

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Instituto de Ciências Exatas  
Programa de Pós-Graduação em Estatística

Pedro Henrique Evangelista Porto

**ANÁLISE DESCRITIVA DA CARGA DA FROTA DE TRANSPORTE DE UMA  
MINERAÇÃO A CÉU ABERTO**

Belo Horizonte  
2022

Pedro Henrique Evangelista Porto

**ANÁLISE DESCRITIVA DA CARGA DA FROTA DE TRANSPORTE DE UMA  
MINERAÇÃO A CÉU ABERTO**

Monografia apresentada ao Programa de Especialização em Estatística do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Estatística, com ênfase em Indústria e Mercado.

Orientador: Prof. Dr. Roberto da Costa  
Quinino

Belo Horizonte

2022

2022, Pedro Henrique Evangelista Porto.  
Todos os direitos reservados.

Porto, Pedro Henrique Evangelista

S853a Análise descritiva da carga da frota de transporte de uma mineração a céu aberto [recurso eletrônico] / Pedro Henrique Evangelista Porto — 2022.

1 recurso online (53 f. il, color.): pdf.

Orientador: Roberto da Costa Quinino.

Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística.

Referências: 53.

1. Estatística. 2. Minas – Métodos estatísticos. 3. Transporte - Produtividade. 4. Estatística – Análise. I. Quinino, Roberto da Costa. II. Universidade Federal de Minas Gerais I. Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística. III. Título.

CDU 519.2 (043)

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Belkiz Inez Rezende Costa  
CRB 6/1510 Universidade Federal de Minas Gerais – ICEX



Universidade Federal de Minas Gerais  
Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Estatística  
Programa de Pós-Graduação / Especialização  
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha  
31270-901 – Belo Horizonte – MG

E-mail: pgest@ufmg.br  
Tel: 3409-5923 – FAX: 3409-5924

## ATA DO 267<sup>o</sup>. TRABALHO DE FIM DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA DE PEDRO HENRIQUE EVANGELISTA PORTO.

Aos dezanove dias do mês de dezembro de 2022, às 18:00 horas, com utilização de recursos de videoconferência a distância, reuniram-se os professores abaixo relacionados, formando a Comissão Examinadora homologada pela Comissão do Curso de Especialização em Estatística, para julgar a apresentação do trabalho de fim de curso do aluno **Pedro Henrique Evangelista Porto**, intitulado: “Análise Descritiva e Inferencial da Carga da Frota de Transporte de uma Mineração a Céu Aberto”, como requisito para obtenção do Grau de Especialista em Estatística. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Professor Roberto da Costa Quinino – Orientador, após dar conhecimento aos presentes do teor das normas regulamentares, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores com a respectiva defesa do candidato. Após a defesa, os membros da banca examinadora reuniram-se sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foi atribuída a seguinte indicação: o candidato foi considerado Aprovado condicional às modificações sugeridas pela banca examinadora no prazo de 30 dias a partir da data de hoje por unanimidade. O resultado final foi comunicado publicamente o candidato pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente Ata, que será assinada por todos os membros participantes da banca examinadora. Belo Horizonte, 19 de dezembro de 2022.

Prof. Roberto da Costa Quinino (Orientador)  
Departamento de Estatística / ICEX / UFMG

Roberto da  
Costa  
Quinino:8087  
1291720

Assinado de forma  
digital por Roberto da  
Costa  
Quinino:80871291720  
Data: 2022.12.21  
19:33:35 -03'00'

Leandro Geraldo Canaan Silveira  
Engenheiro Sênior da Vale S.A



**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Instituto de Ciências Exatas**  
**Departamento de Estatística**  
**Programa de Pós-Graduação / Especialização**  
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha  
31270-901 – Belo Horizonte – MG

E-mail: [pgest@ufmg.br](mailto:pgest@ufmg.br)  
Tel: 3409-5923 – FAX: 3409-5924

**DECLARAÇÃO DE CUMPRIMENTO DE REQUISITOS PARA CONCLUSÃO DO  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA.**

Declaro para os devidos fins que Pedro Henrique Evangelista Porto, número de registro 2019705529, cumpriu todos os requisitos necessários para conclusão do curso de Especialização em Estatística e que me entregou e aprovei a versão final do seu trabalho. O trabalho foi apresentado no dia 19 de dezembro de 2022 com o título "*Análise descritiva e Inferencial da Carga da Frota de Transporte de uma Mineração a Céu Aberto*".

Belo Horizonte, 07 de março de 2023

Prof. Roberto da Costa Quinino  
Coordenador do curso de  
Especialização em Estatística  
Departamento de Estatística / UFMG

*Para Regina e Bráulio.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais por todo o esforço e sacrifício que fizeram para garantir a educação que tive. Nenhuma conquista seria possível não fosse por eles.

Agradeço à Vale pela disponibilização dos dados e aos companheiros de trabalho pelos ensinamentos que tenho recebido todos os dias, fundamentais para a elaboração desse trabalho.

Finalmente, agradeço à UFMG pelo ensino de qualidade e ao professor Roberto que prontamente aceitou ser meu orientador nesse trabalho. Muito obrigado!

## RESUMO

A melhoria da eficiência das operações de mineração é preocupação crescente entre as empresas. Sabe-se que os custos relacionados ao carregamento e transporte de materiais são os mais representativos nas operações e, portanto, a maximização da capacidade produtiva da frota dilui custos e aumenta as receitas. A produtividade da frota de transporte de uma mineração é composta pelos indicadores de carga média e tempo de ciclo. O aumento da carga média e diminuição do tempo de ciclo maximiza a produtividade da frota de transporte. Neste trabalho, foi feita uma análise estatística da carga média de frota de transporte de uma mineração, composta de 2 modelos de caminhões fora de estrada, e algumas oportunidades para aumento da carga média foram levantadas. As análises indicaram que há diferenças significativas entre as turmas que operam a mina, que a frota de pás carregadeiras apresentou desempenho melhor que a frota de escavadeiras, e que a lavra de estéril é aquela que apresenta maiores dificuldades em termos de carga média. Concluiu-se que há diversas ações que podem ser aprofundadas e tomadas para melhoria da carga média global, como padronização de operadores experientes e novatos entre as turmas, melhor acompanhamento do indicador na rotina, e melhor alocação da frota.

**Palavras-chave:** Operação de mina; produtividade de transporte; caminhão fora de estrada; carga média; análise estatística; ANOVA.

## ABSTRACT

The improvement of operational efficiency is a growing concern among mining companies. The costs related to loading and hauling of materials are the most representative in operations, and thus the maximization of the fleet's productive capacity lowers the costs and increases revenues. The productivity of the haulage trucks fleet in mining is composed by the KPI's average payload and cycle time. The increase in the payload and reduction in the cycle time maximizes the fleet's productivity. In this paper, a statistical analysis of the average payload of the truck fleet of a mine site, composed of two different types of off-road trucks, as well as some opportunities to improve the payload, is presented. The analysis indicated that there are significant differences between the crews that operate the mine, that the wheel loaders have better performance than the excavators, and that waste removal has shown to be more difficult in terms of payload. The paper concludes that there are several actions that can be further analyzed and taken, like the balance of skilled and new operators between the crews, better management of the KPI in the routine and better allocation of the fleet.

**Keywords:** Open pit mining; loading and hauling productivity; off-road trucks; payload; statistical analysis; ANOVA.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dimensões do caminhão fora de estrada CAT775.....	14
Figura 2 - Dimensões do caminhão fora de estrada CAT777.....	15
Figura 3 - Regra 10/10/20 para o CAT775.....	16
Figura 4 - Regra 10/10/20 para o CAT775.....	16
Figura 5 - Estatísticas descritivas da carga média do CAT 775 .....	19
Figura 6 - Histograma da carga média do CAT775.....	19
Figura 7 - Gráfico de probabilidade normal do CAT775 .....	20
Figura 8 - Teste de normalidade dos dados para o CAT775. ....	20
Figura 9 - Estatísticas descritivas entre as turmas para o CAT775 .....	21
Figura 10 - Histogramas comparativos de carga média entre as turmas para o CAT775 .....	21
Figura 11 - Boxplots comparativos de carga média entre as turmas para o CAT775 ....	22
Figura 12 - Análise de variância entre as turmas.....	22
Figura 13 - Gráfico de dispersão dos resíduos .....	23
Figura 14 - Histograma dos resíduos.....	23
Figura 15 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos .....	24
Figura 16 - Gráfico de dispersão dos resíduos .....	24
Figura 17 - Gráfico de dispersão dos resíduos por fator.....	25
Figura 18 - Teste de Tukey para as turmas.....	25
Figura 19 - Estatísticas descritivas entre os turnos para o CAT775 .....	26
Figura 20 - Histogramas comparativos de carga média entre os turnos para o CAT775 26	
Figura 21 - Boxplots comparativos de carga média entre os turnos para o CAT775.....	27
Figura 22 - Análise de variância entre os turnos .....	27
Figura 23 - Gráfico de dispersão dos resíduos .....	28
Figura 24 - Histograma dos resíduos.....	28
Figura 25 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos .....	29
Figura 26 - Gráfico de dispersão entre os resíduos .....	29
Figura 27 - Gráfico de dispersão entre os resíduos por turno.....	30
Figura 28 - Teste de Tukey entre os turnos .....	30
Figura 29 - Estatísticas descritivas entre equipamentos de carga.....	31
Figura 30 - Boxplots comparativos de carga média entre a frota de carga para o CAT775 .....	32

Figura 31 - Estatísticas descritivas entre classes de material para o CAT775 .....	33
Figura 32 - Histogramas comparativos de carga média entre os tipos de material para o CAT775 .....	34
Figura 33 - Boxplots comparativos de carga média entre os tipos de material para o CAT775 .....	34
Figura 34 - Estatísticas descritivas da carga média do CAT 777 .....	35
Figura 35 - Histograma da carga média do CAT777.....	36
Figura 36 - Gráfico de probabilidade normal para o CAT777 .....	37
Figura 37 - Teste de normalidade dos dados para o CAT777 .....	37
Figura 38 - Estatísticas descritivas do CAT777 por turma.....	38
Figura 39 - Histogramas comparativos de carga média entre as turmas para o CAT777 .....	38
Figura 40 - Boxplots comparativos de carga média entre as turmas para o CAT777 ....	39
Figura 41 - Análise de variância entre as turmas para o CAT777.....	39
Figura 42 - Gráfico de dispersão dos resíduos .....	40
Figura 43 - Histograma dos resíduos .....	40
Figura 44 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos .....	41
Figura 45 - Gráfico de dispersão dos resíduos .....	41
Figura 46 - Gráfico de dispersão dos resíduos por fator.....	42
Figura 47 - Teste de Tukey para as turmas.....	42
Figura 48 - Estatísticas descritivas do CAT777 por turno.....	43
Figura 49 - Histogramas comparativos de carga média entre as turmas para o CAT777 .....	43
Figura 50 - Boxplots comparativos de carga média entre as turmas para o CAT777 ....	44
Figura 51 - Análise de variância entre os turnos para o CAT777 .....	44
Figura 52 - Gráfico de dispersão dos resíduos .....	45
Figura 53 - Histograma dos resíduos .....	45
Figura 54 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos .....	46
Figura 55 - Gráfico de dispersão dos resíduos .....	46
Figura 56 - Gráfico de dispersão dos resíduos por fator.....	47
Figura 57 - Teste de Tukey para diferenças entre turnos para o CAT777.....	47
Figura 58 - Estatísticas descritivas do CAT777 por equipamento de carga.....	48
Figura 59 - Boxplots comparativos de carga média entre os equipamentos para o CAT777 .....	49

Figura 60 - Estatísticas descritivas por tipo de material para o CAT777 .....	50
Figura 61 - Histograma para o CAT777 .....	50
Figura 62 - Boxplots comparativos de carga média entre materiais para o CAT777.....	51

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
3.1 A MINERAÇÃO EM ESTUDO .....	13
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>19</b>
5.1 FROTA CAT 775.....	19
5.1.1 <i>Comparativo entre as turmas</i> .....	21
5.1.2 <i>Comparativo entre os turnos</i> .....	26
5.1.3 <i>Comparativo entre equipamentos de carga</i> .....	30
5.1.4 <i>Comparativo entre materiais</i> .....	33
5.2 FROTA CAT 777.....	35
5.2.1 <i>Comparativo entre as turmas</i> .....	37
5.2.2 <i>Comparativo entre turnos</i> .....	43
5.2.3 <i>Comparativo entre equipamentos de carga</i> .....	48
5.2.4 <i>Comparativo entre materiais</i> .....	49
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em operações de mineração, custos relacionados com o carregamento e transporte de materiais como o consumo de óleo diesel, manutenção dos equipamentos, pneus entre outros são expressivos e tem impacto direto no resultado financeiro de operações em andamento, bem como na viabilidade de novos projetos. Além do impacto financeiro, tais equipamentos são os principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes, preocupação crescente entre empresas de mineração para que as operações se tornem cada vez mais sustentáveis. A seleção e a utilização dos equipamentos podem garantir o sucesso de uma operação ou até mesmo inviabilizá-la (COSTA E SILVA, 2014).

De maneira a diluir custos, maximizar a capacidade produtiva dos equipamentos e reduzir os impactos, as operações de carregamento e transporte de materiais devem ser cada vez mais eficientes. Nesse sentido, empresas de mineração buscam maximizar a produtividade dos equipamentos de carga – escavadeiras e carregadeiras – e transporte – caminhões. De acordo com Costa e Silva (2014), a produtividade da frota de carregamento e transporte passa por fatores como tamanho e valor da jazida mineral, projetos de cava e deposição de estéril, geologia, planejamento de lavra etc.

No caso de operações já em curso, em geral, os equipamentos têm porte previamente definido e a busca pela maximização da produtividade das frotas deve ser exercício constante das empresas, analisando os indicadores (KPI's) que impactam na eficiência da operação e propondo soluções para a melhoria contínua do resultado. Entre esses fatores está a carga média de transporte, que é a média de toneladas transportadas por caminhão. Neste trabalho, a carga média de transporte de uma mineração será analisada e serão propostas soluções para o aumento do indicador.

## **2 OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é analisar a carga média transportada pela frota de caminhões de uma mineração de minério de ferro localizada em Minas Gerais no último trimestre do ano de 2021. De posse das análises, identificar oportunidades que possam aumentar a carga média transportada e, conseqüentemente, a produtividade horária da frota.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A capacidade produtiva dos equipamentos de carregamento e transporte é função dos fatores de utilização dos equipamentos, disponibilidade física e produtividade horária.

A produtividade horária de transporte é definida conforme a Equação 1:

$$\textit{Produtividade de transporte} \left( \frac{t}{h} \right) = \frac{\textit{Carga Média (t)}}{\textit{Tempo Ciclo (h)}} \quad (1)$$

Sendo a carga média a média, em toneladas, de material transportado pelos caminhões e o tempo de ciclo o tempo que os caminhões levam para completar um ciclo de transporte inteiro. O tempo de ciclo é dividido em tempos fixos e variáveis, de acordo com a Equação 2:

$$\textit{Tempo Ciclo} = \sum \textit{Tempos Fixos} + \sum \textit{Tempos Variáveis} \quad (2)$$

Sendo,

*Tempos Fixos*

$$\begin{aligned} &= \textit{Tempo de fila no carregamento} \\ &+ \textit{tempo de manobra no carregamento} \\ &+ \textit{tempo de carregamento} + \textit{tempo de fila na descarga} \\ &+ \textit{tempo de manobra na descarga} + \textit{tempo de descarga} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\textit{Tempos Variáveis} = \frac{2 * \textit{Distância Média de Transporte (km)}}{\textit{Velocidade Média (km/h)}} \quad (4)$$

Já a produtividade horária de carregamento pode ser definida pela Equação 5:

$$\begin{aligned}
 \text{Produtividade de carregamento } \left( \frac{t}{h} \right) &= \\
 &= \frac{\text{Carga Média (t)}}{(\text{Tempo de manobra no carregamento} + \text{tempo de carregamento} + \text{tempo ocioso})}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Sendo o tempo ocioso o tempo que o equipamento de carregamento aguarda entre o carregamento de um caminhão e o próximo.

Portanto, a seleção correta da maximização da produtividade das frotas de carregamento e transporte passa no aumento da carga média transportada e a minimização dos tempos de ciclo.

A carga média transportada depende da capacidade volumétrica da caçamba dos caminhões, que podem ser rasas ou coroadas, da capacidade de carga dos caminhões (*payload*), do fator de enchimento das caçambas e do empolamento e da densidade do material.

### 3.1 A mineração em estudo

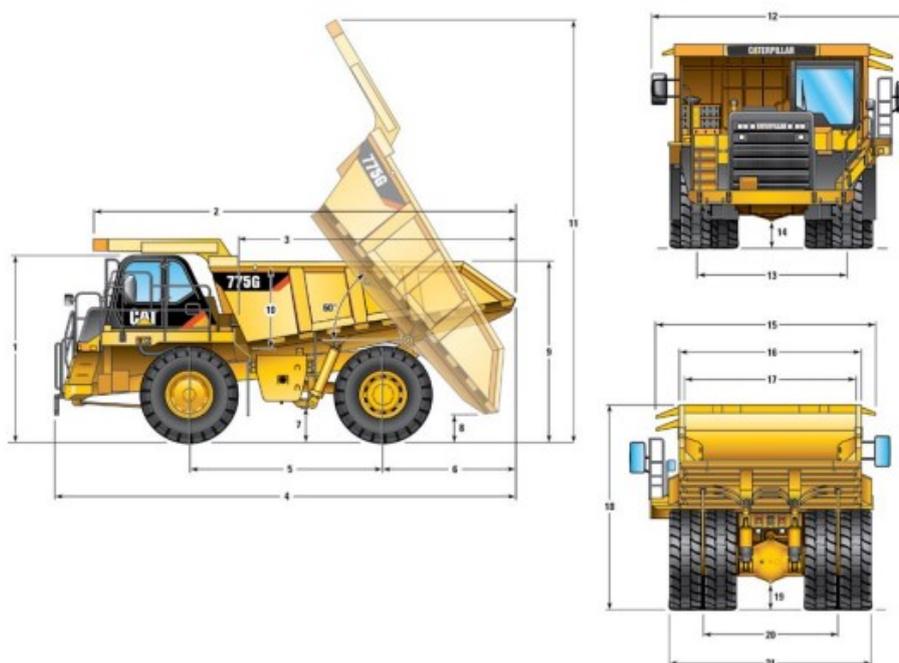
A mineração em estudo está localizada no estado de Minas Gerais e opera a céu aberto (*open pit*), com a produção de minério de ferro. As operações ocorrem 24 horas por dia e 7 dias da semana, em regimes de 4 turnos. O turno diurno representa o período entre 07:00h e 16:00h, o da tarde entre 16:00h e 01:00h e noturno das 01:00h às 07:00h. Os dias de trabalho e folga seguem um cronograma pré-estabelecido. Em um mês, todas as equipes trabalham um número similar de dias nos três turnos.

A frota de transporte da mina é composta por caminhões fora de estrada modelos Caterpillar CAT775 (6 caminhões), mostrado na Figura 1, e Caterpillar CAT777 (11 caminhões), mostrado na Figura 2.

Figura 1 - Dimensões do caminhão fora de estrada CAT775

**Dimensões**

Todas as dimensões são aproximadas.



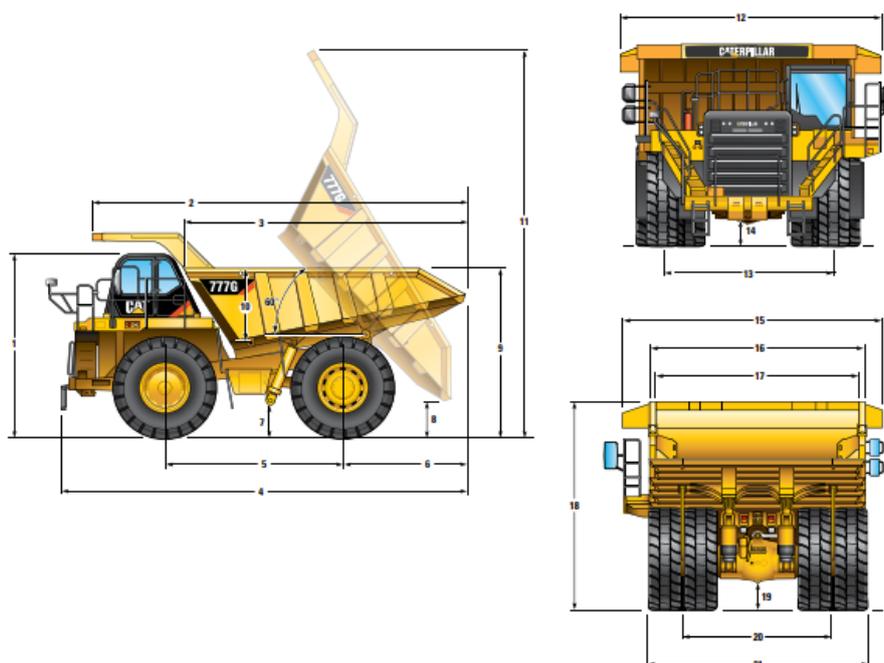
	Inclinação Dupla		Piso Plano		Pedreira	
1	Altura até o Topo da ROPS	4108 mm 13,48 pés				
2	Comprimento Total da Carroceria	9215 mm 30,23 pés	9293 mm 30,49 pés	9295 mm 30,50 pés	9295 mm 30,50 pés	9295 mm 30,50 pés
3	Comprimento Interno da Carroceria	6100 mm 20,01 pés				
4	Comprimento Total	10073 mm 33,05 pés	10151 mm 33,30 pés			
5	Distância entre Eixos	4215 mm 13,83 pés				
6	Eixo Traseiro até a Traseira	2925 mm 9,60 pés	3005 mm 9,86 pés			
7	Altura Livre sobre o Solo	759 mm 2,49 pés				
8	Altura Livre de Descarga	650 mm 2,13 pés	639 mm 2,10 pés			
9	Altura de Carregamento - Vazia	3963 mm 13 pés	3964 mm 13,01 pés	3968 mm 13,02 pés	3968 mm 13,02 pés	3968 mm 13,02 pés
10	Profundidade Interna da Carroceria - Máxima	1945 mm 6,38 pés	1892 mm 6,21 pés			
11	Altura Total - Caçamba Levantada	9279 mm 30,44 pés	9279 mm 30,44 pés	9283 mm 30,46 pés	9283 mm 30,46 pés	9283 mm 30,46 pés
12	Largura Operacional	5673 mm 18,61 pés				
13	Largura da Linha do Centro dos Pneus Dianteiros	3205 mm 10,52 pés				
14	Altura Livre no Protetor do Motor	703 mm 2,31 pés				
15	Largura Total do Teto	5012 mm 16,44 pés				
16	Largura Externa da Carroceria	4254 mm 13,96 pés				
17	Largura Interna da Carroceria	3986 mm 13,08 pés				
18	Altura da Dianteira da Capota	4459 mm 14,63 pés	4457 mm 14,62 pés	4463 mm 14,64 pés	4463 mm 14,64 pés	4463 mm 14,64 pés
19	Altura Livre no Eixo Traseiro	560 mm 1,84 pé				
20	Largura da Linha de Centro dos Pneus Duplos Traseiros	2929 mm 9,61 pés				
21	Largura Total do Pneu	4411 mm 14,47 pés				

Fonte: Caterpillar (2012a).

Figura 2 - Dimensões do caminhão fora de estrada CAT777

**Dimensões**

Todas as dimensões são aproximadas.

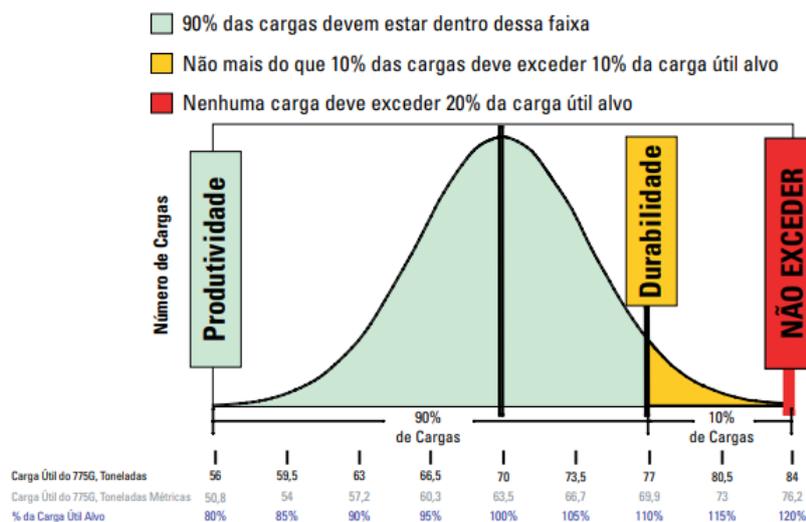


	Inclinação Dupla		Caçamba X		Caçamba para Carvão 1		Caçamba para Carvão 2	
<b>1</b> Altura até o Topo da ROPS	4.730 mm	15,5 pés	4.730 mm	15,5 pés	4.730 mm	15,5 pés	4.730 mm	15,5 pés
<b>2</b> Comprimento Total da Caçamba	9.830 mm	32,2 pés	10.070 mm	33,04 pés	10.274 mm	33,71 pés	10.445 mm	34,27 pés
<b>3</b> Comprimento Interno da Caçamba	6.580 mm	21,5 pés	7.037 mm	23,09 pés	7.562 mm	24,81 pés	7.734 mm	25,37 pés
<b>4</b> Comprimento Total	10.535 mm	34,5 pés	10.758 mm	35,3 pés	10.968 mm	35,98 pés	11.140 mm	36,55 pés
<b>5</b> Distância entre Eixos	4.560 mm	14,9 pés	4.560 mm	14,96 pés	4.560 mm	14,96 pés	4.560 mm	14,96 pés
<b>6</b> Eixo Traseiro até a Traseira	3.062 mm	10 pés	3.263 mm	10,71 pés	3.473 mm	11,39 pés	3.644 mm	11,96 pés
<b>7</b> Vão Livre Sobre o Solo	896 mm	2,9 pés	896 mm	2,94 pés	896 mm	2,94 pés	896 mm	2,94 pés
<b>8</b> Folga de Despejo	965 mm	3,1 pés	893 mm	2,93 pés	935 mm	3,07 pés	821 mm	2,69 pés
<b>9</b> Altura de Carregamento – Vazia	4.380 mm	14,3 pés	4.429 mm	14,53 pés	4.851 mm	15,92 pés	5.321 mm	17,46 pés
<b>10</b> Profundidade Interna da Caçamba – Máxima	1.895 mm	6,2 pés	1.777 mm	5,83 pés	2.223 mm	7,29 pés	2.693 mm	8,84 pés
<b>11</b> Altura Total – Caçamba Levantada	9.953 mm	32,6 pés	10.071 mm	33,04 pés	10.319 mm	33,85 pés	10.319 mm	33,85 pés
<b>12</b> Largura de Operação	6.687 mm	21,9 pés	6.687 mm	21,94 pés	6.706 mm	22 pés	6.706 mm	22 pés
<b>13</b> Largura do Pneu Dianteiro	4.170 mm	13,6 pés	4.170 mm	13,68 pés	4.170 mm	13,68 pés	4.170 mm	13,68 pés
<b>14</b> Folga no Protetor do Motor	864 mm	2,8 pés	864 mm	2,83 pés	864 mm	2,83 pés	864 mm	2,83 pés
<b>15</b> Largura Total da Capota	6.200 mm	20,3 pés	6.200 mm	20,34 pés	6.404 mm	21,01 pés	6.404 mm	21,01 pés
<b>16</b> Largura Externa da Caçamba	5.524 mm	18,1 pés	5.682 mm	18,64 pés	6.365 mm	20,88 pés	6.368 mm	20,89 pés
<b>17</b> Largura Interna da Caçamba	5.200 mm	17 pés	5.450 mm	17,88 pés	6.150 mm	20,18 pés	6.150 mm	20,18 pés
<b>18</b> Altura da Capota Dianteira	5.200 mm	17 pés	5.370 mm	17,62 pés	5.840 mm	19,16 pés	5.840 mm	19,16 pés
<b>19</b> Folga no Eixo Traseiro	902 mm	2,9 pés	902 mm	2,96 pés	902 mm	2,96 pés	902 mm	2,96 pés
<b>20</b> Largura dos Pneus Duplos Traseiros	3.576 mm	11,7 pés	3.576 mm	11,73 pés	3.576 mm	11,73 pés	3.576 mm	11,73 pés
<b>21</b> Largura Total do Pneu	5.223 mm	17,1 pés	5.223 mm	17,14 pés	5.223 mm	17,14 pés	5.223 mm	17,14 pés

Fonte: Caterpillar (2012b).

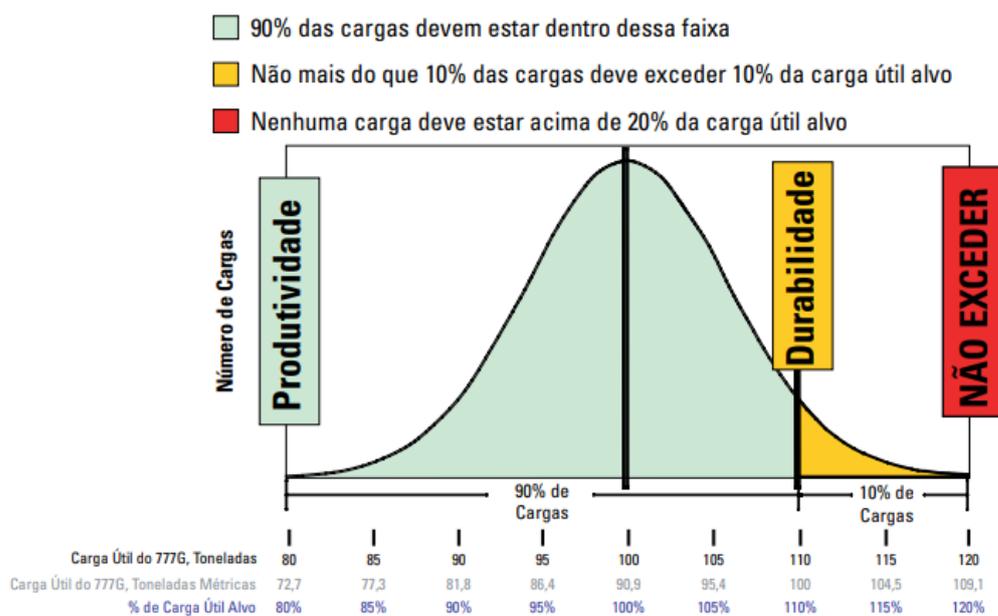
A capacidade de carga dos caminhões é definida de acordo com as especificações do fornecedor de acordo com o modelo. A Caterpillar, fabricante dos caminhões da frota em estudo, trabalha com a política de gerenciamento de carga útil 10/10/20 para vida útil da máquina e maximização da produtividade, em que a média de todas as cargas úteis é menor ou igual à carga útil alvo nominal da máquina (*payload*), não mais que 10% das cargas devem exceder 10% da carga útil alvo e nenhuma carga deve estar acima de 20% da carga útil alvo, como ilustrado na Figura 3 para o CAT775 e Figura 4 para o CAT777:

Figura 3 - Regra 10/10/20 para o CAT775



Fonte: Caterpillar (2012a).

Figura 4 - Regra 10/10/20 para o CAT777



Fonte: Caterpillar (2012b).

Dessa forma, cada caminhão tem sua carga útil alvo. Para o CAT775, neste trabalho considerou-se 64,0 toneladas métricas, e para o CAT777 considerou-se 91,0 toneladas métricas.

A frota de carregamento da mineração é composta por carregadeiras e escavadeiras hidráulicas a diesel, sendo:

- 1 escavadeira Komatsu PC2000 (200 toneladas) – identificador (*tag*) EM3014;
- 3 escavadeiras Komatsu PC1250 (125 toneladas) – identificador (*tag*) EM2501, EM2503 e EM2504;

- 1 carregadeira Caterpillar CAT992 (92 toneladas) – identificador (*tag*) PM3610;
- 1 carregadeira Caterpillar CAT990 (90 toneladas) – identificador (*tag*) PM3014.

Importante salientar que, nessa operação específica, há um viaduto sob o qual os equipamentos trafegam que limita a altura da carga transportada pelos caminhões. Para evitar danos ao viaduto causado por possíveis colisões do material transportado, limita-se o coroamento do material e, conseqüentemente, a carga média. Essa limitação aplica-se especialmente a materiais de menor densidade (geralmente estéreis), que ocupam maior volume nas caçambas.

#### **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para realização das análises a base de dados é proveniente do sistema de despacho eletrônico utilizado na operação de mina. O sistema é responsável por mensurar, registrar e controlar toda a movimentação de equipamentos e materiais da operação, de modo a buscar a otimização dos recursos. Os dados são então armazenados em um banco de dados que é alimentado a cada nova movimentação.

A base de dados apresenta os dados, ciclo a ciclo, da carga mensurada pela balança do caminhão no momento do carregamento, registrando os dados do mês, dia, turno, turma, tipo de material, modelo e número do equipamento de carga e transporte e do operador de carga responsável por aquela carga específica. Os dados de carga média registrados no banco de dados são aqueles medidos pelo sistema de balança presentes nos caminhões fora de estrada. Caso haja algum problema na balança e/ou na pesagem do caminhão, é registrada a carga como 0t e um fator de carga pré-definido para cada frota é aplicado de maneira que não haja maiores problemas contábeis de massa.

Os dados utilizados neste trabalho são referentes ao último trimestre de 2021, em que foram considerados todas as cargas registradas, ciclo a ciclo, nesse período.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dado que a frota de transporte da mina em questão é composta de caminhões de portes diferentes, a carga média foi analisada frota a frota. As análises foram, ainda, estratificadas em turmas, turnos, equipamentos de carga e material.

### 5.1 Frota CAT 775

De acordo com a regra 10/10/20, para a frota de caminhões modelo CAT775, a carga-alvo é de 64,0t, 10% das cargas podem estar acima de 70,4t e nenhuma carga pode estar acima de 76,8t (20% inadmissível). As estatísticas descritivas estão na Figura 5.

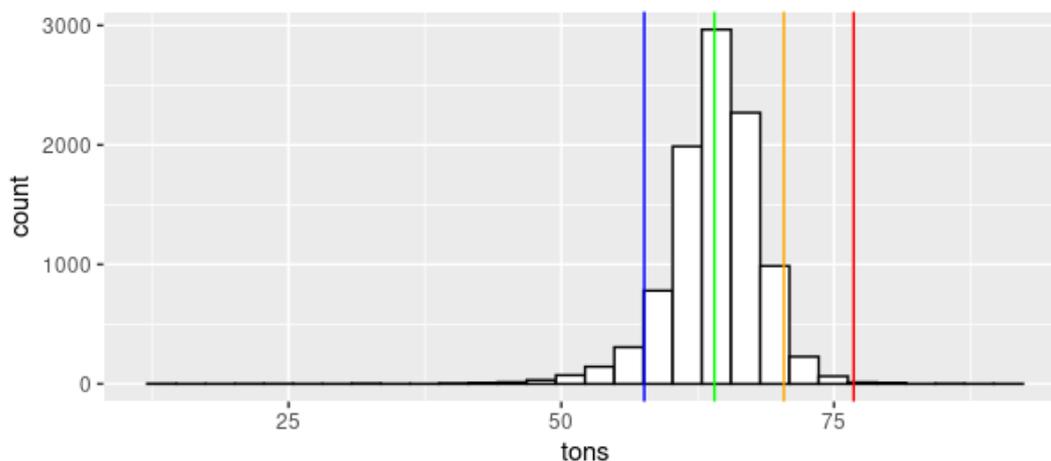
Figura 5 - Estatísticas descritivas da carga média do CAT 775

```
> summary (cat775$Balanca)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.   Max.
 12.50  61.90   64.40   64.03  66.60   90.10
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 6 mostra o histograma de carga média do CAT775, em que a linha vermelha representa 76,8t (20% inadmissível), a linha laranja 70,4t (10% acima do *payload*), a linha verde a média e a linha azul 57,6t (10% abaixo do *payload*).

Figura 6 - Histograma da carga média do CAT775  
Carga Média - CAT 775



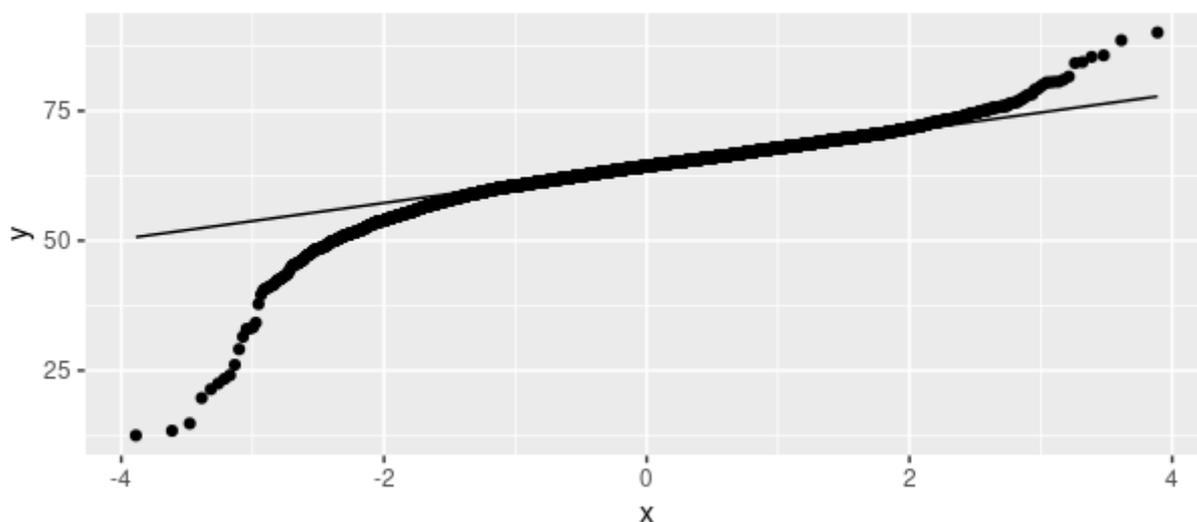
Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível identificar alguns eventos de sobrecargas e vários eventos de cargas abaixo de 10% da carga alvo. Sabe-se que, operacionalmente, muitas vezes é impossível

eliminar por completo as cargas baixas: algumas operações possuem restrição da altura da caga (coroamento) devido a alguma estrutura sob a qual os equipamentos trafegam, cargas de material muito úmido exigem que a carga seja reduzida para que parte do material não caia sob a pista, rampas com inclinações muito acentuadas requerem que os caminhões trafeguem com menor peso para diminuir riscos à operação etc. No entanto, é ideal que as operações busquem minimizar ao máximo os eventos de subcarga e procurar alternativas para que haja menos interferências possível.

O gráfico de probabilidade normal presente na Figura 7 mostra que há alguns pontos fora da reta nas extremidades. No entanto, não se pode rejeitar a hipótese de normalidade dado que a maioria dos dados estão em cima da reta. A hipótese de normalidade dos dados é reforçada pelo formato do histograma da Figura 6. O teste de normalidade de Anderson Darling, conforme Figura 8, indica a não normalidade dos dados (p-valor < 0,05).

Figura 7 - Gráfico de probabilidade normal do CAT775  
Carga Média - CAT 775



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 - Teste de normalidade dos dados para o CAT775.

```
> nortest::ad.test(cat775$Balanca)
```

Anderson-Darling normality test

```
data: cat775$Balanca  
A = 103.77, p-value < 2.2e-16
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.1.1 Comparativo entre as turmas

As análises descritivas das turmas presentes na Figura 9 mostram que letra D é a que apresentou o melhor desempenho em termos de média, mediana e desvio padrão. Por outro lado, a turma C foi a que apresentou menor média e mediana e a B o maior desvio padrão.

Figura 9 - Estatísticas descritivas entre as turmas para o CAT775

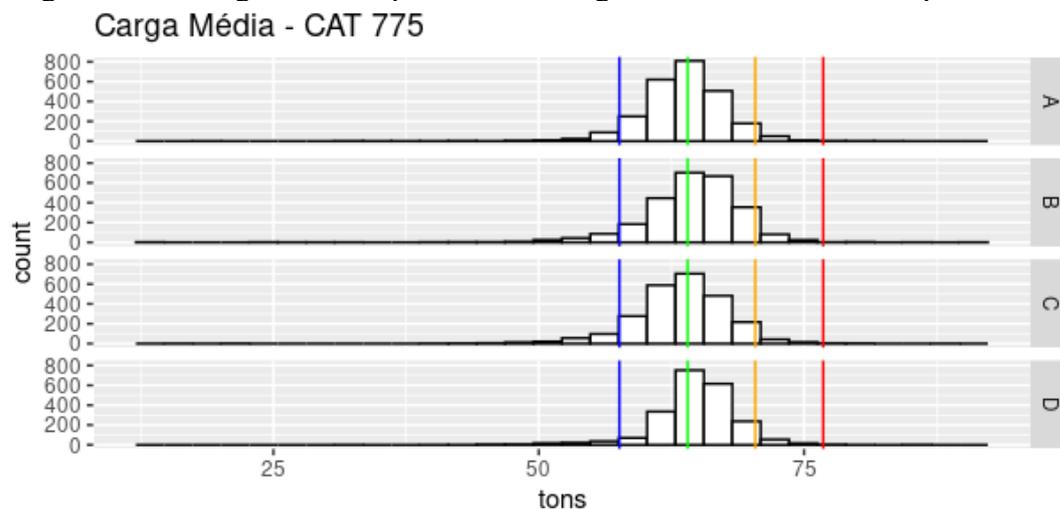
> describeBy (cat775\$Balanca, cat775\$Turma)

```
Descriptive statistics by group
group: A
  vars   n  mean   sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 2566 63.63 4.12  63.8  63.76 3.41 19.7 84.2  64.5 -1.31   10.37 0.08
-----
group: B
  vars   n  mean   sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 2641 64.41 4.94  64.9  64.76 3.85 12.5 90.1  77.6 -2.15   16.16 0.1
-----
group: C
  vars   n  mean   sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 2533 63.36 4.67  63.6  63.59 3.85 14.8 88.6  73.8 -1.41   10.85 0.09
-----
group: D
  vars   n  mean   sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 2174 64.81 3.96   65  65.01 2.82 33.1 85.7  52.6 -1.1    6.5 0.08
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelo histograma presente na Figura 10 observa-se que todas as turmas apresentam número considerável de subcargas, mas que a grande maioria dos eventos está entre a faixa de 57,6t e 70,4t.

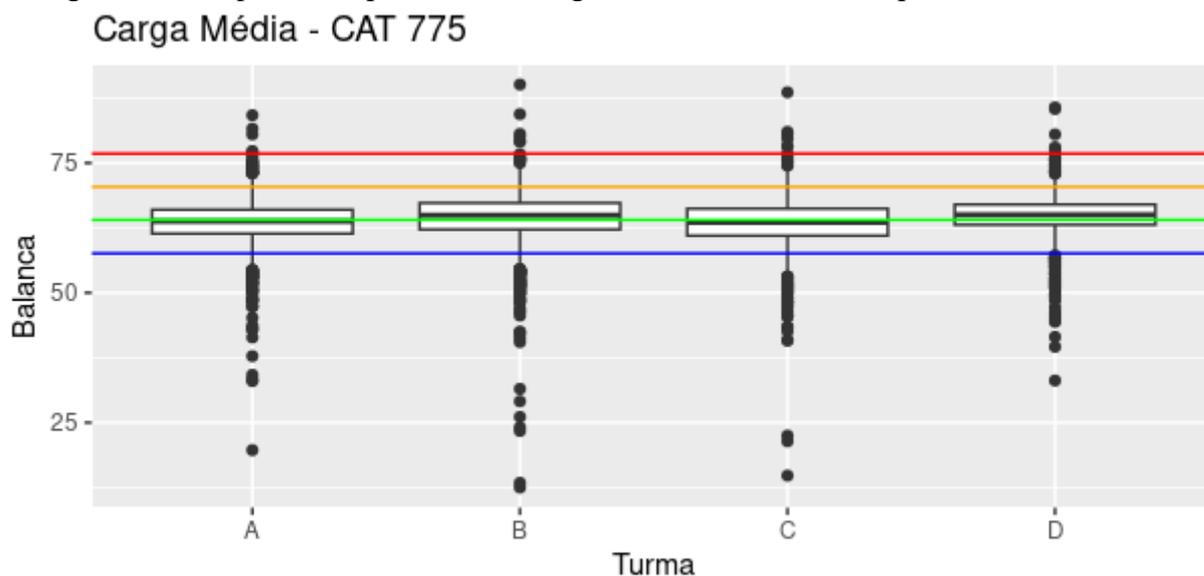
Figura 10 - Histogramas comparativos de carga média entre as turmas para o CAT775



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelos *boxplots* na Figura 11 nota-se a diferença entre a posição dos quartis e a variabilidade de dados entre as turmas. A turma B apresenta vários outliers, tanto de cargas acima quanto de cargas abaixo em comparação às demais turmas. Notavelmente a turma D apresenta menor variabilidade, menos *outliers*, maior mediana e maiores 1º e 3º quartis. Chama atenção também a quantidade de *outliers* de cargas inadmissíveis (acima de 20% da carga alvo).

Figura 11 - *Boxplots* comparativos de carga média entre as turmas para o CAT775



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise de variância, feita conforme Montgomery (2012), confirma a hipótese de que há diferenças significativas entre pelo menos 2 turmas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), como observado na Figura 12.

Figura 12 - Análise de variância entre as turmas

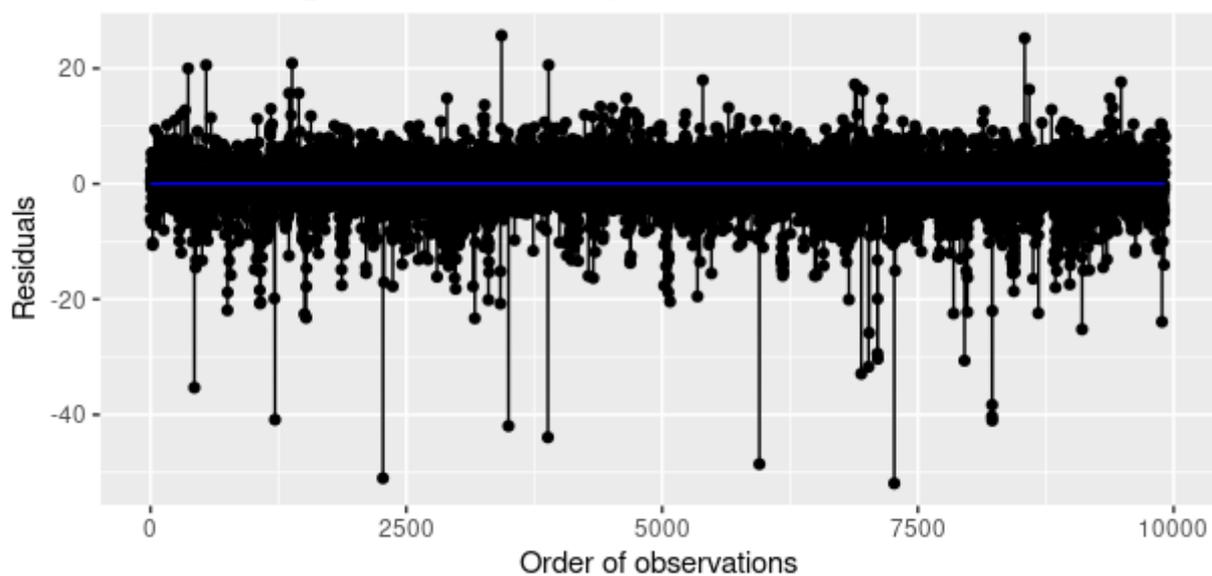
```
> summary (model_775_turma)
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
cat775$Turma  3  3238  1079.5    54.2 <2e-16 ***
Residuals    9910 197364    19.9
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise de variância supõe que os resíduos são normais e homocedásticos. O gráfico de dispersão na Figura 13 mostra aleatoriedade dos resíduos em torno do 0, o histograma presente na Figura 14 e o gráfico de probabilidade normal na Figura 15 indicam moderados desvios de normalidade. Glass et al. (1972), Harwell et al. (1992) e

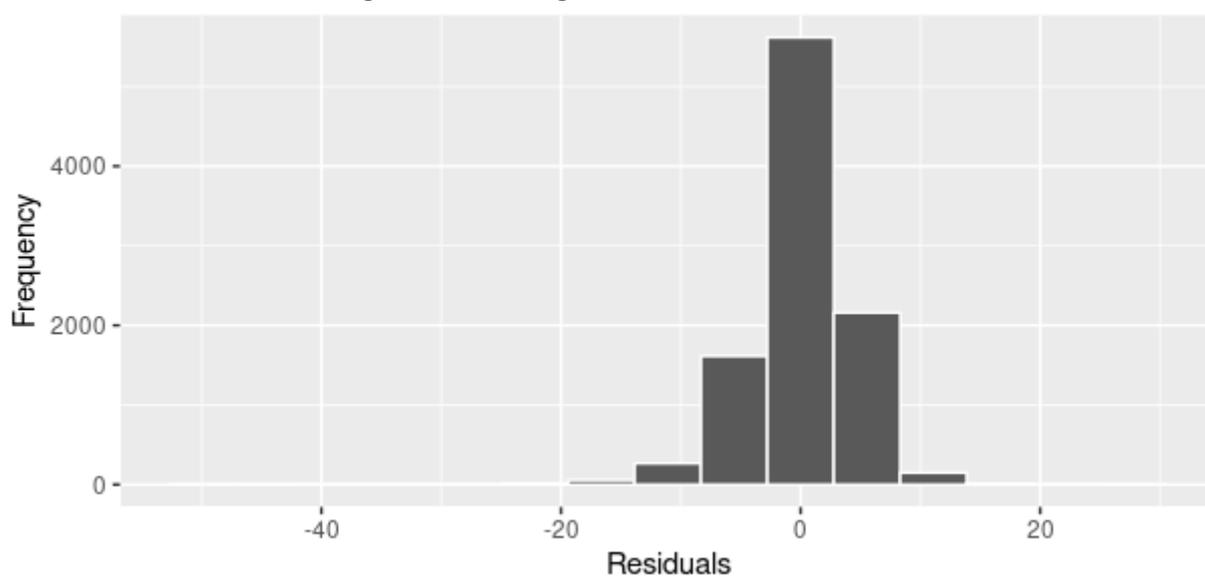
Lix et al (1996), usando uma variedade de distribuições não normais, mostraram que a ANOVA não é muito afetada por essa violação da suposição, principalmente para distribuições aparentemente similares à distribuição normal. Dessa forma, a aplicação da ANOVA não traz grandes alterações de resultado.

Figura 13 - Gráfico de dispersão dos resíduos



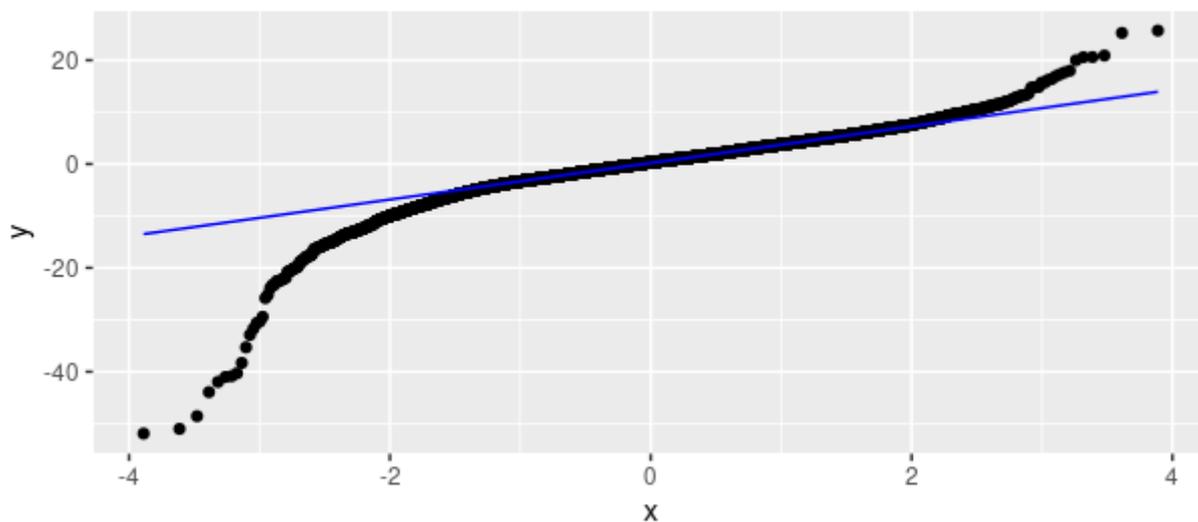
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 - Histograma dos resíduos



Fonte: Elaborada pelo autor.

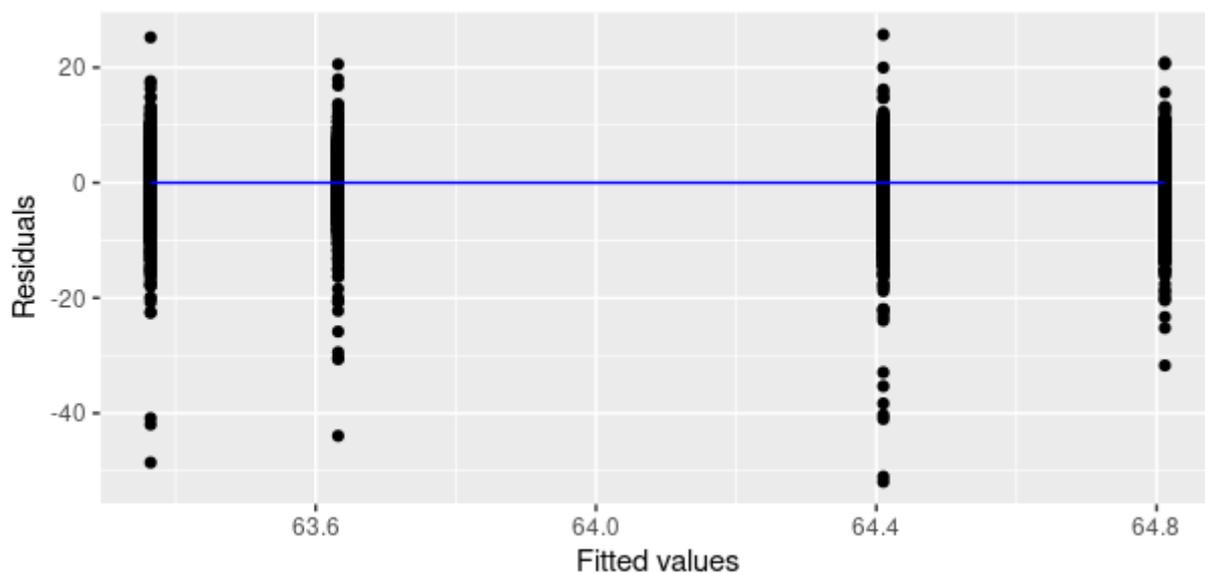
Figura 15 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos  
Normal Q-Q plot



Fonte: Elaborada pelo autor.

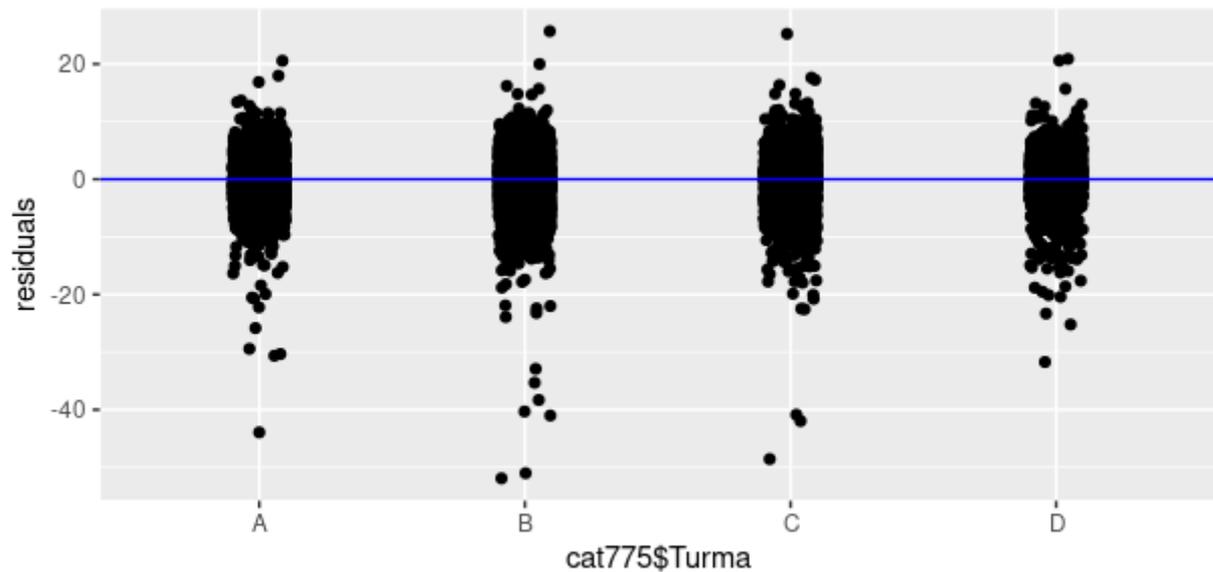
Os gráficos de dispersão dos resíduos presentes na Figura 16 e na Figura 17 indicam um comportamento aleatório em torno do 0, indicando, portanto, que a variância dos resíduos é constante.

Figura 16 - Gráfico de dispersão dos resíduos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 - Gráfico de dispersão dos resíduos por fator



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelo teste de Tukey comprova-se que, com exceção entre as turmas A e C (p-valor > 0,05), há evidências para se supor diferenças significativas entre todos os outros pares de turmas, conforme Figura 18.

Figura 18 - Teste de Tukey para as turmas

```
> TukeyHSD(model_775_turma)
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = cat775$Balanca ~ cat775$Turma)

$`cat775$Turma`
      diff          lwr          upr      p adj
B-A  0.7779630  0.46011338  1.09581267 0.0000000
C-A -0.2676053 -0.58877681  0.05356626 0.1403126
D-A  1.1797342  0.84548411  1.51398430 0.0000000
C-B -1.0455683 -1.36446636 -0.72667024 0.0000000
D-B  0.4017712  0.06970501  0.73383736 0.0101708
D-C  1.4473395  1.11209225  1.78258671 0.0000000
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando que no último trimestre todas as 4 equipes trabalharam sob condições diversas e similares, a confirmação da hipótese de que há diferenças significativas entre pelo menos 2 equipes sugere que há uma despadronização entre as turmas. É importante, portanto, verificar se os operadores de cada turma estão nivelados em termos de experiência, se há algum ruído de comunicação entre as metas de carga média que devem ser cumpridas entre outras ações para nivelar as equipes.

### 5.1.2 Comparativo entre os turnos

A análise entre turnos tem por objetivo identificar se há diferenças no resultado de carga média devido ao horário de trabalho dos operadores. Conforme Figura 19, as análises mostram que o turno noturno é aquele apresenta maior média e menor desvio padrão em comparação aos outros dois turnos.

Figura 19 - Estatísticas descritivas entre os turnos para o CAT775

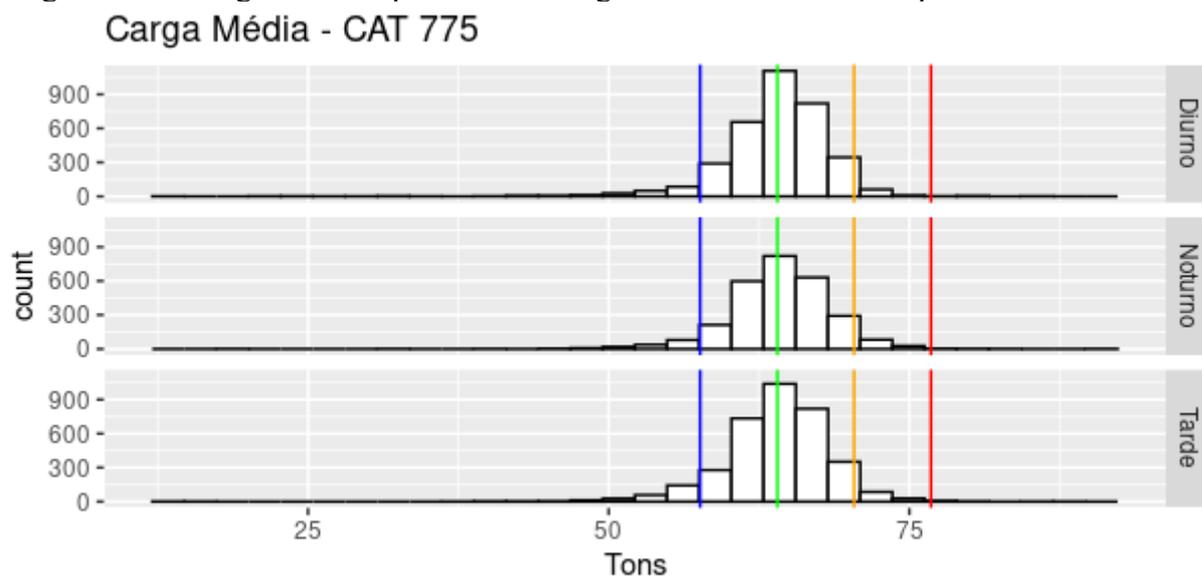
> describeBy (cat775\$Balanca, cat775\$Turno)

```
Descriptive statistics by group
group: Diurno
  vars   n  mean  sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 3496 63.92 4.67  64.4   64.27 3.56 12.5 85.4  72.9 -2.34   16.55 0.08
-----
group: Noturno
  vars   n  mean  sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 2818 64.23 4.27  64.4   64.36 3.71 19.7 90.1  70.4 -0.85    6.97 0.08
-----
group: Tarde
  vars   n  mean  sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 3600 63.98 4.5  64.3   64.2 3.56 13.4 88.6  75.2 -1.27   10.48 0.08
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

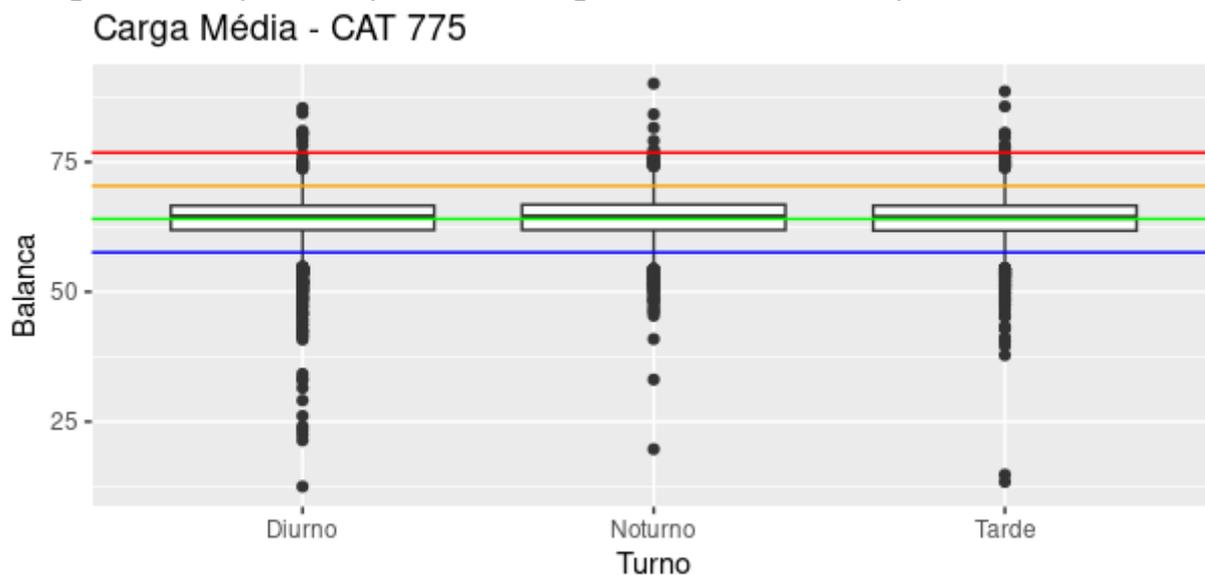
Os histogramas e *boxplots* presentes na Figura 20 e na Figura 21 mostram que o turno noturno apresenta menor número de *outliers* e menor variabilidade na carga média.

Figura 20 - Histogramas comparativos de carga média entre os turnos para o CAT775



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 - *Boxplots* comparativos de carga média entre os turnos para o CAT775



A análise de variância confirma a hipótese de que há diferenças significativas no resultado de carga média entre os turnos ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), como na Figura 22.

Figura 22 - Análise de variância entre os turnos

```
> model_775_turno <- aov (cat775$Balanca ~ cat775$Turno)
> summary (model_775_turno)
```

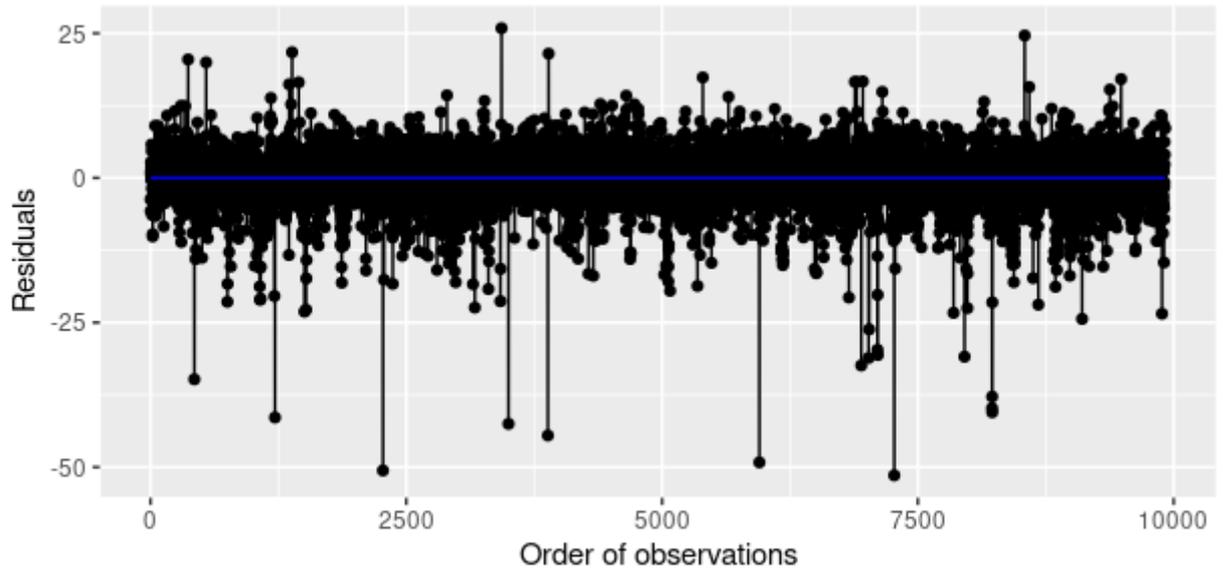
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cat775\$Turno	2	160	80.14	3.963	0.019 *
Residuals	9911	200442	20.22		

---  
 Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Fonte: Elaborada pelo autor.

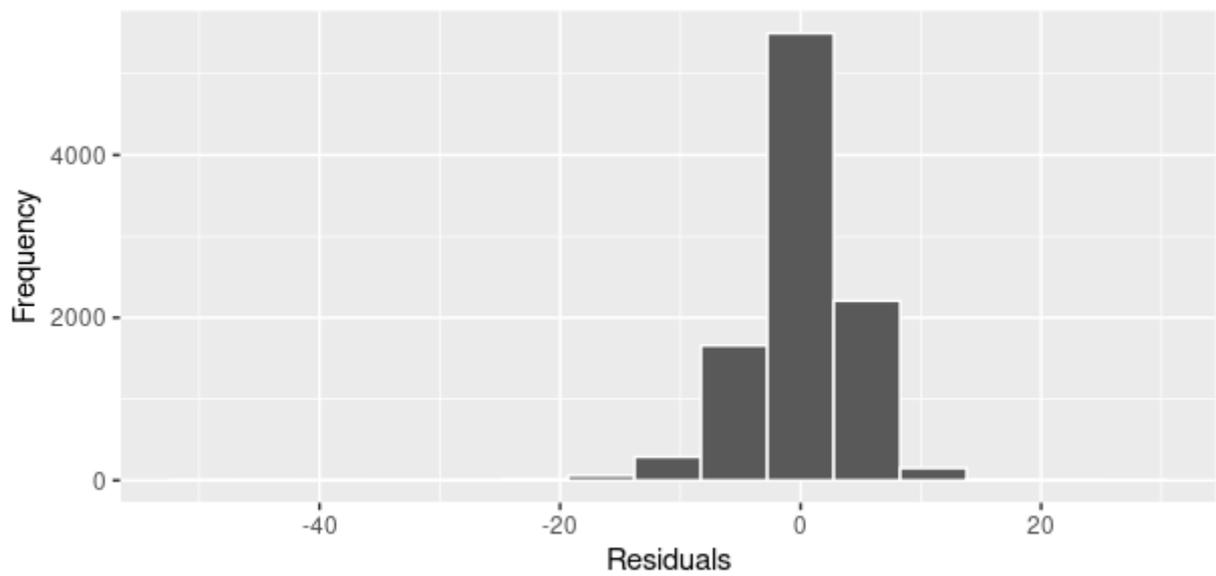
Para validação da ANOVA, observa-se que os resíduos são aleatórios em torno do 0, conforme Figura 23. O histograma presente na Figura 24 e o gráfico de probabilidade normal na Figura 25 indicam um moderado desvio da normalidade, mas não o suficiente para gerar grandes alterações no resultado.

Figura 23 - Gráfico de dispersão dos resíduos



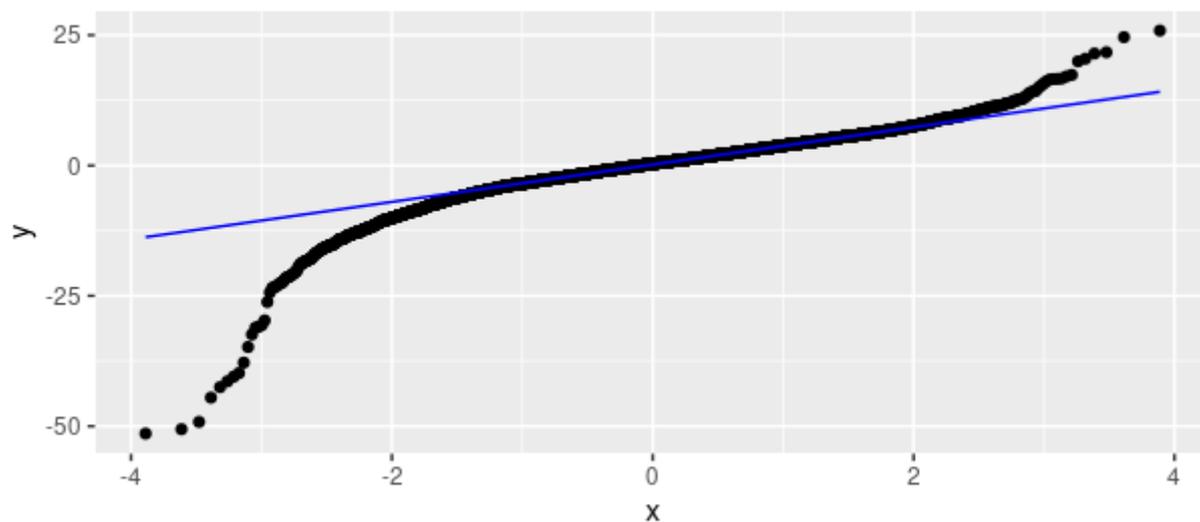
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 - Histograma dos resíduos



Fonte: Elaborada pelo autor.

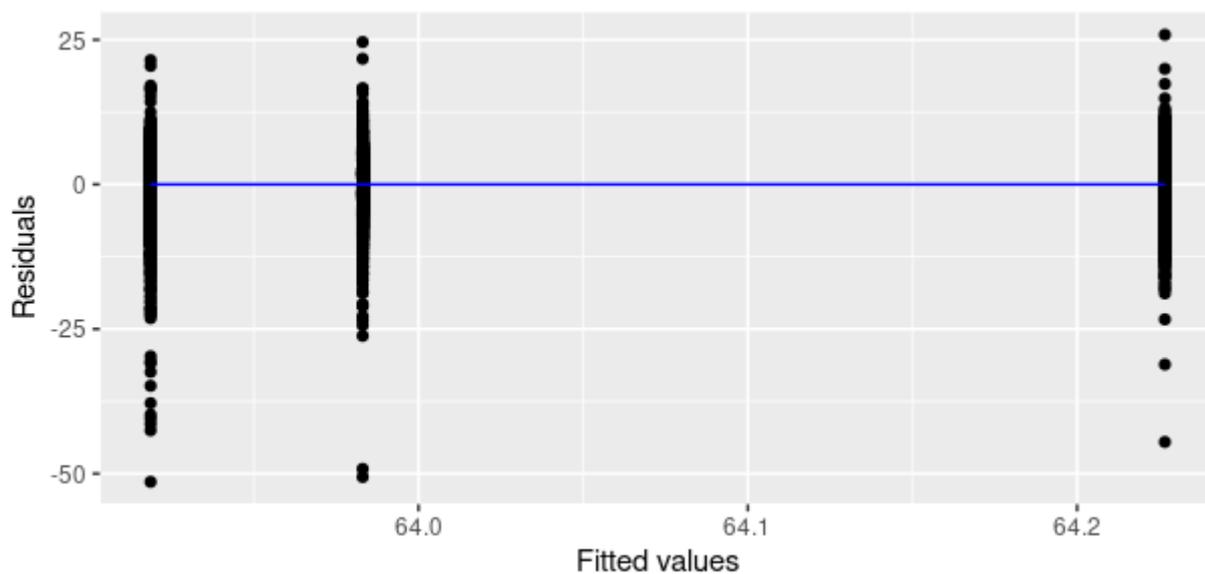
Figura 25 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos  
Normal Q-Q plot



Fonte: Elaborada pelo autor.

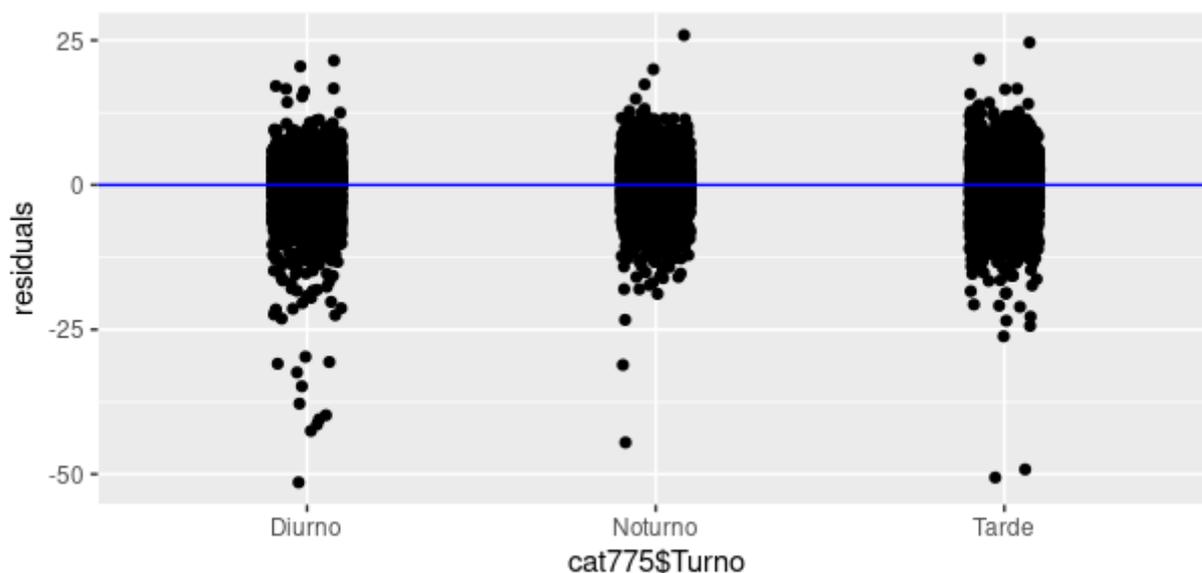
Os gráficos de dispersão presentes na Figura 26 e na Figura 27 mostram um comportamento aleatório em torno do 0, sem padrão aparente. Dessa forma, não há evidências para rejeitar a hipótese de que os resíduos apresentam variância constante.

Figura 26 - Gráfico de dispersão entre os resíduos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 - Gráfico de dispersão entre os resíduos por turno



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez validada a ANOVA, o teste de Tukey presente na Figura 28 indica que a diferença está entre o turno noturno e o diurno ( $p$ -valor  $< 0,05$ ).

Figura 28 - Teste de Tukey entre os turnos

```
> TukeyHSD(model_775_turno)
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = cat775$Balanca ~ cat775$Turno)

$`cat775$Turno`
      diff      lwr      upr    p adj
Noturno-Diurno  0.3080288  0.04115891  0.57489874  0.0187289
Tarde-Diurno    0.0644065 -0.18590072  0.31471371  0.8183960
Tarde-Noturno  -0.2436223 -0.50876623  0.02152157  0.0793983
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

É prática comum que operações de mina concentrem algumas atividades no período diurno por segurança, facilidade de supervisão/acompanhamento ou alguma outra restrição/preferência como, por exemplo, lavras de materiais mais úmidos, em regiões com restrição operacional (inclinação, largura etc.).

### 5.1.3 Comparativo entre equipamentos de carga

A frota de equipamentos de carga analisada é composta por escavadeiras e pás carregadeiras de diferentes modelos e portes. Apesar do porte diferente entre os

equipamentos, o limitador da carga carregada é o próprio caminhão, e não os equipamentos de carregamento. O objetivo dessa análise, portanto, está em avaliar se há algum tipo de equipamento de carregamento que apresenta resultados diferentes (melhores ou piores) que os demais, e buscar identificar a causa disso caso essa hipótese seja confirmada.

As estatísticas descritivas presentes na Figura 29 mostram que as pás carregadeiras (PM3610 e PM3014) apresentam maiores medianas, médias e menores desvios padrão, com exceção aos da escavadeira EM2501, que apresenta maior média, mediana e menor desvio padrão em relação aos demais equipamentos de mesmo porte e de portes diferentes.

Figura 29 - Estatísticas descritivas entre equipamentos de carga

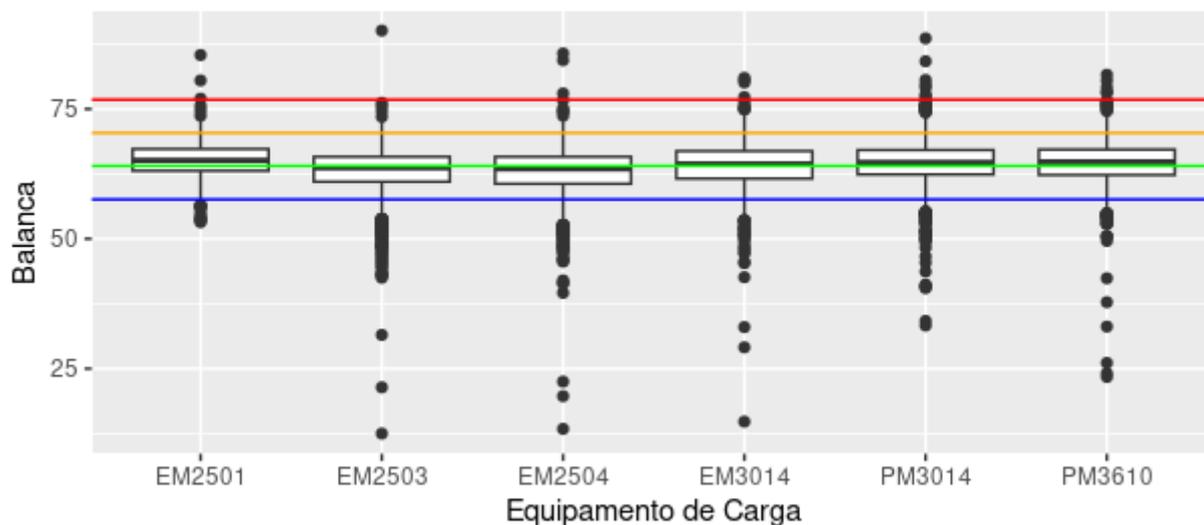
> describeBy (cat775\$Balanca, cat775\$EqptoCg)

```
Descriptive statistics by group
group: EM2501
  vars   n  mean   sd median trimmed  mad  min  max range skew kurtosis  se
X1     1  848  65.15  3.35   65.1   65.12  3.11  53.2  85.4  32.2  0.24    2.38  0.12
-----
group: EM2503
  vars   n  mean   sd median trimmed  mad  min  max range skew kurtosis  se
X1     1 1628  62.92  4.88   63.7   63.38  3.41  12.5  90.1  77.6 -1.95   12.59  0.12
-----
group: EM2504
  vars   n  mean   sd median trimmed  mad  min  max range skew kurtosis  se
X1     1 1761  62.84  4.8    63.5   63.23  3.71  13.4  85.7  72.3 -1.95   13.94  0.11
-----
group: EM3014
  vars   n  mean   sd median trimmed  mad  min  max range skew kurtosis  se
X1     1 1434  64.12  4.66   64.4   64.32  3.85  14.8  81   66.2 -1.64   12.83  0.12
-----
group: PM3014
  vars   n  mean   sd median trimmed  mad  min  max range skew kurtosis  se
X1     1 2325  64.67  4.08   64.7   64.75  3.41  33.3  88.6  55.3 -0.8    6.26  0.08
-----
group: PM3610
  vars   n  mean   sd median trimmed  mad  min  max range skew kurtosis  se
X1     1 1918  64.73  4.24   64.8   64.8   3.71  23.4  81.6  58.2 -1.68   15.11  0.1
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

. Os resultados podem ser observados no boxplot da Figura 30, em que claramente a EM2501 apresenta desempenho superior aos demais equipamentos.

Figura 30 - *Boxplots* comparativos de carga média entre a frota de carga para o CAT775  
Carga Média - CAT 775



Fonte: Elaborada pelo autor.

A alocação de equipamentos de carga em frentes de lavra está intrinsecamente atrelada aos planos de lavra. Como analisado posteriormente, o tipo de material lavrado pode impactar diretamente nos resultados de carga média transportada. No entanto, chama a atenção que, especificamente entre a frota de escavadeiras, há diferenças entre equipamentos de mesmo porte e de porte diferente.

É possível que a PC2000 (EM3014), sendo o equipamento de maior porte da frota, apresente dificuldades operacionais ao realizar a carga do CAT775: por não ser o *match* ideal de carga x transporte, o último passe da escavadeira ao carregar o caminhão, a depender do material, pode não necessitar do enchimento completo da caçamba da escavadeira. Dessa forma, é natural pensar que os operadores não possuam referência clara sobre quão cheio o último passe precise estar para evitar sobrecargas e subcargas. A referência visual da altura do material nos caminhões que tiveram carga adequada pode ser um bom balizador para os operadores, mas ainda assim é um controle frágil e impreciso. Ações de acompanhamento e orientação também podem ser realizadas. Em todo caso, sempre que possível, o respeito ao *match* de porte entre equipamentos de carga x transporte pode ser uma ação de melhoria da carga média e da produtividade geral da frota.

### 5.1.4 Comparativo entre materiais

Conforme observado na Figura 31, materiais classificados como estéril apresentam menor média, mediana e maior desvio padrão de carga. As movimentações de produto apresentaram maior média, mediana e menor desvio padrão. As movimentações classificadas como OM são todas as movimentações que não têm como destino direto as pilhas de estéril (estéril), britador (minério) e movimentação de produtos (produto). Geralmente trata-se de movimentação de minério para pilhas intermediárias ou alguma outra movimentação.

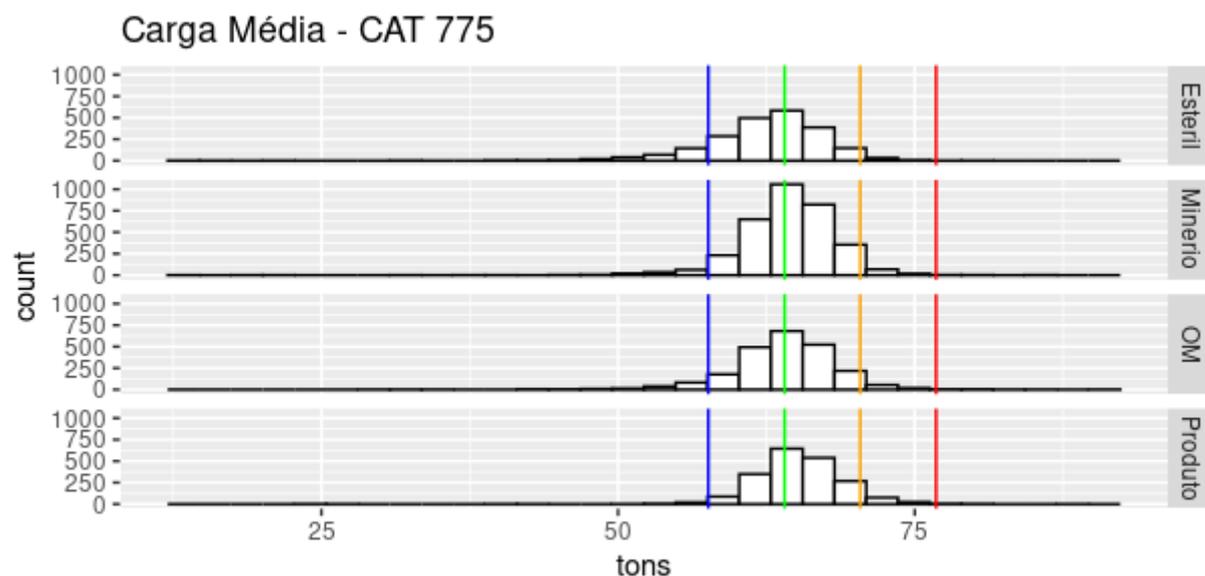
Figura 31 - Estatísticas descritivas entre classes de material para o CAT775  
> describeBy (cat775\$Balanca, cat775\$MaterialClasse)

```
Descriptive statistics by group
group: Esteril
  vars   n mean  sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 2230 62.45 5.1   63   62.84 4.15 12.5 80.1  67.6 -1.79   10.75 0.11
-----
group: Minerio
  vars   n mean  sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 3334 64.34 4.09  64.6   64.5 3.41 13.4 85.7  72.3 -1.86   17.84 0.07
-----
group: OM
  vars   n mean  sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 2326 64.01 4.5   64.2   64.2 3.56 29.1 90.1   61 -0.84    5.86 0.09
-----
group: Produto
  vars   n mean  sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 2024 65.29 3.9   65.2   65.29 3.26 23.4 88.6  65.2 -1.62   19.19 0.09
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

O histograma presente na Figura 32 mostra que a curva do estéril está bem deslocada para a esquerda em relação aos demais tipos de material.

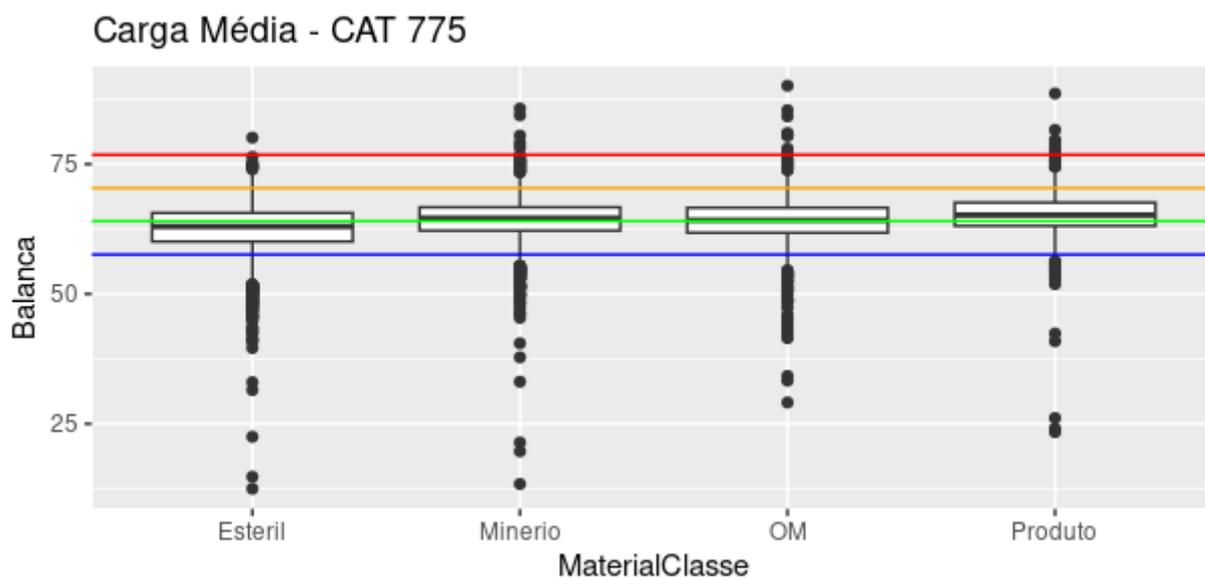
Figura 32 - Histogramas comparativos de carga média entre os tipos de material para o CAT775



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os *boxplots* presentes na Figura 33 evidenciam a maior variabilidade dos resultados para a movimentação de estéril, além da elevada quantidade de *outliers* de subcargas. É possível observar também *outliers* de sobrecargas nas movimentações de todos os tipos de material.

Figura 33 - *Boxplots* comparativos de carga média entre os tipos de material para o CAT775



Fonte: Elaborada pelo autor.

A carga média é diretamente impactada pela densidade do material transportado. Materiais classificados como estéreis, de maneira geral, apresentam densidade menor que os minérios de ferro e, por conseguinte, ocupam maior volume nas caçambas dos caminhões para o transporte da mesma massa. No caso da mina em estudo, há um limitador importante à altura que o material pode atingir na caçamba do caminhão devido a um viaduto sob o qual os equipamentos trafegam. Nesse caso, a otimização das cargas transportadas em outras movimentações melhora a carga média em geral: reduzindo a quantidade de subcargas em movimentações que a princípio não são restringidas (como minério e produto), a carga média geral é aumentada.

No caso das movimentações de produto, sendo realizadas por pás carregadeiras e sem limitações de altura, a minimização de subcargas é essencial.

## 5.2 Frota CAT 777

De acordo com a regra 10/10/20, para a frota de caminhões modelo CAT777, a carga-alvo é de 91,0t, 10% das cargas podem estar acima de 100,1t e nenhuma carga pode estar acima de 109,2t (20% inadmissível). As estatísticas descritivas presentes na Figura 34 mostram que a média do período está em torno de 2% abaixo da carga-alvo.

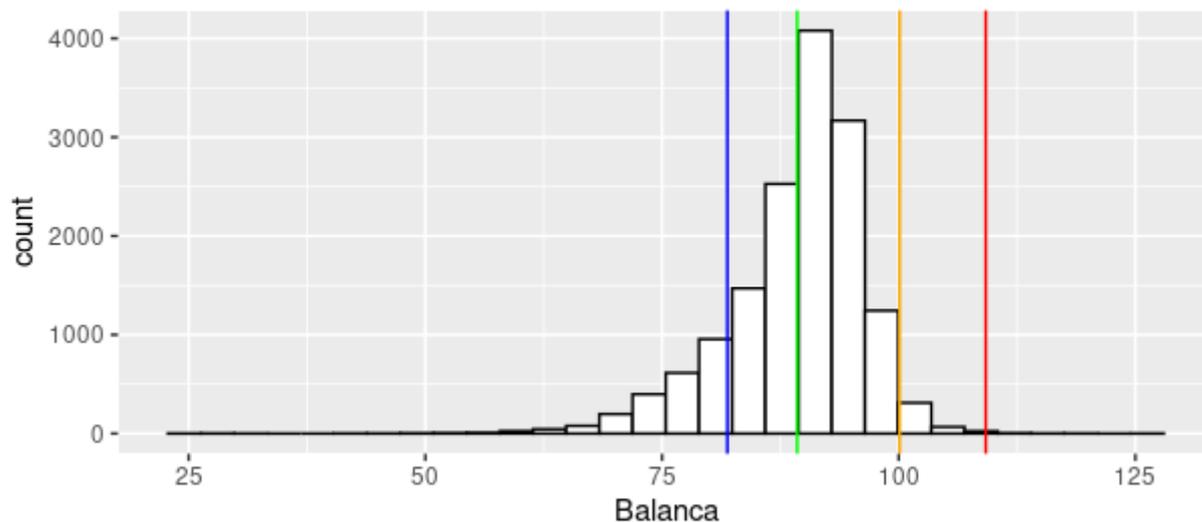
Figura 34 - Estatísticas descritivas da carga média do CAT 777

```
> summary (cat777$Balanca)
  Min. 1st Qu.  Median    Mean 3rd Qu.   Max.
 22.90  86.00   90.60   89.27  93.80  124.60
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

O histograma presente na Figura 35 mostra que há diversos eventos de carga média abaixo de 10% do *payload* (81,9t). É possível observar, ainda, uma leve assimetria da curva à esquerda.

Figura 35 - Histograma da carga média do CAT777  
Carga Média - CAT 777

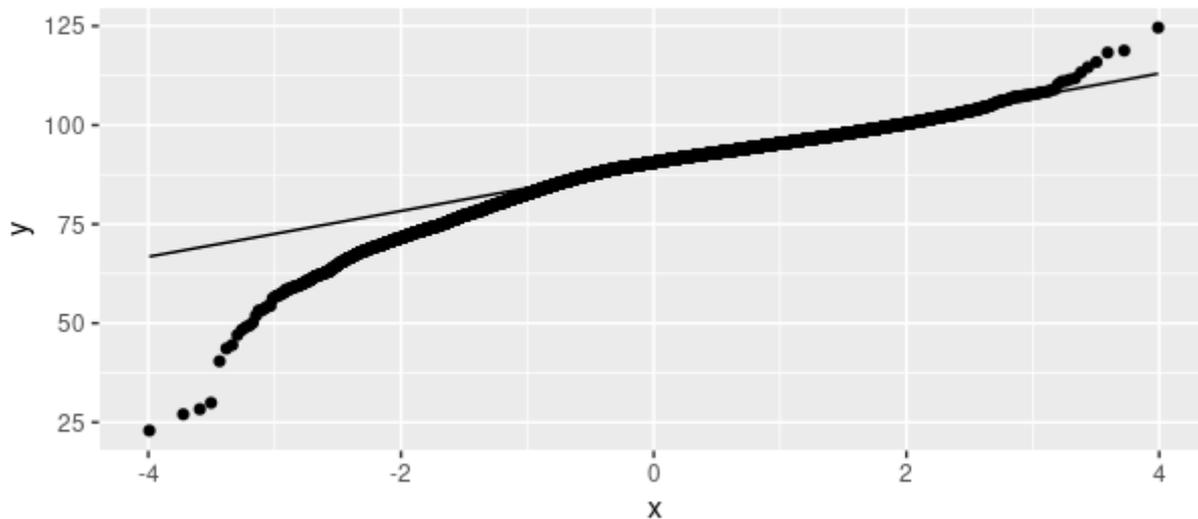


Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como na frota de CAT775, observa-se vários eventos de subcargas (parte esquerda da curva), que impactam diretamente no valor da média e mediana. No caso do CAT777, por se tratar de caminhões de porte maior, restrições de altura e dificuldades operacionais para o tráfego em rampas de maior inclinação, facilitam ainda mais que eventos de carga baixa aconteçam.

Assim como para a frota de CAT777, o gráfico de probabilidade normal presente na Figura 36 mostra que há alguns pontos fora da reta nas extremidades. Para essa frota, no entanto, observa-se mais desvios na extremidade esquerda da reta, indicando moderado desvio de normalidade. O desvio da normalidade dos dados é reforçado pelo formato do histograma da Figura 35. Como observado na Figura 37, o teste de normalidade de Anderson-Darling indica que os dados não seguem a distribuição normal ( $p\text{-valor} < 0,05$ ).

Figura 36 - Gráfico de probabilidade normal para o CAT777  
Carga Média - CAT 777



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 - Teste de normalidade dos dados para o CAT777

```
> nortest::ad.test(cat777$Balanca)
```

```
Anderson-Darling normality test
```

```
data: cat777$Balanca  
A = 264.45, p-value < 2.2e-16
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.2.1 Comparativo entre as turmas

As análises comparativas entre as turmas presentes na Figura 38 mostram que letra D, novamente, é a que apresentou o melhor desempenho em termos de média, mediana e desvio padrão. Por outro lado, a turma C novamente foi a que apresentou menor média e mediana. Os resultados para a frota de CAT777 foram bem parecidos aos da frota de CAT775 quando comparadas as 4 turmas.

Figura 38 - Estatísticas descritivas do CAT777 por turma

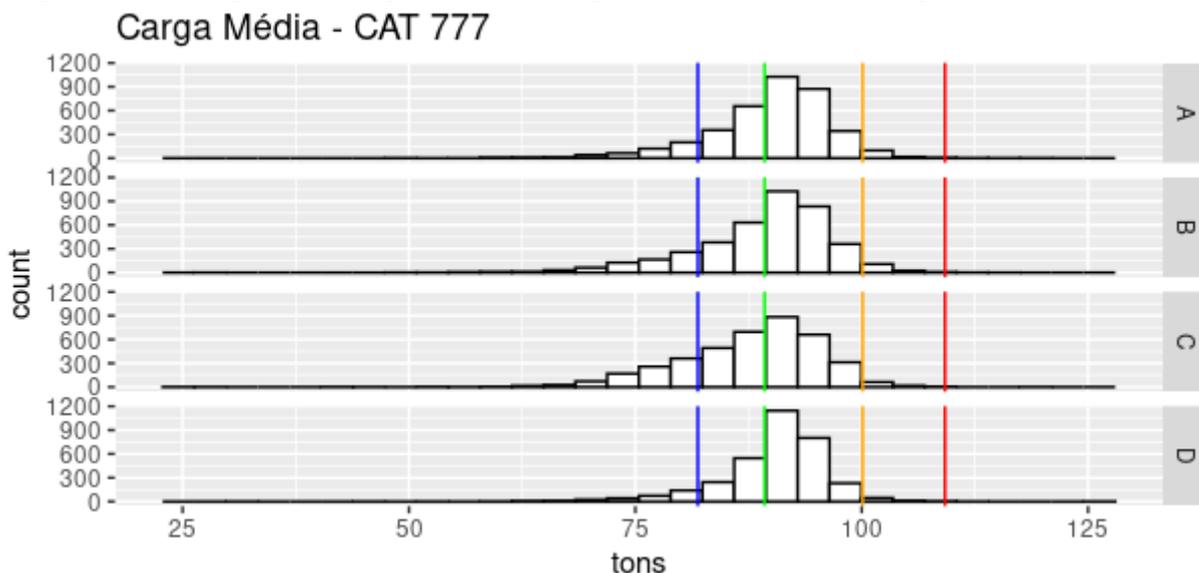
```
> describeBy (cat777$Balanca, cat777$Turma)
```

```
Descriptive statistics by group
group: A
  vars  n mean  sd median trimmed mad min  max range skew kurtosis  se
X1     1 3827 89.99 6.72   91   90.59 5.19 49 118.3 69.3 -1.1   2.82 0.11
-----
group: B
  vars  n mean  sd median trimmed mad min  max range skew kurtosis  se
X1     1 4046 89.21 7.63   90.7   89.93 5.93 27 115.9 88.9 -1.15  2.82 0.12
-----
group: C
  vars  n mean  sd median trimmed mad min  max range skew kurtosis  se
X1     1 4039 87.76 7.77   89.2   88.33 6.97 22.9 118.8 95.9 -0.99   3 0.12
-----
group: D
  vars  n mean  sd median trimmed mad min  max range skew kurtosis  se
X1     1 3327 90.36 5.95   91.3   90.94 4 29.9 124.6 94.7 -1.56  7.45 0.1
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelo histograma presente na Figura 39 observa-se que todas as turmas apresentam número considerável de subcargas, mas que a grande maioria dos eventos está entre a faixa de 76,3t e 91,0t. Nota-se também alguns eventos de cargas abaixo de 76,3t, sinalizando que alguns caminhões foram carregados com cargas similares à capacidade dos caminhões CAT775, de menor porte. Esses eventos devem ser minimizados para a maximização da produtividade da frota.

Figura 39 - Histogramas comparativos de carga média entre as turmas para o CAT777

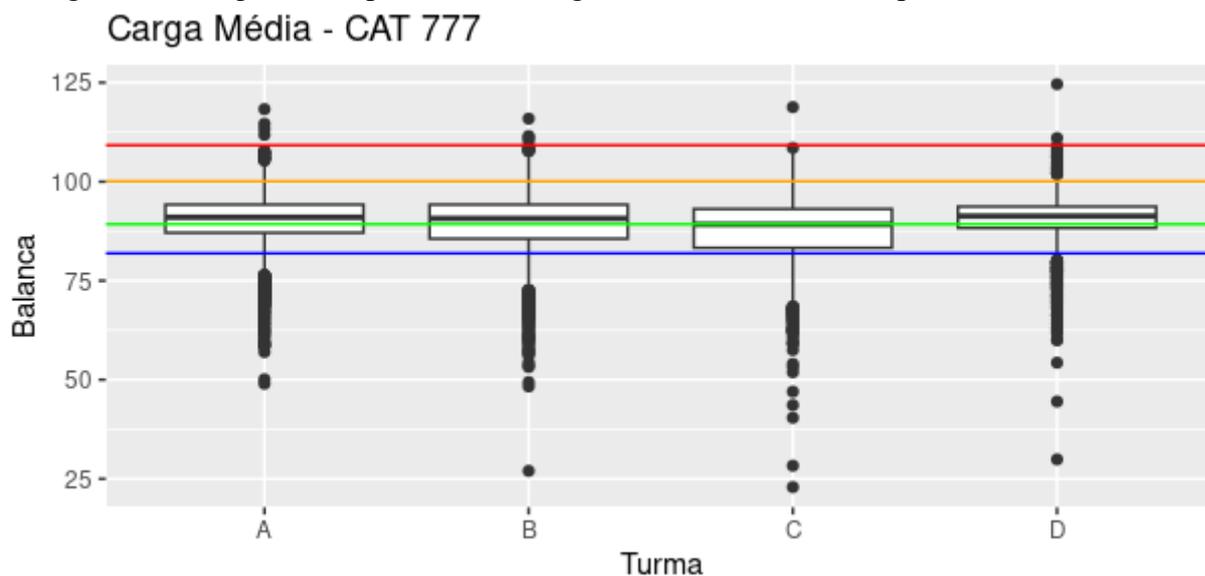


Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelos *boxplots* na Figura 40 nota-se a diferença entre a posição dos quartis e a variabilidade de dados entre as turmas. Toda as turmas apresentam diversos *outliers* de

eventos de subcarga. Notavelmente a mediana da equipe C está abaixo da demais e a equipe D é que apresenta menor variabilidade.

Figura 40 - *Boxplots* comparativos de carga média entre as turmas para o CAT777



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise de variância presente na Figura 41 confirma a hipótese de que há diferenças significativas entre pelo menos 2 turmas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ).

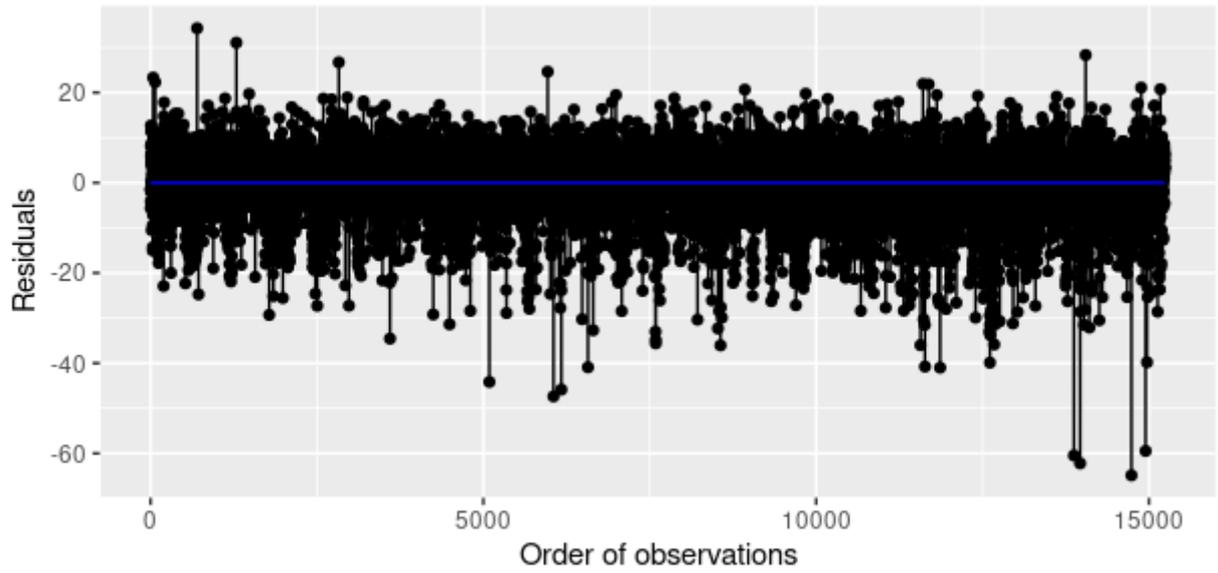
Figura 41 - Análise de variância entre as turmas para o CAT777

```
> summary (model_777_turma)
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
cat777$Turma   3  15121    5040  99.67 <2e-16 ***
Residuals    15235  770448     51
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

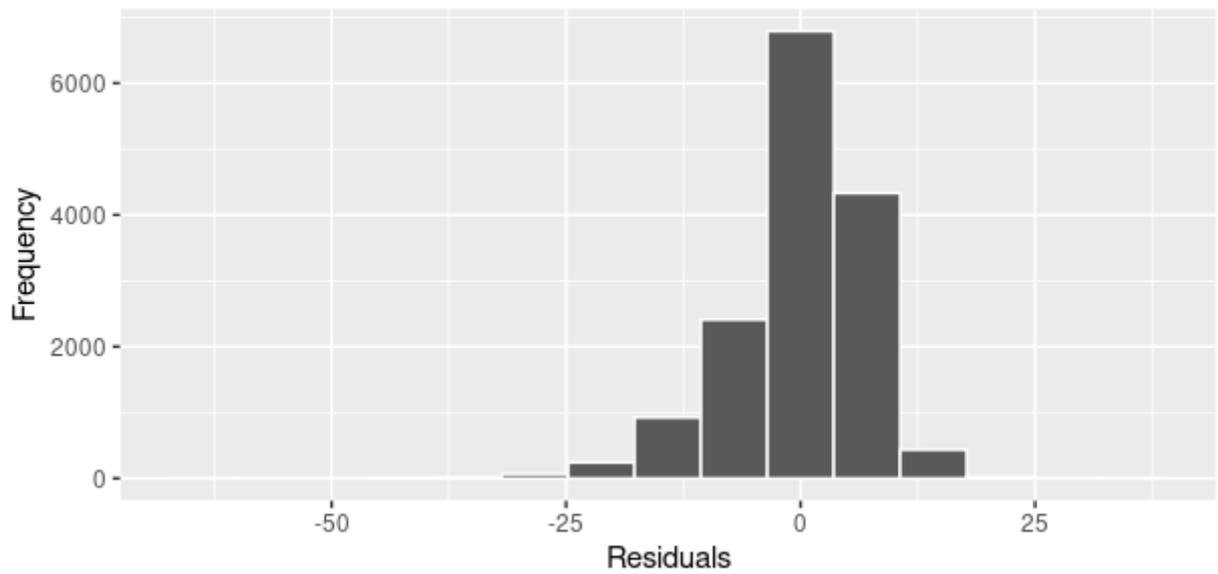
O gráfico presente na Figura 42 mostra aleatoriedade dos resíduos em torno do 0, e a Figura 43 e a Figura 44 indicam moderado desvio da normalidade. Assim como para o CAT775, assume-se que tal desvio não é suficiente para impactar nos resultados da análise de ANOVA.

Figura 42 - Gráfico de dispersão dos resíduos



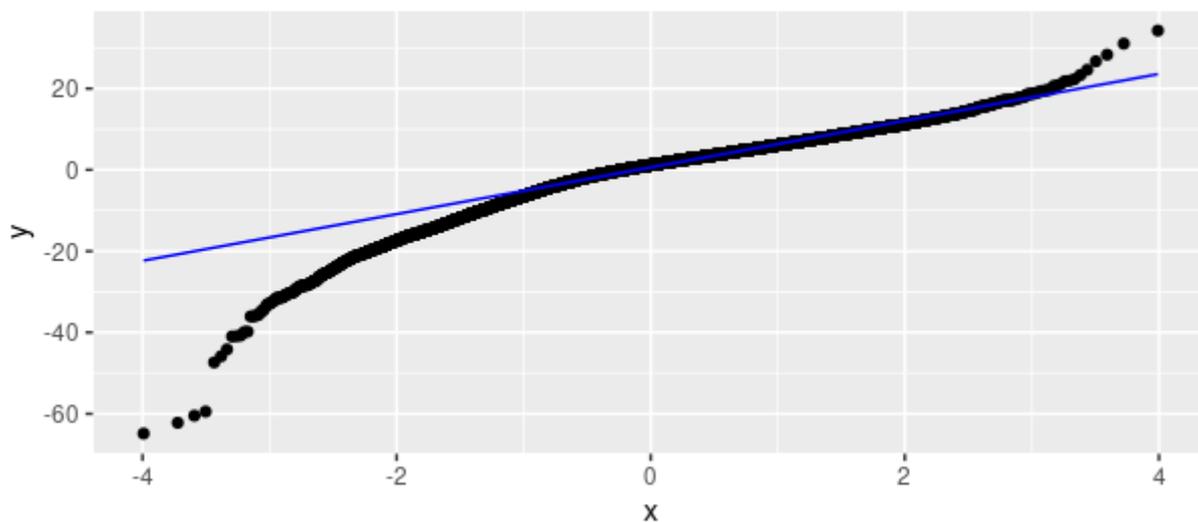
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 43 - Histograma dos resíduos



Fonte: Elaborada pelo autor.

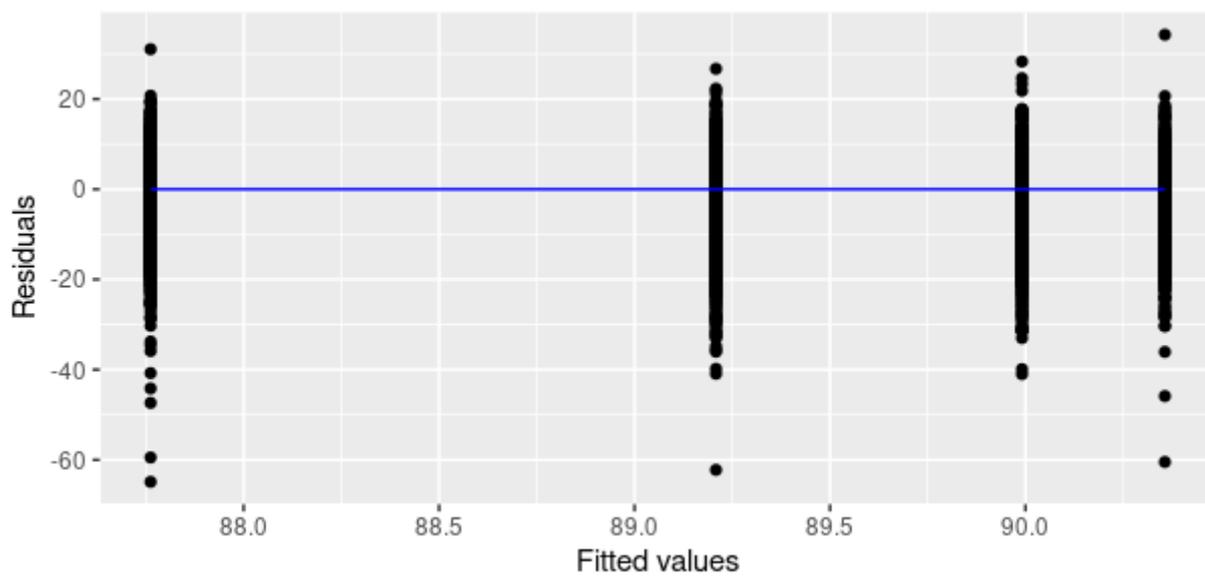
Figura 44 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos  
Normal Q-Q plot



Fonte: Elaborada pelo autor.

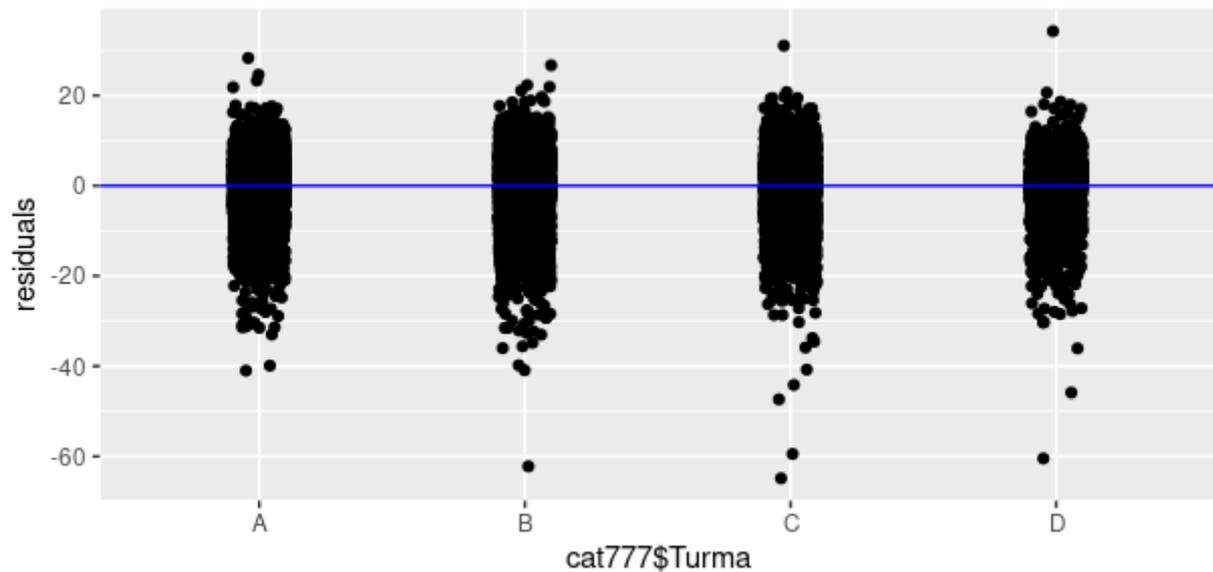
Os gráficos de dispersão dos resíduos presentes na Figura 45 e na Figura 46 indicam um comportamento aleatório em torno do 0, indicando, portanto, que a variância dos resíduos é constante.

Figura 45 - Gráfico de dispersão dos resíduos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 46 - Gráfico de dispersão dos resíduos por fator



Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelo teste de Tukey comprova-se que, com exceção entre as turmas A e D (p-valor > 0,05), há evidências para se supor diferenças significativas entre todos os outros pares de turmas, conforme Figura 47.

Figura 47 - Teste de Tukey para as turmas

```
> TukeyHSD(model_777_turma)
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = cat777$Balanca ~ cat777$Turma)

$`cat777$Turma`
      diff          lwr          upr      p adj
B-A -0.7828939 -1.19489269 -0.3708951 0.0000063
C-A -2.2293018 -2.64147406 -1.8171294 0.0000000
D-A  0.3654452 -0.06765342  0.7985439 0.1322720
C-B -1.4464079 -1.85281201 -1.0400037 0.0000000
D-B  1.1483391  0.72072625  1.5759520 0.0000000
D-C  2.5947470  2.16696693  3.0225270 0.0000000
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Novamente, a presença de diferenças significativas no resultado entre as turmas indica que há oportunidades de ganho em carga média com um melhor balanceamento de operadores experientes e inexperientes entre as letras, além de indicar um possível melhor acompanhamento do indicador de carga média pela equipe C.

### 5.2.2 Comparativo entre turnos

As análises por turno presentes na Figura 48 mostram que, mais uma vez, o turno noturno é aquele apresenta maior média, maior mediana e menor desvio padrão em comparação aos outros dois turnos.

Figura 48 - Estatísticas descritivas do CAT777 por turno

```
> describeBy (cat777$Balanca, cat777$Turno)
```

Descriptive statistics by group

group: Diurno

vars	n	mean	sd	median	trimmed	mad	min	max	range	skew	kurtosis	se	
X1	1	5434	89.05	7.51	90.5	89.77	5.78	22.9	118.8	95.9	-1.23	3.76	0.1

group: Noturno

vars	n	mean	sd	median	trimmed	mad	min	max	range	skew	kurtosis	se	
X1	1	4042	89.57	6.76	90.7	90.17	5.19	28.3	109	80.7	-1.31	4.83	0.11

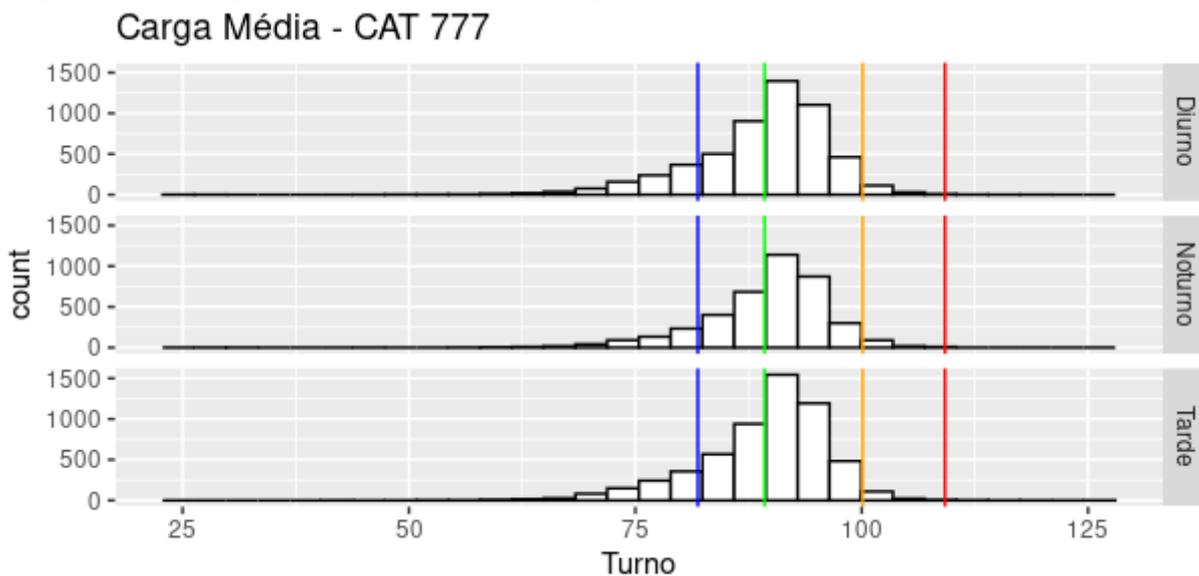
group: Tarde

vars	n	mean	sd	median	trimmed	mad	min	max	range	skew	kurtosis	se	
X1	1	5763	89.27	7.14	90.6	89.94	5.49	40.4	124.6	84.2	-1.06	2.47	0.09

Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa análise é observada nos histogramas presentes na Figura 49, que mostram que o turno noturno apresenta a curva menos deslocada para a esquerda em relação aos demais.

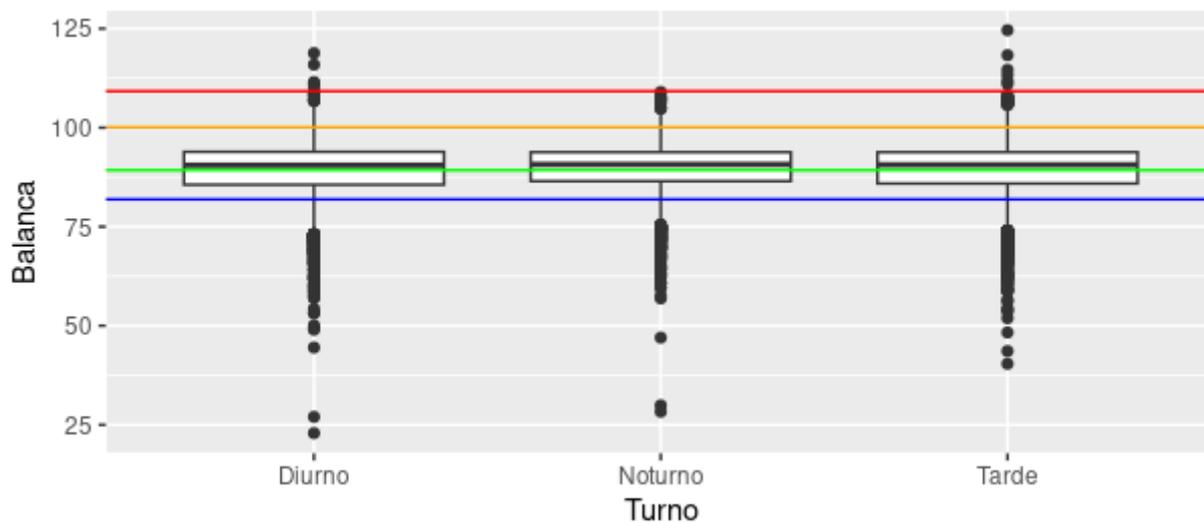
Figura 49 - Histogramas comparativos de carga média entre as turmas para o CAT777



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 50 observa-se que o turno noturno apresenta menos *outliers*, e que o 1º quartil e mediana são maiores.

Figura 50 - *Boxplots* comparativos de carga média entre as turmas para o CAT777  
Carga Média - CAT 777



Fonte: Elaborada pelo autor.

No caso do CAT777, rejeita-se a hipótese de que não há diferenças significativas entre os turnos ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), conforme análise de variância presente na Figura 51:

Figura 51 - Análise de variância entre os turnos para o CAT777

```
> model_777_turno <- aov (cat777$Balanca ~ cat777$Turno)
> summary (model_777_turno)
```

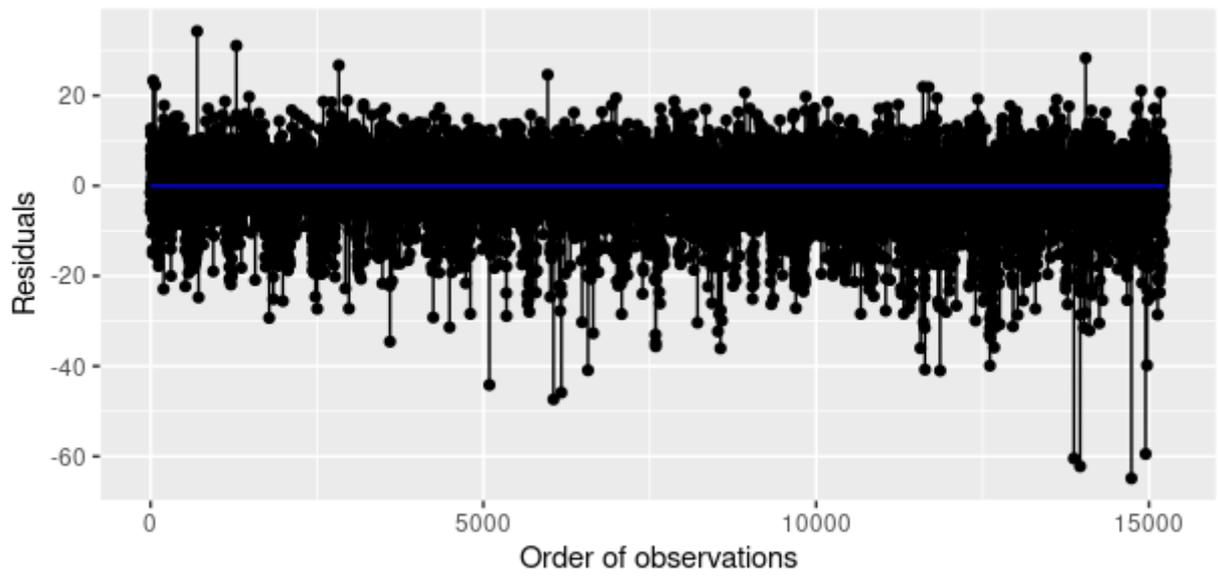
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
cat777\$Turno	2	609	304.68	5.914	0.00271 **
Residuals	15236	784960	51.52		

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Fonte: Elaborada pelo autor.

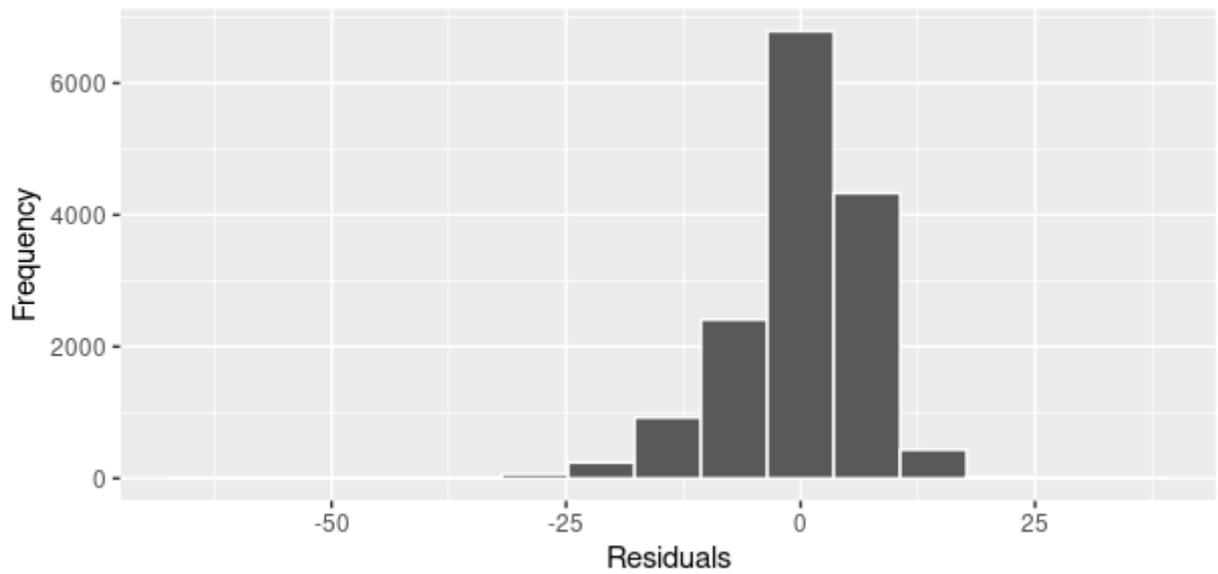
A Figura 52 mostra que não há padrão entre os resíduos. Na Figura 53 e na Figura 54 nota-se moderado desvio da normalidade. Novamente, considerou-se que tal desvio não é suficiente para comprometer os resultados na ANOVA.

Figura 52 - Gráfico de dispersão dos resíduos



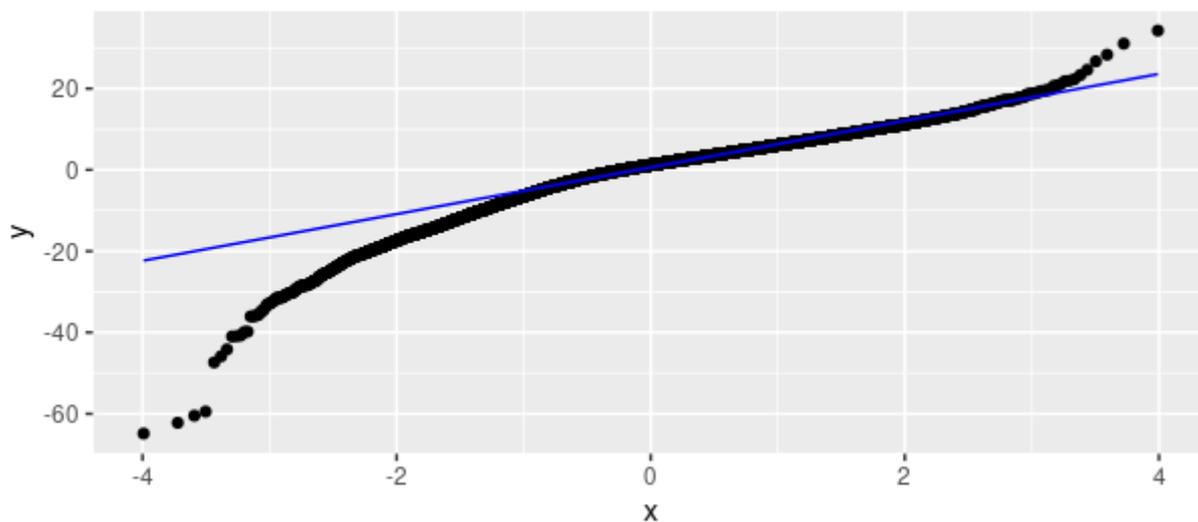
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 53 - Histograma dos resíduos



Fonte: Elaborada pelo autor.

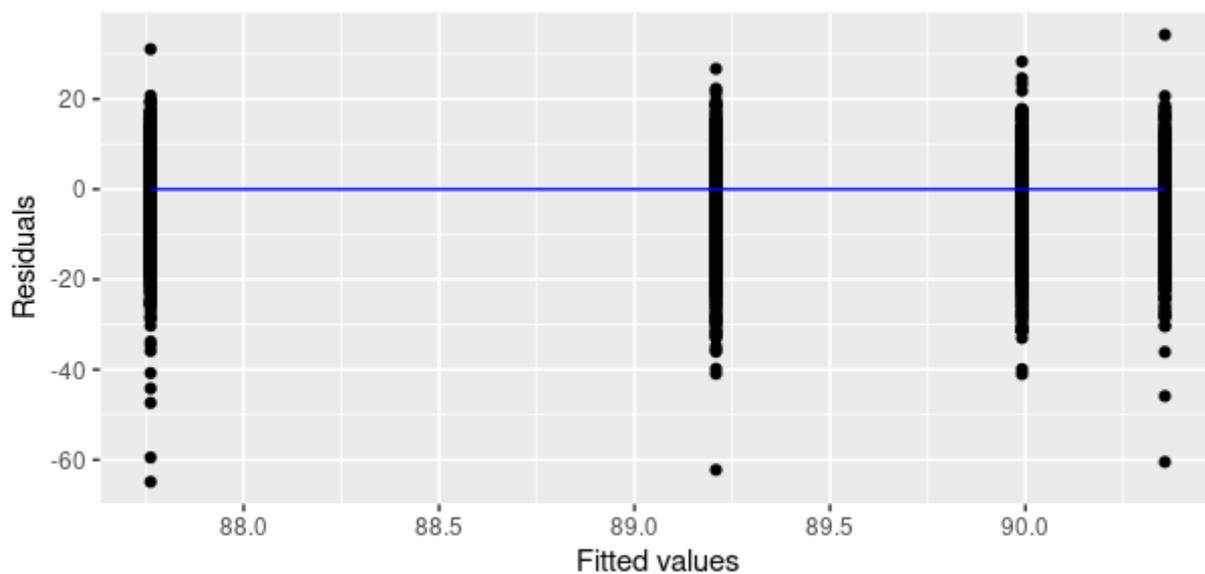
Figura 54 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos  
Normal Q-Q plot



Fonte: Elaborada pelo autor.

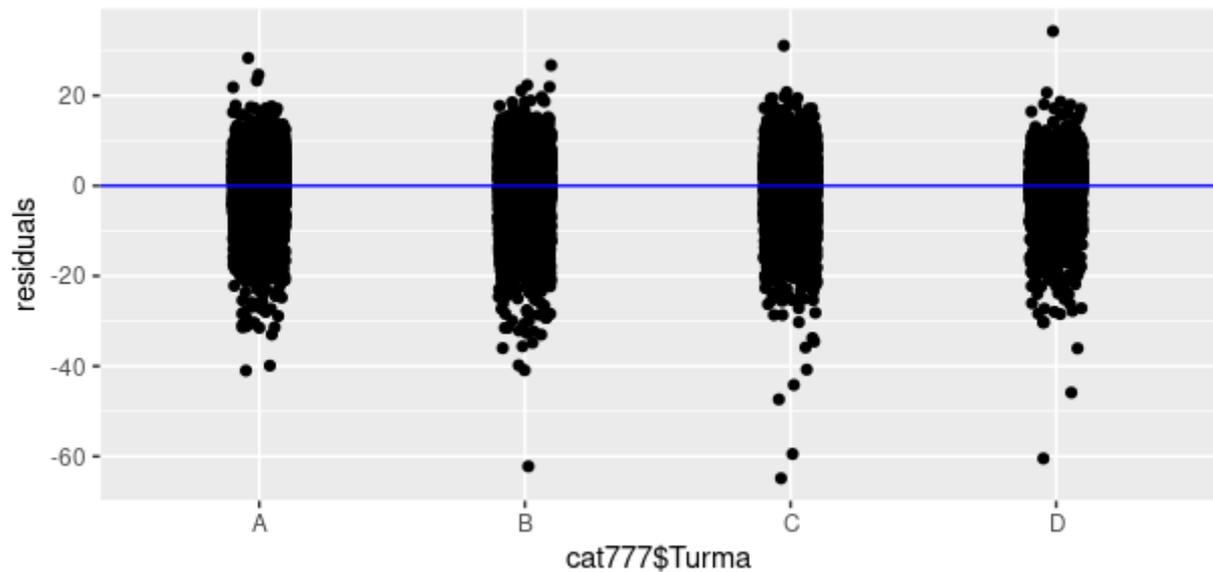
Os gráficos de dispersão dos resíduos presentes na Figura 55 e na Figura 56 mostram um comportamento aleatório em torno do 0, indicando, portanto, que a variância dos resíduos é constante.

Figura 55 - Gráfico de dispersão dos resíduos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 56 - Gráfico de dispersão dos resíduos por fator



Fonte: Elaborada pelo autor.

Confirmada a validação da ANOVA, o teste de Tukey presente na Figura 57 mostra que a diferença está entre os turnos Diurno e Noturno ( $p$ -valor  $<0,05$ ).

Figura 57 - Teste de Tukey para diferenças entre turnos para o CAT777

```
> TukeyHSD(model_777_turno)
  Tukey multiple comparisons of means
  95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = cat777$Balanca ~ cat777$Turno)

$`cat777$Turno`
              diff          lwr          upr      p adj
Noturno-Diurno  0.5127313  0.16327934  0.86218317 0.0016949
Tarde-Diurno    0.2196377 -0.09848857  0.53776405 0.2378858
Tarde-Noturno  -0.2930935 -0.63826444  0.05207741 0.1146019
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por se tratar de um caminhão de porte maior, as possíveis restrições de carga em período noturno em locais mais restritos na mina se tornam ainda mais latentes para o CAT777. Tal medida geralmente é adotada para preservar a segurança da operação. Apesar disso, a elevada quantidade de cargas abaixo dos 10% da carga alvo, várias inclusive com valores próximos ao admissível para os caminhões de porte menor (CAT775), indica oportunidades de ganhos em produtividade com a utilização da frota de maior porte em frentes de lavra com menos restrições operacionais. Obviamente, a caçamba do caminhão CAT777 é maior e faz com que movimentações de materiais mais úmidos, por exemplo, sejam mais produtivas que as com o CAT775 de toda forma. No

entanto, a tomada de decisão no dia a dia, que é sabidamente complexa, deve sempre levar em conta a maximização da produtividade global da frota de transporte.

### 5.2.3 Comparativo entre equipamentos de carga

A frota de equipamentos de carga analisada é a mesma que carrega os caminhões CAT775, com exceção da pá carregadeira CAT990 (PM3014), por uma limitação de altura, conforme Figura 58.

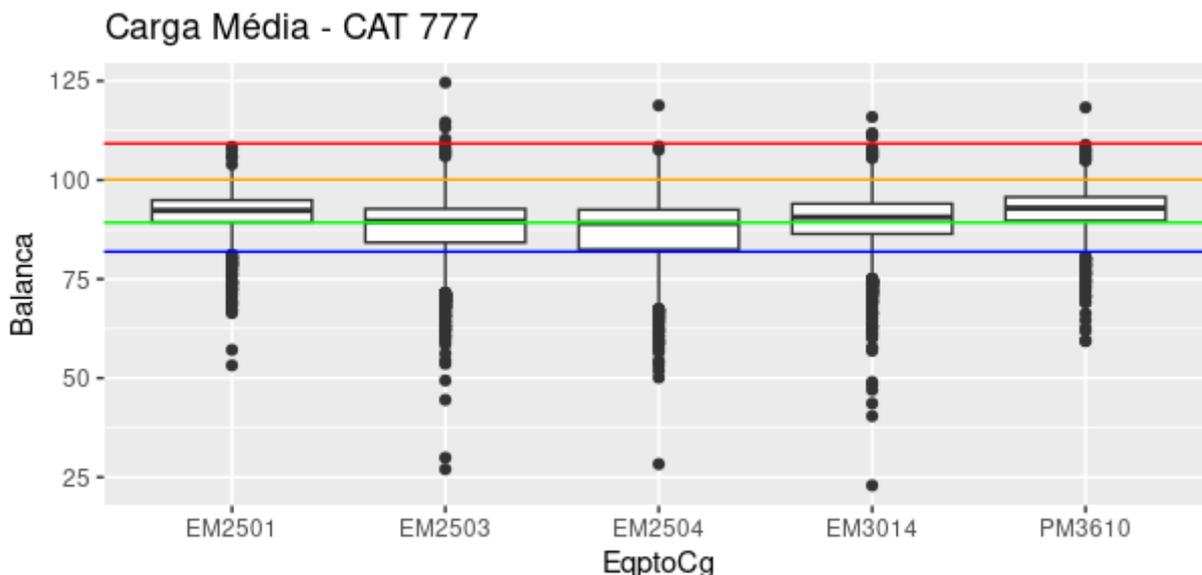
Figura 58 - Estatísticas descritivas do CAT777 por equipamento de carga  
> describeBy (cat777\$Balanca, cat777\$EqptoCg)

```
Descriptive statistics by group
group: EM2501
vars   n  mean  sd median trimmed mad min  max range skew kurtosis se
X1     1 1089 91.62 5.87  92.3  92.16 4.15 53.2 108.4 55.2 -1.43  4.71 0.18
-----
group: EM2503
vars   n  mean  sd median trimmed mad min  max range skew kurtosis se
X1     1 3730 87.84 7.51  89.6  88.57 5.78  27 124.6 97.6 -1.16  3.47 0.12
-----
group: EM2504
vars   n  mean  sd median trimmed mad min  max range skew kurtosis se
X1     1 3820 87.18 7.64  89.1  87.84 6.52 28.3 118.8 90.5 -0.97  1.87 0.12
-----
group: EM3014
vars   n  mean  sd median trimmed mad min  max range skew kurtosis se
X1     1 3821 89.69 6.86  90.6  90.21 5.49 22.9 115.9  93 -1.28  5.58 0.11
-----
group: PM3610
vars   n  mean  sd median trimmed mad min  max range skew kurtosis se
X1     1 2779 92.58 5.16  92.9  92.79 4.45 59.3 118.3  59 -0.87  3.97 0.1
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

As estatísticas descritivas mostram que novamente a escavadeira PC1250 EM2501 apresentou maior média, maior mediana e menor desvio padrão em relação aos demais equipamentos. A pá carregadeira CAT992 (PM3610) também apresentou resultados mais satisfatórios que o restante da frota de carga. Os resultados podem ser observados no boxplot da Figura 59.

Figura 59 - *Boxplots* comparativos de carga média entre os equipamentos para o CAT777



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com exceção da escavadeira EM2501, as duas escavadeiras de porte PC1250 (EM2503 e EM2504) apresentam desempenho abaixo do esperado em termos de média. Uma avaliação mais detalhada do desempenho desse equipamento deve ser conduzida de maneira a identificar se há problemas sistêmicos de manutenção que prejudiquem de alguma forma o carregamento dos caminhões, se a alocação de lavra dela no período analisado esteve em frentes mais restritivas etc.

A PC2000 (EM3014), novamente, representa um ponto a ser mais bem explorado: no caso do CAT777, temos o *match* ideal de porte de escavadeira x caminhão. A quantidade de eventos abaixo de 76,3t demonstra que essa escavadeira não está trabalhando com todo o seu potencial produtivo. A alocação em frentes de lavra produtivas da maior escavadeira da frota operando com caminhões em seu *match* ideal pode trazer ganhos expressivos na produtividade global da operação.

#### 5.2.4 Comparativo entre materiais

Assim como na frota de CAT775, materiais classificados como estéril apresentam menor média, mediana e desvio padrão nos eventos observados de carga, conforme Figura 60.

Figura 60 - Estatísticas descritivas por tipo de material para o CAT777

> describeBy (cat777\$Balanca, cat777\$MaterialClasse)

```

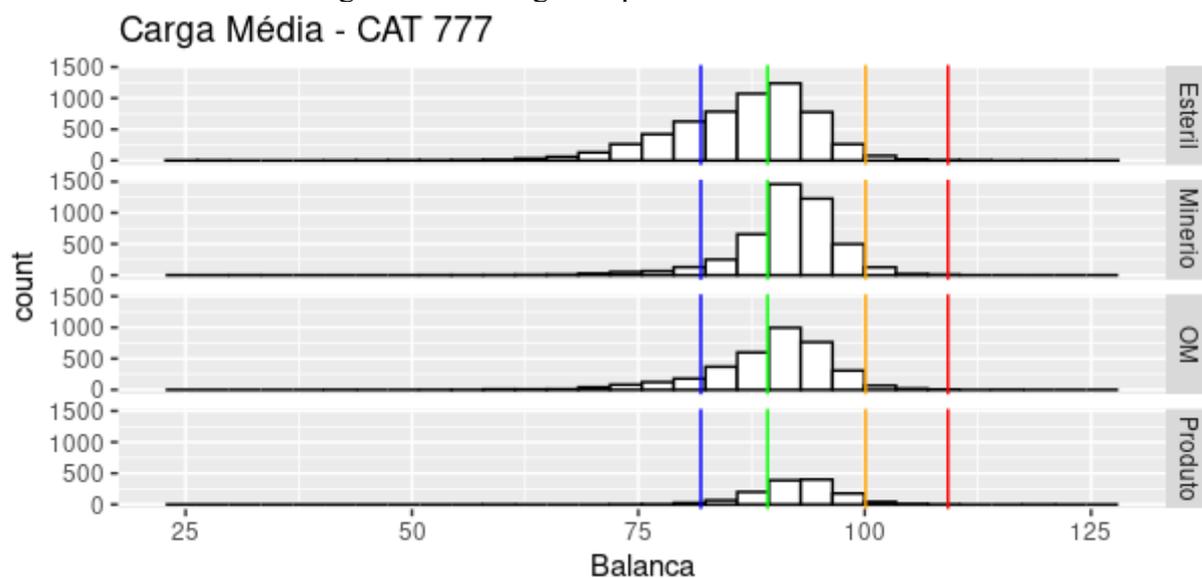
Descriptive statistics by group
group: Esteril
  vars  n  mean  sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 5803 86.57 7.94  87.9   87.12 7.12 22.9 124.6 101.7 -0.91   2.84 0.1
-----
group: Minerio
  vars  n  mean  sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 4532 91.48 5.68  92.1   91.96 4.15 29.9 108.4  78.5 -1.46   6.5 0.08
-----
group: OM
  vars  n  mean  sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 3586 89.65 6.8   90.8   90.28 5.19 40.4 115.9  75.5 -1.12   2.77 0.11
-----
group: Produto
  vars  n  mean  sd median trimmed  mad  min  max range  skew kurtosis  se
X1     1 1318 92.53 4.66  92.8   92.64 4.15 59.3 118.3   59 -0.4    3.1 0.13

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

No caso do CAT777, a densidade do material pode ser um fator ainda mais impactante, como observado na Figura 61. Como anteriormente discorrido, materiais de menor densidade ocupam maior volume na caçamba do caminhão e, para atingimento do *payload* da frota, ficam mais altas. Em minas com restrições de altura, esse impacto é determinante na carga média global.

Figura 61 - Histograma para o CAT777

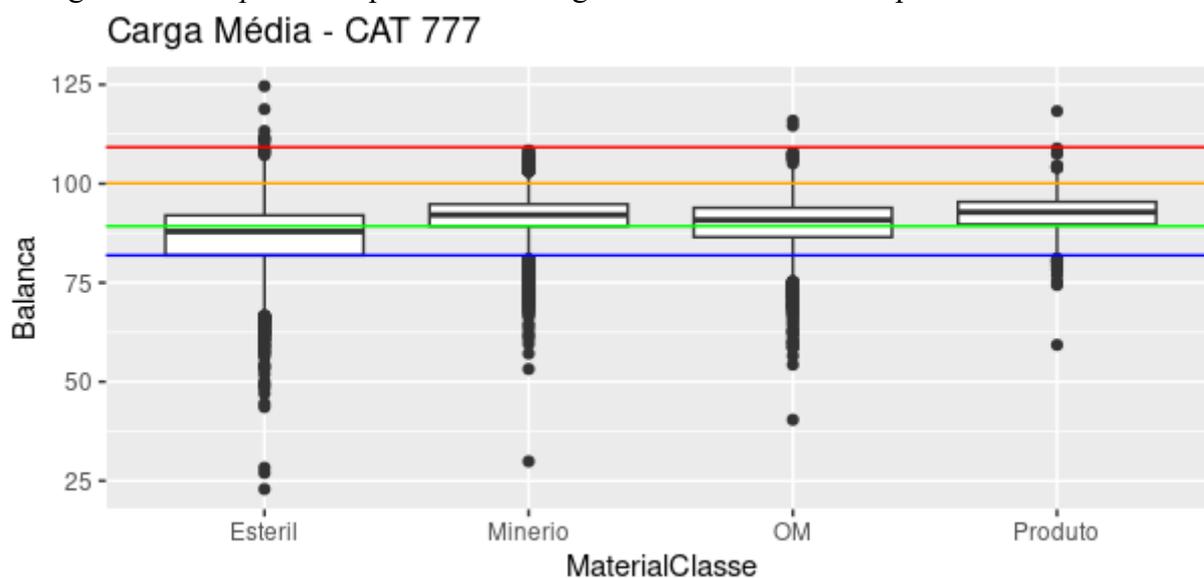


Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se, na Figura 62, que novamente as cargas de estéril representam o maior ponto de atenção em termos de média, mediana e variabilidade. Dessa forma, o

aproveitamento máximo da capacidade produtiva da frota em outras frentes de lavra minimiza o impacto das frentes de estéril, que apresentam menor densidade.

Figura 62 - *Boxplots* comparativos de carga média entre materiais para o CAT777



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse sentido, chama-se a atenção para a carga média de estéril para a frota de CAT775. Considerando-se que os caminhões trabalham em frentes de lavra de materiais estéreis similares, os caminhões de maior porte possuem maiores restrições de altura da carga. Dessa forma, surge uma possível oportunidade de aumento da carga média de estéril para o CAT775 sem comprometer a segurança da operação e das estruturas sob as quais os equipamentos trafegam.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo analisar a carga média da frota de transporte de uma mina a céu aberto de minério de ferro durante o último trimestre de 2022, de maneira a identificar oportunidades no processo para aumentar a capacidade produtiva da mina.

As análises mostraram que há diversas oportunidades para o aumento da carga média e melhoria da produtividade. Por meio das ferramentas estatísticas utilizadas, comprovou-se que há diferença significativa entre as turmas e que ações para padronização entre as turmas e melhor acompanhamento do indicador podem ser uma estratégia interessante para o resultado geral. O turno noturno apresentou melhor resultado para a frota de CAT775 e para a de CAT777. Essa diferença pode ser explicada por regiões de lavra restrita na mina, que são realizadas apenas em período diurno e com a menor frota. Em relação aos equipamentos, as carregadeiras mostraram melhor desempenho, assim como a escavadeira 2501, do porte PC1250. A escavadeira PC2000 se mostrou ponto de preocupação, dado que é a maior escavadeira da frota e a maximização da sua produtividade é, por conseguinte, a maximização da produtividade da operação. Outro aspecto abordado foi o tipo de material, em que, para ambas as frotas de transporte, o estéril apresentou piores resultados em média, mediana e desvio padrão. O impacto da densidade do material na carga média é expressivo, e, portanto, a maximização da carga média nos demais materiais de maior densidade é uma maneira de aumento da carga média global, porém deve-se atentar para não realizar cargas proibitivas.

Como trabalhos futuros, sugere-se que seja elaborado um mapa de cargas da mina em questão por plano de lavra, de maneira a setorizar a recomendação de carga de acordo com o tipo de material.

## REFERÊNCIAS

- CATERPILLAR. **Caminhão Fora-de-Estrada 775G**. 2012a. Disponível em: <<http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C752037>>. Acesso em 23 jan. 2023.
- CATERPILLAR. **Caminhão Fora-de-Estrada 777G**. 2012b. Disponível em: <<http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10461079>>. Acesso em 23 jan. 2023.
- COSTA E SILVA, V. **Curso MIN 112: Operações Mineiras**. [S.l.]. 2014. Disponível em: <<https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-de-ouro-preto/projeto-de-mineracao/2014-apostila-operacoes-mineiras/34393389>>. Acesso em 23 jan. 2023.
- GLASS, G.V.; P.D. PECKHAM; J.R. SANDERS. Consequences of failure to meet assumptions underlying fixed effects analyses of variance and covariance. **Review of Educational Research**, New York, v. 42, p. 237-288, Summer 1972.
- HARWELL, M.R.. et. al. Summarizing Monte Carlo results in methodological research: the one- and two-factor fixed effects ANOVA cases. **Journal of Educational Statistics**, New York, v. 17, n. 4, p. 315-339, Winter 1992.
- LIX, L.M.; KESELMAN, J.C.; KESELMAN, H.J. Consequences of assumption violations revisited: A quantitative review of alternatives to the one-way analysis of variance F test. **Review of Educational Research**, New York, v. 66, n. 4, p. 579-619, Winter 1996.
- MONTGOMERY, DC; RUNGER, GC. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Tradução de . 5. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2012.