Assim, espera-se que o uso de métodos exatos possa obter soluções ótimas em tempo computacional admissível.

### 3.3 Exemplo de aplicação

Com vistas a exemplificar a abordagem proposta, foi modelado um exemplo simples com 3 caminhões que devem atender a 5 clientes, conforme as seguintes características:

- (i) Capacidade dos caminhões:  $h_1 = 20\text{ton}$ ,  $h_2 = 30\text{ton}$  e  $h_3 = 40\text{ton}$ .
- (i) Demanda dos clientes:  $q_1 = 20\text{ton}$ ,  $q_2 = 30\text{ton}$ ,  $q_3 = 20\text{ton}$ ,  $q_4 = 40\text{ton}$  e  $q_5 = 30\text{ton}$ .

Na Tabela 2 é apresentada a tabela de horários com as características de cada uma das viagens, ou seja, os tempos de início, de duração e os tempos não produtivos, assim como origem e destino.

**Tabela 2:** Tabela de horários para o exemplo proposto.

Viagem	Tempo de início	Duração da viagem	Tempo de viagem não produtiva	Origem	Destino
ϑ1	08:00	04:00	03:00	A	1
ϑ2	08:00	08:00	05:00	A	2
ϑ3	16:00	20:00	15:00	A	3
ϑ4	17:00	03:00	02:00	A	4
ϑ5	22:00	06:00	04:00	A	5

Na Figura 4, é apresentado um gráfico de Gantt que ilustra a utilização dos veículos ao longo do tempo ao realizar as viagens planejadas. Vale ressaltar que uma viagem completa é o ato de transportar um produto entre origem e destino, retornando à origem. A origem, neste trabalho, será sempre a usina de asfalto, enquanto que o destino será uma obra de construção rodoviária. A viagem deve ser executada em um certo intervalo de tempo e leva-se em consideração o percurso de ida, com a carreta carregada, e o percurso de volta, com a carreta vazia e com duração inferior à viagem de ida.



No próximo Capítulo, será apresentado o estudo de caso, o qual tratará do problema de forma mais específica, as dificuldades deste tipo de transporte encontradas na prática e soluções para melhorar a gestão das transportadoras de derivados de petróleo.

## CAPÍTULO 4

### ESTUDO DE CASO

#### 4.1 Apresentação do estudo de caso

A empresa em estudo é uma transportadora de derivados de petróleo que atua distribuindo produtos em obras de construção de rodovias situadas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Em sua sede, há um escritório onde funcionam o setor administrativo e o almoxarifado. No mesmo local ainda existem a garagem para os caminhões e a oficina.

Ainda funciona, na sede, o escritório de Logística da transportadora. Lá atuam o gestor de Logística e um assistente de Logística. O primeiro é o responsável pelo agendamento das viagens junto ao cliente, além de atender às reuniões com este para tratar da disponibilidade da frota. Outras funções importantes relacionam-se à informação da posição atual dos caminhões em trânsito, à atualização do tempo de chegada dos mesmos às obras, à elaboração dos relatórios gerenciais de faturamento e à busca por todas as informações sobre as obras, tais como quantidade e tamanho dos tanques existentes, acesso dos caminhões, pessoa responsável para contato na obra, etc. O segundo é responsável pela emissão do Conhecimento de Transporte Rodoviário de Cargas (CTRC), despacho dos motoristas e controle do abastecimento de óleo diesel (o tanque fica no pátio e possui capacidade para 15 mil litros de óleo diesel).

A estrutura da usina, que é o principal cliente da transportadora em estudo, conta com um pátio de movimentação dos caminhões, dois galpões de produção das emulsões, tanques de armazenagem dos produtos e um laboratório para análise das substâncias que entram na composição dos produtos. Há um local específico para o abastecimento dos caminhões, uma balança logo na entrada, três docas para o carregamento das emulsões, estacionamento para carros, área de livre circulação contendo bancos, banheiro e refeitório para os motoristas, além dos escritórios, tanto do cliente como da transportadora.

As únicas ferramentas de gestão logística eram, há 3 anos, as planilhas elaboradas para o controle da frota, dos motoristas e das obras, além do rastreador para todos os veículos. No entanto, estes controles eram limitados e estas ferramentas não contribuíam para um *scheduling* eficiente e automatizado, havendo imprecisão ao

realizar a programação das viagens e a designação dos caminhões adequados para o atendimento.

A transportadora possui frota própria e heterogênea para o transporte de asfalto, sendo composta de 20 caminhões de variadas capacidades de carregamento, conforme ilustrado na Tabela 3. Adotou-se a capacidade média, pois o peso pode variar conforme o produto carregado.

**Tabela 3:** Composição da frota de caminhões.

Capacidade média de carga (ton)	Quantidade de Veículos
25	8
30	6
33	2
35	3
50	1
<b>Total</b>	<b>20</b>

Os principais produtos carregados são: CAP, CM-30 e as emulsões asfálticas, principalmente do tipo RR-2C (ruptura rápida).

Os carregamentos acontecem, em parte, na usina de asfalto, mas algumas particularidades devem ser consideradas:

- a) O CAP e o CM-30 são carregados na refinaria da Petrobras, localizada próximo ao Porto do Mucuripe, em Fortaleza.
- b) A capacidade média de carga varia conforme o produto carregado. Por exemplo, um caminhão de capacidade média 25 toneladas carrega em torno de 24,5 toneladas de CAP e ainda menos se o produto for o CM-30, pois este, por ser bastante volumoso, alcança rapidamente o nível ideal de carregamento, gerando menos peso. Por sua vez, o carregamento de emulsão leva o peso da carga a ultrapassar as 25 toneladas devido à grande composição de água em sua fórmula.
- c) Para a produção das emulsões, há carregamentos de CAP e CM-30 na refinaria para abastecer os tanques da fábrica.
- d) As emulsões são carregadas na fábrica.
- e) Algumas carretas possuem tanque-sela, ou seja, um tanque para combustível extra, utilizado para as viagens mais longas.

- f) O transporte de asfalto é sazonal e, em momento de crescimento da demanda, como em anos eleitorais, há importação do produto de países como Estados Unidos e Espanha, pois as distribuidoras locais não conseguem atender a demanda. O produto chega em navios e o carregamento é feito diretamente no porto.
- g) Para o transporte das emulsões, assim que é determinado o destino do caminhão, é providenciado o devido abastecimento de combustível. Após o abastecimento, o caminhão registra a tara na balança e o carregamento é liberado.
- h) Para CAP/CM-30, com a liberação do pedido, o motorista segue para a refinaria para realizar o carregamento. Em seguida, segue para a fábrica para trocar a nota fiscal, realizar o devido abastecimento e, então, seguir viagem.

Na Tabela 4, são ilustradas algumas das principais obras e suas respectivas distâncias a partir da origem.

**Tabela 4:** Distância das principais obras.

<b>Obra</b>	<b>Distância (km)</b>
$D_1$	320
$D_2$	665
$D_3$	760
$D_4$	665
$D_5$	860
$D_6$	155
$D_7$	840
$D_8$	270

Embora não façam parte diretamente do problema em estudo, é importante ressaltar algumas particularidades que dificultavam a gestão da frota na transportadora, pois estes impactavam a produtividade dos veículos. Os problemas estão relacionados, principalmente, à mão-de-obra, aos caminhões e às obras.

Quanto à mão-de-obra, ressalta-se um problema grave: a falta de disciplina dos motoristas. As ocorrências eram tanto na realização das atividades no pátio de caminhões como nas obras, pois os problemas eram variados, tais como a dificuldade em seguir ordens (manter a limpeza no pátio, seguir o planejamento de transporte, realizar o abastecimento do caminhão de acordo com o que foi determinado em ficha de controle de combustível, seguir as rotas que foram planejadas, manter o posicionamento

na obra aguardando a descarga do produto, manter o contato com o escritório, confirmando o horário de chegada à obra ou sobre algum problema no roteiro ou no caminhão, etc.).

Outro problema comum era relacionado à documentação a ser preenchida e entregue ao gestor de Logística ao chegar de viagem. Havia grande dificuldade por parte da maioria dos motoristas em preencher os documentos de viagem, contendo itens como velocímetro inicial e final, abastecimento, percurso, quilometragem rodada, assinatura do responsável na obra confirmando a descarga do produto, conhecimento de transporte devidamente assinado e preenchido na obra, relatório de obra, etc.

Quanto aos caminhões, deve-se destacar o problema relacionado à idade média da frota. A maioria dos caminhões tinha, em média, em torno de 10 anos de uso, o que resultam em diversos problemas de quebra dos veículos na estrada e entradas frequentes na oficina para reparos.

Outro problema importante é relacionado à estrutura dos caminhões, sendo alguns cavalos-mecânicos dotados de tanque-sela, que era um tanque extra de combustível acoplado ao cavalo-mecânico. Assim, para as viagens mais longas, não era interessante colocar veículos sem tanque-sela devido a esta restrição, pois o mesmo teria que receber ordem de abastecimento na estrada, onde o valor do litro do combustível era maior do que aquele praticado na usina.

Quanto às obras, vale ressaltar o problema relacionado aos tanques. Era comum, após a chegada do veículo à obra, a conclusão de que a capacidade do tanque era inferior ao pedido solicitado ou o tanque continha produto no seu interior, impossibilitando descarregar a carreta pedida. Assim, o veículo precisava aguardar para efetuar a descarga. Dependendo do tempo de espera, e caso o produto fosse o CAP, havia necessidade de aquecê-lo, consumindo mais óleo diesel.

Outro fator relevante era quando a construtora parava devido a problemas técnicos, que ocorriam com a espera de máquinas ou equipamentos para iniciar ou continuar a operação. Não era raro ocorrer o desvio do veículo para outra obra da construtora na mesma região.

## **4.2 Experimentos computacionais**

O modelo matemático proposto foi aplicado por meio dos dados inseridos em uma tabela de horários contendo informações dos pedidos dos clientes que foram coletadas junto à empresa durante o período de nove semanas de trabalho. As

informações da tabela estão dispostas no Anexo 3 e são referentes às demandas dos clientes, contendo o devido destino de cada carga, a quantidade de carga solicitada, os tempos médios de início e duração das viagens, além de informações dos pedidos, que deverão ser distribuídos entre os caminhões que compõem a frota da empresa estudada.

No Anexo 2 é apresentada a Tabela A1 com a composição da frota e a capacidade de carga dos 20 caminhões disponíveis.

No Anexo 3 são apresentadas as Tabelas B, que são as tabelas de horários de cada semana da programação de viagens dos caminhões.

É importante ressaltar que, na prática da empresa em estudo, a programação é realizada semanalmente, ou seja, o gestor de frota recebe o relatório com os pedidos diretamente do responsável comercial da distribuidora e ambos fazem o planejamento dos carregamentos da semana seguinte, sempre analisando os caminhões disponíveis e suas respectivas capacidades de carga, bem como o tamanho do pedido colocado pelo cliente. Eventualmente, há possibilidade de alterações na programação realizada, devido à entrada de novos pedidos, de novos clientes, problemas envolvendo algum veículo pré-agendado para executar determinada viagem ou cancelamento de pedidos.

Na Tabela 5 são apresentadas as instâncias do estudo de caso, incluindo a identificação do problema, o número de viagens realizadas em cada semana, o total de veículos disponíveis nas semanas, a quantidade de veículos utilizados para o atendimento aos clientes, o percentual de economia da frota utilizada na semana e o tempo computacional. Devido a valores muito baixos calculados para estes tempos, permite-se, assim, a utilização deste modelo na prática, com o intuito de automatizar a geração de soluções.

A economia de frota é calculada pela diferença entre o número de veículos disponíveis e o número de veículos utilizados na semana, dividido pelo número total de veículos, sendo medida em valores percentuais.

O modelo proposto foi implementado no *software* CPLEX 12.6. Segundo o Professor Jonathan Bard, da Universidade do Texas, e o Portal IBM, fabricante do software supracitado, o mesmo acelera o desenvolvimento e a implantação de modelos de otimização utilizando programação linear. Os experimentos computacionais foram realizados em um sistema operacional Windows 7 de 64 Bits, com processador Intel Pentium 1,87 GHz e 4 GB de memória RAM.

**Tabela 5:** Resultados computacionais.

Instância (Semana)	# Viagens	# Caminhões disponíveis	Solução ótima (# caminhões)	Economia de frota (%)	<i>t</i> (s)
S1	29	20	15	25	0,22
S2	31	20	15	25	0,25
S3	34	20	16	20	0,47
S4	24	20	13	35	0,19
S5	24	20	15	25	0,3
S6	49	20	16	20	0,98
S7	47	20	16	20	0,75
S8	53	20	17	15	1,03
S9	43	20	15	25	0,62

Verifica-se, portanto, conforme ilustrado na Tabela 5, que em todas as semanas analisadas há economia da frota, com redução média de 23,3%, ou seja, nem todos os caminhões disponíveis foram utilizados para a realização das viagens. Ressalta-se que na prática a inexistência de controles mais apurados de gestão de frota resultava na utilização de todos os veículos durante uma semana de trabalho e, em algumas vezes, a má alocação do veículo a uma determinada viagem permitia que a seguinte situação ocorresse: um caminhão disponível no pátio, um pedido de carregamento pendente e a incompatibilidade entre a capacidade deste veículo e a demanda do cliente.

Verificou-se a necessidade da segregação dos resultados obtidos das instâncias para uma melhor compreensão através da análise de cada semana separadamente, com o objetivo de detalhar a aplicação do modelo ao longo dos períodos analisados.

Os dados das tabelas de horários foram inseridos e implementados no *software* CPLEX 12.6, adicionados das informações relacionadas ao número de viagens, número de caminhões disponíveis, demandas dos clientes e capacidades dos caminhões que compõem a frota. O *software*, então, gerou a solução ótima para cada semana analisada, cujos resultados estão dispostos nos Quadros 1 a 9.

Consultando-se a Tabela A1 e as Tabelas B é possível verificar a viabilidade de cada viagem através da compatibilidade entre o tamanho do pedido do cliente e a capacidade de carga de cada veículo agendado para executar determinada viagem.

No Quadro 1 é apresentada a utilização dos caminhões na realização das viagens da Semana 1.

**Quadro 1:** Programação da Semana 1.

Veículo	Viagens	Veículo	Viagens
1	7	11	1 14 29
2	9	12	13
3	3	13	
4		14	12 22
5	6 18 25	15	
6	19	16	17 21
7		17	5 24
8	8 15 20 26	18	28
9	4 11 16 27	19	
10	2 10	20	23

É possível observar que os caminhões 4, 7, 13, 15 e 19 não foram utilizados na programação da Semana 1. Nota-se, também, que as viagens de demanda 35 toneladas foram atendidas por somente 2 dos 3 veículos. Os dois veículos de 33 toneladas foram utilizados, embora um deles tenha realizado somente 1 das 4 viagens da semana. Para as demandas de 30 toneladas foram utilizados 5 dos 6 veículos, enquanto que nas demandas de 25 toneladas, somente 5 dos 8 caminhões foram utilizados para a execução das viagens.

No Quadro 2 é apresentada a utilização dos caminhões na realização das viagens da Semana 2.

**Quadro 2:** Programação da Semana 2.

Veículo	Viagens	Veículo	Viagens
1	29	11	8 20 27
2	6	12	11 19
3	13 15 28	13	
4	10	14	
5	2 14 31	15	3 24
6	4 17	16	21
7		17	1 22 23
8	5 16 30	18	7 26
9		19	
10	9 18	20	12 25

Pelo Quadro 2, verifica-se que os caminhões 7, 9, 13, 14 e 19 não foram utilizados na programação da Semana 2. Nota-se, também, que as viagens de demanda 35 toneladas foram atendidas pelos 3 veículos. Os dois veículos de 33 toneladas foram

utilizados de forma satisfatória, distribuindo bem as cinco viagens entre eles. Para as demandas de 30 toneladas, foram utilizados apenas 4 dos 6 veículos, enquanto que nas demandas de 25 toneladas, somente 5 dos 8 caminhões foram utilizados para a execução das viagens.

No Quadro 3 é apresentada a utilização dos caminhões na realização das viagens da Semana 3.

**Quadro 3:** Programação da Semana 3.

Veículo	Viagens	Veículo	Viagens
1	15	11	8 18 23
2	1 13 22	12	12 19
3	9 17 26 32	13	
4		14	25
5	5 11 27 30	15	3 29
6	6	16	24 33
7		17	21 28
8	7 20 31	18	14
9	10	19	2 16
10	4 34	20	

Verifica-se que os caminhões 4, 7, 13 e 20 não foram utilizados na programação da Semana 3. Nota-se, também, que as viagens de demanda 35 toneladas foram atendidas por 2 dos 3 veículos. Os dois veículos de 33 toneladas foram utilizados, embora as viagens não estejam bem distribuídas entre eles, já que um veículo realizou somente 1 das 5 viagens. Para as demandas de 30 toneladas, foram utilizados 5 dos 6 veículos, enquanto que nas demandas de 25 toneladas, somente 6 dos 8 caminhões foram utilizados para a execução das viagens.

No Quadro 4 é apresentada a utilização dos caminhões na realização das viagens da Semana 4.

Verifica-se que os caminhões 1, 5, 6, 7, 13, 14 e 16 não foram utilizados na programação da Semana 4. É possível verificar que as viagens de demanda 35 toneladas foram bem distribuídas entre os 3 veículos. Para as demandas de 30 toneladas, foram utilizados 5 dos 6 veículos, enquanto que nas demandas de 25 toneladas, somente 5 dos 8 caminhões foram utilizados para a execução das viagens.

**Quadro 4:** Programação da Semana 4.

Veículo	Viagens	Veículo	Viagens
1		11	10
2	19 21	12	7 15 22
3	1 5 24	13	
4	2 4	14	
5		15	8 17
6		16	
7		17	6
8	3 14	18	18 23
9	11 20	19	13
10	16	20	9 12

No Quadro 5 é apresentada a utilização dos caminhões na realização das viagens da Semana 5.

**Quadro 5:** Programação da Semana 5.

Veículo	Viagens	Veículo	Viagens
1	10 15	11	12 17
2	14	12	20 23
3	4 21	13	
4		14	
5	18	15	6 11
6		16	7
7	19	17	3 24
8		18	2
9	9 16	19	5 8
10	22	20	1 13

Verifica-se que os caminhões 4, 6, 8, 13 e 14 não foram utilizados na programação da Semana 5. Nota-se, também, que as viagens de demanda 35 toneladas foram atendidas por 2 dos 3 veículos. Para as demandas de 30 toneladas, foram utilizados 5 dos 6 veículos, enquanto que nas demandas de 25 toneladas, somente 6 dos 8 caminhões foram utilizados para a execução das viagens.

O Quadro 6 apresenta a utilização dos caminhões na realização das viagens da Semana 6.

**Quadro 6:** Programação da Semana 6.

Veículo	Viagens	Veículo	Viagens
1		11	24 41
2	8 20 34 38	12	10 16 27
3	9 19 48	13	
4	6 18 45	14	11 15 28
5	7 17 29 35 43	15	2 30 42 44
6	5 13	16	12 26
7		17	1 33 39
8	22 46	18	3 23 36 47
9	14 31 49	19	21 32 40
10		20	4 25 37

Conforme o quadro em estudo, os caminhões 1, 7, 10, 13 não foram utilizados na programação da Semana 6. É possível notar que as viagens de demanda 35 toneladas estão bem distribuídas entre os 3 veículos. Os dois veículos de 33 toneladas foram utilizados, embora as viagens não estejam bem distribuídas entre eles, já que um veículo realizou somente 2 das 7 viagens. Para as demandas de 30 toneladas foram utilizados 4 dos 6 veículos, enquanto que nas demandas de 25 toneladas, 7 dos 8 caminhões foram utilizados para a execução das viagens.

O Quadro 7 apresenta a utilização dos caminhões na realização das viagens da Semana 7.

**Quadro 7:** Programação da Semana 7.

Veículo	Viagens	Veículo	Viagens
1	21	11	5 26 28 44
2	6 24	12	3 32 45
3	25 30 40	13	
4	41	14	9 34
5	15 17 31	15	8 18 39
6		16	10 16 47
7		17	19 38 43
8	7 14 27 37 46	18	
9	4 13 22 33	19	1 11 20 36
10	2 12 23	20	29 35 42

É possível notar que os caminhões 6, 7, 13 e 18 não foram utilizados na programação da Semana 7. Nota-se, também, que as viagens de demanda 35 toneladas foram atendidas pelos 3 veículos. As viagens cuja demanda é de 33 toneladas foram

atendidas por apenas 1 veículo. Para as demandas de 30 toneladas, foram utilizados 5 dos 6 veículos, enquanto que nas demandas de 25 toneladas, somente 6 dos 8 caminhões foram utilizados para a execução das viagens.

O Quadro 8 apresenta a utilização dos caminhões na realização das viagens da Semana 8.

**Quadro 8:** Programação da Semana 8.

Veículo	Viagens	Veículo	Viagens
1	17	11	9 16 25 43
2	18 22 35	12	3 12 27
3		13	
4	6 26 36 49	14	19 44
5	28 33 52	15	2 47
6	48	16	5 11 34 50
7		17	30 39 53
8	7 10 23 42 51	18	1 15 24 40
9	4 21 31 45	19	13 20 37
10	8 14 38 46	20	29 32 41

A análise do Quadro 8 permite verificar que os caminhões 3, 7 e 13 não foram utilizados na programação da Semana 8. Nota-se, também, que as viagens de demanda 35 toneladas foram atendidas por 2 dos 3 veículos. Os dois veículos de 33 toneladas foram utilizados, embora as viagens não estejam bem distribuídas entre eles, já que um veículo realizou somente 1 das 4 viagens. Para as demandas de 30 toneladas, foram utilizados 5 dos 6 veículos, enquanto que nas demandas de 25 toneladas, 7 dos 8 caminhões foram utilizados para a execução das viagens.

O Quadro 9 apresenta a utilização dos caminhões na realização das viagens da Semana 9.

Os caminhões 3, 6, 7, 10, 13 não foram utilizados na programação da Semana 9. Nota-se, também, que as viagens de demanda 35 toneladas foram atendidas por 2 dos 3 veículos. Apenas um dos veículos de 33 toneladas foi utilizado. Para as demandas de 30 toneladas, foram utilizados 4 dos 6 veículos, enquanto que nas demandas de 25 toneladas, 7 dos 8 caminhões foram utilizados para a execução das viagens.

**Quadro 9:** Programação da Semana 9.

Veículo	Viagens	Veículo	Viagens
1	42	11	6 9 19 34 43
2	10 21	12	7 27 33 39
3		13	
4	26 36	14	24 38
5	18 32	15	1 22 30
6		16	4 25
7		17	16
8	3 12 28 31 40	18	5 14 20
9	2 8 15 37 41	19	11 17
10		20	13 23 29 35

### 4.3 Avaliação de desempenho das soluções propostas

#### 4.3.1 Proposição dos indicadores de desempenho

O modelo implementado buscou atender, por horizonte de planejamento, todas as viagens programadas utilizando a menor quantidade possível de caminhões.

Visando uma melhor avaliação das programações ao longo do período analisado, houve a necessidade de elaborar estratégias e desenvolver indicadores de desempenho.

Conforme Fawcett e Clinton (1997), indicadores de desempenho servem como guia para as empresas desenvolverem e utilizarem recursos chaves em busca de alcançar os objetivos desejados em ambiente dinâmico e competitivo. No caso em questão, para a realidade do transporte estudado, os recursos são os caminhões e o interesse é otimizar o seu uso buscando a minimização da frota.

Na Tabela 6 são apresentados dois indicadores implementados para medir a utilização de um veículo em duas dimensões: em toda a frota e dentro do grupo de veículos de mesmo tipo.

O primeiro indicador visa verificar o quanto o caminhão está sendo utilizado, levando-se em consideração todas as viagens realizadas no período. O objetivo é equilibrar o faturamento dos motoristas ao final do mês. Através deste indicador, é possível, também, identificar os motoristas menos produtivos, ou seja, aqueles que têm realizado viagens mais demoradas, acarretando no não cumprimento dos prazos previamente estipulados. Assim, o atraso no retorno de uma viagem pode acarretar em prejuízos no cumprimento do cronograma de viagens da semana, assim como em desgastes no relacionamento com o cliente.

**Tabela 6:** Indicadores de desempenho propostos.

<b>Indicador</b>	<b>Descrição</b>	<b>Cálculo</b>	<b>Meta</b>
Percentual dos veículos utilizados	Mede a utilização do caminhão no total de viagens realizadas no período	Quantidade de viagens realizadas pelo caminhão / Total de viagens	Em torno de 5%.
Percentual dos veículos utilizados do mesmo tipo.	Mede a utilização do caminhão no total de viagens realizadas por caminhões do mesmo tipo no período	Quantidade de viagens realizadas pelo caminhão / Soma das viagens realizadas por caminhões do mesmo tipo	Variam conforme a quantidade de veículos de um tipo $k$ .

O segundo indicador verifica o quanto um veículo está sendo utilizado dentro do conjunto de viagens realizadas por veículos do mesmo tipo, permitindo ratear de forma equilibrada as viagens entre os caminhões semelhantes, evitando a utilização de forma desproporcional entre veículos de mesmo tipo e reduzindo, assim, a possibilidade de desgastes em um dos veículos e ociosidade em outro. Deve-se ressaltar que os custos com os veículos de mesmo tipo são semelhantes, incluindo salário do motorista, manutenção do veículo e abastecimento, é interessante fazer com que eles rodem na mesma proporção. No caso deste indicador, já que os veículos são do mesmo tipo, não há razão para a utilização desproporcional, a não ser em caso de problemas no caminhão, que exijam que o mesmo passe alguns dias parado em reparos na oficina.

#### 4.3.2 Discussão dos indicadores obtidos

É importante mencionar que não há informações das programações semanais reais que foram executadas. Isto significa que, após o planejamento das viagens, as alterações existentes e a execução das mesmas, não há dados de como as demandas foram atendidas.

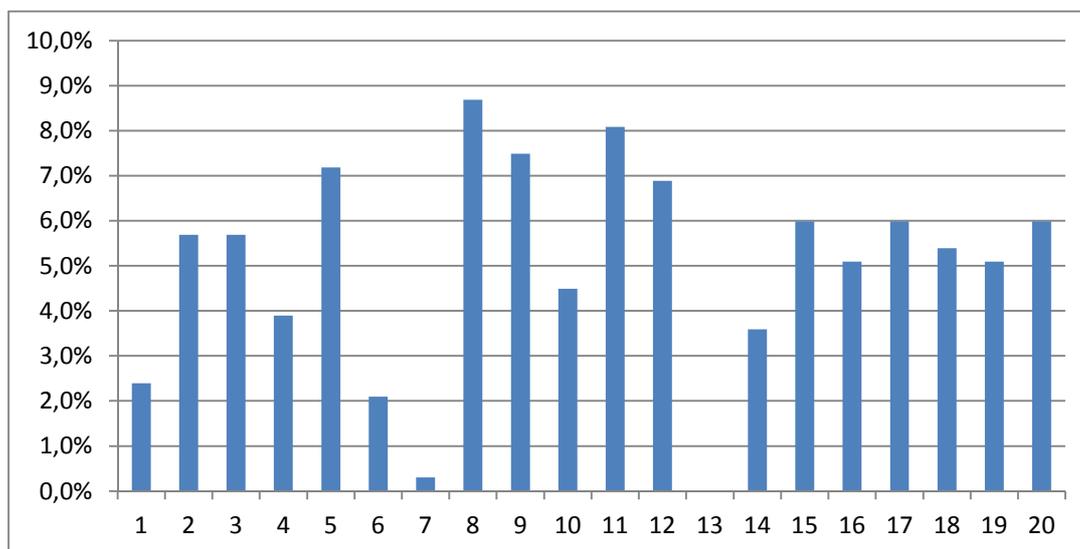
O modelo obteve a minimização da frota para as semanas analisadas, conforme pode-se observar na Tabela 5. Entretanto, ao analisar detalhadamente a utilização de cada veículo através dos Quadros 1 a 9, é possível verificar que, em algumas poucas situações, não há balanceamento na utilização dos caminhões. Isto significa que um veículo de determinado tipo é utilizado em quantidade bem maior que outro veículo do mesmo tipo. Um exemplo de desbalanceamento pode ser observado no Quadro 6, onde

constam 7 viagens com demanda 33 toneladas, sendo 5 destas viagens a serem executadas pelo veículo 5 e somente 2 designadas para o veículo 6. A Tabela 7 apresenta os percentuais de utilização dos caminhões em relação ao total da frota (coluna “Geral”) e em relação aos veículos de mesmo tipo (coluna “Tipo”).

**Tabela 7:** Utilização dos caminhões.

Frota		# Viagens	%	
-	Tipo (ton)		Geral	Tipo
1	50	8	2,4%	100,0%
2	35	19	5,7%	37,3%
3	35	19	5,7%	37,3%
4	35	13	3,9%	25,5%
5	33	24	7,2%	77,4%
6	33	7	2,1%	22,6%
7	30	1	0,3%	0,8%
8	30	29	8,7%	24,2%
9	30	25	7,5%	20,8%
10	30	15	4,5%	12,5%
11	30	27	8,1%	22,5%
12	30	23	6,9%	19,2%
13	25	0	0,0%	0,0%
14	25	12	3,6%	9,7%
15	25	20	6,0%	16,1%
16	25	17	5,1%	13,7%
17	25	20	6,0%	16,1%
18	25	18	5,4%	14,5%
19	25	17	5,1%	13,7%
20	25	20	6,0%	16,1%
<b># Viagens</b>	-	<b>334</b>	100,0%	-

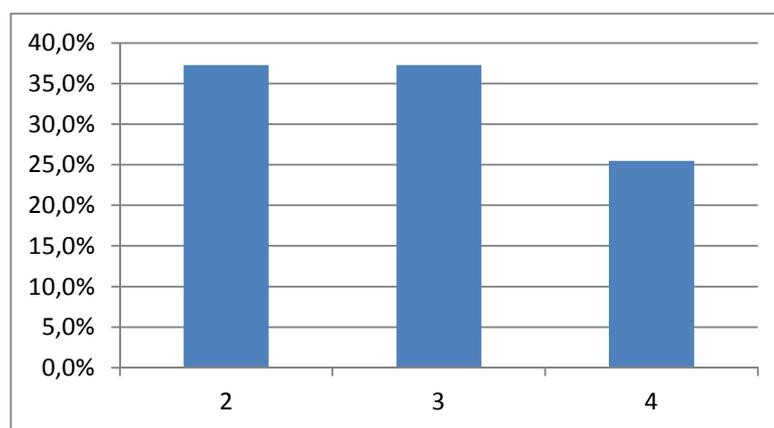
O modelo auxiliou na tomada de decisão ao selecionar o veículo correto para a obra correta, evitando desgastes com o cliente. O balanceamento das viagens, entretanto, poderia ser efetuado para equilibrar a quantidade de viagens realizadas pelos veículos de mesmo tipo, bem como a produtividade dos motoristas. Na Figura 5 é apresentado o percentual de utilização da frota na execução das viagens ao longo das nove semanas de trabalho, conforme ilustrado na Tabela 7.



**Figura 5:** Utilização da frota.

Com exceção dos veículos 7 e 13, que tiveram pouca ou nenhuma utilização, os demais caminhões são utilizados de forma razoável ao longo dos períodos analisados. O caminhão 1 é especial por ser o único do tipo 50 toneladas e recebe poucos pedidos. Os veículos 5 e 6 são do tipo 33 toneladas e o modelo optou por utilizar em maior escala o primeiro, já que não há nenhuma regra para distribuição balanceada das viagens.

Na Figura 6 é apresentado o percentual de utilização dos veículos do tipo 35 toneladas.

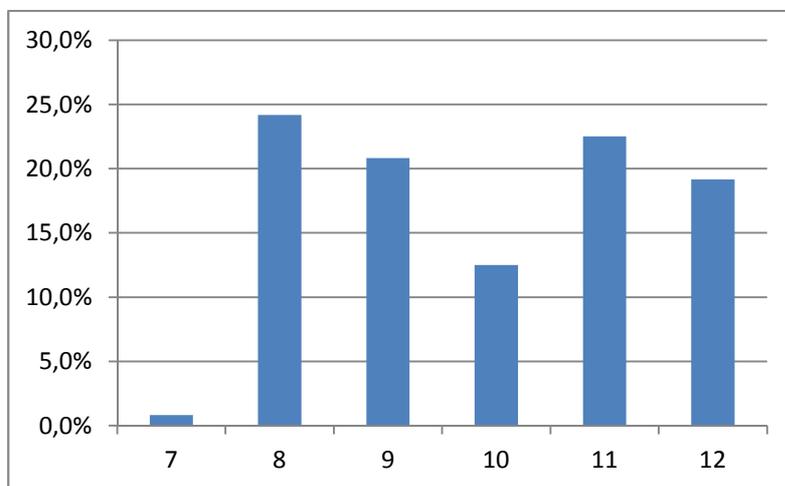


**Figura 6:** Utilização dos veículos de 35 toneladas.

A análise do gráfico ilustrado na Figura 6 apresenta números semelhantes para os veículos 2 e 3 e um resultado aceitável na utilização do veículo 4, ou seja, o percentual apresentado para este veículo não ficou tão abaixo do percentual dos demais.

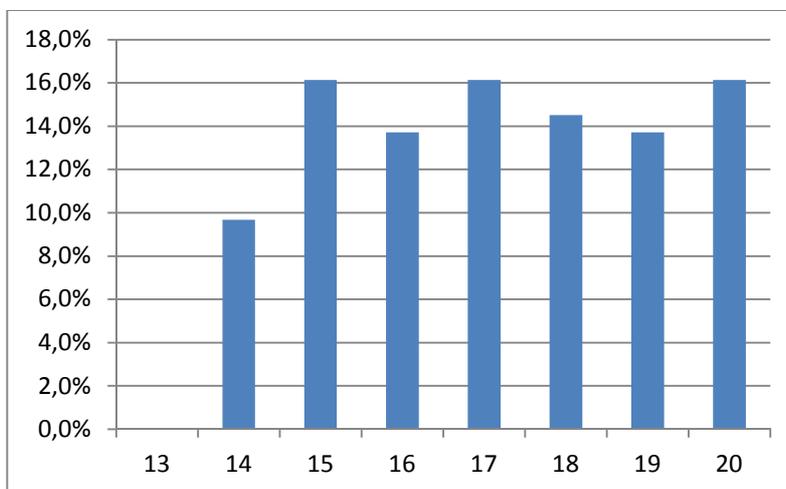
Assim, as demandas para estes veículos tiveram uma distribuição satisfatória, já que os números apresentados variam pouco. Isto significa que, ao final do período analisado, os custos totais individuais de cada veículo serão semelhantes, variando pouco apenas na produção do motorista e no faturamento do veículo 4.

Na Figura 7 é apresentado o percentual de distribuição dos veículos do tipo 30 toneladas. Verifica-se que os veículos de tipo 30 toneladas tiveram distribuição satisfatória, já que a diferença entre o caminhão mais utilizado, no caso o número 8, e o caminhão menos utilizado, ou seja, o número 10, foi muito pequena em termos percentuais (menor que 5%). A exceção foi o caminhão 7 que foi utilizado apenas uma vez.



**Figura 7:** Utilização dos veículos de 30 toneladas.

Na Figura 8 é apresentado o percentual de distribuição dos veículos do tipo 25 toneladas.



**Figura 8:** Utilização dos veículos de 25 toneladas.

É possível verificar que o modelo distribuiu de forma satisfatória os pedidos para os veículos de tipo 25 toneladas, embora o balanceamento não seja contemplado na função objetivo nem nas restrições. A exceção ficou por conta do caminhão 13, que não foi utilizado.

O Anexo 4 foi elaborado para exemplificar o caso das folgas mínimas e apresenta o Gráfico de Gantt da semana 1 com a utilização dos caminhões ao longo da semana na realização de suas viagens. É possível verificar que o caminhão 8 praticamente não possui folga entre as viagens 15 e 20, sendo difícil a implementação desta solução na prática. Portanto, este é um dos casos que necessitariam de ajustes no momento da utilização do novo *scheduling* gerado pelo modelo.

#### **4.4 Considerações Finais**

Neste Capítulo foi apresentada a empresa em estudo, sendo detalhadas suas características para um maior entendimento do trabalho. Foi descrita, ainda, a estrutura da usina e de toda a sua estrutura de pátio, tanques, local de abastecimento de combustível e de carregamento dos caminhões. Apresentou-se a composição da frota da transportadora, com a quantidade de veículos de cada tipo. Foram mencionadas algumas particularidades que resultavam na dificuldade em se realizar a gestão da frota da transportadora estudada.

Discorreu-se, sobre os experimentos computacionais, com explicações acerca do modelo matemático proposto e suas funcionalidades. Foram apresentados os resultados envolvendo a solução ótima gerada para cada semana de trabalho, sendo que os mesmos foram dispostos em quadros, divididos por período.

No Capítulo foram propostos indicadores visando avaliar o desempenho da frota da empresa, com o intuito de elaborar metas com o objetivo de melhorar a performance dos veículos ao longo do período estudado. Com as metas calculadas, ficaria mais fácil cobrar maior empenho dos motoristas e negociar melhor a distribuição das cargas com o cliente, quando houver alguma queda na quantidade de viagens programadas para um determinado período.

No próximo Capítulo, serão apresentadas as considerações finais para este trabalho, assim como as limitações do estudo. Serão apresentadas propostas de estudos futuros que visarão dar continuidade ao trabalho realizado.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

#### 5.1 Relevância, originalidade e resultados obtidos na pesquisa

Este trabalho resultou em uma Dissertação de Mestrado cujo objetivo primordial era elaborar um modelo que buscasse a minimização da frota de caminhões necessária no transporte de derivados de petróleo na construção de rodovias.

O modelo de Programação Inteira foi implementado no *software CPLEX* e foi possível constatar que a metodologia empregada no trabalho serviu para minimizar a frota necessária para o transporte dos derivados de petróleo em cada semana analisada.

No que se refere à relevância e à originalidade do trabalho, pode-se destacar:

- Elaboração de um modelo de otimização que gera programações de caminhões para o transporte de derivados de petróleo para a construção de rodovias com custo de capital mínimo.
- Proposição de indicadores de desempenho das programações de veículos, visando à avaliação da qualidade das soluções geradas.
- Automatização da geração de programações, reduzindo substancialmente os tempos de planejamento e garantindo a viabilidade das programações geradas.
- Elaboração de ferramentas para visualização das programações. Foram propostos tabelas e quadros explicativos para apresentar a utilização de cada caminhão, além de gráficos para ilustrar de forma mais clara o desempenho dos veículos;
- Poucos trabalhos, na literatura revisada, com abordagem semelhante para o transporte deste segmento.

#### 5.2 Limitações da pesquisa

Com relação aos objetivos da pesquisa, quase todos foram atingidos, conforme pode ser observado ao longo desta Dissertação. Deve-se, entretanto, notar algumas dificuldades encontradas na execução do trabalho:

- Não foi possível comparar as soluções geradas pelo modelo com soluções reais, pois a empresa estudada não possuía as programações reais do período analisado;
- Admitiu-se que os tempos eram determinísticos, porém, na verdade, o problema tem natureza probabilística;
- O modelo considera somente o custo de capital.

Vale ressaltar que, além da utilização satisfatória dos veículos ao longo das semanas, em um *scheduling* de caminhões é importante trabalhar com as folgas existentes entre duas viagens. A folga é o tempo de descanso do motorista ao final do expediente de trabalho e tem início na chegada do veículo na origem e dura até o início da próxima viagem programada. Como o modelo contemplou apenas a minimização da frota, existem casos de folgas mínimas que precisariam ser ajustados para que as soluções sejam melhor utilizadas na prática.

### 5.3 Proposições para futuros estudos

O tema explorado neste trabalho é bastante amplo, pois muitos desdobramentos podem surgir a partir de particularidades do problema. Deste modo, são reportadas sugestões para aprofundamento do tema pesquisado, bem como de outros temas afins.

As seguintes sugestões podem ser salientadas:

- Considerar os tempos de operação na usina e os tempos de ida e volta de uma viagem como variáveis aleatórias;
- Considerar múltiplos critérios, tais como custo, tempo, ociosidade da frota, folgas entre viagens e balanceamento das viagens entre os caminhões;
- Considerar o produto carregado e as particularidades de cada um, tais como a possibilidade de um caminhão carregar o produto X após ter carregado o produto Y na viagem anterior. Ainda, avaliar a necessidade de fazer a programação semanal dos caminhões levando em consideração os tipos de produtos que cada veículo deverá carregar.
- Na prática, a geração de serviços de motoristas não atende à legislação vigente, já que se torna difícil controlar os horários dos motoristas quando os mesmos estão em viagem, com dificuldade de acesso ao telefone ou mesmo de visualizar o veículo no roteirizador, já que há obras em regiões remotas. A orientação é

incorporar a programação dos motoristas (*crew scheduling*) na programação dos caminhões.

#### **5.4 Considerações finais**

Dada a escassez de pesquisas na literatura voltadas ao ramo de transporte de derivados realizados por caminhões tanques, houve certa dificuldade em encontrar fontes sólidas para a execução deste trabalho. Outro fator agravante e que ampliou o grau de dificuldade do problema foi devido ao fato de a frota da empresa estudada ser heterogênea.

É pertinente ressaltar que a metodologia apresentada no presente trabalho é condição necessária, mas não suficiente, para a garantia da eficiência e da eficácia na gestão de transportes da empresa estudada. A metodologia utilizada e o desenvolvimento do método no *software* CPLEX permitiram que o objetivo de redução da frota fosse alcançado em todas as semanas estudadas. Na teoria é possível afirmar que não há problemas quanto ao método. Contudo, na prática, há necessidade de pequenos ajustes na programação para que seja possível respeitar outros critérios práticos que não foram contemplados na abordagem mono-objetivo proposta.

## REFERÊNCIAS

- ABEDA – Associação Brasileira Das Empresas Distribuidoras De Asfalto. Manual básico de emulsões asfálticas. Solução para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro: Abeda, 2001.
- BAITA, F., PESENTI, R., UKOVICH, W., FAVARETTO, D. *A comparison of different solution approaches to the vehicle scheduling problem in a practical case.* Computers & Operations Research no. 27 (13):1249-1269, 2000.
- BARD, Jonathan. CPLEX Tutorial Handout. Disponível em: [www.stat.washington.edu/courses/stat539/spring12/Resources/Cplex/CPLEXTutorialHandout-java.pdf](http://www.stat.washington.edu/courses/stat539/spring12/Resources/Cplex/CPLEXTutorialHandout-java.pdf) (acesso em set/2014).
- BAUSCH, D., BROWN, G., RONEN, D. *Dispatching shipments at minimal cost with multiple mode alternatives.* Journal of Business Logistics, Vol. 15, Nº 1, 1994.
- BEAUJON, G. J., TURNQUIST, M. A. *A model for fleet sizing and vehicle allocation.* Transportation Science, v. 25, n. 1, p. 19–45, 1991.
- BERTOLLO, S.A.M.; BERNUCCI, L.B.; FERNANDES, J.L.; LEITE, L.M. *Mechanical properties of asphalt mixtures using recycled tire rubber produced in Brazil – a laboratory evaluation.* Washington, DC: Transportation Research Board, 2003.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: ABEDA, 2007.
- BUNTE, S., KLIEWER, N. *An overview on vehicle scheduling models.* Public Transport 1(4), 299-317, Springer Berlin/Heidelberg, Germany, 2009.
- CARDOSO, Luiz Cláudio dos Santos; Logística do petróleo: transporte e armazenamento. Interciência. Rio de Janeiro, RJ, 2004.
- CARRARESI, P., GALLO, G. *Network models for vehicle and crew scheduling.* European Journal of Operational Research 16. Published by: Elsevier Science Publishers, 1984.
- CEDER, A. *Public-transit Vehicle Schedules Using a Minimum Crew-cost Approach.* International Journal of Total Logistic Management, 2011.
- CHOI, Y., NIETO, A. *Optimal Haulage Routing of Off-road Dump Trucks in Construction and Mining Sites Using Google Earth and a Modified Least-cost Path Algorithm.* Journal of Automation in Construction. Published by: Elsevier Science Publishers, 2011.
- CHRISTOPHER, M. Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2001.

DADUNA, J., PAIXÃO, J. *Vehicle Scheduling for Public Mass Transit – An Overview*, in *Computer Scheduling of Public Transport*, eds. J. Daduna, I.M. Branco & J. Paixão, Lectures Notes in Economics and Mathematical Systems, 430, Springer-Verlag, Berlin, pp. 76-90, 1995.

DNIT. Manual de pavimentação. Publicação IPR – 179. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias, 2006.

ELIYI, D., ORNEK, A., KARAKÜTÜK, S. *A vehicle scheduling problem with fixed trips and time limitations*. International Journal of Production Economics. Published by: Elsevier Science Publishers, 2009.

FAWCETT, S. E., CLINTON, S. R. *Enhancing logistics performance to improve the competitiveness of manufacturing organizations*. Transportation Journal, Arlington, v. 37, n. 1, p. 18-28, 1997.

FENG, C., CHENG, T., WU, H. *Optimizing the schedule of dispatching RMC trucks through genetic algorithms*. Journal of Automation in Construction. Published by: Elsevier Science Publishers, 2004.

FENG, C., WU, H. *Integrating fmGA and Cyclone to Optimize the Schedule of Dispatching RMC Trucks*. Journal of Automation in Construction. Published by: Elsevier Science Publishers, 2006.

FERLAND, J. A., MICHELON, P. *The Vehicle Scheduling Problem with Multiple Vehicle Types*. Journal of the Operational Research Society, Vol. 39, No. 6 (Jun., 1988), pp. 577-583. Published by: Palgrave Macmillan Journals on behalf of the Operational Research Society, 1988.

FLEURY, P. F., WANKE, P., FIGUEIREDO, K. *Logística empresarial: a perspectiva brasileira*. São Paulo. Atlas. 2000.

FRELING, R., PAIXÃO, J.M.P. *Vehicle scheduling with time constraint*. In J. Daduna, I. Branco, and J.M.P. Paixão (eds.) *Computer-aided transit scheduling*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol 430, Springer, Berlin, ages 130\_144, 1995.

FRELING, R., HUISMAN, D., WAGELMANS, A.P.M. *Models and algorithms for integration of vehicle and crew scheduling*. Journal of Scheduling, 2003.

GOVERNO FEDERAL. Programa de Aceleração do Crescimento - PAC (2007-2010). Comitê Gestor. Brasília - DF, Janeiro de 2008.

HAGHANI, A., BANIHASHEMI, M. *A comparative analysis of bus transit vehicle scheduling models*. Transportation Research Part B, 37, pp. 301–322 (2003).

HATORI, S. *Truck Dispatch Scheduling by Constraint Logic Programming*. System Plaza Inc., Supply Chain Division. APDSI, 2000.

HUNTER, R.N., 2000. *Asphalts in road construction*. London: Thomas Telford Ed.

IBM ILOG CPLEX Optimizer. Disponível em: <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/> (acesso em set/2014).

IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo. Informações básicas sobre materiais asfálticos. Rio de Janeiro: IBP - Comissão de Asfalto, 1999.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade. Industrial

Instituto Brasileiro de Petróleo: Informações básicas sobre materiais asfálticos. 6ª edição, Rev, Rio de Janeiro: Cervantes, 1999.

LIN, P., WANG, J., HUANG, S., WANG, Y. *Dispatching Ready Mixed Concrete Trucks Under Demand Postponement And Weight Limit Regulation*. Journal of Automation in Construction. Published by: Elsevier Science Publishers, 2010.

MORABITO, R., VASCO, R. Modelos Para o Dimensionamento e Alocação Dinâmica de Veículos no Transporte Rodoviário de Cargas Completas Entre Terminais. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção: ENEGEP, 2011.

NAZÁRIO, Paulo. Papel do Transporte na Estratégia Logística in Logística empresarial. Organização: FLEURY, P. F.; WANKE, P.; FIGUEIREDO, K. F. São Paulo: Atlas, 2000.

POWELL, W. B.; SHEFFI, Y.; THIRIEZ, S. *The dynamic vehicle allocation problem with uncertain demands*. In: Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory. [S.l.: s.n.], 1984.

POWELL, W. B. *An operational planning model for the dynamic vehicle allocation problem with uncertain demands*. Transportation Research Part B, v. 21, n. 3, p. 217–232, 1987.

POWELL, W. B. *A comparative review of alternative algorithms for the dynamic vehicle allocation problem*. Vehicle Routing: Methods and Studies, Elsevier Science Publisher B. V., 1988.

POWELL, W. B. *A stochastic formulation of the dynamic assignment problem, with an application to truckload motor carrier*. Transportation Science, v. 30, n. 3, p. 195–219, 1996.

SENÇO, W. Manual de técnicas de pavimentação. Vol. 1, 1ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

SENÇO, W. Manual de técnicas de pavimentação. Vol. 1, 2ª ed. São Paulo: Pini, 2001.

SHELL. The Shell bitumen handbook. 5. ed. Cambridge, 2003.

STOJANOVIC, D., NIKOLICIC, S., MILICIC, M. *Transport fleet sizing by using make and buy decision-making*. Economic Annals, Volume LVI, Nº 190, 2011.

WANG, H., SHEN, J. *Heuristic Approach for Solving Transit Vehicle Scheduling Problem With Route and Fueling Time Constraints*. Journal of Applied Mathematics and Computation. Published by: Elsevier Science Publishers, 2007.

YAN, S., LAI, W. *An Optimal Scheduling Model for Ready Mixed Concrete Supply With Overtime Considerations*. Journal of Automation in Construction. Published by: Elsevier Science Publishers, 2007.

YAN, S., LIN, H., LIU, Y. *Optimal schedule adjustments for supplying ready mixed concrete following incidents*. Journal of Automation in Construction. Published by: Elsevier Science Publishers, 2011.

## ANEXO 1 – Modelo matemático para o exemplo proposto

$$\text{Minimizar } x_{111}+x_{131}+x_{331}+x_{222}+x_{252}+x_{552}+x_{443} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$x_{131}+x_{331} = y_{31} \quad (2)$$

$$x_{111}+x_{131} = y_{11} \quad (3)$$

$$x_{252}+x_{552} = y_{52} \quad (4)$$

$$x_{222}+x_{252} = y_{22} \quad (5)$$

$$x_{443} = y_{43} \quad (6)$$

$$y_{11}+y_{12}+y_{13}=1 \quad (7)$$

$$y_{21}+y_{22}+y_{23}=1 \quad (8)$$

$$y_{31}+y_{32}+y_{33}=1 \quad (9)$$

$$y_{41}+y_{42}+y_{43}=1 \quad (10)$$

$$y_{51}+y_{52}+y_{53}=1 \quad (11)$$

$$20*y_{11}+30*y_{12}+40*y_{13}=20 \quad (12)$$

$$20*y_{21}+30*y_{22}+40*y_{23}=30 \quad (13)$$

$$20*y_{31}+30*y_{32}+40*y_{33}=20 \quad (14)$$

$$20*y_{41}+30*y_{42}+40*y_{43}=40 \quad (15)$$

$$20*y_{51}+30*y_{52}+40*y_{53}=30 \quad (16)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (17)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad (18)$$

**Anexo 2 – Capacidade de Carga dos caminhões da empresa X****Tabela A1:** Capacidade de Carga dos caminhões.

<b>Frota</b>			
<b>Veículo</b>	<b>Capacidade (ton.)</b>	<b>Veículo</b>	<b>Capacidade (ton.)</b>
1	50	11	30
2	35	12	30
3	35	13	25
4	35	14	25
5	33	15	25
6	33	16	25
7	30	17	25
8	30	18	25
9	30	19	25
10	30	20	25

### ANEXO 3 – Tabelas de horário referentes à programação das 9 semanas

Tabela B1: Tabela de horários da Semana 1.

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
1	$\vartheta_1$	8	4	3	30
1	$\vartheta_2$	9	4	3	30
1	$\vartheta_3$	8	9	7	35
1	$\vartheta_4$	8	10	7	30
1	$\vartheta_5$	8	9	7	25
1	$\vartheta_6$	8	7	5	33
2	$\vartheta_7$	8	7	5	50
2	$\vartheta_8$	8	7	5	30
2	$\vartheta_9$	8	9	7	35
2	$\vartheta_{10}$	8	9	7	30
2	$\vartheta_{11}$	11	7	5	30
3	$\vartheta_{12}$	8	4	3	25
3	$\vartheta_{13}$	8	9	7	30
3	$\vartheta_{14}$	8	7	5	30
3	$\vartheta_{15}$	11	12	8	30

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
3	$\vartheta_{16}$	8	9	7	30
4	$\vartheta_{17}$	8	7	5	25
4	$\vartheta_{18}$	8	4	3	33
4	$\vartheta_{19}$	8	12	8	33
4	$\vartheta_{20}$	8	9	7	30
5	$\vartheta_{21}$	8	9	7	25
5	$\vartheta_{22}$	8	10	7	25
5	$\vartheta_{23}$	10	7	5	25
5	$\vartheta_{24}$	13	9	7	25
5	$\vartheta_{25}$	8	9	7	33
5	$\vartheta_{26}$	8	9	7	30
5	$\vartheta_{27}$	8	7	5	30
5	$\vartheta_{28}$	15	11	7	25
5	$\vartheta_{29}$	10	12	8	30

**Tabela B2:** Tabela de horários da Semana 2.

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
1	$\vartheta_1$	8	7	5	25
1	$\vartheta_2$	8	7	5	33
1	$\vartheta_3$	8	7	5	25
1	$\vartheta_4$	8	9	7	33
1	$\vartheta_5$	8	7	5	30
1	$\vartheta_6$	8	9	7	35
1	$\vartheta_7$	10	9	7	25
1	$\vartheta_8$	8	11	7	30
2	$\vartheta_9$	8	7	5	30
2	$\vartheta_{10}$	8	9	7	35
2	$\vartheta_{11}$	8	7	5	30
2	$\vartheta_{12}$	8	9	7	25
2	$\vartheta_{13}$	10	9	7	35
3	$\vartheta_{14}$	8	9	7	33
3	$\vartheta_{15}$	8	9	7	35
3	$\vartheta_{16}$	8	7	5	30

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
3	$\vartheta_{17}$	8	9	7	33
3	$\vartheta_{18}$	13	9	7	30
3	$\vartheta_{19}$	14	9	7	30
3	$\vartheta_{20}$	14	12	8	30
3	$\vartheta_{21}$	8	9	7	25
3	$\vartheta_{22}$	8	9	7	25
4	$\vartheta_{23}$	8	11	7	25
4	$\vartheta_{24}$	10	9	7	25
4	$\vartheta_{25}$	13	9	7	25
5	$\vartheta_{26}$	8	7	5	25
5	$\vartheta_{27}$	8	9	7	30
5	$\vartheta_{28}$	8	9	7	35
5	$\vartheta_{29}$	8	9	7	50
5	$\vartheta_{30}$	8	12	8	30
6	$\vartheta_{31}$	8	9	7	33

**Tabela B3:** Tabela de horários da Semana 3.

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
1	$\vartheta_1$	8	9	7	35
1	$\vartheta_2$	8	7	5	25
1	$\vartheta_3$	8	9	7	25
1	$\vartheta_4$	8	7	5	30
1	$\vartheta_5$	8	7	5	33
1	$\vartheta_6$	8	9	7	33
1	$\vartheta_7$	11	9	7	30
1	$\vartheta_8$	8	12	8	30
1	$\vartheta_9$	8	7	5	35
1	$\vartheta_{10}$	10	11	7	30
2	$\vartheta_{11}$	14	9	7	33
2	$\vartheta_{12}$	8	9	7	30
2	$\vartheta_{13}$	8	7	5	35
2	$\vartheta_{14}$	8	7	5	25
3	$\vartheta_{15}$	8	5	3	50
3	$\vartheta_{16}$	10	4	3	25
3	$\vartheta_{17}$	8	9	7	35
3	$\vartheta_{18}$	14	9	7	30

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
3	$\vartheta_{19}$	8	7	5	30
3	$\vartheta_{20}$	11	7	5	30
4	$\vartheta_{21}$	8	7	5	25
4	$\vartheta_{22}$	8	9	7	35
4	$\vartheta_{23}$	8	9	7	30
4	$\vartheta_{24}$	10	4	3	25
4	$\vartheta_{25}$	13	9	7	25
4	$\vartheta_{26}$	8	9	7	35
4	$\vartheta_{27}$	8	9	7	33
5	$\vartheta_{28}$	8	4	3	25
5	$\vartheta_{29}$	8	5	3	25
5	$\vartheta_{30}$	8	7	5	33
5	$\vartheta_{31}$	8	9	7	30
5	$\vartheta_{32}$	8	7	5	35
5	$\vartheta_{33}$	10	4	3	25
5	$\vartheta_{34}$	8	7	5	30

**Tabela B4:** Tabela de horários da Semana 4.

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
1	$\vartheta_1$	8	7	5	35
1	$\vartheta_2$	10	7	5	35
1	$\vartheta_3$	8	7	5	30
2	$\vartheta_4$	8	4	3	35
2	$\vartheta_5$	14	7	5	35
2	$\vartheta_6$	8	9	7	25
2	$\vartheta_7$	8	9	7	30
3	$\vartheta_8$	8	7	5	25
3	$\vartheta_9$	8	12	8	25
4	$\vartheta_{10}$	8	9	7	30
4	$\vartheta_{11}$	8	7	5	30
4	$\vartheta_{12}$	8	7	5	25
4	$\vartheta_{13}$	8	7	5	25

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
4	$\vartheta_{14}$	8	7	5	30
4	$\vartheta_{15}$	10	7	5	30
4	$\vartheta_{16}$	10	7	5	30
4	$\vartheta_{17}$	10	9	7	25
4	$\vartheta_{18}$	14	7	5	25
4	$\vartheta_{19}$	8	7	5	35
5	$\vartheta_{20}$	8	12	8	30
5	$\vartheta_{21}$	8	7	5	35
5	$\vartheta_{22}$	8	11	7	30
5	$\vartheta_{23}$	8	4	3	25
5	$\vartheta_{24}$	10	12	8	35

**Tabela B5:** Tabela de horários da Semana 5.

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$l_i(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
1	$\vartheta_1$	8	4	3	25
1	$\vartheta_2$	8	4	3	25
1	$\vartheta_3$	10	7	5	25
2	$\vartheta_4$	8	4	3	35
2	$\vartheta_5$	8	9	7	25
2	$\vartheta_6$	8	4	3	25
3	$\vartheta_7$	8	4	3	25
3	$\vartheta_8$	8	7	5	25
3	$\vartheta_9$	8	9	7	30
3	$\vartheta_{10}$	8	4	3	50
3	$\vartheta_{11}$	8	4	3	25
3	$\vartheta_{12}$	8	7	5	30

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$l_i(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
3	$\vartheta_{13}$	8	9	8	25
4	$\vartheta_{14}$	8	7	5	35
4	$\vartheta_{15}$	8	4	3	50
4	$\vartheta_{16}$	8	7	5	30
4	$\vartheta_{17}$	8	9	7	30
4	$\vartheta_{18}$	8	7	5	33
4	$\vartheta_{19}$	10	9	7	30
4	$\vartheta_{20}$	10	9	7	30
4	$\vartheta_{21}$	8	9	7	35
4	$\vartheta_{22}$	14	10	8	30
5	$\vartheta_{23}$	8	7	5	30
5	$\vartheta_{24}$	8	11	7	25

Tabela B6: Tabela de horários da Semana 6.

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
1	$\vartheta_1$	8	7	5	25
1	$\vartheta_2$	8	4	3	25
1	$\vartheta_3$	8	9	7	25
1	$\vartheta_4$	8	10	7	25
1	$\vartheta_5$	8	9	7	33
1	$\vartheta_6$	8	11	7	35
1	$\vartheta_7$	8	9	7	33
1	$\vartheta_8$	8	7	5	35
1	$\vartheta_9$	10	7	5	35
1	$\vartheta_{10}$	8	9	7	30
1	$\vartheta_{11}$	8	3	2	25
1	$\vartheta_{12}$	8	3	2	25
2	$\vartheta_{13}$	13	9	7	33
2	$\vartheta_{14}$	8	10	8	30
2	$\vartheta_{15}$	8	4	3	25
2	$\vartheta_{16}$	8	9	7	30
2	$\vartheta_{17}$	11	9	7	33
2	$\vartheta_{18}$	13	9	7	35
2	$\vartheta_{19}$	8	7	5	35
2	$\vartheta_{20}$	14	7	5	35
3	$\vartheta_{21}$	8	7	5	25
3	$\vartheta_{22}$	8	9	7	30
3	$\vartheta_{23}$	8	11	7	25
3	$\vartheta_{24}$	8	9	7	30
3	$\vartheta_{25}$	8	7	5	25

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
3	$\vartheta_{26}$	8	4	3	25
3	$\vartheta_{27}$	9	12	8	30
3	$\vartheta_{28}$	8	9	7	25
3	$\vartheta_{29}$	13	7	5	33
3	$\vartheta_{30}$	8	9	7	25
3	$\vartheta_{31}$	10	7	5	30
4	$\vartheta_{32}$	8	4	3	25
4	$\vartheta_{33}$	8	7	5	25
4	$\vartheta_{34}$	8	7	5	35
4	$\vartheta_{35}$	8	7	5	33
5	$\vartheta_{36}$	8	9	7	25
5	$\vartheta_{37}$	8	9	8	25
5	$\vartheta_{38}$	8	9	7	35
5	$\vartheta_{39}$	8	7	5	25
5	$\vartheta_{40}$	8	7	5	25
5	$\vartheta_{41}$	8	7	5	30
5	$\vartheta_{42}$	8	7	5	25
5	$\vartheta_{43}$	8	9	7	33
6	$\vartheta_{44}$	8	9	7	25
6	$\vartheta_{45}$	8	9	7	35
6	$\vartheta_{46}$	8	9	7	30
6	$\vartheta_{47}$	8	4	3	25
6	$\vartheta_{48}$	8	12	8	35
6	$\vartheta_{49}$	8	12	8	30

Tabela B7: Tabela de horários da Semana 7.

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
1	$\vartheta_1$	8	4	3	25
1	$\vartheta_2$	8	9	7	30
1	$\vartheta_3$	8	9	7	30
1	$\vartheta_4$	8	7	5	30
1	$\vartheta_5$	8	7	5	30
1	$\vartheta_6$	8	7	5	35
1	$\vartheta_7$	8	11	7	30
1	$\vartheta_8$	8	7	5	25
1	$\vartheta_9$	8	4	3	25
1	$\vartheta_{10}$	8	9	7	25
1	$\vartheta_{11}$	8	11	7	25
2	$\vartheta_{12}$	8	9	7	30
2	$\vartheta_{13}$	15	7	5	30
2	$\vartheta_{14}$	15	12	8	30
2	$\vartheta_{15}$	8	7	5	33
2	$\vartheta_{16}$	8	9	7	25
2	$\vartheta_{17}$	8	9	7	33
2	$\vartheta_{18}$	8	9	7	25
3	$\vartheta_{19}$	8	7	5	25
3	$\vartheta_{20}$	8	9	7	25
3	$\vartheta_{21}$	8	9	7	50
3	$\vartheta_{22}$	8	9	7	30
3	$\vartheta_{23}$	9	12	8	30
3	$\vartheta_{24}$	8	7	5	35
3	$\vartheta_{25}$	8	9	7	35
3	$\vartheta_{26}$	10	7	5	30
3	$\vartheta_{27}$	13	9	7	30
4	$\vartheta_{28}$	8	9	7	30
4	$\vartheta_{29}$	8	7	5	25
4	$\vartheta_{30}$	8	7	5	35
4	$\vartheta_{31}$	8	9	7	33
4	$\vartheta_{32}$	13	9	7	30
4	$\vartheta_{33}$	14	12	8	30
5	$\vartheta_{34}$	8	9	7	25
5	$\vartheta_{35}$	8	9	7	25
5	$\vartheta_{36}$	8	4	3	25
5	$\vartheta_{37}$	8	9	7	30
5	$\vartheta_{38}$	8	7	5	25
5	$\vartheta_{39}$	8	7	5	25
5	$\vartheta_{40}$	8	7	5	35
6	$\vartheta_{41}$	8	9	7	35
6	$\vartheta_{42}$	8	9	7	25
6	$\vartheta_{43}$	8	9	7	25
6	$\vartheta_{44}$	8	9	7	30
6	$\vartheta_{45}$	8	9	7	30
6	$\vartheta_{46}$	8	7	5	30
6	$\vartheta_{47}$	8	4	3	25

Tabela B8: Tabela de horários da Semana 8.

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
1	$\vartheta_1$	8	9	7	25
1	$\vartheta_2$	8	7	5	25
1	$\vartheta_3$	8	7	5	30
1	$\vartheta_4$	8	4	3	30
1	$\vartheta_5$	8	4	3	25
1	$\vartheta_6$	8	7	5	35
1	$\vartheta_7$	9	9	7	30
1	$\vartheta_8$	9	9	7	30
1	$\vartheta_9$	10	9	7	30
2	$\vartheta_{10}$	8	9	7	30
2	$\vartheta_{11}$	8	9	7	25
2	$\vartheta_{12}$	8	9	7	30
2	$\vartheta_{13}$	8	7	5	25
2	$\vartheta_{14}$	8	9	7	30
2	$\vartheta_{15}$	8	9	7	25
2	$\vartheta_{16}$	13	9	7	30
2	$\vartheta_{17}$	8	4	3	50
2	$\vartheta_{18}$	8	7	5	35
3	$\vartheta_{19}$	8	9	7	25
3	$\vartheta_{20}$	8	7	5	25
3	$\vartheta_{21}$	8	9	7	30
3	$\vartheta_{22}$	8	9	7	35
3	$\vartheta_{23}$	8	7	5	30
3	$\vartheta_{24}$	8	7	5	25
3	$\vartheta_{25}$	14	7	5	30
3	$\vartheta_{26}$	8	9	7	35
3	$\vartheta_{27}$	15	12	8	30

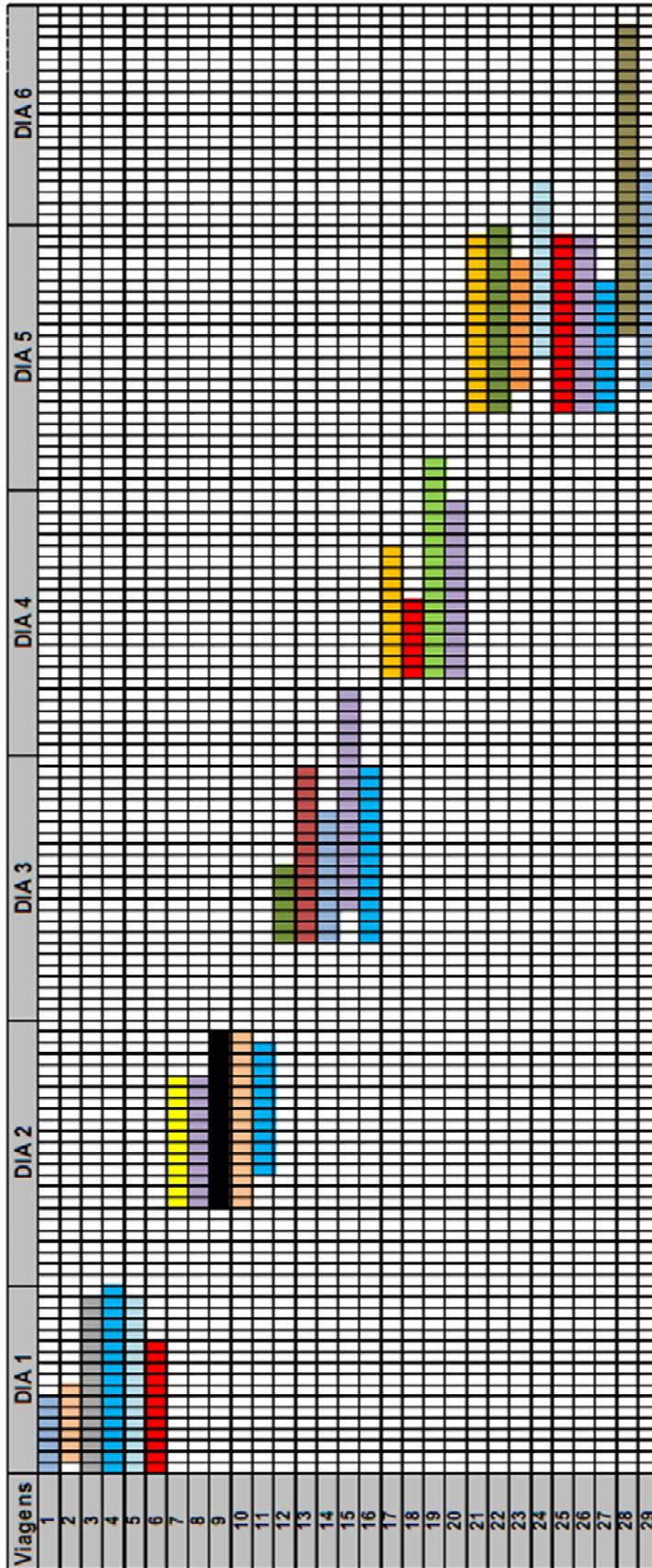
Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$li(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
3	$\vartheta_{28}$	8	9	7	33
3	$\vartheta_{29}$	15	4	3	25
4	$\vartheta_{30}$	8	9	7	25
4	$\vartheta_{31}$	8	12	8	30
4	$\vartheta_{32}$	8	4	3	25
4	$\vartheta_{33}$	8	7	5	33
4	$\vartheta_{34}$	8	4	3	25
4	$\vartheta_{35}$	8	7	5	35
5	$\vartheta_{36}$	8	9	7	35
5	$\vartheta_{37}$	8	9	7	25
5	$\vartheta_{38}$	8	7	5	30
5	$\vartheta_{39}$	8	9	7	25
5	$\vartheta_{40}$	8	9	7	25
5	$\vartheta_{41}$	8	9	7	25
5	$\vartheta_{42}$	9	9	7	30
5	$\vartheta_{43}$	10	7	5	30
5	$\vartheta_{44}$	8	4	3	25
5	$\vartheta_{45}$	8	7	5	30
5	$\vartheta_{46}$	8	9	7	30
5	$\vartheta_{47}$	15	7	5	25
6	$\vartheta_{48}$	8	9	7	33
6	$\vartheta_{49}$	8	9	7	35
6	$\vartheta_{50}$	8	9	7	25
6	$\vartheta_{51}$	8	9	7	30
6	$\vartheta_{52}$	8	4	3	33
7	$\vartheta_{53}$	8	9	7	25

**Tabela B9:** Tabela de horários da Semana 9.

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$l_i(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
1	$\vartheta_1$	8	5	4	25
1	$\vartheta_2$	8	9	7	30
1	$\vartheta_3$	8	7	5	30
1	$\vartheta_4$	8	9	7	25
1	$\vartheta_5$	8	5	3	25
1	$\vartheta_6$	8	9	7	30
1	$\vartheta_7$	8	9	7	30
2	$\vartheta_8$	8	4	3	30
2	$\vartheta_9$	8	9	7	30
2	$\vartheta_{10}$	8	7	5	35
2	$\vartheta_{11}$	8	9	7	25
2	$\vartheta_{12}$	14	7	5	30
2	$\vartheta_{13}$	8	7	5	25
2	$\vartheta_{14}$	8	9	7	25
3	$\vartheta_{15}$	8	7	5	30
3	$\vartheta_{16}$	8	7	5	25
3	$\vartheta_{17}$	8	4	3	25
3	$\vartheta_{18}$	8	4	3	33
3	$\vartheta_{19}$	8	9	7	30
3	$\vartheta_{20}$	8	9	7	25
3	$\vartheta_{21}$	8	9	7	35
3	$\vartheta_{22}$	8	9	7	25

Dia	$\vartheta_i$	$\zeta_i(\text{h})$	$l_i(\text{h})$	$\tau_{ij}(\text{h})$	$q_i$
3	$\vartheta_{23}$	8	4	3	25
3	$\vartheta_{24}$	16	9	7	25
3	$\vartheta_{25}$	13	9	7	25
3	$\vartheta_{26}$	11	7	5	35
3	$\vartheta_{27}$	8	9	7	30
3	$\vartheta_{28}$	8	7	5	30
3	$\vartheta_{29}$	16	9	7	25
4	$\vartheta_{30}$	8	9	7	25
4	$\vartheta_{31}$	8	9	7	30
4	$\vartheta_{32}$	8	9	7	33
4	$\vartheta_{33}$	8	9	7	30
4	$\vartheta_{34}$	8	9	7	30
4	$\vartheta_{35}$	8	4	3	25
4	$\vartheta_{36}$	8	9	7	35
4	$\vartheta_{37}$	8	7	5	30
4	$\vartheta_{38}$	8	7	5	25
5	$\vartheta_{39}$	8	7	5	30
5	$\vartheta_{40}$	8	9	7	30
5	$\vartheta_{41}$	9	9	7	30
5	$\vartheta_{42}$	8	4	3	50
5	$\vartheta_{43}$	9	12	8	30

### Anexo 4 – Gráfico de Gantt para a Semana 1



Legendas – veículos

V1	Yellow
V2	Black
V3	Grey
V4	Blue
V5	Red
V6	Green
V7	-
V8	Purple
V9	Blue
V10	Orange
V11	Blue
V12	Red
V13	-
V14	Green
V15	-
V16	Yellow
V17	Blue
V18	Green
V19	-
V20	Orange