

**RELATÓRIO DE CONSULTA SOBRE O  
PROJETO: “AÇÃO DE ALTAS  
TEMPERATURAS SOBRE CONCRETOS”**

**Cláudia Peixoto  
César Henrique Tôres  
Lucélia Ce Hyeun Song  
Robson Lunardi**

**São Paulo, dezembro de 2005**

**CENTRO DE ESTATÍSTICA APLICADA – CEA – USP**  
**RELATÓRIO DE CONSULTA**

**TÍTULO DO PROJETO:** “Ação de altas temperaturas sobre concretos”

**PESQUISADORA:** Andréia Azeredo Nince

**ORIENTADOR:** Antônio Domingues de Figueiredo

**INSTITUIÇÃO:** Departamento de Engenharia de Construção Civil - Poli - USP

**FINALIDADE DO PROJETO:** Doutorado

**PARTICIPANTES DA ENTREVISTA:** Andréia Azeredo Nince  
Antônio Domingues de Figueiredo  
Carlos Alberto de Bragança Pereira  
Cláudia Peixoto  
Lucélia Song  
Robson Lunardi  
Altino Sheu  
César Henrique Torres

**DATA:** 09/08/2005

**RELATÓRIO ELABORADO POR:** Carlos Alberto de Bragança Pereira  
César Henrique Torres  
Lucélia Ce Hyeun Song  
Robson Lunardi

## FICHA TÉCNICA

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUSSAB, W. O. e MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 5ª ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2002.

NETER, J.; WASSERMAN, W., KUTNER, M.H. and NACHTSHEIM, C.J. **Applied Linear Statistical Models**. 4ª ed. Boston: McGraw-Hill, 1996.

KHOURY, G. MAJORANA, C.E. “ **Modelling of Concrete Spalling in Fire**” AIMETA 01 – XV Congresso AIMETA di Meccanica Teorica e Applicata, 2001.

### PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS:

Microsoft Word for Windows (versão 2002)

Microsoft Excel for Windows (versão 2002)

Minitab 14 for Windows

SPSS 13 for Windows

### TÉCNICAS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS:

Análise Descritiva Unidimensional (03:010)

Análise Descritiva Bidimensional (03:020)

Análise de Regressão Clássica (07:020)

### ÁREAS DE APLICAÇÃO

Aplicações Técnicas e Industriais (14:120)

Outros (14:990)

## ÍNDICE

<b>RESUMO.....</b>	<b>5</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>2. DESCRIÇÃO DO ESTUDO.....</b>	<b>7</b>
<b>3. DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS .....</b>	<b>9</b>
<b>4. ANÁLISE DESCRITIVA.....</b>	<b>10</b>
<b>5. ANÁLISE INFERENCIAL.....</b>	<b>11</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>13</b>
<b>APÊNDICE A – Resumo das Etapas .....</b>	<b>14</b>
<b>APÊNDICE B – Tabelas .....</b>	<b>19</b>
<b>APÊNDICE C – Gráficos.....</b>	<b>24</b>
<b>APÊNDICE D – Inferência .....</b>	<b>37</b>

## RESUMO

Incêndios em túneis têm sido assunto de grande preocupação, porém não muito abordado em pesquisas de modo a gerar as recomendações técnicas necessárias para se evitar prejuízos e danos grandes.

O presente trabalho teve por objetivo verificar numa primeira etapa, parâmetros de dosagem que podem influenciar na maior ou menor susceptibilidade de ocorrência ao lascamento explosivo do concreto, bem como definir os limiares do lascamento que podem ser apontados como de risco de lascamento.

Em paralelo, realizou-se um estudo para a otimização do uso de fibras orgânicas (polipropileno) como elementos redutores da ação deletéria do fogo em concretos.

Após os experimentos realizados junto a Furnas Centrais Elétricas em Goiânia, em amostras de cubos de  $15\text{ cm}^3$ , concluiu-se que a variável a/c exerce grande influência no lascamento, especialmente quando combinada com a umidade ambiente (RH%).

Além disso, o uso de fibras orgânicas são eficazes. Quanto maior o teor, comprimento e ponto de fusão da fibra, menor a propensão ao lascamento.

## 1. INTRODUÇÃO

Estruturas enterradas, como no caso de túneis, quando submetidas ao fogo (incêndios), muitas vezes não apresentam estabilidade sem a presença de um revestimento. Vários incidentes ocorridos na última década em diversos túneis executados, no hemisfério norte e na Europa, tem sido de grande preocupação<sup>1</sup>. Além disso, existe grande controvérsia e dúvidas ainda não solucionadas sobre o comportamento dos concretos de alta resistência. Muito pouco foi encontrado a respeito de concretos projetados, submetidos a altas temperaturas.

**Figura 1** – Revestimento lateral do Eurotúnel após o incêndio



**Figura 2** – Túnel Mont Blanc após incêndio



<sup>1</sup>Desde então, vários túneis europeus, principalmente aqueles que fazem parte da rota turística, sofreram inspeção e foram submetidos a testes, e a maioria foi classificada como insatisfatório no caso de um incêndio.

Visto que a tendência mundial é de aumentar a quantidade e a extensão dos túneis e conseqüentemente, de aumentar o risco de acidentes resultando em incêndio, fica plenamente justificada a relevância de estudos na área, de modo a evitar fatalidades futuras e reduzir custos de recuperações.

Este estudo tem por objetivo determinar as umidades ambientes e parâmetros de dosagem que podem influenciar na maior ou menor susceptibilidade de ocorrência ao lascamento explosivo do concreto. Além disso, definir os limiares do lascamento, ou seja, determinar que faixas de valores adotados para a umidade ambientes (RH%), a relação água/cimento (a/c), consumo total de água (H%) e teor de argamassa ( $\alpha\%$ ) em concretos, que podem ser apontados como de risco de lascamento.

Em paralelo, se fará um estudo para a otimização do uso de fibras orgânicas (polipropileno) como elementos redutores da ação deletéria do fogo em concretos.

## 2. DESCRIÇÃO DO ESTUDO

O universo da pesquisa é composto por combinações de umidades ambientes e parâmetros de dosagem em uma etapa inicial e ainda, de fibras orgânicas em concretos e cubos de 15cm<sup>3</sup> cada.

**Figura 3** – Cubo de concreto de 15 cm<sup>3</sup>



**Figura 4 – Exemplos de cubos lascados**



Foi realizado um estudo junto a Furnas Centrais Elétricas em Goiânia, o qual consistiu em avaliar em uma primeira etapa, as variáveis: relação água/cimento ( $a/c$ ), consumo total de água ( $H\%$ ) e teor de argamassa ( $\alpha\%$ ) relacionadas a dosagem em três condições de exposição distintas ( $RH = 55\%$ ,  $75\%$  e  $100\%$ ) quanto à propensão ao lascamento. Os cubos de concreto foram expostos à curva Hidrocarboneto (*equação tempo X temperatura, usada para pequenos incêndios*) durante 55 minutos. Esta primeira avaliação gerou 12 traços estudados. Destes, foram utilizadas 4 amostras de cada concreto para cada umidade ambiente citada ( $3 \text{ exposições} \times 12 \text{ concretos} = 36 \text{ combinações}$ ). Em seguida, as amostras foram submetidas a uma simulação de incêndio e retirou-se a porcentagem de volume lascado de cada amostra. Cabe ressaltar que se deseja saber qual das variáveis analisadas influenciou na ocorrência do lascamento, utilizando como parâmetro de comparação, a porcentagem de volume lascado. Ainda na mesma etapa, testou-se a influência da variação da brita ou dimensões máximas do agregado graúdo ( $(D_{max})$ ), variando de 9,5, 19 e 32 mm, o que gerou mais 8 traços analisados (ver figuras A.1 e A.2)

Numa segunda etapa, foi realizado o estudo de otimização do uso da fibra de polipropileno para a redução/eliminação do lascamento. Produziram-se 51 traços, nos quais foram testadas 10 fibras, variando comprimento, diâmetro, ponto de fusão e teor de fibra, em dois traços distintos: o de maior e menor relação água/cimento ( $a/c$ ) com o



mesmo teor de argamassa e relação água/materiais (H%). (Nessa etapa, deseja-se definir o teor mínimo e quais características (comprimento, diâmetro, ponto de fusão) são capazes de eliminar o risco de ocorrência de lascamento nos concretos em estudo submetidos à elevação rápida de temperatura) (ver figuras A.3 a A.5).

Finalmente, com o objetivo de verificar se os resultados da primeira e segunda etapa podem ser extrapolados para estruturas de dimensões reais, foram testadas numa terceira etapa, 22 placas de 40x80x15 cm utilizando os mesmos traços empregados no estudo com e sem a fibra de polipropileno, mais 11 tipos de concreto também utilizados nas etapas anteriores. (ver figuras A.6 e A.7)

### **3. DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS**

#### **3.1 Variável Resposta**

- Porcentagem do Volume lascado (%)

#### **3.2 Primeira Etapa (Susceptibilidade de ocorrência do lascamento explosivo)**

##### **3.2.1 Primeira Etapa (A)**

- Relações água/cimento ( $a/c = 0,25; 0,35$  e  $0,50$ ) – adimensional
- Relação água/materiais ( $H\% = 6,00; 8,39$  e  $11,99$ ) – porcentagem
- Teores de argamassa ( $\alpha\% = 50$  e  $60$ ) – porcentagem
- Umidades ambientes ( $RH\% = 55, 75$  e  $100$ ) – porcentagem

##### **3.2.2 Primeira Etapa (B)**

- Relações água/cimento ( $a/c = 0,35$  e  $0,50$ ) – adimensional
- Relação água/materiais ( $H\% = 8,39$  e  $11,99$ ) – porcentagem
- Teores de argamassa ( $\alpha\% = 50$ ) – porcentagem
- Umidades ambientes ( $RH\% = 100$ ) – porcentagem
- Dimensões Máx. do Agregado Graúdo ( $D_{max} = 9,5; 19,0$  e  $32,0$ ) – mm

#### **3.3 Segunda Etapa (Otimização do uso de fibras)**

- Relações água/cimento ( $a/c = 0,25$  e  $0,50$ ) – adimensional

- Relação água/materiais ( $H\% = 8,39$ ) – porcentagem
- Teores de argamassa ( $\alpha\% = 50$ ) – porcentagem
- Umidades ambientes ( $RH\% = 100$ ) – porcentagem
- Comprimentos de fibra ( $C = 6, 12$  e  $18$ ) – mm
- Diâmetros de fibra ( $\phi = 18, 36$  e  $106$ ) -  $\mu\text{m}$
- Pontos de fusão ( $PF = 140$  e  $170$ ) –  $^{\circ}\text{C}$
- Teores de fibra ( $T = 500, 600, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000$  e  $2250$ ) –  $\text{g/m}^3$

#### 4. ANÁLISE DESCRITIVA

Observou-se em cada etapa, as dosagens individualmente e depois conjuntamente. Foram observados os mínimos e máximos.

Vemos pelo Gráfico C.1 que o máximo e a variabilidade do  $a/c = 0,25$  é maior do que os demais, seguido do  $0,35$  e  $0,50$ . Observando apenas o comportamento da variável  $a/c$  exposta às três umidades ambientes, verificamos que no ambiente mais úmido ( $RH\% = 1,00$ ) e com menor  $a/c$ , o lascamento foi maior (Gráfico C.5). Além disso, combinando com o teor de argamassa, o comportamento parece ser o mesmo, embora no  $\alpha\% = 50$ , aparentemente, o concreto tenha lascado mais (Gráfico C.6 e Tabela B.2). O Gráfico C.7, confirma que o concreto mais seco ( $H\% = 6,00$  e  $a/c = 0,25$ ) num ambiente mais úmido, seu volume lascado foi maior.

Temos na Tabela B.1 as estatísticas descritivas de cada combinação (ou grupo) da Primeira Etapa (A). Destaca-se o grupo 3, que tem a mediana de volume lascado igual a  $32,7\%$  e teve uma amostra quebrada. A média também parece ser maior que as demais. Este grupo tem em sua composição o menor  $a/c$  e  $H\%$ ,  $\alpha\% = 50$  e maior  $RH\%$ . Na Tabela B.2, observamos as quatro variáveis individualmente.

O teor de argamassa parece ter pouca interferência no lascamento. Conforme o Gráfico C.2, a diferença é relativamente pequena (o máximo do  $\alpha\% = 50$  é menos que  $5\%$  maior que o  $\alpha\% = 60$ ). Porém, comparando-se com o  $RH\%$ , o máximo é pequeno no  $\alpha\% = 50$  (Gráfico C.8).

Novamente, nos gráficos C.3, C.4, C.9, C.10, vemos que o concreto mais seco (a/c e H% menor) em ambiente mais úmido (RH% maior) lascou mais.

Na primeira etapa (B), observamos todos os concretos submetidos a um ambiente 100% úmido, e com teor de argamassa de 50%.

Pelo Gráfico C.12, o menor a/c lascou mais, enquanto que a brita (Dmax) maior, teve seu volume lascado menor (Gráfico C.11). O comportamento se repete no H%, o qual a % Volume Lascado é maior no concreto mais seco (Gráfico C.13 e tabelas B.3 e B.4).

Finalmente, combinando o a/c com o Dmax, o comportamento apenas se confirma (Gráfico C.14).

Na Segunda Etapa, testou-se as características do teor de fibra. Novamente, conforme Gráfico C.15, o menor a/c teve seu volume lascado maior, especialmente nos teores de fibra 0 e 500 (gráficos C.18 e C.21) e comprimentos 0 e 6 mm (gráficos C.22 e C.23). Em geral, observamos que nos concretos com menores teores e menor comprimento de fibra parecem lascar mais (gráficos C.15 a C.17).

Quanto ao diâmetro, vemos que o volume lascado parece ser maior no 0 e 35 (Gráfico C.19).

Finalmente, o ponto de fusão 170 °C parece ser o que lasca menos (Gráfico C.20).

Em geral, pode-se verificar por meio das tabelas B.5 e B.6 a influência positiva do uso das fibras nos concretos. Todos, com exceção dos grupos 1 e 27 tiveram a porcentagem do volume lascado inferior a 1%.

Na Terceira Etapa confirma-se a suposição de que o volume lascado para as combinações com o menor a/c foi maior, apesar de não haver um número de amostra suficiente (Tabela B.7).

## 5. ANÁLISE INFERENCIAL

Para analisar o Volume Lascado em cada etapa, utilizou-se como resposta, o *Log-Odds*, dado pela transformação  $\log(\text{Vol Lascado} / (1 + \text{Vol Lascado}))$ . Como o *Log-Odds* não é definido para 0, considerou-se o valor 10E-6.

Ajustou-se um modelo de regressão linear múltipla com objetivo de interpretar os parâmetros e obter a melhor combinação das variáveis comparadas na Primeira Etapa (A) e (B). Atribuiu-se scores aos *Log-Odds*, que foram classificados em quatro grupos similares, de modo a satisfazer as condições de normalidade, variância constante (homocedasticidade) e erros independentes (ver NETER et al., 1996).

Para a Primeira Etapa (A), apenas as variáveis *a/c*,  $\alpha\%$  e *RH%* foram significantes para o modelo proposto, lembrando que a variável resposta é o *score do Log-Odds* mencionado acima. A equação dada pela regressão é apresentada a seguir:

$$\text{Score } \text{Log} - \text{Odds} = 15,2 - 21,7.a/c - 0.235.\alpha\% + 26,2.H\%$$

As variáveis que mais influenciam no lascamento do cubo são o *a/c* e o *RH%*. Quanto maior o valor do *a/c*, menor o volume lascado. O contrário ocorre com o *RH%*, ao passo que aumenta, maior o volume lascado. O  $\alpha\%$  pouco influencia na resposta, porém, assim como o *a/c*, o volume lascado é maior quando aumentamos o teor de argamassa. Verifica-se no Apêndice D.1 que as suposições citadas acima foram satisfeitas.

Considerando a Primeira Etapa (B), temos que as variáveis *a/c*, *H%* e o *Dmax* deram significantes. Novamente, à medida que aumenta o *a/c*, diminui o volume lascado. O mesmo ocorre com o *Dmax* e o *H%*, apesar de terem pouca influência na resposta. Pode-se verificar pelo Apêndice D.2 que as suposições também estão satisfeitas.

Para elaborar um estudo de dosagem utilizando fibras orgânicas (polipropileno) (Segunda Etapa), não foi necessário ajustar um modelo de regressão. Apenas 1 entre 230 cubos experimentados teve o volume lascado “alto” (aproximadamente 33%), sendo este considerado no estudo como valor “aberrante” ou *outlier*. Todas as demais combinações nesta etapa foram consideradas “boas” dado que tiveram o volume lascado inferior a 1%.

Finalmente, a Terceira Etapa não possui unidades experimentais suficientes para realização de qualquer análise inferencial.

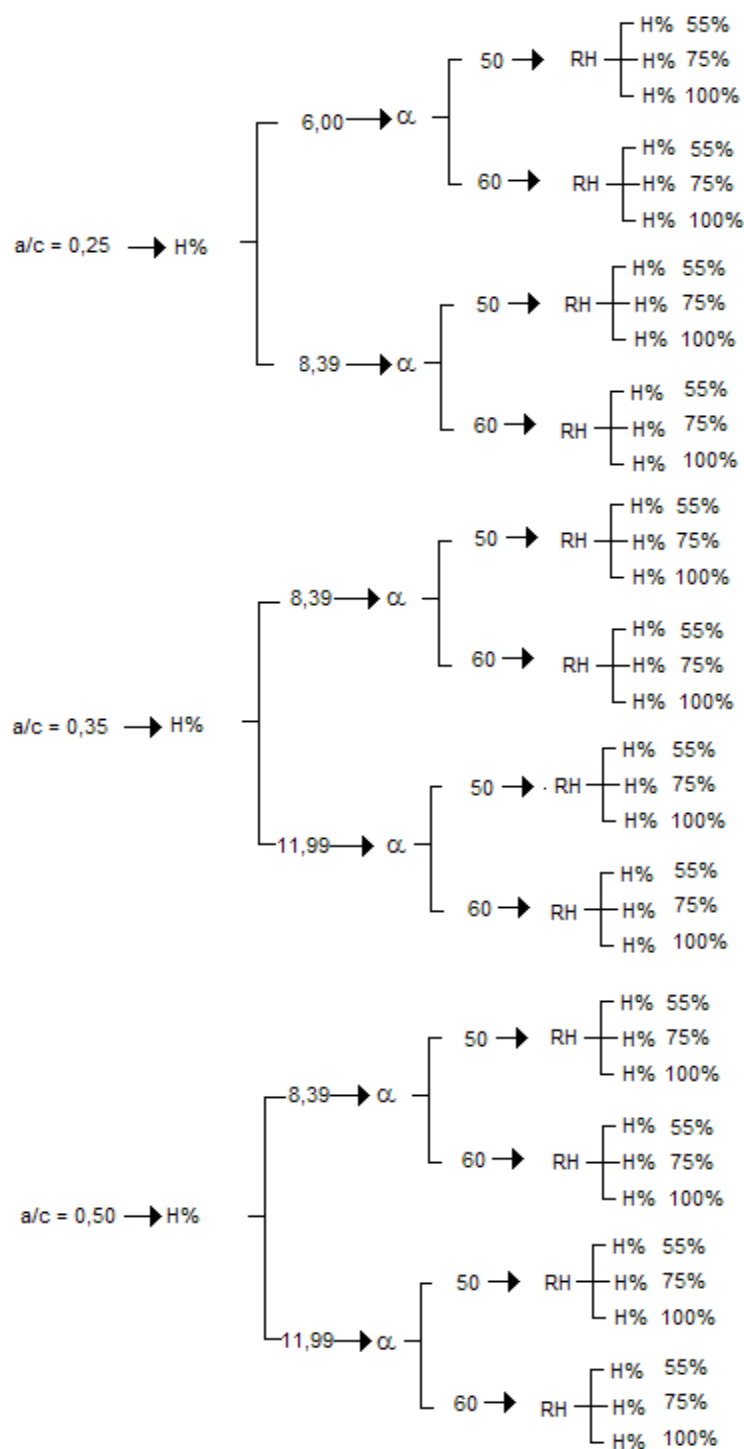
## 6. CONCLUSÕES

As análises realizadas nos permitem sugerir a seguinte lista de conclusões:

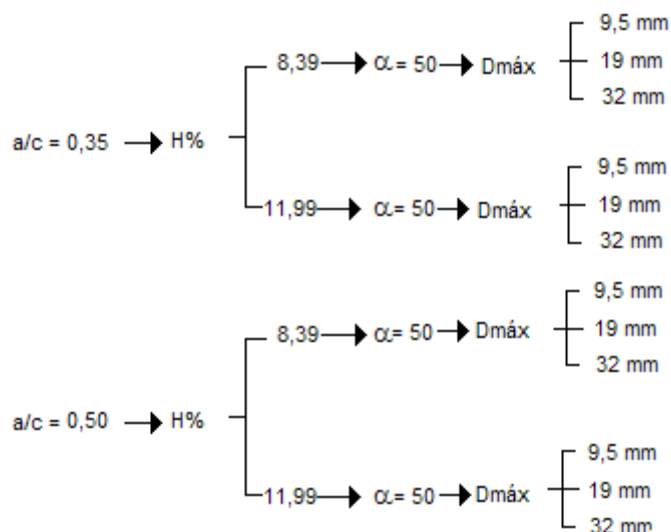
1. O concreto mais seco (a/c menor) tem maior propensão ao lascamento, tanto quando comparado individualmente, quanto em conjunto ao ambiente mais úmido (RH% maior).
2. Quanto à influência do Dmax (1ª Etapa (B)), quanto maior, menor a porcentagem do volume lascado.
3. Na segunda etapa, a influência do a/c no volume lascado se confirma. O menor teor, comprimento e ponto de fusão da fibra tem maior propensão ao lascamento. Nada se conclui sobre o diâmetro da fibra; porém, pode-se dizer que o concreto lascou mais quando analisado junto ao menor a/c.
4. Na Terceira Etapa, há indícios de que as combinações com o menor a/c resulta em maior volume lascado nos concretos.

**Apêndice A**  
**Resumo das etapas**

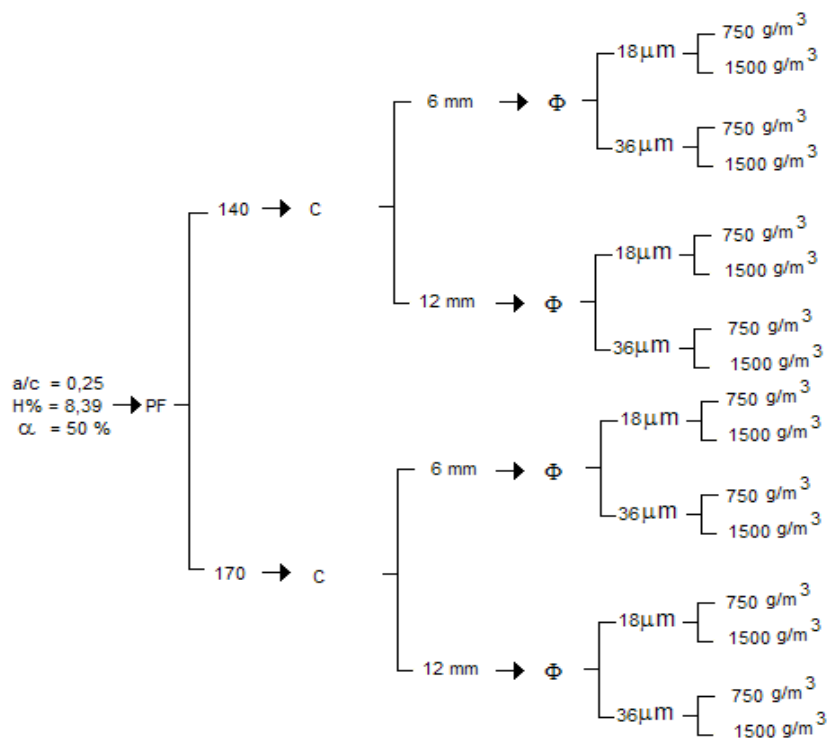
**Figura A.1** Combinações das variáveis da Primeira Etapa (A) (36 combinações e 12 traços)



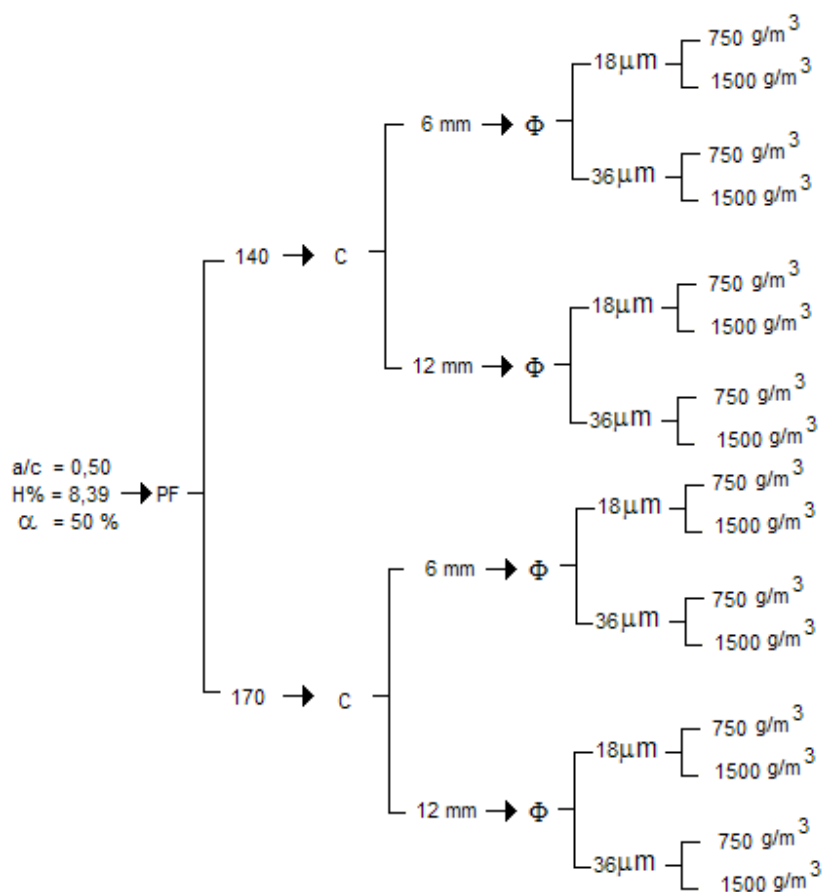
**Figura A.2** Combinações das variáveis da Primeira Etapa (B) (12 combinações e 8 traços novos + 4 traços da 1ª etapa (A))



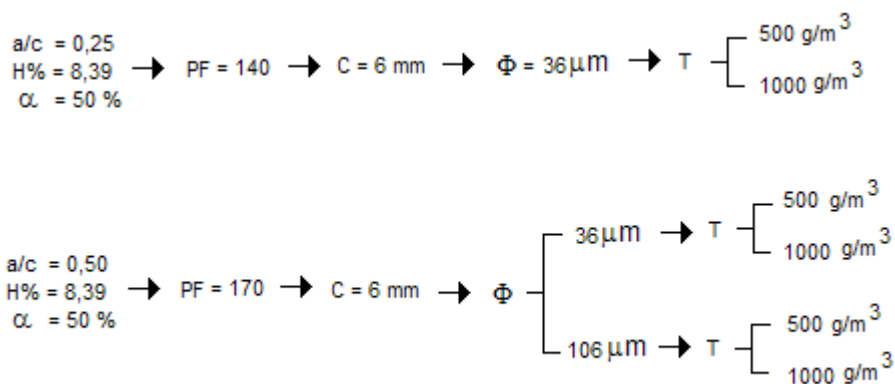
**Figura A.3** Combinações das variáveis da Segunda Etapa (A) (16 combinações para cada concreto)

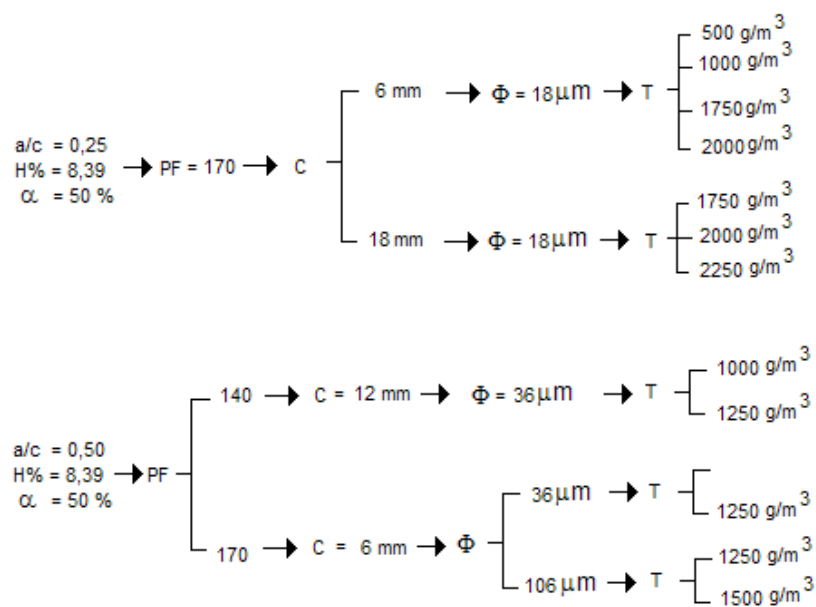




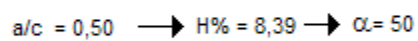
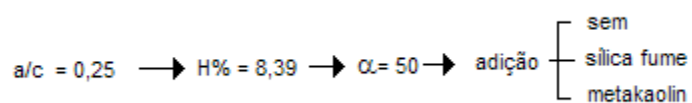


**Figura A.4** Combinações das variáveis da Segunda Etapa (B) (6 combinações)



**Figura A.5** Combinações das variáveis da Segunda Etapa (C) (13 combinações)**Figura A.6** Combinações das variáveis da Terceira Etapa (sem fibras)

[CP= 40x80x15cm]



## **Apêndice B**

### **Tabelas**

**Tabela B.1** – Estatísticas descritivas para grupo (Primeira Etapa (A))

grupo	a/c	H%	alfa %	RH%	N	Média (%)	Mediana (%)	Desvio Padrão (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
1	0,25	6,00	50	0,55	4	0,04	0,03	0,03	0,01	0,08
2	0,25	6,00	50	0,75	4	18,11	17,71	20,86	0,00	37,01
3	0,25	6,00	50	1,00	3	24,91	32,70	20,14	2,04	39,99
4	0,25	6,00	60	0,55	4	6,81	1,07	12,24	0,00	25,10
5	0,25	6,00	60	0,75	4	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03
6	0,25	6,00	60	1,00	4	18,26	18,04	20,79	0,15	36,81
7	0,25	8,39	50	0,55	4	1,21	0,24	2,11	0,00	4,37
8	0,25	8,39	50	0,75	4	15,64	15,62	17,38	0,21	31,11
9	0,25	8,39	50	1,00	4	7,86	1,36	13,80	0,18	28,53
10	0,25	8,39	60	0,55	4	0,15	0,10	0,13	0,06	0,33
11	0,25	8,39	60	0,75	4	7,83	0,35	15,13	0,09	30,52
12	0,25	8,39	60	1,00	4	8,73	2,42	14,02	0,43	29,66
13	0,35	8,39	50	0,55	4	0,04	0,03	0,03	0,02	0,09
14	0,35	8,39	50	0,75	4	0,04	0,03	0,04	0,00	0,08
15	0,35	8,39	50	1,00	3	10,12	1,25	15,96	0,57	28,55
16	0,35	8,39	60	0,55	4	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
17	0,35	8,39	60	0,75	4	0,05	0,02	0,08	0,00	0,16
18	0,35	8,39	60	1,00	3	0,35	0,27	0,13	0,27	0,50
19	0,35	11,99	50	0,55	4	0,33	0,17	0,42	0,01	0,95
20	0,35	11,99	50	0,75	4	1,91	0,14	3,64	0,00	7,36
21	0,35	11,99	50	1,00	4	0,94	0,54	0,95	0,32	2,34
22	0,35	11,99	60	0,55	4	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
23	0,35	11,99	60	0,75	4	0,05	0,04	0,05	0,01	0,12
24	0,35	11,99	60	1,00	3	2,42	2,68	0,60	1,73	2,85
25	0,5	8,39	50	0,55	4	0,31	0,24	0,36	0,01	0,74
26	0,5	8,39	50	0,75	4	0,18	0,14	0,21	0,00	0,44
27	0,5	8,39	50	1,00	4	1,14	1,09	0,60	0,62	1,78
28	0,5	8,39	60	0,55	4	0,05	0,05	0,04	0,01	0,08
29	0,5	8,39	60	0,75	4	0,01	0,00	0,02	0,00	0,03
30	0,5	8,39	60	1,00	4	0,40	0,47	0,23	0,07	0,57
31	0,5	11,99	50	0,55	4	0,11	0,05	0,16	0,00	0,34
32	0,5	11,99	50	0,75	4	0,11	0,00	0,23	0,00	0,45
33	0,5	11,99	50	1,00	4	1,21	1,10	0,84	0,48	2,15
34	0,5	11,99	60	0,55	4	0,21	0,19	0,18	0,02	0,46
35	0,5	11,99	60	0,75	4	0,11	0,01	0,22	0,00	0,44
36	0,5	11,99	60	1,00	4	1,29	1,33	0,65	0,46	2,05

**Tabela B.2 – Estatísticas descritivas para as variáveis da Primeira Etapa (A)**

% Volume Lascado	a/c			H%			alfa%		RH%		
	0,25	0,35	0,5	6,00	8,39	11,99	50	60	55	75	100
<b>N</b>	47	45	48	23	70	47	70	70	48	48	44
<b>média</b>	8,79	1,16	0,43	10,77	2,94	0,69	4,31	2,63	0,77	3,67	6,20
<b>mediana</b>	0,37	0,06	0,19	0,11	0,14	0,21	0,30	0,09	0,03	0,03	1,19
<b>desvio padrão</b>	14,35	4,36	0,59	16,36	8,31	1,27	10,50	8,20	3,65	10,15	12,00
<b>mínimo</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
<b>máximo</b>	39,99	28,55	2,15	39,99	31,11	7,36	39,99	36,81	25,10	37,01	39,99

**Tabela B.3 – Estatísticas descritivas para grupo (Primeira Etapa (B))**

grupo	a/c	H%	alfa%	RH%	Dmax	N	Média (%)	Mediana (%)	Desvio Padrão (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
1	0,35	11,99	50	100	9,5	4	12,57	4,55	18,44	1,26	39,93
2	0,35	11,99	50	100	19	4	0,94	0,54	0,95	0,32	2,34
3	0,35	11,99	50	100	32	4	0,41	0,41	0,24	0,12	0,71
4	0,35	8,39	50	100	9,5	4	13,03	1,63	23,10	1,19	47,69
5	0,35	8,39	50	100	19	4	15,62	14,90	17,05	0,57	32,10
6	0,35	8,39	50	100	32	4	1,46	1,06	1,37	0,30	3,41
7	0,50	11,99	50	100	9,5	4	5,28	4,68	2,04	3,67	8,09
8	0,50	11,99	50	100	19	4	1,21	1,10	0,84	0,48	2,15
9	0,50	11,99	50	100	32	4	0,85	0,81	0,16	0,72	1,07
10	0,50	8,39	50	100	9,5	4	9,31	2,06	15,93	0,00	33,13
11	0,50	8,39	50	100	19	4	1,14	1,08	0,60	0,62	1,78
12	0,50	8,39	50	100	32	4	0,42	0,35	0,31	0,13	0,86

**Tabela B.4 – Estatísticas descritivas para as variáveis da Primeira Etapa (B)**

% Volume Lascado	Brita (mm)			a/c		H%	
	9,5	19	32	0,35	0,5	8,39	11,99
<b>N</b>	16	16	16	24	24	24	24
<b>média</b>	10,05	4,73	0,79	7,34	3,04	6,83	3,54
<b>mediana</b>	3,46	0,95	0,72	1,26	0,89	1,22	0,99
<b>desvio padrão</b>	15,38	10,04	0,78	14,00	6,69	13,41	8,06
<b>mínimo</b>	0,00	0,32	0,12	0,12	0,00	0,00	0,12
<b>máximo</b>	47,69	32,10	3,41	47,69	33,13	47,69	39,93

**Tabela B.5 – Estatísticas descritivas para grupo (Segunda Etapa)**

grupo	a/c	H%	alfa%	Teor (g/m3)	C (mm)	Diâmetro fibra (mm)	PF (oC)	N	Média (%)	Mediana (%)	Desvio Padrão (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
1	0,25	8,39	50	500	6	36	140	4	8,39	0,17	16,56	0,00	33,23
2	0,25	8,39	50	500	18	18	170	4	0,17	0,07	0,25	0,01	0,54
3	0,25	8,39	50	750	6	18	140	4	0,04	0,04	0,03	0,01	0,07
4	0,25	8,39	50	750	6	18	170	4	0,03	0,03	0,01	0,02	0,04
5	0,25	8,39	50	750	6	36	140	4	0,03	0,02	0,02	0,01	0,06
6	0,25	8,39	50	750	6	36	170	4	0,05	0,05	0,01	0,03	0,06
7	0,25	8,39	50	750	12	18	140	4	0,06	0,06	0,03	0,04	0,10
8	0,25	8,39	50	750	12	18	170	4	0,06	0,06	0,04	0,01	0,10
9	0,25	8,39	50	750	12	36	140	4	0,12	0,08	0,11	0,05	0,29
10	0,25	8,39	50	750	12	36	170	4	0,07	0,07	0,05	0,02	0,13
11	0,25	8,39	50	1000	6	36	140	4	0,24	0,03	0,42	0,02	0,87
12	0,25	8,39	50	1000	18	18	170	4	0,03	0,02	0,03	0,01	0,07
13	0,25	8,39	50	1500	6	18	140	4	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03
14	0,25	8,39	50	1500	6	18	170	6	0,02	0,02	0,02	0,00	0,05
15	0,25	8,39	50	1500	6	36	140	4	0,05	0,05	0,02	0,02	0,08
16	0,25	8,39	50	1500	6	36	170	4	0,02	0,02	0,01	0,00	0,03
17	0,25	8,39	50	1500	12	18	140	4	0,08	0,03	0,12	0,01	0,26
18	0,25	8,39	50	1500	12	18	170	4	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02
19	0,25	8,39	50	1500	12	36	140	4	0,07	0,03	0,09	0,02	0,20
20	0,25	8,39	50	1500	12	36	170	4	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
21	0,25	8,39	50	1750	6	18	170	4	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
22	0,25	8,39	50	1750	18	18	170	7	0,03	0,03	0,02	0,01	0,07
23	0,25	8,39	50	2000	6	18	170	4	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
24	0,25	8,39	50	2000	18	18	170	4	0,01	0,02	0,01	0,00	0,02
25	0,25	8,39	50	2250	6	18	170	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	0,50	8,39	50	500	6	36	170	7	0,02	0,01	0,03	0,00	0,09
27	0,50	8,39	50	500	6	106	170	7	0,31	0,01	0,75	0,00	2,00
28	0,50	8,39	50	600	6	36	170	4	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
29	0,50	8,39	50	750	6	18	140	4	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02
30	0,50	8,39	50	750	6	18	170	3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
31	0,50	8,39	50	750	6	36	140	4	0,02	0,03	0,02	0,00	0,04
32	0,50	8,39	50	750	6	36	170	6	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02
33	0,50	8,39	50	750	12	18	140	4	0,02	0,01	0,02	0,00	0,05
34	0,50	8,39	50	750	12	18	170	4	0,03	0,03	0,02	0,02	0,05
35	0,50	8,39	50	750	12	36	140	7	0,01	0,01	0,01	0,00	0,03
36	0,50	8,39	50	750	12	36	170	4	0,02	0,02	0,01	0,00	0,03
37	0,50	8,39	50	1000	6	36	170	7	0,01	0,00	0,01	0,00	0,04
38	0,50	8,39	50	1000	6	106	170	7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
39	0,50	8,39	50	1000	12	36	140	4	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
40	0,50	8,39	50	1250	6	36	170	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
41	0,50	8,39	50	1250	6	106	170	3	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02
42	0,50	8,39	50	1250	12	36	140	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
43	0,50	8,39	50	1500	6	18	140	4	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02
44	0,50	8,39	50	1500	6	18	170	4	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03
45	0,50	8,39	50	1500	6	36	140	4	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
46	0,50	8,39	50	1500	6	36	170	6	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02
47	0,50	8,39	50	1500	6	106	170	4	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
48	0,50	8,39	50	1500	12	18	140	4	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
49	0,50	8,39	50	1500	12	18	170	4	0,01	0,00	0,02	0,00	0,03
50	0,50	8,39	50	1500	12	36	140	7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
51	0,50	8,39	50	1500	12	36	170	4	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01

**Tabela B.6** – Estatísticas descritivas para as variáveis da Segunda Etapa

% Volume Lascado	a/c		Teor (g/m3)									
	0,25	0,5	0	500	600	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
<b>N</b>	109	128	8	22	4	68	26	11	75	11	8	4
<b>média</b>	0,64	0,06	4,50	1,66	0,00	0,03	0,04	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00
<b>mediana</b>	0,02	0,00	1,18	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
<b>desvio padrão</b>	4,17	0,28	9,73	7,06	0,01	0,04	0,17	0,01	0,04	0,02	0,01	0,00
<b>mínimo</b>	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>máximo</b>	33,23	2,00	28,53	33,23	0,01	0,29	0,87	0,02	0,26	0,07	0,02	0,00

% Volume Lascado	C (mm)				Diâmetro fibra (mm)				PF(oC)		
	0	6	12	18	0	18	36	106	0	140	170
<b>N</b>	8	132	78	19	8	96	112	21	8	86	143
<b>média</b>	4,50	0,29	0,03	0,06	4,50	0,03	0,33	0,11	4,50	0,43	0,03
<b>mediana</b>	1,18	0,01	0,01	0,02	1,18	0,02	0,01	0,00	1,18	0,02	0,01
<b>desvio padrão</b>	9,73	2,90	0,05	0,12	9,73	0,06	3,14	0,44	9,73	3,58	0,17
<b>mínimo</b>	0,18	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00
<b>máximo</b>	28,53	33,23	0,29	0,54	28,53	0,54	33,23	2,00	28,53	33,23	2,00

**Tabela B.7 – Estatísticas descritivas para grupo (Terceira Etapa)**

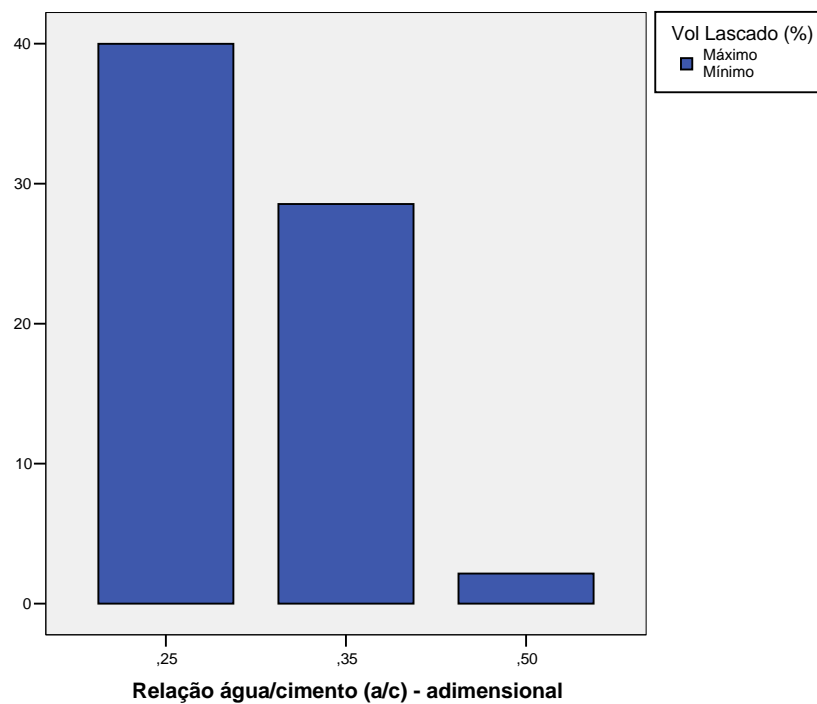
grupo	a/c	H%	alfa%	adição	N	Média (%)	Mediana (%)	Desvio Padrão (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
1	0,25	8,39	50	sílica	2	4,79	4,79	0,00	4,79	4,79
2	0,25	8,39	50	metakaolin	2	3,96	3,96	0,00	3,96	3,96
3	0,25	8,39	50	Sem adição	2	3,61	3,61	0,00	3,61	3,61
4	0,5	8,39	50		2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

## **Apêndice C**

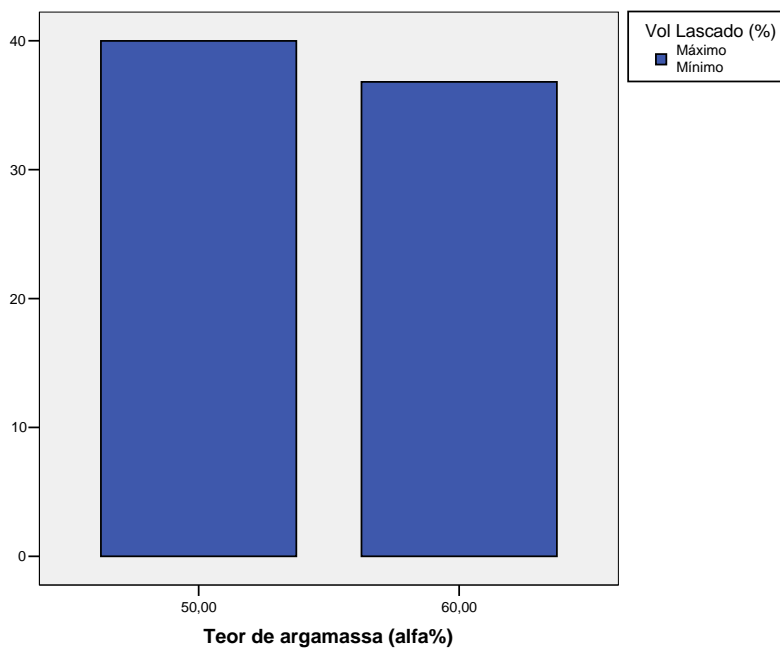
### **Gráficos**



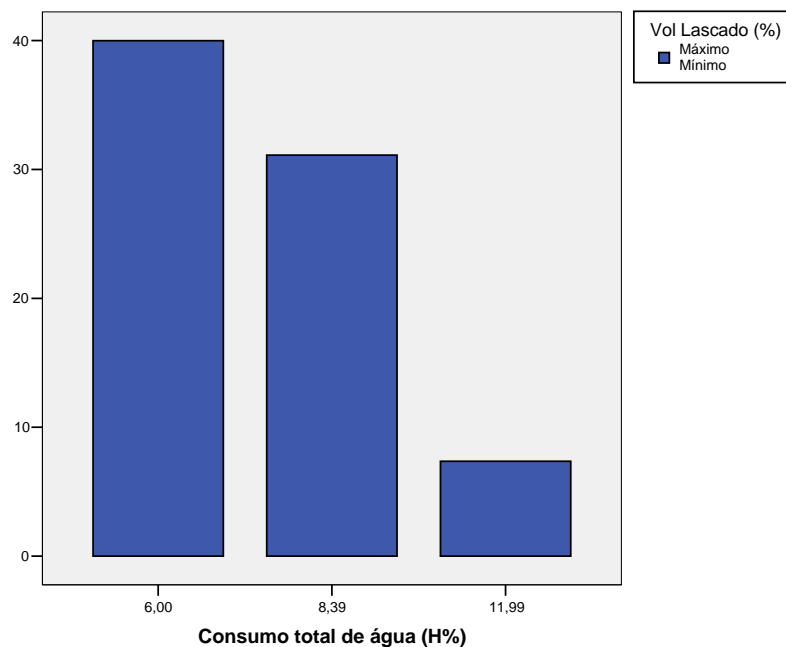
**Gráfico C.1 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por a/c (Primeira Etapa (A))**



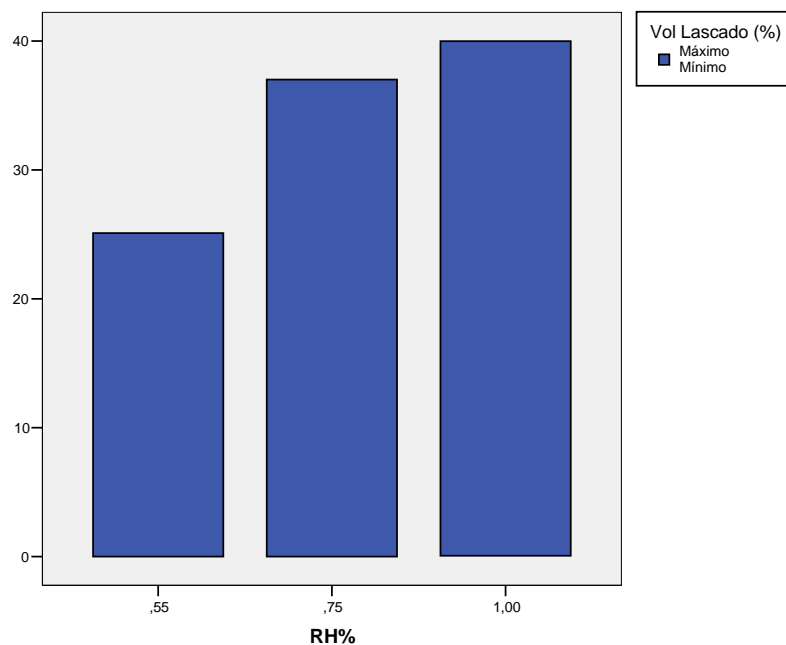
**Gráfico C.2 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por  $\alpha$ % (Primeira Etapa (A))**



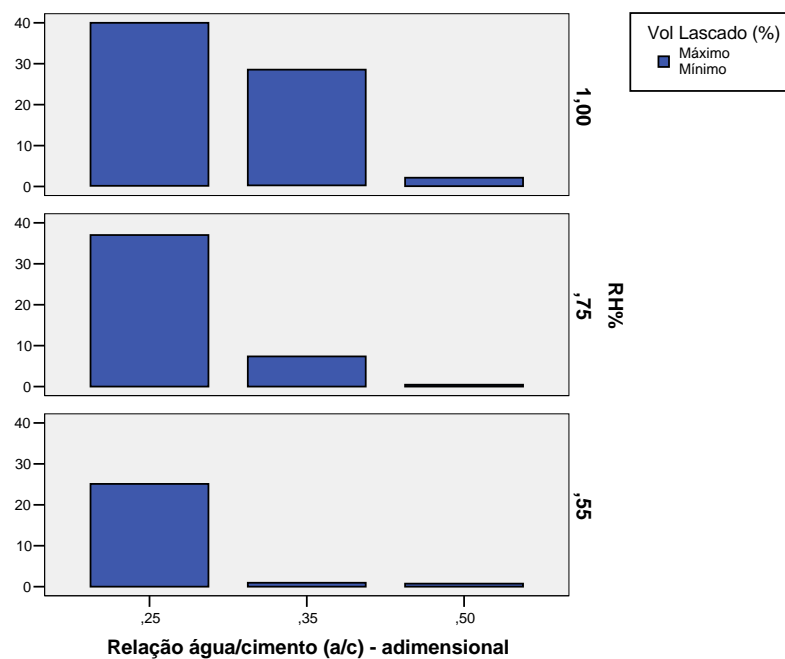
**Gráfico C.3 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por H% (Primeira Etapa (A))**



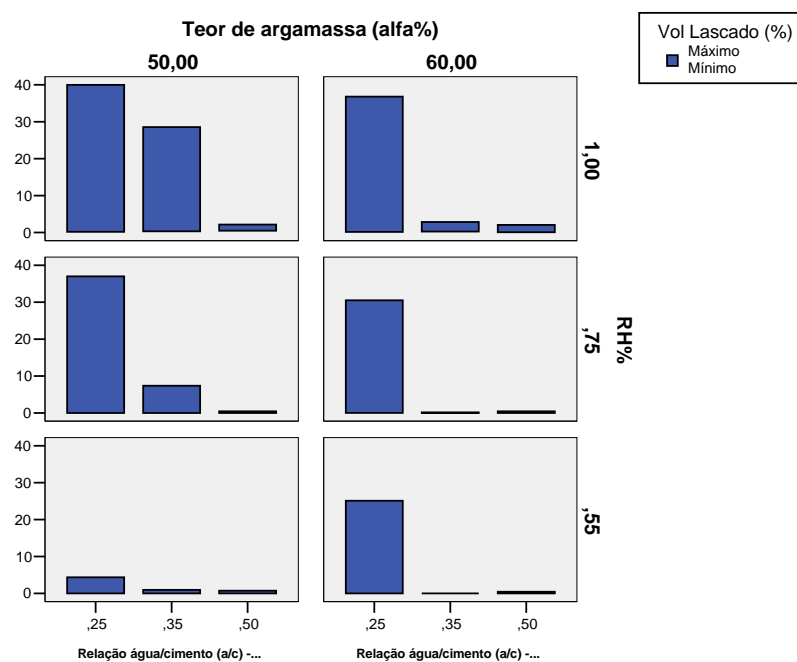
**Gráfico C.4 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por RH% (Primeira Etapa (A))**



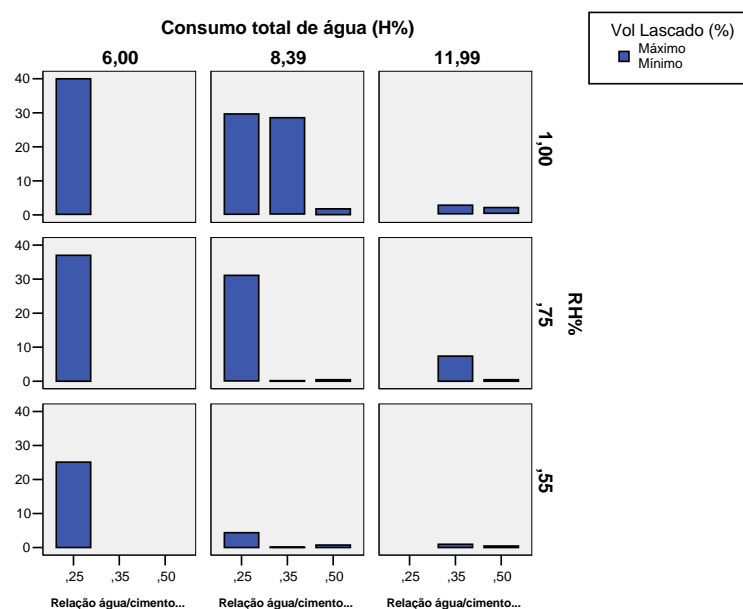
**Gráfico C.5 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por a/c e RH% (Primeira Etapa (A))**



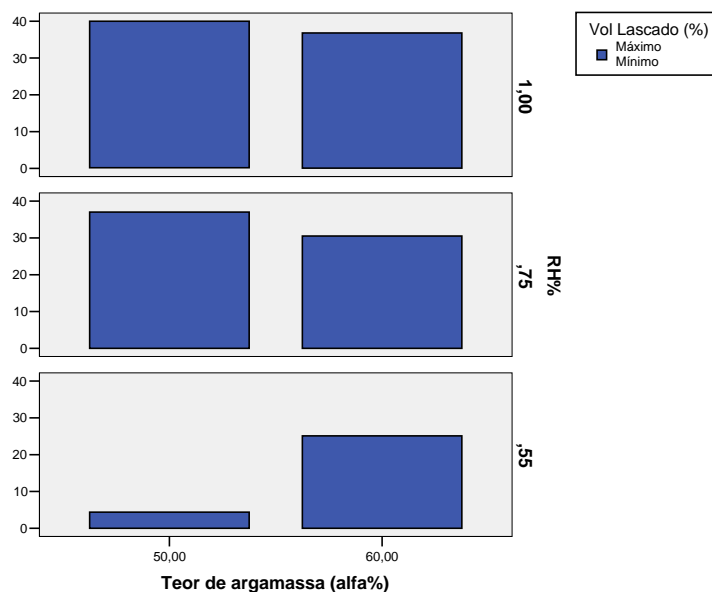
**Gráfico C.6 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por a/c,  $\alpha\%$  e RH% (Primeira Etapa (A))**



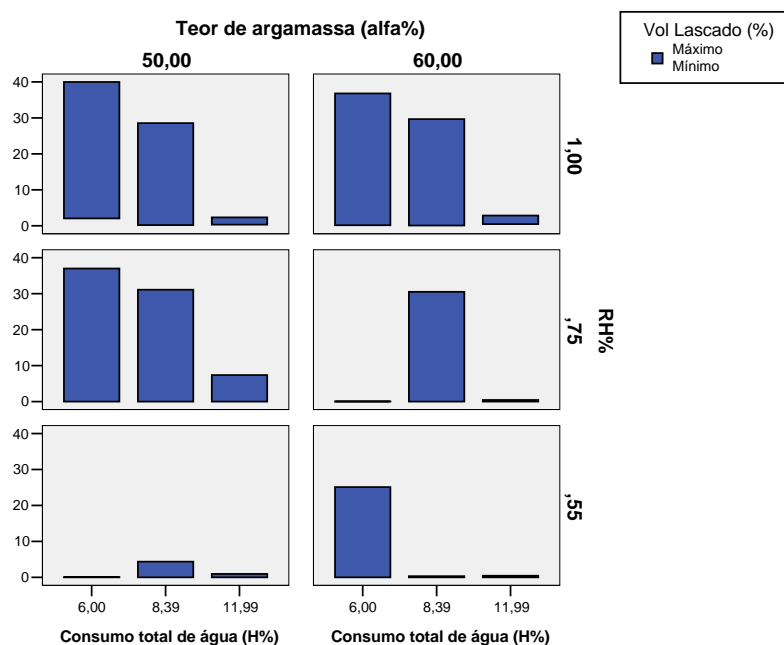
**Gráfico C.7 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por a/c, H% e RH% (Primeira Etapa (A))**



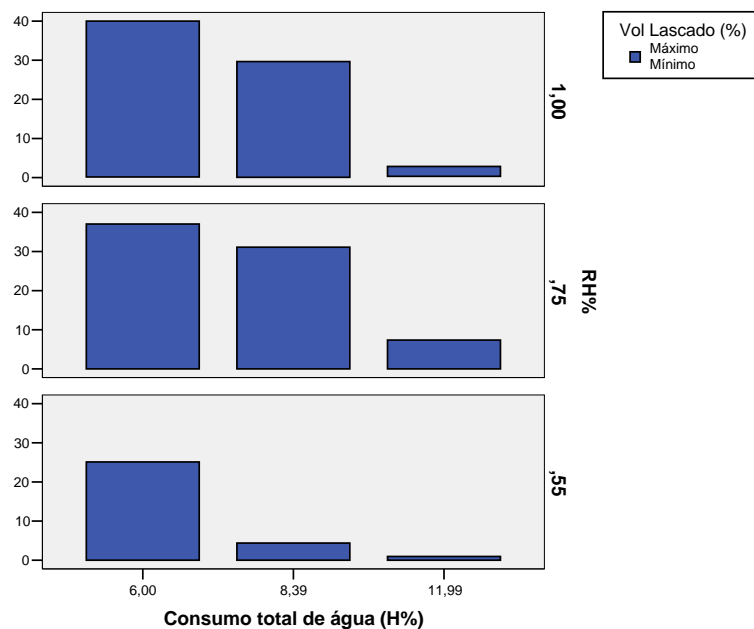
**Gráfico C.8 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por  $\alpha$ % e RH% (Primeira Etapa (A))**



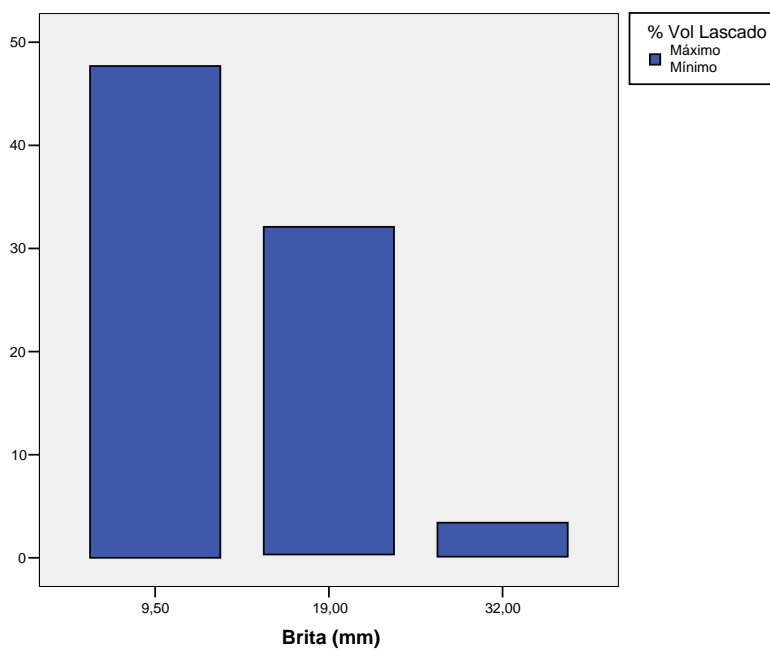
**Gráfico C.9 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por  $\alpha\%$ , H% e RH% (Primeira Etapa (A))**



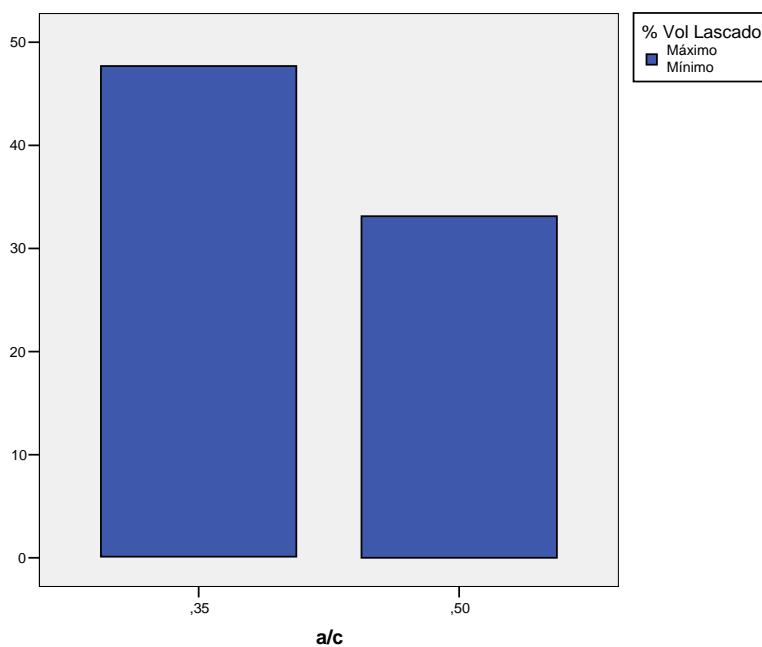
**Gráfico C.10 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por H% e RH% (Primeira Etapa (A))**



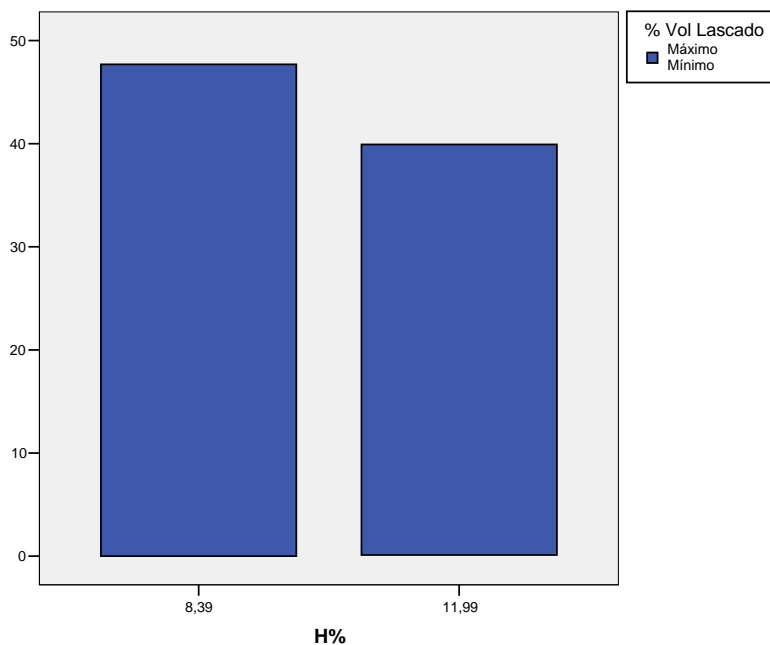
**Gráfico C.11 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por brita (Dmax)  
(Primeira Etapa (B))**



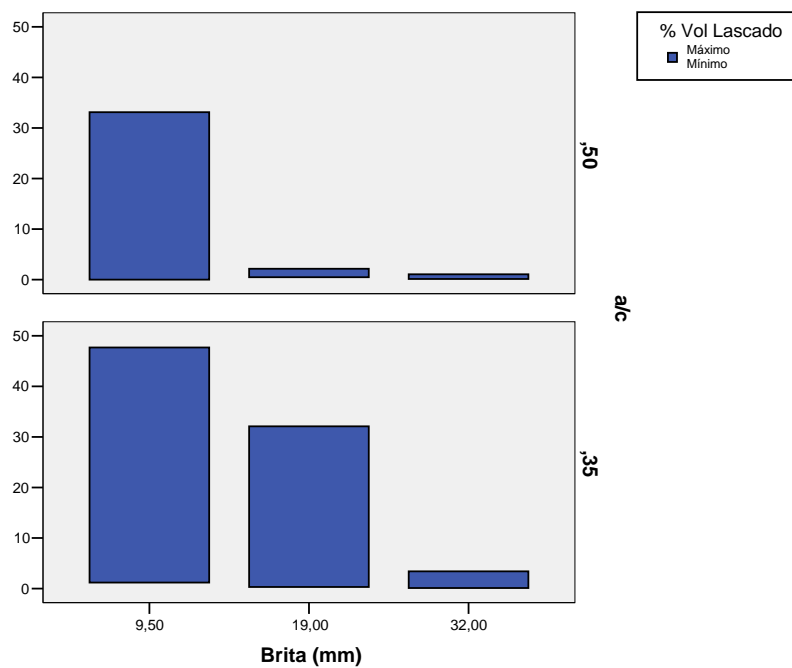
**Gráfico C.12 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por a/c  
(Primeira Etapa (B))**



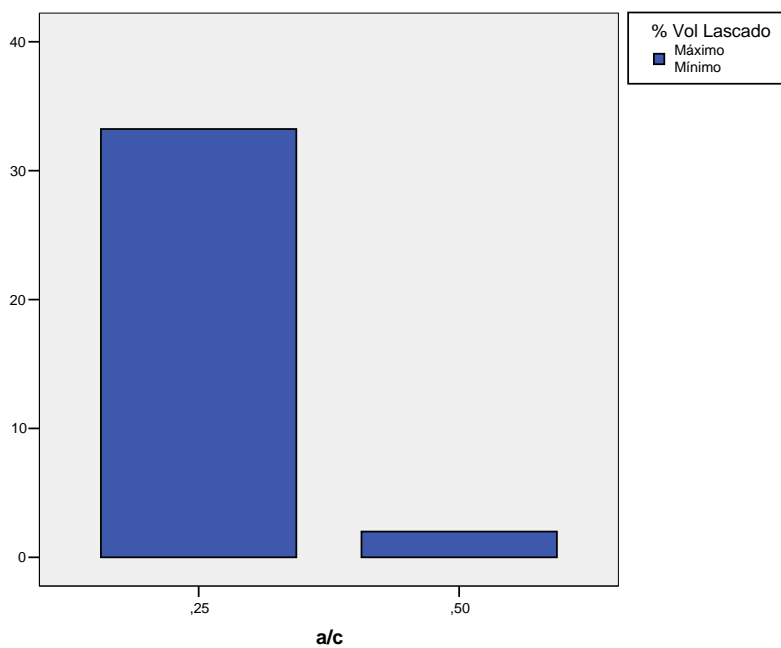
**Gráfico C.13 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por H% (Primeira Etapa (B))**



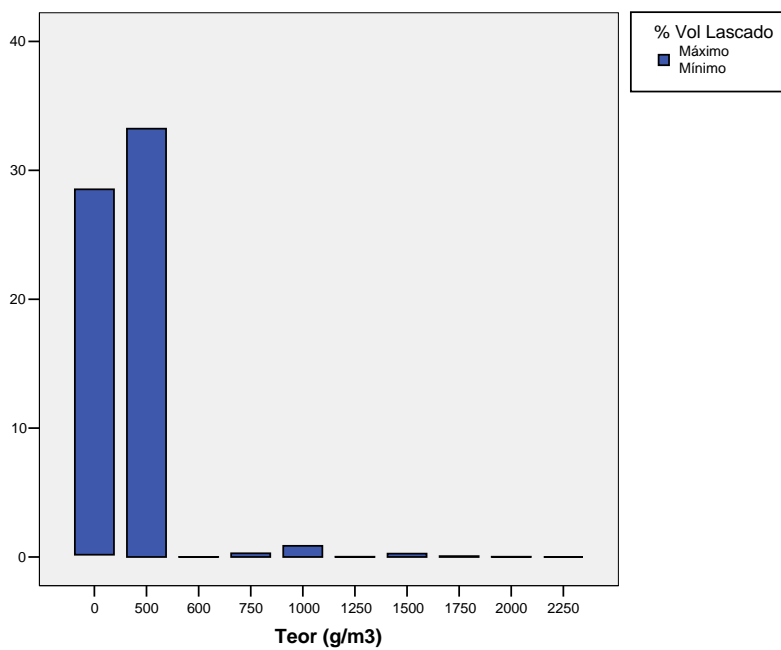
**Gráfico C.14 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por a/c e brita (Dmax) (Primeira Etapa (B))**



**Gráfico C.15 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por a/c**  
(Segunda Etapa)

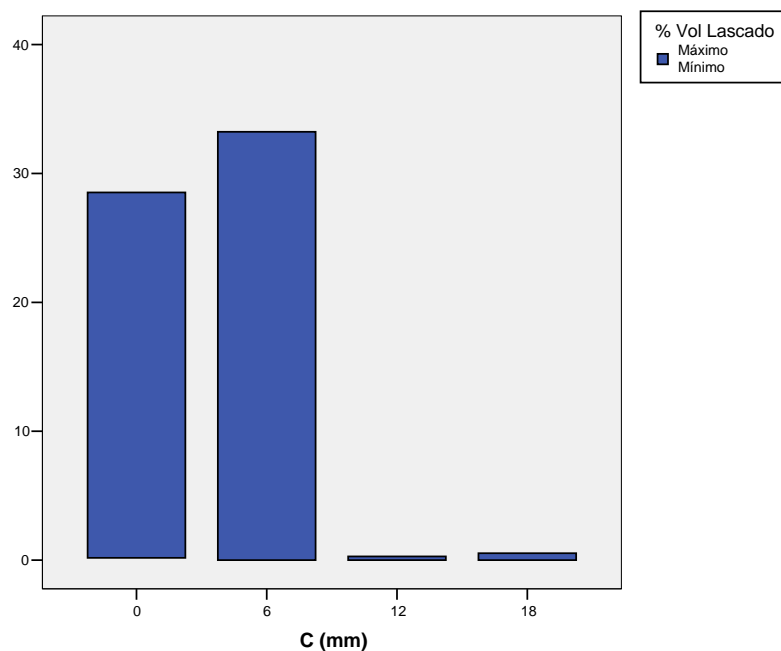


**Gráfico C.16 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por teor de fibra**  
(Segunda Etapa)

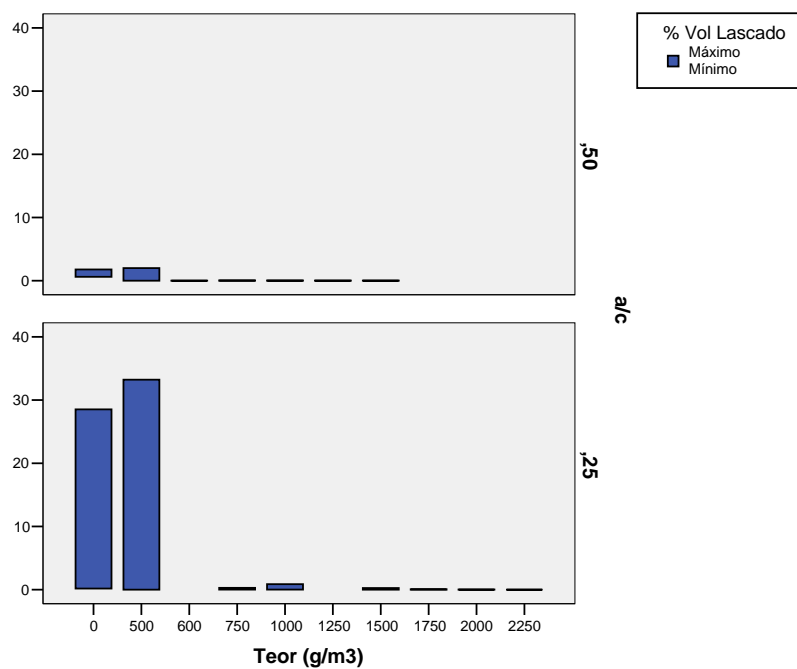




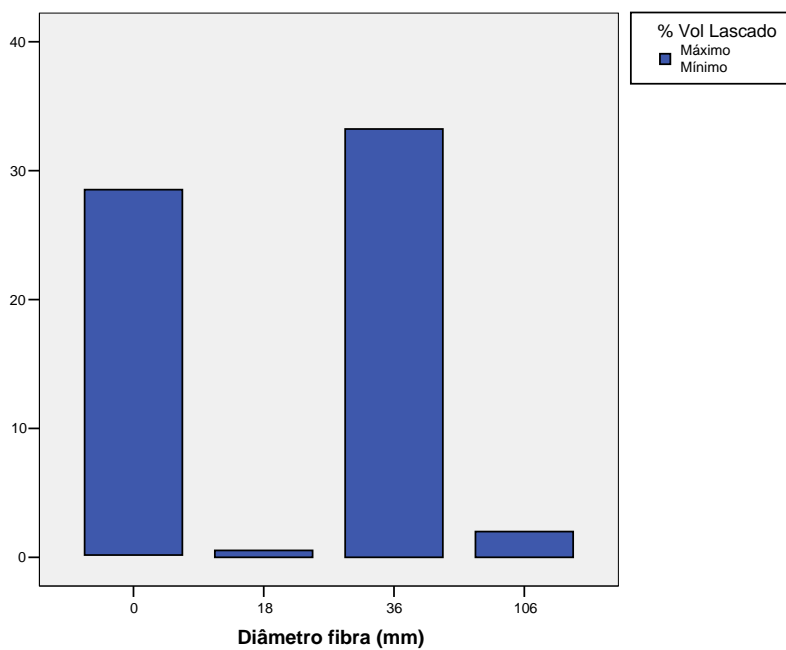
**Gráfico C.17 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por comprimento de fibra (Segunda Etapa)**



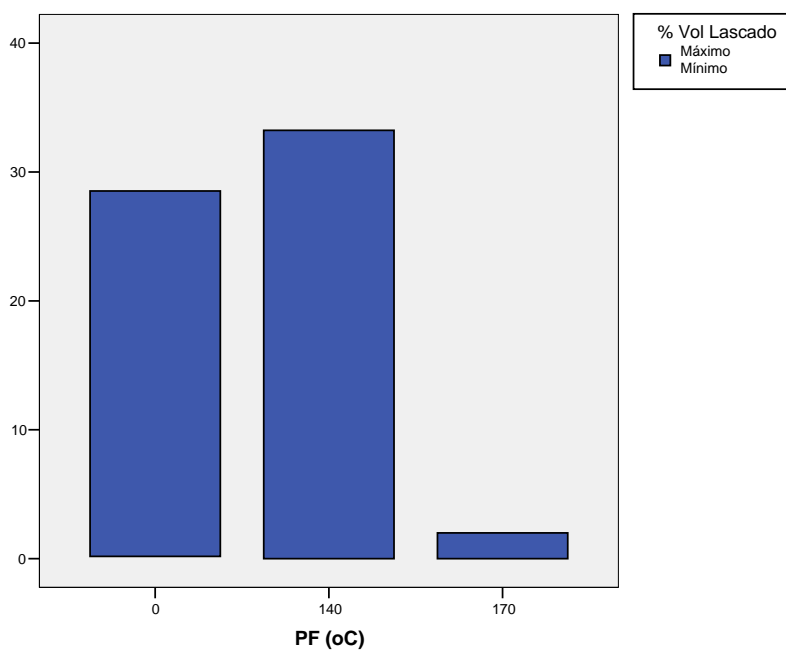
**Gráfico C.18 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por a/c e teor de fibra (Segunda Etapa)**



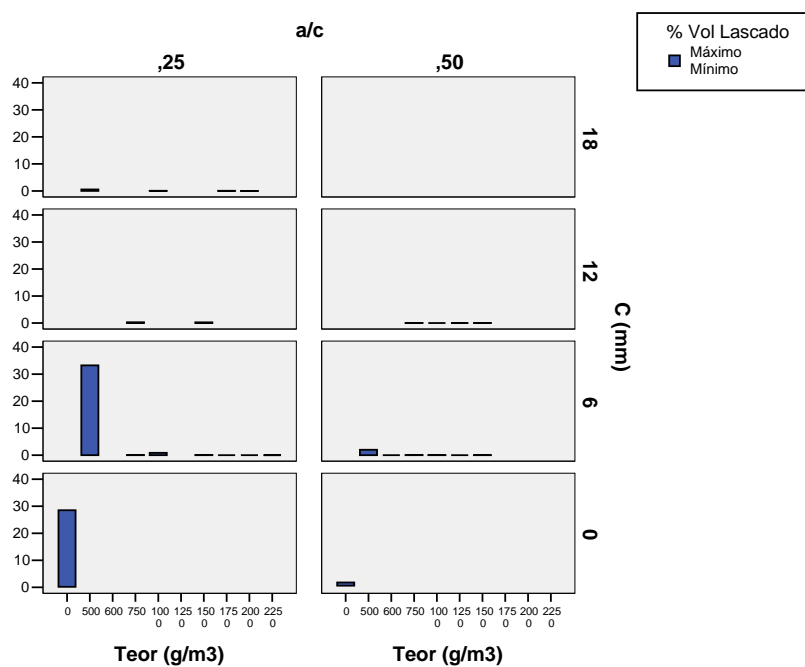
**Gráfico C.19** – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por diâmetro de fibra (Segunda Etapa)



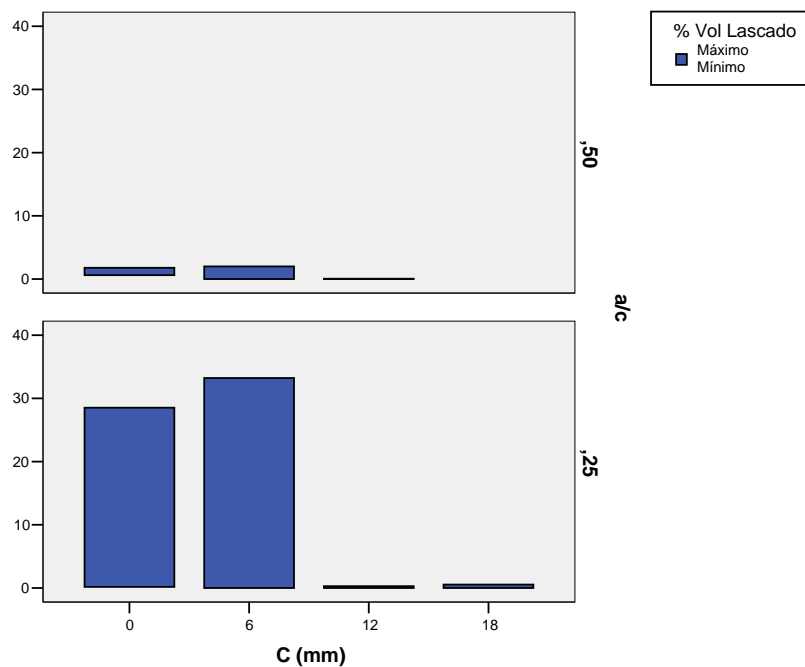
**Gráfico C.20** – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por Ponto de Fusão (Segunda Etapa)



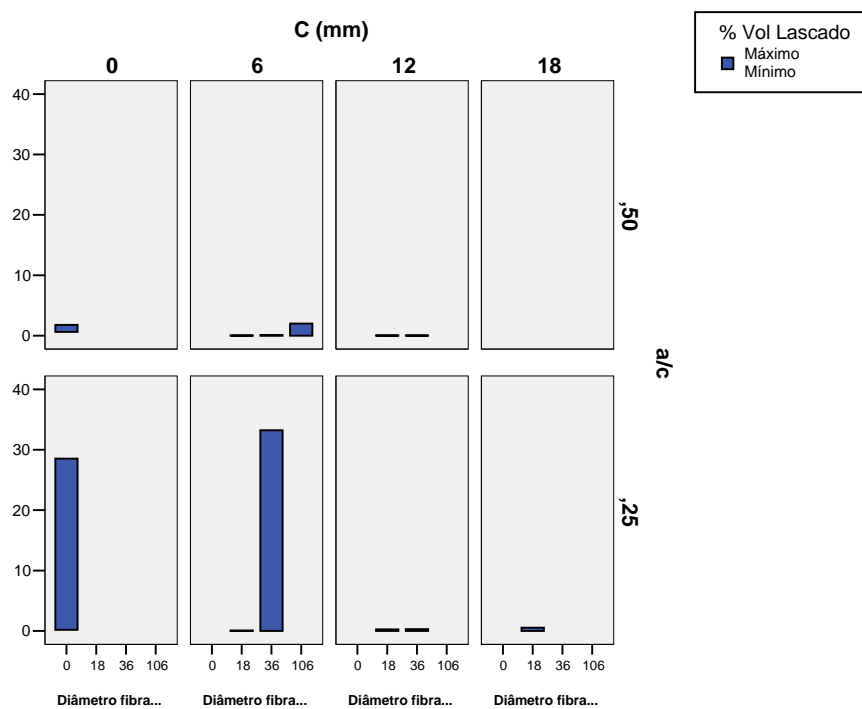
**Gráfico C.21** – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por a/c, comprimento e teor da fibra (Segunda Etapa)



**Gráfico C.22** – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por a/c e comprimento da fibra (Segunda Etapa)



**Gráfico C.23 – Mínimos e Máximos da % Volume Lascado por a/c e comprimento da fibra (Segunda Etapa)**



## **Apêndice D**

### **Inferência**

## Apêndice D.1 – Análise de Regressão e Diagnóstico para a Primeira Etapa (A)

Equação da Regressão:

score log-odds = 15,2 - 21,7 a/c - 0,235 alfa% + 26,2 RH%

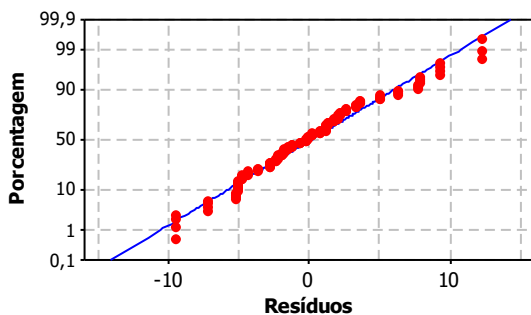
Preditores	Coef	Erro Padrão	T	P
Constante	15,163	4,873	3,11	0,002
a/c	-21,724	3,811	-5,70	0,000
alfa%	-0,23452	0,07903	-2,97	0,004
RH%	26,239	2,167	12,11	0,000

S = 4,67555     $R^2 = 57,7\%$      $R^2(\text{ajustado}) = 56,8\%$

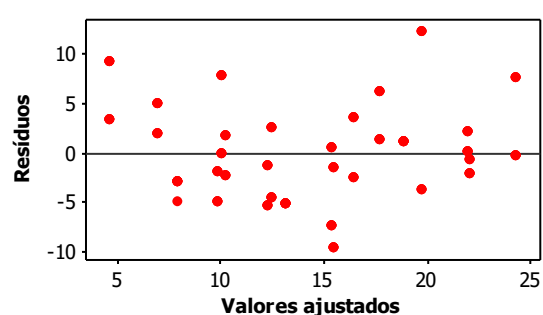
Análise de Variância

Fonte de Variação	g.l.	SQ	QM	F	P
Regressão	3	4057,7	1352,6	61,87	0,000
Erro Residual	136	2973,1	21,9		
Total	139	7030,8			

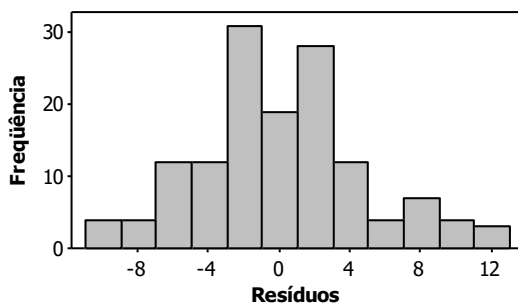
**Gráfico de probabilidade normal dos resíduos**



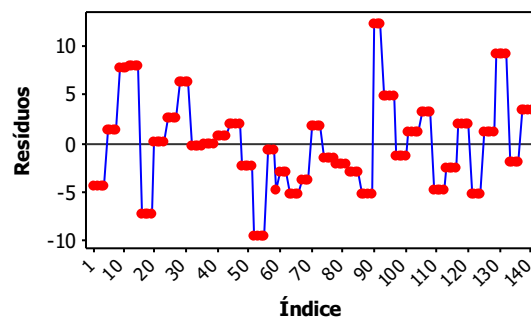
**Resíduos contra Valores ajustados**



**Histograma de Resíduos**



**Resíduos contra Índice**



## Apêndice D.2 – Análise de Regressão e Diagnóstico para a Primeira Etapa (B)

Equação da Regressão:

score log-odds = 37,8 - 21,1 a/c - 0,694 H% - 0,422 BRITA

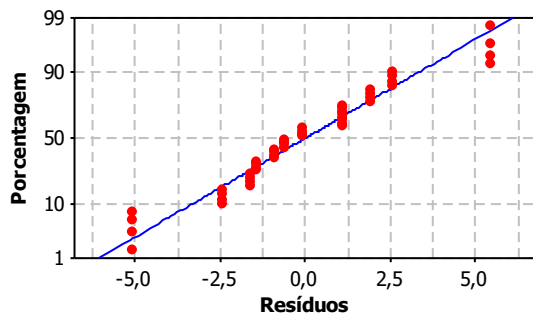
Preditores	Coef	Erro Padrão	T	P
Constante	37,814	3,243	11,66	0,000
a/c	-21,111	5,171	-4,08	0,000
H%	-0,6944	0,2155	-3,22	0,002
BRITA	-0,42227	0,04205	-10,04	0,000

S = 2,68695     $R^2 = 74,4\%$      $R^2(\text{ajustado}) = 72,7\%$

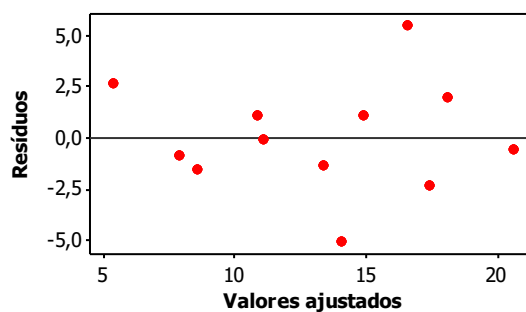
Análise de Variância

Fonte de Variação	g.l.	SQ	QM	F	P
Regressão	3	923,33	307,78	42,63	0,000
Erro Residual	44	317,67	7,22		
Total	47	1241,00			

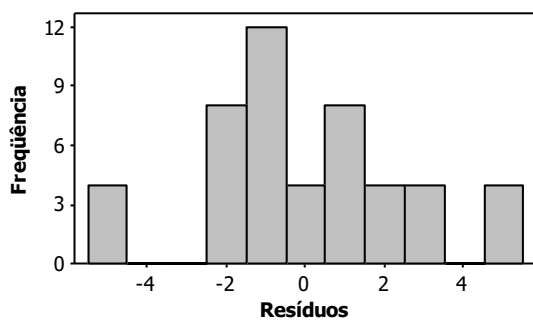
**Gráfico de probabilidade normal dos resíduos**



**Resíduos contra Valores ajustados**



**Histograma dos resíduos**



**Resíduos contra Índice**

