

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Bruno César Silva Gonçalves

**AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DE
TEOR DE LIGANTE E GRANULOMETRIA EM CONCRETOS
ASFÁLTICOS DE DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E
ORIGENS MINERALÓGICAS**

Santa Maria, RS
2017

Bruno César Silva Gonçalves

**AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DE TEOR DE
LIGANTE E GRANULOMETRIA EM CONCRETOS ASFÁLTICOS DE
DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E ORIGENS MINERALÓGICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**

Orientador: Prof. Dr. Deividi da Silva Pereira

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Gonçalves, Bruno César Silva
AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DE TEOR DE LIGANTE E GRANULOMETRIA EM CONCRETOS ASFÁLTICOS DE DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E ORIGENS MINERALÓGICAS / Bruno César Silva Gonçalves.- 2017.
200 p.; 30 cm

Orientador: Deividi da Silva Pereira
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2017

1. Misturas asfálticas 2. Controle tecnológico 3. Teor de ligante 4. Granulometria I. Pereira, Deividi da Silva II. Título.

Bruno César Silva Gonçalves

**AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DE TEOR DE
LIGANTE E GRANULOMETRIA EM CONCRETOS ASFÁLTICOS DE
DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E ORIGENS MINERALÓGICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**

Aprovado em 13 de julho de 2017:

Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)
(Orientador)

Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)

Liedi Légi Bariani Bernucci, Dr.^a (EPUSP)

Santa Maria, RS
2017

*So understand
Don't waste your time always searching for those wasted years
Face up, make your stand
And realize you're living in the golden years*

(Adrian Smith)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Rede Temática do Asfalto ANP/PETROBRAS pelo financiamento do projeto no qual possibilitou minha pesquisa e à CAPES e PPGEC/UFSM pela bolsa de estudos integral, possibilitando meu total foco na pesquisa.

Ao meu orientador, Deividi da Silva Pereira, por confiar na minha capacidade e me proporcionar uma das grandes oportunidades da minha vida, sempre me auxiliando nas mais diferentes etapas da pesquisa e fazendo com que eu rendesse além do que até eu mesmo achava que era capaz.

Ao professor Luciano Pivoto Specht que sempre se mostrou aberto às mais diversas conversas e discussões acerca do trabalho aqui apresentado, sempre trazendo ideias novas e entusiasmo sobre o tema.

A todo e qualquer membro do GEPPASV que tenha contribuído no meu crescimento como pesquisador e crescimento pessoal. Gostaria de agradecer pontualmente aos colegas de pós-graduação: o grande amigo Mateus Tanski, um irmão que a vida proporcionou desde a infância em Santana do Livramento; Mauricio Silveira dos Santos pela sua prontidão em sempre auxiliar desde os tempos de iniciação científica; Fábio Pereira Rossato que me ajudou ao adentrar no tema da pesquisa. Gostaria também de agradecer ao Eduardo Druzian e aos bolsistas de iniciação científica Gustavo Pinheiro e Bethania Correa que sempre se mostraram dispostos a ajudar.

Agradeço a minha família pelo apoio nessa caminhada. Devo agradecer eternamente a minha irmã Andréa, que mesmo sem querer me ensinou que a vida deve ser vivida em pleno pelos sãos de mente e corpo em justiça aos que dela não podem usufruir.

A minha família que meu coração me trouxe, Gabriela Meller, obrigado por todo o amor e apoio.

Agradeço a todos meus amigos que sempre apoiaram a minha decisão e sempre se mostraram contentes com a minha caminhada, mesmo que eu me encontrasse recluso pelo tempo dedicado a esta pesquisa.

RESUMO

AValiação DOS PROCEDIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DE TEOR DE LIGANTE E GRANULOMETRIA EM CONCRETOS ASFÁLTICOS DE DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E ORIGENS MINERALÓGICAS

AUTORIA: Bruno César Silva Gonçalves

ORIENTADOR: Deividi da Silva Pereira

A averiguação de teor de ligante e granulometria de misturas asfálticas são de suma importância no controle tecnológico do processo construtivo. Esses garantem um bom desempenho do pavimento em sua vida útil. Para obtenção de teor de ligante é realizado, entre outros, o ensaio de extração de betume normatizado na DNER ME 053/94, que é um ensaio de baixo custo e de procedimento simples. Vêm-se destacando atualmente uma alternativa de maior precisão, o método da ignição, ainda sem norma brasileira vigente, com normas norte-americanas ASTM D 6307:2010 onde são utilizados fornos de ignição. A análise granulométrica tem norma brasileira DNER-ME 083/98, podendo ser realizada com amostras finais de extração de ligante. Foram utilizadas rochas de diferentes origens mineralógicas do Rio Grande do Sul. Utilizou-se CAP 50-70 para as misturas em todas as rochas, além de uma utilizando AMP 60/85. Para cada uma das 6 rochas, foram confeccionadas 30 amostras para o método da ignição e 30 amostras para a extração com a centrífuga, utilizando duas faixas granulométricas, B e C do DNIT, com 15 amostras para cada faixa, sendo 5 para cada variação de teor de ligante: um traço com teor de projeto e mais 2 traços com maior e menor quantidade de ligante em relação ao projetado. Após cada extração, foi realizada a análise granulométrica de cada amostra. O forno de ignição por convecção apresentou bons resultados nas suas duas metodologias normatizadas, A e B. O fator de calibração utilizado foi confirmado como parte fundamental para garantia da acurácia de seus resultados com a metodologia vigente, sendo esse fator C_F uma compensação da perda de massa do agregado durante o processo de queima da amostra no forno, onde cada agregado possui uma distinta necessidade de correção devido a diferenças mineralógicas. Foi indicada na pesquisa uma alternativa para a metodologia atual, composta por equações obtidas por regressão linear dos dados brutos de teor de ligante do forno de ignição, independentemente então da fase de calibração. Os resultados de teor de ligante e granulometria mostraram maior dependência da origem mineralógica do agregado utilizado na mistura. As amostras com CAP 50-70 e AMP 60/85 diferenciaram-se nos valores de C_F nos dados do forno, com valores menores que os das misturas com o ligante convencional. No caso da centrífuga, as misturas com AMP 60/85 mostraram queda na eficiência em comparação ao CAP 50-70. Os dados do forno de ignição mostraram boa resposta frente a variações de teor de ligante nas misturas, respeitando o limite de variação de teor de ligante de 0,3% e muito próximas ao valor de projeto, assim como as curvas granulométricas, muito próximas à curva de projeto e dentro da faixa de trabalho. Os dados de obtenção de teor de ligante com a centrífuga não apresentaram boa resposta nas diferentes variações das misturas impostas na pesquisa, com baixa acurácia e também baixa precisão. A extração incompleta do ligante da centrífuga provocou alteração direta nos dados de teor de ligante e distorção nas curvas granulométricas proporcionadas pelas amostras pós-extração. Nos dados da centrífuga também não foram constatados padrões ou resultados que apontem a absorção como fator preponderante nos dados de teor de ligante e granulometria. A variação de teor de ligante nas misturas teve grande influência nos dados de obtenção de teor de ligante e granulometria da centrífuga: misturas com baixo teor de ligante apontaram valores acima do teor de projeto e misturas com adição de ligante apresentaram resultados abaixo do teor de projeto. O forno de ignição é indicado como uma ótima alternativa ao método que utiliza a centrífuga por ter apresentado dados com elevada acurácia e precisão na obtenção de teor de ligante e análise granulométrica.

Palavras-chave: Misturas asfálticas; Controle tecnológico; Teor de ligante; Granulometria.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF THE PROCEDURES FOR DETERMINATION OF THE BINDER CONTENT AND GRANULOMETRY IN ASPHALT CONCRETE WITH DIFFERENT PARTICLE SIZES AND MINERALOGICAL ORIGIN

AUTHOR: Bruno César Silva Gonçalves
ADVISOR: Deividi da Silva Pereira

The verification of binder content and granulometry of asphalt mixtures are of great importance in the technological control of the construction process. These ensure a good performance of the pavement in its useful life. In order to obtain the binder content, the bitumen extraction test standard DNER ME 053/94, which is a low cost and simple procedure, is carried out. A more accurate alternative is the ignition method, with no current brazilian standard, with american standards ASTM D 6307:2010 where ignition furnaces are used. The granulometric analysis has the brazilian standard DNER-ME 083/98, and can be carried out with final samples of binder extraction. Rocks of different mineralogical origins of Rio Grande do Sul were used. CAP 50-70 was used for the mixtures in all the rocks, besides one using PMB 60/85. For each one of the 6 rocks, 30 samples were prepared for the ignition method and 30 samples for the centrifugal extraction using two DNIT granulometric ranges, B and C, with 15 samples for each range, 5 for each variation of binder content: a trace with design content and 2 more traces with greater and lesser amount of binder in relation to the designed. After each extraction, the granulometric analysis of each sample was performed. The convection ignition furnace presented good results in its two standardized methodologies, A and B. The calibration factor used was confirmed as a fundamental part to guarantee the accuracy of its results with the current methodology. The C_F factor compensates the loss of mass of the aggregate during the process of burning the sample in the furnace, where each aggregate has a distinct need for correction due to mineralogical differences. It was indicated in the research an alternative to the current methodology, composed of equations obtained by linear regression of the raw data of binder content of the ignition furnace, being independent of the calibration phase. The results of binder content and granulometry showed greater dependence of the mineralogical origin of the aggregate used in the mixture. Samples with CAP 50-70 and AMP 60/85 differed in the C_F values in the oven data, with values lower than those of the mixtures with the conventional binder. In the case of the centrifuge, mixtures with AMP 60/85 showed a drop in efficiency compared to CAP 50-70. The ignition furnace data showed good response to variations in binder content in the mixes. The binder content obtained with the centrifuge did not present a good response in the different variations of the mixtures imposed on the research, with low accuracy and also low precision. Incomplete extraction of the binder from the centrifuge caused a direct change in the binder content and distortion in the grain size curves provided by the post-extraction samples. In the data of the centrifuge neither patterns nor results were observed that point to the absorption as a preponderant factor in the data of binder content and granulometry. The variation of binder content in the mixtures had a great influence on the data obtained in binder content and granulometry of the centrifuge: mixtures with low binder content showed values above the design content and mixtures with binder addition presented results below the design content. The ignition furnace is indicated as a great alternative to the method that uses the centrifuge because it presented data with high accuracy and precision in obtaining binder content and granulometric analysis.

Keywords: Asphalt mixtures; Quality Control; Binder content; Granulometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Classificação dos Agregados.....	28
Figura 1.2 - Ciclo de formação das tochas.....	28
Figura 1.3 – Curvas Granulométricas.....	32
Figura 1.4 – Parâmetros volumétricos: Vv, VAM, teor efetivo e massas específicas	38
Figura 1.5 - Províncias geomorfológicas do estado do Rio Grande do Sul.....	45
Figura 1.6 – Forno de ignição por convecção NCAT.....	57
Figura 1.7 – Forno de ignição por convecção NCAT - esquemático.....	57
Figura 1.8 – Aparelho extrator Rotarex.....	65
Figura 1.9 – Centrífuga Rotarex – descrição das peças.....	66
Figura 1.10 – Centrífuga Rotarex – especificações de norma.....	66
Figura 2.1 – Localização das cidades de origem dos agregados da pesquisa.....	70
Figura 2.2 – Fluxograma de etapas para cada uma das rochas da pesquisa.....	72
Figura 2.3 – Composição granulométrica – Faixa B DNIT 031/2006 - ES.....	74
Figura 2.4 - Composição granulométrica – Faixa C DNIT 031/2006 - ES.....	74
Figura 2.5 - Gráfico Vv e RBV x Teor de ligante – St. Antônio da Patrulha - Faixa C.....	75
Figura 2.6 - Processo de mistura e coleta das amostras de uma mistura usinada ...	76
Figura 2.7 – Detalhes de instalação e equipamentos necessários para o ensaio com o forno de ignição.....	79
Figura 2.8 – Aferimento do “peso da amostra total”.....	82
Figura 2.9 – Preparação da amostra no Rotarex.....	82
Figura 3.1 – Médias dos teores de ligante – Faixa B.....	87
Figura 3.2 – Diferenças médias dos teores de ligante – Forno de Ignição – Faixa B	88
Figura 3.3 – Diferenças médias dos teores de ligante – Centrífuga – Faixa B.....	88
Figura 3.4 - Médias dos teores de ligante – Faixa C.....	91
Figura 3.5 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C.	92
Figura 3.6 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa C.....	92
Figura 3.7 – Amostras finais de extração de diferentes teores - centrífuga.....	93
Figura 3.8 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B.....	95
Figura 3.9 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B.....	95
Figura 3.10 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B.....	96
Figura 3.11 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B.....	96
Figura 3.12 Médias entre os teores - forno de ignição — Faixa C.....	97
Figura 3.13 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C.....	97
Figura 3.14 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C.....	98
Figura 3.15 Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C.....	98
Figura 3.16 - Médias dos teores de ligante – Faixa B.....	100
Figura 3.17 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição - Faixa B.....	101
Figura 3.18 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga - Faixa B.....	101
Figura 3.19 - Médias dos teores de ligante – Faixa C.....	103
Figura 3.20 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C.....	103

Figura 3.21 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa C.....	104
Figura 3.22 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B.....	105
Figura 3.23 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B.....	105
Figura 3.24 Médias entre os teores - centrífuga — Faixa B.....	106
Figura 3.25 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B.....	106
Figura 3.26 – Exemplos de material acumulado na peneira 3/8” de diferentes amostras - centrífuga.....	107
Figura 3.27 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C.....	108
Figura 3.28 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C.....	108
Figura 3.29 – Médias entre os teores - centrífuga– Faixa C.....	109
Figura 3.30 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C.....	109
Figura 3.31 - Médias dos teores de ligante – Faixa B.....	112
Figura 3.32 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa B.....	113
Figura 3.33 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa B.....	113
Figura 3.34 - Médias dos teores de ligante – Faixa C.....	114
Figura 3.35 - Diferenças médias dos teores de ligante e erro – forno de ignição - Faixa C.....	115
Figura 3.36 – Diferenças médias dos teores de ligante e erro – centrífuga - Faixa C.....	115
Figura 3.37 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B.....	116
Figura 3.38 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B.....	116
Figura 3.39 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B.....	118
Figura 3.40 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B.....	118
Figura 3.41 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C.....	119
Figura 3.42 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C.....	119
Figura 3.43 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C.....	120
Figura 3.44 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C.....	120
Figura 3.45 - Médias dos teores de ligante – Faixa B.....	123
Figura 3.46 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa B.....	123
Figura 3.47 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa B.....	124
Figura 3.48 - Médias dos teores de ligante – Faixa C.....	125
Figura 3.49 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C.....	125
Figura 3.50 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa C.....	126
Figura 3.51 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B.....	127
Figura 3.52 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B.....	127
Figura 3.53 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B.....	128
Figura 3.54 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B.....	128

Figura 3.55 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C	129
Figura 3.56 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C	129
Figura 3.57 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C	130
Figura 3.58 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C	130
Figura 3.59 - Médias dos teores de ligante – Faixa B	133
Figura 3.60 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa B	133
Figura 3.61 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa B.....	134
Figura 3.62 - Médias dos teores de ligante – Faixa C	135
Figura 3.63 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C	136
Figura 3.64 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga - Faixa C	136
Figura 3.65 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B	137
Figura 3.66 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B	137
Figura 3.67 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B.....	139
Figura 3.68 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B	139
Figura 3.69 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C	140
Figura 3.70 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C	140
Figura 3.71 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C	141
Figura 3.72 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C	141
Figura 3.73 - Médias dos teores de ligante – Faixa B	144
Figura 3.74 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa B	144
Figura 3.75 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa B.....	145
Figura 3.76 - Médias dos teores de ligante – Faixa C	146
Figura 3.77 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C	146
Figura 3.78 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa C	147
Figura 3.79 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B	148
Figura 3.80 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B	148
Figura 3.81 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B.....	149
Figura 3.82 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B	149
Figura 3.83 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C	151
Figura 3.84 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C	151
Figura 3.85 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C	152
Figura 3.86 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C	152
Figura 3.87 - Médias dos teores de ligante – Faixa B	154
Figura 3.88 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa B	154
Figura 3.89 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa B.....	155

Figura 3.90 - Médias dos teores de ligante – Faixa C	156
Figura 3.91 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C	156
Figura 3.92 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa C.....	157
Figura 3.93 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B.....	158
Figura 3.94 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B.....	158
Figura 3.95 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B	159
Figura 3.96 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B	159
Figura 3.97 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C	160
Figura 3.98 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C	160
Figura 3.99 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C.....	161
Figura 3.100 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C	162
Figura 3.101 – Ligante não queimado no ensaio de extração - forno de ignição....	164
Figura 3.102 – Exemplo de amostra com extração pouco eficiente - centrífuga	166
Figura 3.103 – Exemplo em escala de material acumulado	166
Figura 3.104 - Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos - forno de ignição – Faixa B	172
Figura 3.105 - Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos – centrífuga – Faixa B.....	173
Figura 3.106 – Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos - forno de ignição – Faixa C	174
Figura 3.107 – Médias entre amostras de teores máximos e mínimos – centrífuga – Faixa C	174
Figura 3.108 - Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos - forno de ignição – Faixa B	176
Figura 3.109 - Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos - centrífuga – Faixa B.....	176
Figura 3.110 – Médias entre amostras de teores máximos e mínimos - forno de ignição – Faixa C	177
Figura 3.111 - Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos - centrífuga – Faixa C	178
Figura 3.112 - Diferenças de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B...	180
Figura 3.113 - Diferenças de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C...	180
Figura 3.114 – Gráfico de médias de Teor real <i>versus</i> Teor sem correção (método A)	182
Figura 3.115 - Teor real <i>versus</i> Médias de teor com correção (método A).....	182
Figura 3.116 - Teor real <i>versus</i> Médias de teor sem correção (método B).....	183
Figura 3.117 - Teor real <i>versus</i> Médias de teor com correção (método B).....	183
Figura 3.118 - Teor real <i>versus</i> Médias de teor sem correção (centrífuga).....	184
Figura 3.119 – Resultados médios da equação 12 aplicada nos dados brutos do forno de ignição	185

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Dimensões Nominais das Peneiras.....	32
Tabela 1.2 – Província e cidades de produção de agregado utilizadas nesta pesquisa	46
Tabela 1.3 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração	48
Tabela 1.4 – Tamanho mínimo de amostra.....	59
Tabela 1.5 – Quadro indicativo de diferenças significativas (S) de agregados antes e após queima no forno de ignição e valores de C_F	63
Tabela 2.1 – Resumo das características de cada rocha da pesquisa	70
Tabela 2.2 - Ensaio utilizado para caracterização dos agregados.....	71
Tabela 2.3 – Quantidade de amostras	72
Tabela 2.4 – Caracterização dos ligantes	73
Tabela 2.5 – Determinação do teor pelo método de Ceratti e Reis (2011) - St. Antônio da Patrulha - Faixa C	75
Tabela 2.6 – Resumos dos dados de dosagem e calibração (CAP 50-70).....	75
Tabela 2.7 - Resumos dos dados de dosagem e calibração (AMP 60/85).....	75
Tabela 2.8 - Exemplo de granulometria entre CA's de diferentes teores usinados – Faixa B	77
Tabela 2.9 - Exemplo de granulometria entre CA's de diferentes teores usinados – Faixa C	77
Tabela 3.1 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração	86
Tabela 3.2 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa B	87
Tabela 3.3 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C	91
Tabela 3.4 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B	95
Tabela 3.5 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B.....	96
Tabela 3.6 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C	97
Tabela 3.7 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C.....	98
Tabela 3.8 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração	99
Tabela 3.9 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa B	100
Tabela 3.10 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C.....	102
Tabela 3.11 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B.....	104
Tabela 3.12– Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B	106
Tabela 3.13 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C	107
Tabela 3.14 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C.....	108
Tabela 3.15 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração .	110
Tabela 3.16 – Resumo dos dados de teor de ligante - Faixa B.....	112
Tabela 3.17 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C.....	114
Tabela 3.18 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B	116
Tabela 3.19 – Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B	117
Tabela 3.20 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C	118
Tabela 3.21 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C.....	119
Tabela 3.22 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração .	121
Tabela 3.23 – Resumo dos dados de teor de ligante - Faixa B.....	122
Tabela 3.24 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C.....	124
Tabela 3.25 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B	127
Tabela 3.26 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B.....	128
Tabela 3.27 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C	129

Tabela 3.28 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C	130
Tabela 3.29 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração	131
Tabela 3.30 – Resumo dos dados de teor de ligante - Faixa B	132
Tabela 3.31 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C	135
Tabela 3.32 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B.....	137
Tabela 3.33 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B	138
Tabela 3.34 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C.....	139
Tabela 3.35 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C	140
Tabela 3.36 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração	142
Tabela 3.37 – Resumo dos dados de teor de ligante - Faixa B	143
Tabela 3.38 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C	145
Tabela 3.39 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B.....	148
Tabela 3.40 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B	149
Tabela 3.41 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C.....	150
Tabela 3.42 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C	151
Tabela 3.43 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração	153
Tabela 3.44 – Resumo dos dados de teor de ligante - Faixa B	153
Tabela 3.45 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C	155
Tabela 3.46 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B.....	158
Tabela 3.47 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B	159
Tabela 3.48 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C.....	160
Tabela 3.49 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C	161
Tabela 3.50 - Análise de 2 amostras com teores de maior distinção entre 5 – Faixa B	172
Tabela 3.51 - Análise de 2 amostras com teores de maior distinção entre 5 - Faixa C	173
Tabela 3.52 – Análise de 2 amostras com teores de maior distinção entre 5 – Faixa B	175
Tabela 3.53 – Análise de 2 amostras com teores de maior distinção entre 5 – Faixa C	177
Tabela 3.54 – Extrações na centrífuga em diferentes temperaturas - Faixa B	179
Tabela 3.55 – Extrações na centrífuga em diferentes temperaturas - Faixa C	179
Tabela 3.56 – Granulometrias das amostras na faixa B	180
Tabela 3.57 - Granulometrias das amostras na faixa C.....	180
Tabela 3.58 – Equações obtidas com os dados médios de teor de ligante.....	181
Tabela 3.59 – Equação 12 aplicada a dados sem calibração de misturas com agregado de Dilermando de Aguiar	186

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
AASHTO	<i>American Association of Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMP	Asfalto modificado por polímero
ANTT	Agência nacional de transportes terrestres
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimentos Asfálticos de Petróleo
CBUQ	Cimento Betuminoso Usinado à Quente
C _F	Fator de calibração
CP	Corpo de prova
DMM	Densidade máxima medida
DMT	Densidade máxima teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisa em Pavimentação e Segurança Viária
G _m	Massa específica aparente
G _{mm}	Massa específica máxima medida
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
kg	Quilograma
kgf	Quilograma Força
m	Metros
mm	Milímetros
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
SBS	Estireno-butadieno-Estireno
OGFC	<i>Open Graded Friction Course</i>
P	Peso do betume extraído
RBV	Relação Betume Vazios
rpm	Rotações por minuto
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SSF	Segundo Faybolt-Furol
Superpave	<i>Superior Performing Asphalt Pavement System</i>
T _c	Compensação de temperatura
UFES	Universidade Federal de Santa Maria
VAM	Vazios do agregado mineral
V	Volume
V _v	Volume de vazios

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	23
OBJETIVO GERAL	24
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
1.1 AGREGADO E A MATRIZ PÉTREA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS	27
1.1.1 Natureza.....	27
1.1.2 Tamanho das partículas e graduação da mistura.....	31
1.1.3 Resistência à abrasão	33
1.1.4 Textura superficial.....	35
1.1.5 Forma das partículas.....	36
1.1.6 Absorção, densidade específica e massa específica.....	37
1.1.7 Adesividade.....	41
1.1.8 Sanidade.....	42
1.2 AGREGADOS ROCHOSOS DO RIO GRANDE DO SUL.....	44
1.3 O LIGANTE ASFÁLTICO.....	47
1.4 O REVESTIMENTO ASFÁLTICO.....	49
1.5 CONTROLE TECNOLÓGICO DE MISTURAS A QUENTE.....	51
1.6 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE LIGANTE	54
1.6.1 Método da Ignição	56
1.6.2 Método da Centrifugação.....	64
2 METODOLOGIA	69
2.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	69
2.2 DOSAGENS MARSHALL	73
2.3 MISTURA DAS AMOSTRAS	76
2.4 EXTRAÇÕES COM O FORNO DE IGNIÇÃO.....	77
2.5 EXTRAÇÕES COM A CENTRÍFUGA.....	80
2.6 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	82
3 RESUTADOS E ANÁLISES	85
3.1 PEDREIRA DE SANTO ANTÔNIO DA PATRULHA (BASALTO).....	86
3.1.1 Determinação do teor de ligante	86
3.1.2 Análise granulométrica	93
3.2 PEDREIRA DE ITAARA (RIODACITO)	99
3.2.1 Determinação do teor de ligante	99
3.2.2 Análise granulométrica	104
3.3 PEDREIRA DE SARANDI (BASALTO).....	109
3.3.1 Determinação do teor de ligante	110
3.3.2 Análise granulométrica	115
3.4 PEDREIRA DE CAÇAPAVA DO SUL (BASALTO).....	120
3.4.1 Determinação do teor de ligante	121
3.4.2 Análise granulométrica	126
3.5 PEDREIRA DE ELDORADO DO SUL (GRANITO)	131
3.5.1 Determinação do teor de ligante	131
3.5.2 Análise granulométrica	136
3.6 PEDREIRA DE PELOTAS (GRANITO)	141
3.6.1 Determinação do teor de ligante	142
3.6.2 Análise granulométrica	147
3.7 PEDREIRA DE SANTO ANTÔNIO DA PATRULHA (BASALTO) – AMP 60/85.....	152
3.7.1 Determinação do teor de ligante	153

3.7.2 Análise granulométrica.....	157
3.8 PARTICULARIDADES SOBRE O EMPREGO DO FORNO DE IGNIÇÃO ..	162
3.9 PARTICULARIDADES DO EMPREGO DA CENTRÍFUGA	165
3.10 EFICIÊNCIA COMPARATIVA DOS DISTINTOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO.....	167
3.11 INFLUÊNCIA DAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS NOS RESULTADOS DE EXTRAÇÃO E GRANULOMETRIA.....	167
3.12 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DAS ROCHAS NOS RESULTADOS DE EXTRAÇÃO E GRANULOMETRIA.....	168
3.13 INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE LIGANTE NOS RESULTADOS DE EXTRAÇÃO E GRANULOMETRIA.....	169
3.14 INFLUÊNCIA DA COLETA DAS AMOSTRAS EM LABORATÓRIO NOS RESULTADOS DE TEOR DE LIGANTE E GRANULOMETRIA.....	170
3.14.1 Exemplo de Santo Antônio da Patrulha	171
3.14.2 Exemplo de Itaara.....	175
3.15 TEMPERATURA DAS AMOSTRAS NO MÉTODO DA CENTRIFUGAÇÃO	178
3.16 REGRESSÕES LINEARES E EQUAÇÕES EMPÍRICAS	181
3.17 SÍNTESE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS.....	186
4 CONCLUSÕES	188
4.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	191
REFERÊNCIAS	193

INTRODUÇÃO

A determinação do teor de ligante e granulometria são processos de suma importância no controle tecnológico de misturas asfálticas, tanto de produção como na verificação de execuções. Uma falha no controle de teor de ligante asfáltico durante a usinagem pode decorrer em consequências severas, falhas de durabilidade e comportamento mecânico de uma obra rodoviária, tanto no caso de excesso como na falta de ligante. Assim como esses erros na quantidade de ligante somados a falhas na graduação em concretos asfálticos, em relação ao projetado, podem causar diversos problemas que acarretarão numa precocidade da vida útil do revestimento. Alguns exemplos de falha no controle do processo construtivo são: baixa estabilidade, baixa resistência ao trincamento por fadiga, corrugação, deformações plásticas, desagregações, baixo atrito pneu/pavimento, oxidação acelerada e permeabilidade excessiva. Uma correta graduação do concreto asfáltico também garante a rigidez, durabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e deformação permanente da mistura. Fica claro, então, que falhas no controle tecnológico afetam diretamente o conforto do usuário, segurança na via e durabilidade do revestimento.

O ensaio de extração de ligante utilizando centrífuga é um ensaio de baixo custo, procedimento simples e rápido e uma alternativa muito comum dentre os ensaios normatizados no Brasil. O ensaio utiliza um extrator centrífugo, conhecido como Rotarex. A acurácia de seus resultados tem-se indicada influenciável por diferentes fatores, como graduação da mistura e absorção da rocha utilizada como agregado mineral em pesquisas mais recentes.

O método de ignição para extração de ligante, ainda sem norma brasileira vigente, teve em diferentes pesquisas a conclusão de que o tipo de graduação e a origem mineralógica do agregado são influentes no fator de calibração utilizado na mistura. A fase de calibração do aparelho é um processo de alta importância na metodologia do ensaio, esta garante a precisão e acurácia de todo o método.

A pesquisa procura, então, ampliar o conhecimento sobre esses processos de controle tecnológico de misturas asfálticas, realizando análises de resultados de ensaios de obtenção de teor de ligante e análise granulométrica com misturas de concretos asfálticos, utilizando de agregados minerais de distintas províncias geológicas do Rio Grande do Sul, com diferentes graduações e diferentes teores de

ligante. Logo, intenta trazer um entendimento maior dos diversos fatores influentes nesses processos de controle tecnológico de concretos asfálticos.

OBJETIVO GERAL

Constitui-se o objetivo geral desta pesquisa a avaliação dos procedimentos de controle tecnológico de concretos asfálticos: determinação de teor de ligante utilizando os métodos de ignição e centrifugação; controle de granulometria.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) Analisar os resultados obtidos no ensaio de extração de ligante asfáltico mediante comparação entre os métodos de extração por ignição e centrifugação;
- b) Avaliar a influência de diferentes faixas granulométricas de concreto asfáltico nos ensaios de extração e granulometria;
- c) Julgar-se se diferentes rochas, com propriedades distintas, têm influência nos resultados finais de controle de teor de ligante e granulometria;
- d) Analisar a influência de diferentes teores de ligante nos ensaios de extração e granulometria;
- e) Inferir a influência do excesso ou escassez de ligante sobre os resultados de teor de ligante e granulometria.

Possuindo quatro capítulos distintos, este trabalho inicia por uma revisão bibliográfica, discursando sobre agregados minerais e suas características focadas neste trabalho, ligantes asfálticos, revestimentos asfálticos e métodos de dosagem de concreto asfáltico e a importância do controle tecnológico na otimização do serviço de pavimentação com concreto asfáltico.

O segundo capítulo trata da metodologia empregada neste trabalho, com o planejamento da pesquisa, as fases que foram realizadas, desde a preparação dos agregados até os ensaios realizados e esclarecimentos das etapas específicas de cada ensaio.

O terceiro capítulo analisa os resultados obtidos da pesquisa, procurando comparar e discutir esses dados, com elucidações através de tabelas, gráficos e fotos, com o objetivo de facilitar a análise de resultados.

A conclusão, capítulo quatro, apresenta além das considerações finais, observações e sugestões de futuros trabalhos na mesma linha de pesquisa ou ligados de forma direta ou indireta a esta. Após a conclusão são apresentadas as referências consultadas para realização deste trabalho.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 AGREGADO E A MATRIZ PÉTREA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Misturas asfálticas são utilizadas como revestimento de pavimentos com o objetivo de melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança, resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando a superfície de rolamento mais durável, segundo Medina e Motta (2015). Bernucci et al. (2006) tratam misturas asfálticas tratando-se de uma mistura de agregados minerais de diferentes diâmetros com ligantes asfálticos de forma adequada, proporcionando impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local. Ainda, segundo DNIT (2006), dentre as misturas asfálticas é destacado o Concreto Asfáltico (CA), de ampla utilização em obras no Brasil, tem sua designação reservada para pré-misturados a quente de graduação densa, em que são feitas rigorosas exigências de seus índices tecnológicos e construtivos.

Os agregados nas misturas asfálticas podem ser classificados como naturais ou artificiais. Os naturais são encontrados na natureza (pedregulhos, seixos rolados, etc.). Os artificiais são, por exemplo, a escória e a argila expandida, pois necessitam de transformações químicas e físicas a partir de materiais naturais para serem utilizados. Esta definição é dada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) no seu Manual de Pavimentação (DNIT, 2006). Nele também é encontrada sua metodologia de classificação, sendo por natureza e tamanho e quanto à sua graduação (Figura 1.1).

1.1.1 Natureza

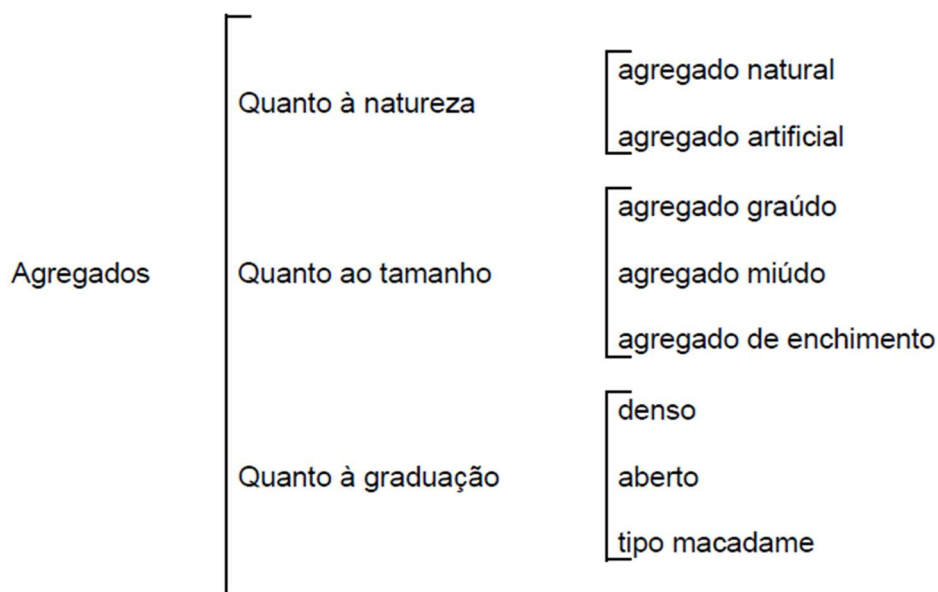
Agregados para misturas asfálticas podem ser de diferentes naturezas, como indica DNIT (2006). As classificações de agregados pela sua natureza são:

- a) Agregados naturais são provenientes da alteração das rochas por processos de intemperismo ou produzidos por processos de britagem. São exemplos os pedregulhos, seixos, britas, areias, etc.;
- b) Agregados artificiais são produtos ou subprodutos produzidos industrialmente, por processo físico-químico de um material. Como

exemplos são dados a escória de alto forno, argila calcinada e a argila expandida.

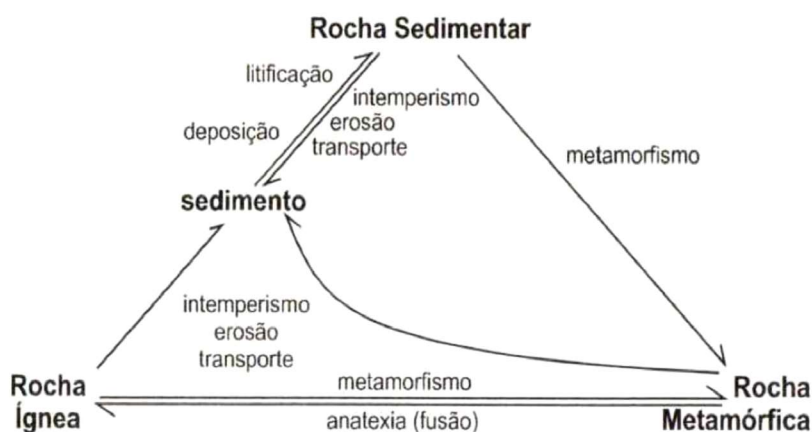
Oliveira et al. (1998) esclarecem resumidamente que as rochas são separadas em três grandes grupos, diferenciando-se por seu processo de formação: rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. Estes três grupos de rochas inter-relacionam-se através de seus processos cíclicos e dinâmicos de formação como pode ser visto na Figura 1.2.

Figura 1.1 - Classificação dos Agregados



Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006)

Figura 1.2 - Ciclo de formação das tochas



Fonte: Oliveira et al. (1998)

As rochas ígneas surgem da consolidação do magma, sendo nomeadas como de origem primária. (OLIVEIRA et al., 1998). Estas, também conhecidas como rochas magmáticas, dão origem às rochas sedimentares e metamórficas, através de processos físico-químicos. Rochas ígneas podem ser classificadas como:

- a) Plutônicas, também nomeadas como intrusivas, quando são formadas no interior da crosta terrestre pelos lentos processos de resfriamento e solidificação do magma, resultando em material cristalino geralmente de granulação grossa e de formas definidas;
- b) Vulcânicas, também nomeadas extrusivas, quando são formadas na superfície da crosta terrestre ou nas proximidades, resultando em material vítreo ou cristalino, de graduação fina.

As rochas sedimentares são formadas a partir do ciclo sedimentar, através de vários processos do ciclo, como intemperismo, erosão, transporte, deposição e litificação, ou seja, formam-se a partir de partículas provenientes desses processos ocorridos em rochas preexistentes, ou até precipitação química e ação biogênica (OLIVEIRA et al., 1998).

Maciel Filho (2008) expõe que qualquer rocha pode ser destruída ou sofrer ação do intemperismo. Por essas ações, surgem as rochas sedimentares. Das rochas intemperizadas formam-se o regolito ou saprólito e destes surge o solo. Em algumas situações, o solo pode transformar-se em materiais mais duros como a laterita ou a bauxita, consideradas rochas residuais. Depósitos de solos que sofreram erosão dão origem às sedimentares detríticas, que, em determinadas condições geoquímicas, principalmente meio aquoso, causam reações químicas e seus produtos são precipitados, originando lamas calcárias, dolomitas, etc. A acumulação de matéria orgânica origina turfeiras. Desses depósitos detríticos, precipitados químicos ou turfeiras originam-se as rochas sedimentares, através do processo de diagênese.

Rochas ígneas e rochas sedimentares passam por processos geológicos que as levam a condições diferentes daquelas que formaram a rocha. Estas novas condições de temperatura, pressão, presença de agentes voláteis ou fortes atritos provocam uma adaptação e, assim, às novas condições. Essas adaptações originam as rochas metamórficas, podendo ou não mudar sua composição mineralógica, mas com uma mudança obrigatória de sua textura (LEINZ, 2003).

Conforme Maciel Filho (2008), rochas magmáticas, ou também conhecidas como ígneas ou eruptivas, são formadas a partir do resfriamento do magma, esta sendo uma mistura complexa e em estado de fusão, com predominância de silicatos e algumas substâncias voláteis. Dentre as rochas ígneas intrusivas, o autor destaca que são deste tipo: granitos, sienitos, dioritos, gabros, peridotitos e piroxenitos.

Conforme Oliveira et al. (1998), as rochas metamórficas são resultantes de um metamorfismo e depende essencialmente da sua composição original, das condições de pressão e temperatura e dos fluidos envolvidos, ou seja, rochas de composições mineralógicas diferentes, como calcários, folhelhos e basaltos e irão apresentar mineralogia diversa, mesmo quando submetidas a ações metamórficas semelhantes. Maciel Filho (2008) descreve que as rochas metamórficas são divididas em um grupo com quartzo, feldspato, micas e minerais escuros aciculares, sendo que sua classificação é dependente principalmente de sua estrutura e textura. O outro grupo, contendo com maior frequência estruturas maciças, tem sua classificação determinada pela composição de cada rocha, como exemplos são dados o mármore, constituído por calcita, o quartzito por quartzo e o anfibólito por anfibólio.

Conforme Blücher (1951), petrologistas nomearam os diversos e vários tipos de rocha natural, não sendo obrigatório que o engenheiro rodoviário todos estes tipos de rocha. O autor destaca ainda que dentre os vários tipos pouco diferem entre si dentro de seus grupos em suas características como materiais para estradas, devendo o engenheiro se ater às propriedades do agregado mineral utilizado na pavimentação.

Para Bernucci et al. (2006), exames petrográficos são úteis e auxiliam na avaliação dos agregados, mas somente a mineralogia é incompleta para prognosticar o comportamento de um agregado em serviço. Os autores citam que rochas ígneas, como granito e granito-gnaiss, são ricas em quartzos e feldspatos, minerais duros e resistentes ao polimento. Já os calcários, ricos em calcita e dolomita, são exemplos de minerais macios, tendendo à ocorrência de polimento mais precocemente do que outros tipos de agregados.

As rochas ígneas são também classificadas segundo a quantidade de sílica presente e quanto à sua acidez, ácida, neutra, básica ou ultrabásica, relacionado à carga elétrica superficial das partículas do agregado. Os agregados de rochas classificadas como ácidas costumam apresentar problemas de adesividade,

enquanto os de rochas classificadas como básicas costumam apresentar melhor adesividade ao ligante asfáltico (BERNUCCI et al., 2006).

Os minerais presentes nos agregados apresentam seus átomos dispostos em uma rede cristalina, promovendo a adsorção química, sendo o principal fator na adesividade entre o agregado e os ligantes asfálticos. Agregados silicosos geralmente são negativamente carregados na presença de água, sendo exemplos o arenito, quartzo e cascalho, enquanto os calcários são positivamente carregados em presença de umidade. Existem casos extremos de eletronegatividade e eletropositividade, como a dolomita e o quartzito, respectivamente (BERNUCCI et al., 2006).

Ainda, segundo Bernucci et al. (2006), é destacado que muitos agregados contêm ambas as cargas, como os basaltos e calcários silicosos, porque estes são compostos de minerais de carga negativa, como a sílica, e minerais de carga positiva, como cálcio, magnésio, alumínio ou ferro.

1.1.2 Tamanho das partículas e graduação da mistura

Os agregados são classificados segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) quanto ao tamanho de seus grãos (Tabela 1.1):

- a) Graúdo: material retido na peneira nº 10;
- b) Miúdo: material passante na peneira nº 10 e retido na peneira nº 200;
- c) Filler ou enchimento: é o material que passa pelo menos 65% de sua massa na peneira nº 200.

Também há a classificação do material pétreo (DNIT, 2006) quanto a sua graduação (Figura 1.3):

- a) Graduação Densa: material com curva granulométrica de material bem graduado, com quantidade de material fino que preencha os vazios entre as partículas de maior tamanho;
- b) Graduação Aberta: também de curva granulométrica bem graduada, mas com menor quantidade de finos, insuficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores;
- c) Macadame: possui partículas de um mesmo tamanho, granulometria uniforme. Seu diâmetro máximo é próximo do dobro do diâmetro mínimo.

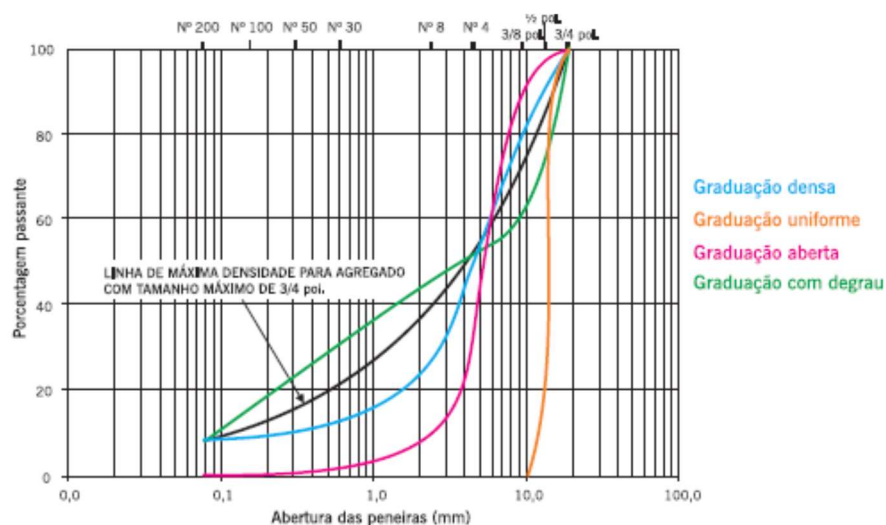
Ceratti e Reis (2011) ressaltam que a rigidez, durabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e deformação permanente, entre outras propriedades e qualidades esperadas de uma mistura asfáltica, estão diretamente ligadas à correta distribuição granulométrica dos agregados. Uma correta curva granulométrica proporciona um maior desempenho do pavimento, por assegurar a estabilidade da camada de revestimento asfáltico devido ao entrosamento entre as diferentes graduações de partículas do esqueleto mineral e o atrito entre elas.

Tabela 1.1 - Dimensões Nominais das Peneiras

Vão da Peneira		Abertura da Peneira	
Padrão	Número	Milímetros	Polegadas
75,0 mm	---	75,0	3,0
50,0 mm	---	50,0	2,0
37,5 mm	---	34,5	1,5
25,0 mm	---	25,0	1,0
19,0 mm	---	19,0	0,75
9,50 mm	---	9,50	0,375
4,75 mm	4	4,75	0,187
2,36 mm	8	2,36	0,0937
2,00 mm	10	2,00	0,0789
1,18 mm	16	1,18	0,0469
600 µm	30	0,600	0,0234
425 µm	40	0,425	0,0168
300 µm	50	0,300	0,0117
150 µm	100	0,150	0,0059
75 µm	200	0,075	0,0029

Fonte: (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1995)

Figura 1.3 – Curvas Granulométricas



Fonte: Bernucci et al. (2006)

Abdul-Malak et al. (1996) relatam que as forças de atrito no contato pneu-pavimento são de maior responsabilidade dos agregados graúdos, concluindo que estes provocam maior quantidade de pontos de contato e, logo, aumentando a segurança viária.

Esqueletos minerais de misturas do tipo *Open Graded Friction Course* (OGFC) e *Stone Matrix Asphalt* (SMA) possuem forças internas muito elevadas, segundo Gatchalian et al. (2006), levando a faturamento das partículas de agregados a ponto de comprometer o desempenho da mistura, caso o agregado não tenha resistência adequada. Ainda, segundo Airey et al. (2008), misturas abertas, se comparadas a misturas mais densas, tendem a ter uma maior degradação de seus agregados. Estes autores também afirmam que a degradação dos agregados da mistura é pouco influenciada pela energia de compactação, tendo a maior influência por parte da graduação da mistura.

Ligado ao tema proposto desta pesquisa, os estudos feitos por Rossato et al. (2014) e Gonçalves et al. (2015) demonstram uma influência direta da quantidade de finos na mistura na determinação do teor de ligante utilizando o Rotarex. A conclusão dos autores é ligada a perda de material passante na peneira nº200. Os autores utilizaram misturas idênticas nas duas pesquisas, três misturas diferenciadas em quantidade de material fino. A mistura com menor quantidade de finos mostrou valores baixos de teor de ligante e em contrapartida a de maior quantidade de finos mostrou valores acima do teor utilizado na mistura.

1.1.3 Resistência à abrasão

A determinação da resistência à abrasão é comumente feita através do ensaio de abrasão Los Angeles, normatizado pela DNER-ME 53/98. Em resumo, uma amostra de 5.000 g é submetida de 500 a 1000 revoluções em um equipamento padronizado. Juntamente ao agregado são adicionadas esferas padronizadas em quantidades variáveis, dependendo da parcela na qual essa amostra se encaixa, os limites dessas parcelas de amostras retidas ou passantes são tabelados. O resultado esperado é um valor relativo em porcentagem de quantidade de material reduzido retido na peneira nº 12, relacionado ao valor de quantidade de material inicial de amostragem.

Têm-se questionado a real ligação dos resultados dos testes de Abrasão Los Angeles ao desgaste sofrido pelos agregados. Por se tratar de um ensaio bastante severo, não ocorrendo somente abrasão na amostra no decorrer das revoluções no tambor, mas também impacto direto das esferas e trituração, esse tem sido tratado atualmente até mesmo como um ensaio de Abrasão e Impacto Los Angeles (Rogers, 1998).

Rogers (1998) conclui que os resultados finais de abrasão Los Angeles não levam a conclusões quanto ao processo ocorrido de abrasão, por se tratar somente de um resultado focado em quantidade de massa perdida. Se encontrados resultados do ensaio com valores baixos nesse parâmetro, por exemplo, esses não necessariamente indicam que o agregado tem resistência à abrasão, visto que a forma final das amostras é desconsiderada.

A pesquisa de Bessa et al. (2011) conclui que amostras finais do ensaio de abrasão Los Angeles mostraram que os agregados sofrem perda nos valores de suas características de textura e angularidade, ficando com suas superfícies mais lisas e cantos mais arredondados. Pereira (2010) relata que é importante que um agregado preserve uma rugosidade mínima durante a vida útil do pavimento, assim, conseguindo uma maior segurança adequada ao usuário em relação ao atrito pneu-pavimento.

Os valores aceitáveis de abrasão Los Angeles dependem da empregabilidade do agregado e a que fim esse será submetido. Os limites desses valores são regulados pelos órgãos viários. Como em revestimentos o desgaste é alto durante o seu tempo de serviço, é indicada uma baixa taxa de abrasão para seus agregados. Os valores especificados no Brasil para camadas de base e revestimento de pavimentos são limitados entre 40 e 55% de abrasão Los Angeles (LA) (DNIT, 2006).

Outros ensaios e equipamentos são utilizados para quantificar a abrasão de agregados, como o realizado no Micro-Deval, com norma norte-americana AASHTO TP 58-00. Este equipamento foi desenvolvido originalmente na França e a abrasão do agregado é originada pelo contato de pequenas esferas. Todo o processo de degradação desse ensaio é ocorrido na presença de água.

Pesquisas atuais têm tratado do tema de comparação entre esses diferentes tipos de ensaios de quantificação de durabilidade e abrasão, como as pesquisas de Lane et al. (2000), onde é pontuado que o ensaio de abrasão Los Angeles mede

somente a resistência frente a impactos e a de Rogers (1998), onde conclui-se que o ensaio Micro-Devals simula melhor as condições de campo de desgaste dos agregados.

Outros ensaios para avaliação da resistência têm sido utilizados na Europa, o Aggregate Abrasion Test, realizado em condição seca, utiliza um prato de aço que gira sob os agregados para realizar abrasão nos mesmos e o Nordic Ball Mill Test, uma adaptação do ensaio no Micro-Deval, que utiliza uma diferente velocidade de rotação tamanhos das esferas de aço, a carga abrasiva e a peneira de corte para a determinação da perda de massa (MAHMOUD, 2005).

Segundo Wu et al. (1998), misturas asfálticas produzidas em laboratório podem ter sua graduação afetada durante a construção do pavimento. Isto ocorre quando a resistência à degradação dos agregados, por quebra ou abrasão, não é satisfatória, alterando o esqueleto pétreo antes mesmo do início da vida útil do pavimento. Logo, uma baixa resistência à abrasão pode afetar os dados de granulometria tanto de laboratório quanto possíveis controles tecnológicos de misturas em processo construtivo.

Bernucci et al. (2006) citam que rochas ricas em quartzos e feldspatos, minerais duros e resistentes ao polimento, como exemplo são dados as rochas ígneas, como granito e granito-gnaiss. Ainda, segundo os autores, rochas com predominância de calcita e dolomita tendem à ocorrência de polimento mais precocemente do que outros tipos de agregados, o exemplo dado pelos autores são as rochas calcárias. As presenças quantitativas destes minerais nos agregados são mais precisamente indicadas com ensaios de análise de petrografia, micro e macroscópica.

1.1.4 Textura superficial

Segundo Ceratti e Reis (2011), as misturas asfálticas são diretamente influenciadas pela textura superficial das suas partículas de agregados na trabalhabilidade, adesividade e resistência ao atrito e ao cisalhamento. Com o aumento da rugosidade do agregado, há uma perda de trabalhabilidade da mistura asfáltica e um aumento da resistência ao cisalhamento, bem como do teor de ligante de projeto.

A textura superficial, rugosa ou lisa, também possui influência no consumo de ligante, também devido à superfície específica dos agregados. Agregados de superfícies rugosas, como encontradas agregados britados, proporcionam uma maior estabilidade da mistura asfáltica, mas esse tipo de superfície diminui a trabalhabilidade, essa sendo compensada com um maior consumo de ligante. Agregados de superfície lisa têm sua cobertura pela película asfáltica facilitada, mas a união entre as partículas, provocada pelo ligante, é mais fraca se comparada a agregados de superfície rugosa (GOUVEIA, 2002).

Visto que Ceratti e Reis (2011) e Gouveia (2002) afirmam que a textura superficial influencia no teor de ligante de uma mistura, esta deve ser considerada nesta pesquisa, sobretudo no que pode dizer a respeito da influência da textura na dosagem e na posterior extração do ligante, um dos objetivos deste trabalho. No que diz respeito à influência na adesividade do ligante pela textura superficial na mistura, a interferência se dá diretamente no ligante efetivo, no filme de ligante exposto nas partículas.

Essas parcelas de ligante efetivo e absorvido podem ser influentes na quantificação do teor de ligante pelos diferentes ensaios de extração utilizados. Estas influências, finalmente, tendem a impactar, dissimular, a posterior análise granulométrica das amostras de posterior extração de ligante. Caso a extração não seja efetiva, há uma coesão entre partículas de agregado mesmo após ensaio de extração, passando a influenciar os resultados finais de análise granulométrica. Isto já foi evidenciado na pesquisa de Gonçalves et al. (2015) com extratores centrífugos.

1.1.5 Forma das partículas

Ceratti e Reis (2011) defendem que partículas lamelares, ou de forma irregular, requererem maior quantidade de ligante para preenchimento dos vazios do agregado mineral da mistura asfáltica. Ainda, segundo o autor, partículas de formas mais lamelares ou chatas provocam segregação entre elas e fragmentação durante a compactação.

Assim, a forma das partículas utilizadas na mistura asfáltica tende a influenciar diretamente o estudo proposto, visto que serão realizadas dosagens de teor de ligante para diferentes tipos de rochas, originadas de pedreiras comerciais

diversas, podendo, então, ter entre si diferentes índices de forma e, então, diferentes influências deste aspecto na obtenção do teor de ligante.

Outra influência pode se dar quanto ao comportamento de misturas após compactação, no que tange o comportamento da matriz pétreia da mistura, visto que partículas mais lamelares tendem a quebrar durante a fase de compactação, uma posterior análise granulométrica, ou seja, uma aferição da granulometria adotada na mistura pode resultar em resultados errôneos. A intenção desta análise está presente desde o processo de controle da mistura em usina como até mesmo uma análise posterior ao emprego da mistura como revestimento em uma obra.

Ainda, a estabilidade mecânica de misturas asfálticas é ligada ao atrito interno do esqueleto mineral. Partículas de agregados angulares geram um maior atrito interno da mistura. Porém, partículas arredondadas, como seixos e areias de rio, possuem maior trabalhabilidade e necessitam de uma menor energia de compactação para chegar à densidade requerida, mas Gouveia (2002) salienta que essa facilidade não é uma vantagem, necessariamente, visto que essa facilidade na compactação pode provocar deformação permanente devido à densificação pela ação do tráfego.

1.1.6 Absorção, densidade específica e massa específica.

O *Asphalt Institute* (1979) mostra um esquema muito esclarecedor dos parâmetros volumétricos e ligante asfáltico influenciados pela absorção do agregado nas misturas asfálticas, onde se podem ver claramente as diferenças entre massas específicas real, aparente e efetiva, volume de vazios, volume de agregado mineral e teor efetivo de ligante (Figura 1.4).

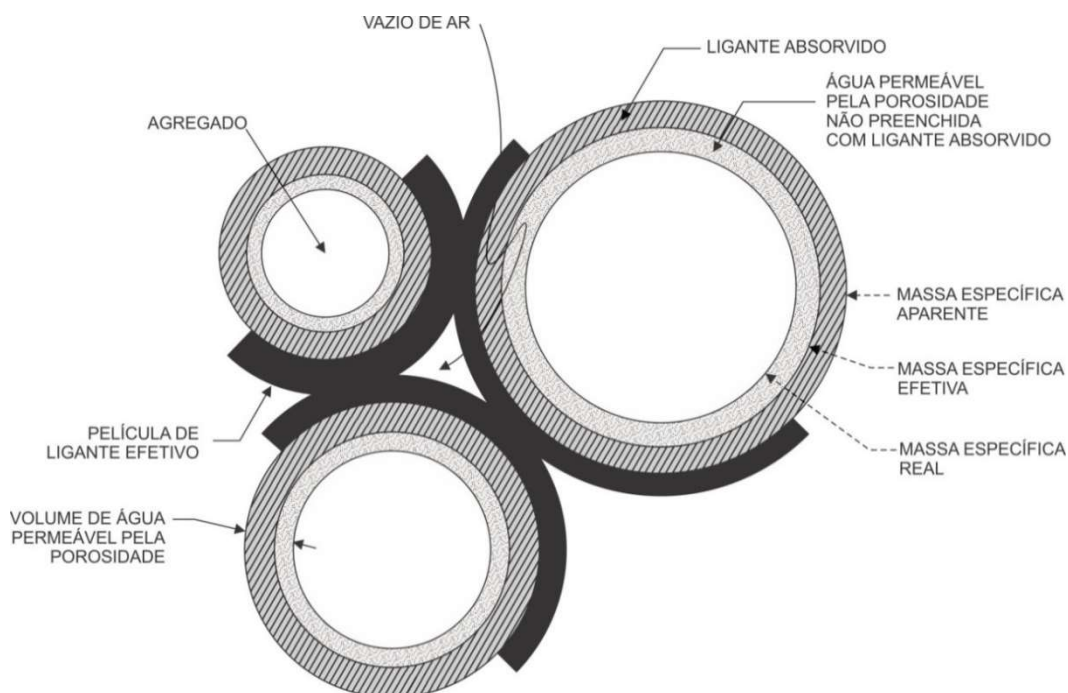
Vista a ilustração (Figura 1.4) fica mais clara a influência da absorção no estudo aqui proposto. A absorção do agregado interfere em todos os parâmetros importantes de uma mistura asfáltica, desde seu processo de dosagem até o controle tecnológico. No que tange o controle tecnológico de misturas asfálticas, especificamente o de teor de ligante e análise de granulometria, a absorção do agregado mineral é atuante em ambos os controles. Na primeira situação por interferir diretamente na extração do ligante de amostras de uma mistura, como já visto na pesquisa de Gonçalves et al. (2015) utilizando extratores centrífugos. Na segunda por consequência de uma má extração do ligante de uma amostra de

mistura, já que a coesão entre as partículas de agregado não é totalmente cessada com uma má extração, acarretando em resultados adversos da real granulometria empregada.

Ainda, a absorção de ligante asfáltico é influenciada pela porosidade do agregado mineral, devendo-se, então, adicionar maior quantidade de ligante na mistura, a fim de mitigar essa parcela consumida pelos poros, visto que a real utilidade do ligante é a coesão da mistura asfáltica. Essa situação pode acarretar em maus resultados de controle de ligante, caso essa parcela absorvida não seja corretamente extraída (CERATTI e REIS, 2011). Os métodos de extração de ligante propostos nesta pesquisa tem por finalidade um dos objetivos principais desta pesquisa, avaliar e comparar os seus resultados finais de teor de ligante entre diferentes tipos de agregados, com diferentes absorções e teores.

É indicado que não se utilizem agregados de grande absorção na pavimentação por consumirem maior quantidade de ligante asfáltico e dificultarem os cálculos de teor de ligante, por apresentarem porosidade variável dependendo da amostra. Exemplos de agregados de possível absorção alta e elevada porosidade são relatados por Ceratti e Reis (2011) sendo: escória de aciaria, laterita e alguns basaltos e agregados sintéticos.

Figura 1.4 – Parâmetros volumétricos: V_v , VAM, teor efetivo e massas específicas



Fonte: adaptado de *Asphalt Institute* (1979)

De forma simples, Gouveia (2006) disserta que a absorção tem consequência direta na diminuição do filme de ligante que envolve as partículas de agregado, diminuindo o teor efetivo de asfalto na mistura, tornando esta mais suscetível às tensões do tráfego e deterioração devido à intempérie. Vários problemas surgem de uma mistura de baixo teor efetivo por consequência de problemas de endurecimento e envelhecimento do ligante em um tempo prematuro.

As propriedades volumétricas projetadas em laboratório e propriedades volumétricas reais da mistura após compactação podem acabar se distanciando caso não seja levada em consideração a influência da absorção do agregado. Caso a absorção seja negligenciada, o teor de ligante projetado e o teor de ligante efetivo acabarão por ser diferentes. Ao desconsiderar a influência da absorção, supõe-se erroneamente que todo o ligante na mistura está envolvendo as partículas de agregado, levando a valores irrealistas de volume de vazios, vazios do agregado mineral e vazios preenchidos por asfalto, visto que a quantidade de ligante absorvido altera as proporções de vazios da mistura (GOUVEIA, 2006).

A dependência do tempo de absorção dos agregados torna mais difícil o cálculo dos parâmetros volumétricos de misturas asfálticas. Agregados podem absorver ligante tanto no momento de mistura como ao passar do tempo, levando até meses após a aplicação e compactação do revestimento, segundo Kandhal (1991). Em um primeiro momento, a solução de aumentar a quantidade de ligante para compensar a absorção parece válida, mas a absorção não ocorre somente no processo de mistura e nem somente a médio e longo prazo. Logo, se uma mistura que utiliza de agregados de absorção lenta tiver uma quantidade extra de ligante para compensar o ligante absorvido em longo prazo, pode acabar tendo problemas na fase de compactação, ocasionando estabilidade inicial baixa e problemas de exsudação, segundo Lee et al. (1990).

Gouveia (2006) salienta que outra característica importante da absorção dos agregados é sua seletividade. Algumas frações do asfalto podem ser preferenciais na absorção seletiva os agregados, alterando diretamente as propriedades do asfalto efetivo, a parcela não absorvida, em relação ao asfalto original aplicado na mistura. Por exemplo, moléculas de tamanho menores, como as dos maltenos, podem ser preferencialmente absorvidas dentro do volume do poro, enquanto moléculas grandes, como as dos asfaltenos, permanecem no filme de asfalto efetivo, segundo Kandhal (1992). Logo, a película de ligante que cobre o agregado terá

propriedades reológicas, físicas, químicas e de envelhecimento diferentes das do asfalto adicionado à mistura durante sua preparação.

Gouveia (2006) faz um resumo das consequências da não consideração da absorção do agregado na dosagem de misturas asfálticas:

- a) Cálculo incorreto das propriedades volumétricas das misturas: volume de vazios (V_v), vazios do agregado mineral (VAM) e vazios preenchidos por asfalto (relação betume-vazios, RBV);
- b) Baixo teor efetivo de ligante na mistura, resultando em desgaste, perda de adesividade entre o asfalto e o agregado na presença de água (stripping) ou em trincas;
- c) Suscetibilidade às tensões e às intempéries da película de ligante;
- d) Endurecimento e envelhecimento precoce do asfalto em decorrência da absorção seletiva.

Quanto à influência da porosidade do agregado, Gouveia (2006) nos resume a sua influência na absorção:

- a) Os mecanismos físicos da absorção se processam através da passagem do líquido por canais intercrystalinos, que constituem vazios com formas e tamanhos variados (poros).
- b) A absorção de ligante é relacionada diretamente com a porosidade do agregado;
- c) A capacidade de absorção máxima do agregado é indicada pela porosidade total;
- d) A taxa de absorção de asfalto bem como a natureza da absorção é influenciada pela porosidade da partícula, tamanho de seus poros e a frequência de ocorrência desses tamanhos de poros;
- e) A absorção está diretamente relacionada com as densidades do agregado, indicativas da porosidade da partícula;

O ensaio de absorção do agregado graúdo brasileiro é normalizado pela DNER-ME 081/98, que relaciona através de três medidas de massa de uma amostra (seca, saturada e submersa) a quantidade de água absorvida pelo agregado graúdo após 24h de imersão. Nela chega-se também aos valores de densidade aparente do agregado. Outra norma também dá valores de absorção de agregado graúdo, a DNER-ME 195/97, sua diferença está no resultado final, que quantifica a massa específica.

A absorção do agregado miúdo pode ser realizada pelas normas ABNT NBR NM 30:2000 e ASTM C 128. Os procedimentos são semelhantes, mas a segunda norma citada utiliza de água destilada, picnômetro, controle de temperatura e vácuo para determinar, além da absorção, a densidade aparente do agregado miúdo.

Ceratti e Reis (2011) esclarecem que:

- a) A massa específica real desconsidera qualquer poro da superfície, sendo a relação entre a massa seca e o volume real;
- b) A massa específica aparente considera a presença dos vazios. Obtida pela divisão da massa seca pelo volume aparente;
- c) A massa específica efetiva é a relação entre a massa seca de uma amostra e o volume efetivo do agregado.

1.1.7 Adesividade

A exposição de ligante sobre as partículas de agregado de uma mistura asfáltica, a cobertura dessas partículas, e a possível absorção de ligante por elas está ligada à composição mineralógica e consequente comportamento das cargas como já visto no item 1.1.1. Esses fatores têm implicação direta sobre os temas desta pesquisa. A adesividade, interferindo na absorção de ligante, tem implicação sobre o CAP absorvido e exposto sobre os agregados da mistura. Estas duas parcelas, ligante absorvido e teor de ligante efetivo, tendem a interferir nos ensaios de extração de ligante, caso a extração não seja efetiva o suficiente para remover a parcela absorvida pela rocha. Como exemplo, rochas de baixa adesividade e alta porosidade, sem a devida correção desta dificuldade de cobrimento do ligante, acabam por ter maior teor efetivo, assim como no caso de haver a correção da adesividade, a maior absorção de ligante acaba por diminuir o teor efetivo da mistura. Esses fatores acabam por influenciar, então, na acurácia de ensaios de obtenção de teor de ligante e até mesmo de granulometria, visto que os valores de massa nas peneiras são alterados em caso de má extração da parcela de ligante absorvida pelas partículas.

Um descolamento da película de ligante asfáltico junto ao material pétreo pode tornar este agregado impróprio como material de infraestrutura por inutilizar a coesão, propriedade esta que é o objetivo do ligante na mistura. Esse efeito ocorre porque a água separa essas duas parcelas, material pétreo e asfalto, chamando-o

de material hidrófilo. São dados como exemplo por Bernucci et al. (2006) o quartzito e alguns granitos. Já os hidrofóbicos são de alta adesividade em presença de água, sendo a sua aceitabilidade positiva na utilização como agregado em misturas asfálticas.

As características de adesão e coesão podem ser melhoradas com a adição de modificadores ao asfalto. Atualmente são mais utilizados como modificadores os polímeros, como elastômeros e plastômeros, e agentes rejuvenescedores, como ácidos polifosfóricos (ANITELLI, 2013).

Anitelli (2013) concluiu em sua pesquisa que suas misturas com asfalto modificado com polímero (CAP 50-70 + estireno-butadieno-estireno “SBS”) apresentaram taxas de absorção de asfalto até 40% maiores em comparação a amostras que utilizaram de CAP convencional 50/70 em sua composição. Na mesma pesquisa, a utilização de cal na mistura reduziu a absorção de ligante pelo agregado em até 20%, se comparado às misturas em cal.

A influência da adição de cales em misturas asfálticas mostrou melhorias não só de adesividade, mas também nas propriedades mecânicas das misturas estudadas por Boeira (2014). A pesquisa mostrou também que a melhora de propriedades mecânicas de misturas com a adição de cal também é ligada ao tipo de rocha utilizada como agregado na mistura.

A norma DNER-ME 078/94 – Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso, utiliza-se de avaliação visual da adesividade do agregado ao ligante betuminoso, bem como determina a aparelhagem e procedimentos para execução do ensaio, assim como o critério na obtenção dos resultados. O resultado é satisfatório somente se após o decorrer de 72 horas não houver deslocamento da película betuminosa, total ou parcial.

1.1.8 Sanidade

Além das resistências à abrasão e impacto, o agregado de misturas asfálticas deve ter resistência à ação de intempéries, ou seja, os seguidos ciclos de molhagem e secagem e até mesmo ciclos de congelamento e descongelamento, em alguns casos, sem sofrer quebras ou deterioração (GOUVEIA, 2006).

Essa deterioração do material pétreo diante atmosferas severas pode ser expressiva no caso dos ensaios de extração de ligante utilizando o forno de ignição,

visto que as temperaturas durante o ensaio podem chegar a temperaturas próximas a 580°C. Rochas com valores baixos de sanidade podem acarretar em valores de baixa acurácia na análise granulométrica, como em um caso específico de rocha na pesquisa de Choubane et al. (2006), onde uma das misturas teve a graduação da mistura afetada após os ensaio de extração com três diferentes fornos de ignição.

A acurácia do método está ligada diretamente a calibração do forno para cada mistura e tipo de agregado, logo, ligada também a resistência da rocha utilizada como agregado diante ambientes severos de temperatura, como concluído por Prowell e Hurley (2005) em sua pesquisa. Toda pesquisa foi fundamentada na utilização de rochas com recorrentes valores elevados de calibração no método de ignição. Dentre as propostas da pesquisa foi estudado e sugerido até mesmo uma alteração de condição de finalização do ensaio para melhorar a acurácia na utilização de rochas de baixa resistência à atmosfera do ensaio de ignição.

O ensaio de durabilidade é normatizado no Brasil pela DNER-ME 089/94 – Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio, comumente conhecido por “Ensaio de Sanidade”, onde é avaliada sua durabilidade diante ao sulfato de sódio ou magnésio. Após o procedimento do ensaio é avaliada a perda de massa após o ataque químico, após cinco imersões de 16 a 18 horas, sendo que o limite é de 12% de perda em relação à massa inicial da amostra pétreo. Bernucci et al. (2006) salientam que alguns basaltos são suscetíveis à deterioração química com formação de argilas.

Uma correta e total secagem dos agregados durante a usinagem, antes da mistura com o ligante, aumenta a resistência das misturas asfálticas perante os ciclos de molhagem e secagem, congelamento e descongelamento, não têm grande efeito nas misturas asfálticas segundo Wu et al. (1998) e Roberts et al. (1996). Assim, se a película de ligante que envolve a partícula do agregado permanecer intacta, protegendo o agregado da absorção de umidade, os ciclos de molhagem e secagem e de congelamento e descongelamento não devem ocasionar problemas. Caso a mistura seja confeccionada com excesso de partículas alongadas ou planas, a quebra delas durante a compactação e vida útil do pavimento desprotegerá os agregados, assim, a água pode penetrar nas partículas, comprometendo a vida útil do pavimento, caso o agregado da mistura asfáltica não tenha uma sanidade apropriada.

1.2 AGREGADOS ROCHOSOS DO RIO GRANDE DO SUL

No Rio Grande do Sul, quatro grandes domínios morfoestruturais são reconhecidos a partir das características geológicas e estruturais das rochas e modelados da superfície. Ao norte do RS, encontra-se o Planalto Meridional, Planalto Basáltico ou Planalto de Derrames, formado por extenso platô de rochas basálticas e riodacíticas. A Depressão Periférica, estendendo-se num estreito corredor em direção ao oeste, até a fronteira com o Uruguai, é composta por rochas sedimentares paleozoicas e mesozoicas da Bacia do Paraná, no qual são mais antigas do que as rochas do platô. Na porção sudeste do estado encontra-se o Escudo Rio-Grandense, trata-se de um planalto formado por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Na costa leste situa-se o domínio da Província Costeira, Planície Costeira, formada por um rosário de pequenas lagoas isoladas encravadas em depósitos arenosos. É importante destacar que nessas províncias há uma predominância de determinados tipos de rochas, o que não significa que existam exclusivamente esses afloramentos, segundo Menegat et al. (1998). As localizações das quatro províncias geomorfológicas do Rio Grande do Sul estão demonstradas na Figura 1.5.

No Escudo Rio-Grandense, também denominado impropriamente Serras de Sudeste, o planalto dissecado de sudeste compreende um conjunto de ondulações cujo nível mais alto não ultrapassa 600 m. Trata-se de um planalto antigo, cuja superfície tabular só foi preservada entre alguns rios. Com coxilhas e cristas de rochas graníticas, de idade pré-cambriana, cobertas de campos e matas (MENEGAT et al., 1998). Esta província é constituída por associações de rochas ígneas de composição predominantemente granítica, as quais são intrusivas em um conjunto de rochas metamórficas, representadas por extenso complexo de gnaisses ortoderivados, rochas máfico-ultramáficas de assoalho oceânico, xistos e mármore de composição metapelítica, que, por sua vez, estão recobertas por um pacote com cerca de 5.000 m de espessura de rochas sedimentares intercaladas a rochas vulcânicas, cujas afinidades variam entre magma básicos a ácidos na forma de lavas e rochas pirocásticas (VIERO, 2010).

Figura 1.5 - Províncias geomorfológicas do estado do Rio Grande do Sul



A Depressão Periférica está localizada na parte centro do estado, entre o Planalto Médio e a Serra do Sudeste. Seus principais municípios são Gravataí, Santa Maria, Guaíba, Taquari, Canoas e Cachoeira do Sul, sendo delimitada ao norte pelos leques aluviais e os sedimentos da formação Serra Geral e pelos patamares inferiores do Escudo representados pelas serras do Sudeste ao sul. São aspectos transicionais entre duas unidades, visto que a depressão periférica deve sua gênese a uma evolução intimamente ligada à rede hidrográfica da bacia do Jacuí. É constituída por formações como a Botucatu e formação Rio Bonito. Na formação Botucatu existem arenitos de alta porosidade, constituintes do Aquífero Guarani. Já o Grupo Rosário do Sul é formado por siltos e argilitos, podendo haver a presença de alguns fósseis. Na formação Rio Bonito é possível encontrar carvão mineral e xistos grafitosos, enquanto que a formação Estrada Nova apresenta rochas derivadas do calcário (GUSMÃO et al., 1990).

A província denominada Planalto de Derrames, Planalto Basáltico, é dominado por basaltos e basaltos andesíticos de afinidade toleítica distribuídos em uma pilha de derrames com até 2 km de espessura que perfaz mais do que 90% do

vulcanismo. As unidades ácidas descritas genericamente como “riolitos” ocorrem intercaladas no topo da pilha vulcânica (PEATE et al., 1992).

Conforme Pinheiro (2000), a Planície Costeira é a região mais recente, ela se desenvolve de uma forma continua ao longo da costa, desde a cidade de Torres até a cidade do Chuí no extremo sul do estado. Constituída predominantemente por depósitos arenosos, sílico-argilosos, argilosos e ocasionalmente conglomerados, sem afloramentos de rochas. Parte da planície é formada pela Bacia de Pelotas e pelas sequências sedimentares e vulcânicas, paleozóicas e mesozóicas da Bacia do Paraná. A Bacia de Pelotas teve sua origem relacionada com os movimentos tectônicos que conduziram à abertura do oceano Atlântico Sul no período cretáceo (TOMAZELLI e VILLWOCK, 1995, 2005). Ao norte da planície, o sistema de leques é alimentado pelas rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná, são formados por fácies de natureza lítica e de textura grossa, sendo conglomerados e arenitos líticos, depósitos de fluxo de detritos (ROISENBERG et al., 2008).

Neste trabalho procurou-se adotar agregados de diferentes regiões do estado, diferentes províncias, que sejam empregados na engenharia de pavimentação. Eles diferenciam-se em mineralogia e características, como absorção, textura e resistência à abrasão, por exemplo. Essas diferentes características gerarão misturas asfálticas diferenciadas entre si. A influência desses diferentes agregados minerais será analisada futuramente dentre os temas da pesquisa, obtenção de teor de ligante e granulometria, sugeridos neste trabalho. As pedreiras selecionadas são situadas em cidades do Rio Grande do Sul conforme indica a Tabela 1.2, onde estão separadas por província.

Tabela 1.2 – Província e cidades de produção de agregado utilizadas nesta pesquisa

PROVÍNCIA	CIDADE
Planalto Basáltico	Sarandi
Escudo Rio-Grandense	Capão do Leão
	Itaara
Depressão Periférica	Caçapava do Sul
	Eldorado do Sul
Planície Costeira	Santo Antônio da Patrulha

1.3 O LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante asfáltico mais utilizado atualmente na pavimentação é de origem da destilação do petróleo. Possui propriedades interessantes como a adesividade, impermeabilidade à água, baixa reatividade química e viscoelástico em temperatura ambiente. Sua atual predominância, devido às qualidades citadas, fez com que a pavimentação abandonasse o alcatrão, um ligante anteriormente utilizado, obtido através da queima ou destilação do carvão. Um fator preponderante no seu abandono foi seu potencial cancerígeno, além de suas: pouca homogeneidade e deficiente qualidade perante o asfalto (CERATTI e REIS, 2011).

Uma sigla largamente utilizada é CAP, que significa “Cimento Asfáltico de Petróleo”. Nas classificações de suas propriedades físicas a sigla CAP segue-se de um número, este é um valor referente ao valor de consistência encontrado no ensaio de Penetração do cimento asfáltico de petróleo. Segundo Bernucci et al. (2006), de 1992 a julho de 2005 o CAP era dividido em duas especificações perante sua consistência: seu valor obtido pelo ensaio de penetração e pela viscosidade pelo ensaio de Saybolt-Furol.

Em julho de 2005 a Agência Nacional do Petróleo, Gás e Energia (ANP) adotou uma nova especificação para o CAP brasileiro (Tabela 1.3), baseada somente no ensaio de penetração. Outras propriedades são também dadas para as referidas classificações.

Segundo Ceratti e Reis (2011), na maioria dos casos de obras rodoviárias, as misturas asfálticas confeccionadas com CAP convencional têm comportamento satisfatório e atendem aos requisitos técnicos necessários e apresentam um bom desempenho, mas casos como o crescimento de cargas em veículos comerciais ao longo dos anos, o aumento de carga por eixo, em rodovias especiais e aeroportos, corredores de tráfego pesado canalizado e condições ligadas a variações térmicas severas necessitam de do uso de modificadores no ligante asfáltico. Ainda segundo o autor, os modificadores têm a finalidade de proteger a usinagem da mistura asfáltica dos defeitos oriundos da variação de teor de ligante, uma vez que o excesso ou falta de ligante provocam inúmeros defeitos, desde trincas por fadiga precoces até problemas de deformação permanente e exsudação.

Tabela 1.3 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 - 45	50 - 70	85 - 100	150 - 200	NBR 6576	D 5	ME 003/99
	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol	s					NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135 °C, min		192	141	110	80			
a 150 °C, min		90	50	43	36			
a 177 °C		40 - 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60			
OU								
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20 rpm, min		374	274	214	155			
a 150 °C, SP 21, min.		203	112	97	81			
a 177 °C, SP 21		76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114			
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor min	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, min	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25° C, min	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							D 2872	
Variação em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25° C, min	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, min (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: ANP (2005)

Em resumo, Ceratti e Reis (2011) citam que a modificação do asfalto objetiva diminuir as variações das propriedades do ligante frente às temperaturas de serviço, melhorando as propriedades mecânicas do revestimento. Essa melhoria é consequência de melhorias das características de adesividade e coesão, maior resistência ao envelhecimento, à deformação permanente e trincas por fadiga e térmica, como visto em Taira (2003) e Specht (2004). Dentre as opções indicadas por Bernucci et al. (2006) estão a utilização de asfaltos borracha e asfaltos modificados por polímero, produtos distintos em composição, processo de fabricação e aplicação.

O asfalto modificado por polímero (AMP) é obtido a partir de reações químicas e condições controladas de produção entre o polímero e o asfalto, normalmente utiliza-se o polímero SBS, o estireno-butadieno-estireno, com seu

transporte, armazenamento e procedimentos executivos muito semelhantes ao CAP convencional (CERATTI e REIS, 2011).

Já o asfalto modificado por borracha é produzido através da mistura física de asfalto com borracha moída de pneus inservíveis, sofrendo uma alteração físico-química. Sua produção é menos controlada se comparada ao processo de controle industrial do asfalto polímero, visto que a borracha de pneus contém composições variáveis de borracha, óleos extensores e cargas minerais. A característica visual dos dois asfaltos modificados é distinta, visto que o asfalto borracha apresenta duas fases muito distintas, os grânulos de borracha são visíveis a olho nu misturados ao ligante, enquanto que o asfalto polímero é homogêneo visualmente (CERATTI e REIS, 2011).

1.4 O REVESTIMENTO ASFÁLTICO

Bernucci et al. (2006, p.157) dão uma eficiente explicação sobre o tema:

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada que se destina a receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática. Portanto, essa camada deve ser tanto quanto possível impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a carga e a velocidade dos veículos.

Segundo Balbo (2007) o revestimento asfáltico deve ser resistente a grandes deformações elásticas e plásticas e desagregações durante sua utilização.

No Brasil predomina a utilização de Concreto Asfáltico (CA) como revestimento de pavimentos, também conhecido como Cimento Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Misturas a quente possuem proporções de agregados de diferentes tamanhos e cimento asfáltico, certa temperatura de mistura e de compactação, energia de compactação e densidade pós-compactação previamente calculados em laboratório, baseados também na viscosidade do ligante. Essas misturas a quente são aplicáveis a qualquer volume de tráfego, de volume baixo até volume elevado. Misturas a quente são subdivididas quanto a sua graduação dos agregados como densa, aberta ou descontínua (BERNUCCI ET AL., 2006).

No caso de misturas a frio (PMF), são utilizadas emulsões asfálticas como ligante. Também são arrançados seu esqueleto pétreo a fim de atender certos requisitos na pista. São usinados em usinas estacionárias próprias, em temperatura ambiente e, em alguns casos, com certo aquecimento. São indicadas para ruas e

estradas de baixo volume de tráfego, como camada intermediária e em conservação e manutenção de rodovias, podendo ser densa ou aberta (BERNUCCI ET AL., 2006).

Bernucci et al. (2006) relatam alguns defeitos encontrados em pista contendo suas origens no agregado utilizado na mistura asfáltica, sendo por suas propriedades mecânicas ou por falhas na composição granulométrica:

- a) desgaste, desagregação e polimento de agregado, devido a baixa resistência a abrasão;
- b) problemas de adesividade do ligante ao agregado, gerando deslocamentos e perda de agregado;
- c) segregação, pode ter origem na definição da faixa granulométrica.

Além de um correto esqueleto pétreo, revestimentos asfálticos também necessitam de uma correta quantidade de ligante. Segundo Augusto Junior (1992), erros na quantidade de teor de ligante levam a mistura asfáltica a baixo desempenho e certos defeitos, tanto no excesso quanto na falta de ligante se comparados ao teor ótimo. Alguns destes são citados adiante:

- a) Baixa Estabilidade: provocada pelo excesso de ligante, predominantemente;
- b) Resistência insuficiente ao trincamento por fadiga: provocada, normalmente, pela falta de ligante no revestimento e também provocada por deficiente compactação, excesso de vazios e camada insuficiente de revestimento da pista;
- c) Corrugação: provocada pela não homogeneidade na quantidade de ligante na mistura asfáltica;
- d) Deformações: pouca quantidade de ligante ou até desuniformidade na quantidade de ligante no revestimento;
- e) Exsudação: provocada por elevada taxa de ligante na mistura;
- f) Baixo atrito pneu/pavimento: provocado pelo excesso de ligante exsudado na pista;
- g) Oxidação acelerada: causada por falta de ligante, que ao deixar maior número de vazios, deixa exposto o pavimento a maior ataque por oxidação;

- h) Permeabilidade excessiva: provocado pela maior quantidade de vazios, também provocado por falta de ligante. Uma compactação abaixo da prevista também acarreta esse problema na permeabilidade.

1.5 CONTROLE TECNOLÓGICO DE MISTURAS A QUENTE

O controle técnico assegura a conformidade às normas ou às especificações, verificando, por meio de ensaios e medições, a qualidade dos serviços, dos materiais e suas utilizações (DNIT, 2006, p.233).

Segundo Fortes e Merighi (2004), o controle tecnológico e de qualidade é realizado a partir da amostragem dos serviços de pavimentação que estão sendo concretizados, além da realização de ensaios para verificar as diversas fases de execução. O controle tecnológico objetiva verificar o atendimento às especificações de materiais e da mistura asfáltica. A abrangência do controle de qualidade é maior, visando, além de ensaios visando a conformidade de produção com o projeto, a conformidade desde adequação de instalações, instrumentos, calibração de instrumentos e equipamentos, métodos e documentações necessárias, competência técnica dos profissionais do empreendimento.

Dentre as fases do controle tecnológico estão a seleção de materiais, usinagem de misturas e aplicação destas. Para possibilitar o devido controle tecnológico da usinagem, ou seja, garantir que certos ajustes de produção sejam realizados em tempo hábil, o controle deve ser feito de maneira adequada, só assim o desempenho desejado de uma obra pode aproximar-se do previsto em projeto. Ainda segundo os autores Fortes e Merighi (2004), o controle tecnológico tem um custo de 0,5% a 1,5% da obra, valores estes pequenos se comparados aos 12% referidos a possíveis recuperações de patologias causadas na execução (FORTES e MERIGHI, 2004).

O desempenho do revestimento construído deve ser correlacionado a parâmetros e propriedades de engenharia, como resistência à tração, módulo de resiliência e deformação permanente, assim, permitindo a verificação da conformidade da produção e aplicação com as exigências de projeto. Burati et al. (2003) diferenciam propriedade de característica de qualidade com exemplos simples relacionados ao concreto asfáltico: a durabilidade é uma propriedade e o teor de ligante sua característica de qualidade.

Em DNIT (2006) são indicados os seguintes procedimentos para controle de produção de concreto asfáltico:

- a) Teor de ligante da mistura através de extrações de asfalto de amostras coletadas em pista após a passagem pela vibroacabadora;
- b) Graduação das amostras de concreto asfáltico através das amostras resultantes de extração;
- c) Temperaturas na usinagem: agregados no silo, ligante no momento da mistura e da massa de concreto saída do misturador;
- d) Temperatura durante o espalhamento e compactação do concreto asfáltico;
- e) Parâmetros e características da mistura através do ensaio Marshall e ensaio de compressão diametral;
- f) Densidade aparente do revestimento compactado, conseguida através de ensaios feitos em corpos de prova extraídos de pista.

Em campo deve haver o acompanhamento do controle de temperatura da mistura na chegada do caminhão transportador e logo após o lançamento do material em pista, visto que durante o carregamento do caminhão na usina e no tempo de transporte da mistura ao local de aplicação há perda de calor. Essas temperaturas devem respeitar os limites impostos no projeto da mistura asfáltica. Temperaturas excessivas aceleram a oxidação do CAP na mistura, perdendo suas propriedades elásticas. No caso de temperaturas abaixo dos limites especificados, geram uma mistura mais rígida e de recobrimento irregular, tornando deficiente a sua aplicação (BERNUCCI et al., 2006).

Várias são as razões que implicam na rejeição de uma carga de mistura asfáltica, segundo Bernucci et al. (2006), além dos problemas nos limites de temperatura: excesso de ligante, falta de ligante, mistura não homogênea, excesso de agregado graúdo em relação ao especificado em projeto, excesso de agregado miúdo e excesso de umidade. Esses últimos podem ter uma primeira inspeção logo na chegada do material, por experiência de quem está fazendo o controle tecnológico. Um exemplo disto é a fumaça que sai da mistura asfáltica quando se encontra em temperaturas elevadas e a aparência da mistura, pois diferentes faixas granulométricas apresentam aspectos também diferenciados entre si. Mas uma verificação adequada e de precisão necessita de ensaios como extração de ligante e

granulometria, normatizados e indicados pelos órgãos vigentes, para que haja um devido controle tecnológico.

Em concretos asfálticos é desejável que haja um valor adequado de vazios do agregado mineral (VAM) e isto só pode ser garantido com um bom controle da granulometria da mistura. O VAM deve ser grande o suficiente para permitir que cada partícula seja recoberta pelo ligante e ainda manter um volume de vazios (Vv) adequado na mistura quando compactada. De acordo com o *Hot-Mix Bituminous Paving Manual*, da *Federal Highway Administration* (1985), a granulometria tem grande influência no desempenho das misturas e é provavelmente a característica de mais fácil controle. É salientado pelo *Asphalt Institute* (1979) que, além da análise granulométrica ser de grande importância para garantir que a mistura confeccionada esteja em conformidade com a mistura projetada, este controle é provavelmente o mais econômico dentre os controles de produção de misturas asfálticas.

Um exemplo dado por Ceratti e Reis (2011) é de que quando a porcentagem de material passante na peneira nº 200 é elevada, reduz-se os vazios do esqueleto mineral e aumenta-se a trabalhabilidade da mistura asfáltica, mas só até certo ponto. O excesso de pó interfere na adesividade do ligante às partículas grossas. Pode prejudicar também a trabalhabilidade e a estabilidade do esqueleto mineral, reduzindo o intertravamento das partículas grossas, alterando também a capacidade de compactação da mistura.

Nogueira (2011) indicou uma grande dificuldade de empreiteiros de manterem sua produção próxima dos valores de projeto e até mesmo dentro dos limites de trabalho, além da importância do controle tecnológico na usina e na compactação para garantir o sucesso de uma obra viária. O autor obteve os seguintes dados de controle de produção de 12 misturas asfálticas diferentes: porcentagens passantes nas peneiras 3/8", nº 4 e nº 200 e o teor de ligante. Através de análise de variabilidade o autor concluiu que as 12 misturas estavam abaixo das especificações, com exceção somente do passante na peneira 3/8". Ainda, com auxílio do *software* M-E PDG, avaliou a consequência desses problemas de produção nos parâmetros de afundamento de trilha de roda e porcentagem de área trincada. O autor concluiu que: mesmo dentro do limite de variação de teor de ligante de 0,3% do DNIT os 20% de área trincada foi atingido 9 vezes; com o incremento de 1% de Vv, o menor das análises, o afundamento de trilha de roda passou do limite de 7mm com 6 meses de antecedência em relação à mistura sem incremento de Vv.

1.6 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE LIGANTE

O teor de ligante influi diretamente nas propriedades do concreto asfáltico. O excesso de ligante pode gerar problemas de deformação permanente no concreto asfáltico por fluência e/ou exsudação. Teores de ligante abaixo do teor de projeto diminuem a resistência à formação de trincas, uma vez que a resistência à tração é bastante afetada e sua vida de fadiga fica muito reduzida, como foi evidenciado por Bernucci et al. (2008). Resumidamente, Medina e Motta (2015) esclarecem que teores elevados de ligante, melhoram a vida de fadiga e a resistência ao desgaste superficial do revestimento, mas também aumentam a possibilidade de ocorrência de deformação permanente.

Harvey et al. (1995) procuraram desenvolver modelos de previsão de desempenho, avaliando o efeito do teor de ligante e do Vv no desempenho do revestimento asfáltico em termos de vida de fadiga. Dentre suas conclusões, foi e mostrado que uma redução de 1% no teor de ligante diminui em 12% na vida a fadiga do revestimento, considerando uma mistura com teor de ligante e volume de vazios iguais a 5%.

Utilizando um simulador de tráfego, Bernucci et al. (2008) avaliaram o efeito do tipo de ligante e teor de ligante na formação de trilhas de roda a partir da deformação permanente. As misturas com teor de ligante menor que o de projeto apresentaram melhor comportamento frente à deformação permanente, pois apresentavam altos valores de Vv. Já as misturas com teores de ligante maiores que o de projeto apresentaram os piores desempenhos quanto à deformação permanente, visto que seus Vv mais baixos provocaram menores resistência e rigidez destas misturas.

Os métodos de extração com solvente são utilizados há mais de um século, segundo Brown e Murphy (1994). Os mais comumente utilizados são o método por centrifugação e por refluxo, conforme Garcia et al. (2000). Os métodos são baseados na dissolução do ligante asfáltico da mistura asfáltica através de reação com solventes, retirando esse resíduo da mistura asfáltica através de centrifugação, vácuo e refluxo. São inúmeras as desvantagens da utilização desses métodos devido à utilização de solventes, como apontado por Hall e Wilians (1998): ambientalmente hostis; dificuldades devido à periculosidade de utilização (WHO, 1989, 2010), manuseio e armazenamento; perda de parcela de agregado fino

mineral durante a extração, acarretando em erros no teor de ligante e granulometria (GARCIA et al., 2000).

Ainda, no passado, vários solventes foram utilizados em procedimentos de extração. O benzeno foi um dos primeiros solventes a serem utilizados. Nas décadas de 1950 e 1960, novos solventes surgiram devido à toxicidade do benzeno. Estes solventes incluíram um novo grupo de solventes: tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetano e cloreto de metileno (BURR et al., 1990). Com a proibição do 1,1,1-tricloroetano, o tricloroetileno (TCE) tornou-se o mais popular e eficaz desses solventes, porém sabe-se que pode causar desde dores de cabeça, tonturas, tremores, além de possuir potencial cancerígeno conforme inúmeros órgãos de saúde internacionais e norte americanos, visto no amplo estudo da *Agency for Toxic Substances and Disease Registry – ATSRD* (2014), que trata publicamente dos níveis de exposição do tricloroetileno. Sabendo-se da periculosidade dos solventes, são feitos estudos para procurar solventes alternativos, como o caso do estudo de Garcia et al. (2000).

Os primeiros estudos com fornos de ignição para determinação de teor de ligante iniciaram na década de 1960 através da *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), provendo o trabalho de Antrim e Busching (1969), intitulado “*Asphalt Content Determination by Lite Ignition Method*”, onde foi mostrado que poder-se-ia chegar à porcentagem de ligante com temperaturas superiores a 840°C, porém, a perda de massa dos agregados e redução da graduação era muito elevada, logo, o estudo acabou não sendo levado a diante na época. Somente a partir da pesquisa de mestrado desenvolvida por Yu (1992), utilizando inicialmente uma mufla (forno elétrico com serpentinas comumente utilizado em laboratórios) chegou-se a temperatura de 538°C, acabando por reduzir o problema de perda elevada de massa dos agregados e diminuição da graduação. Baseado no estudo de Yu (1992) a *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), localizada na *Auburn University*, através da pesquisa de Brown e Murphy (1994), criou-se o método de ignição com o forno de ignição, chegando a norma provisória AASHTO *Provisional Standard TP53-95*.

1.6.1 Método da Ignição

O método de extração de ligante asfáltico por ignição tem normas norte-americanas ASTM D 6307 de 2010 e AASHTO T308 de 2013, onde são descritas as metodologias do ensaio para determinar o teor de ligante de misturas asfálticas a quente. Essas metodologias utilizam de fornos de ignição.

As metodologias das normas ASTM D 6307 - *Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method* e AASHTO T308 - *Determining the Asphalt Binder Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by the Ignition Method* utilizam de fornos de ignição por convecção (Figura 1.6 e Figura 1.7) e forno de ignição por infravermelho, onde a irradiação direta provoca a combustão. Os fornos são dotados ou não de balança interna de controle de perda de massa, durante o processo de extração do ligante, contendo um método para cada situação, com ou sem balança interna.

A finalidade do forno de extração de ligante é determinar o percentual de ligante asfáltico de uma amostra de mistura asfáltica à quente pelo método de perda por combustão. No modelo de forno de ignição por convecção a amostra é envolta em ar oxigenado e pesada continuamente ao longo do procedimento de combustão, em temperaturas que variam de 450°C a 550°C, conforme o manual NCAT (2000).

A norma ASTM D 6307:2010 esclarece que este método de teste pode ser utilizado para a determinação quantitativa do teor de ligante de misturas a quente de asfalto (*HMA - hot-mix asphalt*), misturas de laboratório ou amostras de revestimentos aplicados, para controle de qualidade do pavimento, conformidade com especificações e estudos e avaliações de misturas. Este método de ensaio não necessita da utilização de solventes.

Resumidamente, o cimento asfáltico na amostra de mistura é inflamado utilizando o equipamento de fornalha utilizado no método, particularmente. A porcentagem de asfalto é calculada pela diferença de massa do agregado e teor de umidade residual. O conteúdo de asfalto é expresso como porcentagem de massa de misturas isenta de umidade. O método de teste A destina-se a fornos com sistema de pesagem interna, automatizado. O Método de Teste B destina-se a fornos sem um sistema de pesagem interna (ASTM, 2010).

Visto que muitos laboratórios brasileiros vêm utilizando deste dispositivo para seus ensaios de teor e ligante, membros da Comissão de Asfalto do Instituto

Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP) elaboram atualmente uma norma nacional (LÁO, 2014).

Figura 1.6 – Forno de ignição por convecção NCAT

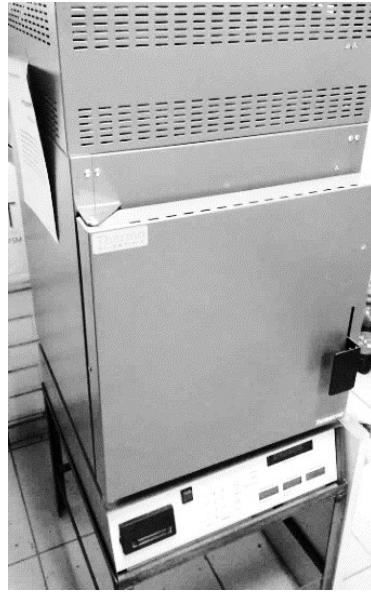
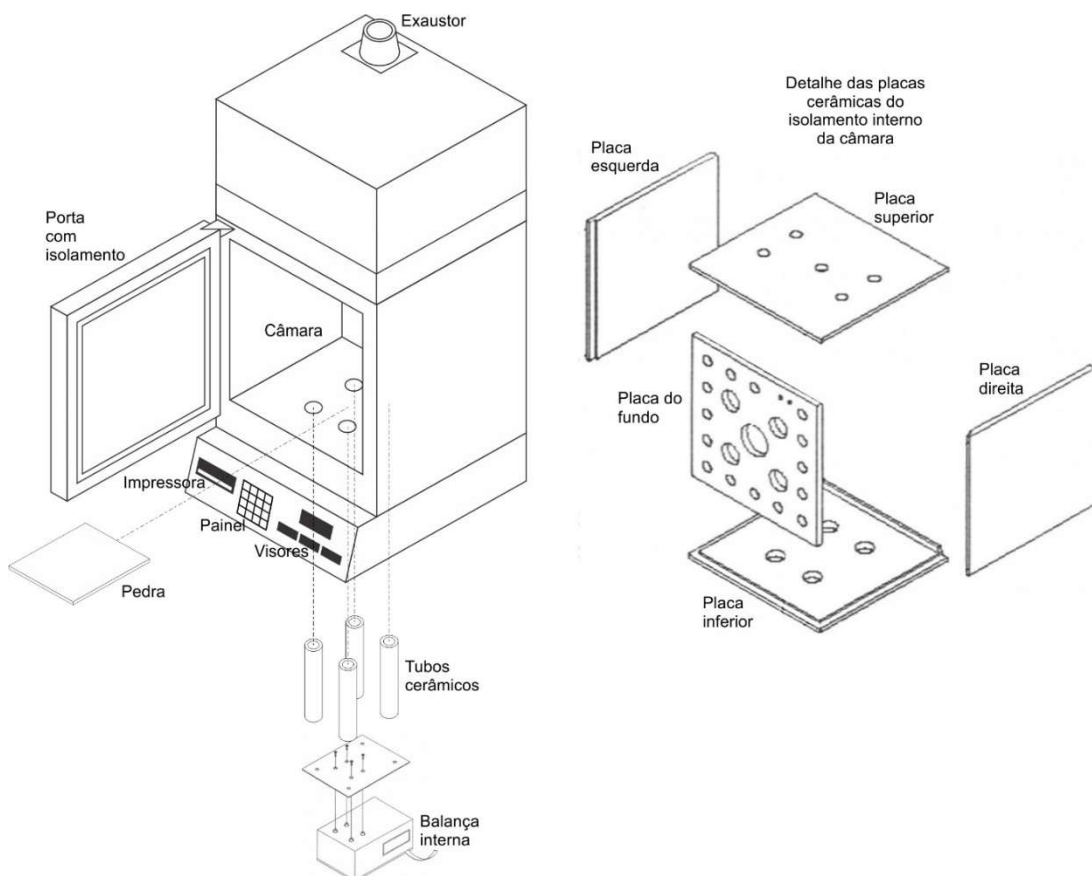


Figura 1.7 – Forno de ignição por convecção NCAT - esquemático



Láo (2014) assegura a melhor agilidade do forno disposto de controle de perda de massa durante o ensaio, montando um gráfico em função do tempo, registrando a perda de massa a cada minuto decorrido, variação de temperatura no interior do forno e impressão dos dados de entrada e saída após o termino de ensaio. O teor de ligante final é corrigido por fatores de calibração e correção em função da temperatura durante o processo de ignição.

No interior da câmara, a convecção é realizada por um aspirador e um exaustor que trabalham com certa rotação fixa, que quando bem ajustados, não permitem a passagem de odores ou fumos perceptíveis, ainda promovem uma aceleração no processo de ignição. Filtros ainda podem ser instalados para diminuir as emissões (LÁO, 2014).

O equipamento é consideravelmente rápido na determinação do teor de ligante em amostras de 1200g a 1800g, em 30 a 45 minutos, com precisão de 0,11%, conforme a ASTM D 6307. O ensaio pelo método da ignição em si é praticamente todo automatizado.

Há uma quantidade mínima em massa requerida de amostra para realização do ensaio de extração com o forno de ignição. Essa quantidade é em função do tamanho máximo nominal da mistura a ser ensaiada (Tabela 1.4). Uma nota é feita na ASTM D 6307 quanto à capacidade máxima de alguns aparelhos. Alguns modelos de forno não comportam a capacidade recomendada por norma, então é indicada a divisão da amostra necessária, seguida de uma combinação dos resultados.

Semelhantemente ao método de centrifugação, as amostras que não estão “macias” suficientemente devem ser levadas a uma estufa com uma temperatura entre 105 e 115°C para posterior destorroamento e quarteamento. O destorroamento é indicado para que haja uma maior e melhor superfície específica durante o processo de extração, facilitando o processo (ASTM, 2010).

Cuidados são indicados quanto à segurança do laboratório, como a instalação do exaustor, cuidados do laboratorista no manuseio da amostra e forno durante e após o ensaio. Uma observação importante é dada no início da descrição da norma ASTM D 6307, esta norma não pretende tratar de todas as questões de segurança associadas à utilização do forno. É de responsabilidade do usuário estabelecer práticas de segurança e de saúde adequadas e determinar as limitações de aplicabilidade antes de usar o forno.

Tabela 1.4 – Tamanho mínimo de amostra

Tamanho máximo nominal do agregado (mm)	Massa mínima da amostra (kg)
4,75	0,5
9,5	1
12,5	1,5
19,0	2
25,0	3
37,5	4

Fonte: ASTM (2010)

A norma norte-americana ASTM D 6307 também trata da precisão do ensaio. O desvio padrão de único laboratório para o teor de ligante foi de 0,04 %, portanto, os resultados de dois testes corretamente realizados, pelo mesmo operador, nas mesmas amostras de misturas a quente não deve diferir em mais de 0,11%. O desvio padrão de múltiplos laboratório para o conteúdo de asfalto foi encontrado em 0,06 %, portanto, os resultados de dois testes corretamente realizados de dois laboratórios diferentes em amostras de misturas a quente a partir do mesmo lote não deve diferir em mais de 0,17%.

A precisão citada na norma ASTM D 6307 é baseada na pesquisa de Brown e Mager (2003), onde o objetivo, além da precisão da determinação do teor de ligante de amostras de CA, era também avaliar a precisão de análise granulométrica após a extração do asfalto utilizando o forno de ignição. O estudo foi realizado com o auxílio de doze laboratórios norte-americanos e quatro diferentes tipos de misturas a quente, cada uma com um tipo de rocha, graduação e teor de ligante. A conclusão do estudo é que os resultados de análise de teor de ligante e granulometria de amostras de misturas a quente utilizando o forno de ignição são superiores a métodos que utilizam de solventes para a extração, sem afetar significativamente os agregados utilizados na pesquisa.

A precisão do modelo de ignição por infravermelho foi estudada por Prowell (2002), utilizando o modelo de forno de ignição por infravermelho Troxler Model 4730 para comparar resultados com o forno de ignição por convecção da Thermolyne. Foram utilizadas 48 amostras para cada forno, estas com diferentes tipos de rocha, diferente graduação máxima e dois tipos de teor, utilizando o teor ótimo e um teor com adição de 0,5% de asfalto acima do teor ótimo. Os resultados mostraram diferenças significativas nos fatores de calibração entre os modelos,

etapa essa importante para garantia de precisão dos resultados, principalmente para as amostras de graduação de menor diâmetro máximo, mas os resultados finais de teor de ligante são identicamente precisos. Dentre os fatores estudados estatisticamente, o de maior importância na calibração ficou por conta do tipo de agregado utilizado, seguido do tipo de forno e diâmetro máximo nominal da mistura, respectivamente. A diferença de degradação dos agregados após os ensaios mostrou ser ligada à graduação, mas não ligada ao tipo de forno, que mostrou resultados estatisticamente semelhantes para ambos os modelos.

O estudo de Prowell e Hurley (2005) utilizou de seis diferentes tipos de rocha, estas selecionadas por apresentarem regularmente altos valores de calibração. Sua calibração alta era devida a alta perda, alta degradação, durante o processo de ignição. Foram utilizados quatro diferentes métodos de ignição: convecção, infravermelho, Ontário e Tempyxox. Amostras com adição de 0,5% de teor de ligante acima do teor ótimo também foram testadas. O estudo concluiu, além das precisões dos quatro métodos e implicações de utilização dos diferentes tipos de rocha de alta perda, que o método de Ontário, que utiliza o forno de ignição por convecção, tem maior precisão se comparado ao método padrão para estes tipos de rochas com altos fatores de calibração devido à degradação pela ignição. Sua diferença está na condição de finalização do ensaio de ignição. O método de Ontário tem a condição final do teste na mudança menor igual a 1 g por três minutos consecutivos no ponto de temperatura mais elevada do ensaio (538, 480 ou 450°C). Este procedimento gerou fatores de correção menores que 1%.

O estudo de Choubane et al. (2006) utilizaram de diferentes misturas e doze diferentes laboratórios para verificar a precisão do método de ignição para a situação local, na Florida. Todos os laboratórios procederam com o método para a obtenção do teor de ligante com o modelo de forno da NCAT, de ignição por convecção, e análise granulométrica com as amostras finais do método de ignição. Todos os laboratórios utilizaram modelos de forno com balança interna, mas divididos em dois grupos de seis laboratórios, diferenciados pelo fabricante do forno. As misturas foram confeccionadas de acordo com a especificação da *Florida Department of Transportation (FDOT)*. Foram utilizados seis diferentes tipos de agregados e somente um tipo de ligante. Os teores de ligante utilizados nas misturas foram o teor de projeto, teor de projeto com mais 0,5% e teor de projeto com menos 0,5% de ligante. Foi utilizada a condição de perda menor que 0,1 g por três minutos

consecutivos para o término do ensaio de extração. As conclusões da pesquisa são positivas quanto à precisão do forno de ignição na determinação do teor de ligante e análise granulométrica pós-ensaio de extração. Mesmo em situações de diferentes operadores e diferentes laboratórios, os resultados de desvio padrão se mostraram baixos, confirmando a precisão do ensaio. Na mistura “Mix 3” os valores de granulometria se mostraram errôneos. A conclusão dos pesquisadores ficou a cargo do tipo de rocha utilizada como agregado da mistura em particular. Dentre as indicações dos autores está a criação de um banco de dados de fatores de calibração em função do tipo de rocha, já que o tipo de rocha utilizada influencia diretamente nesta fase do teste, como já visto em pesquisas anteriores.

Mallick e Brown (1999) fizeram uma pesquisa com o intuito de usar o método de ignição para prever se uma massa está ou não dentro da conformidade de projeto utilizando somente os 10 a 15 min iniciais do processo de ignição. Este tempo foi escolhido pelos autores analisando gráficos de perda de massa por tempo decorrido de ensaios pelo método de ignição para diferentes teores de ligante, maior igual e menor igual a 6% de teor de ligante. Os autores criaram essa alternativa procurando melhorar o controle em tempo real da usinagem, partindo do pressuposto conhecimento do comportamento e análise de resultados já conhecidos dentro do histórico de controle de teor da usina, ou seja, criar um método de prevenção de mudanças bruscas na produção. Assim, o método consiste-se, resumidamente, em uma análise gráfica do histórico de ensaios e obtenção de um fator de predição (P_f). Este fator é aplicado em uma equação com o valor encontrado destes ensaios mais curtos. Com o método preventivo foram encontradas diferenças médias máximas de 0,28% e 0,08% nos resultados finais de obtenção de teor de ligante, utilizando duas misturas com dois tipos de agregado diferentes.

Dentre as diferentes pesquisas mencionadas, um fator comum é o de que a precisão do ensaio de extração pelo método de ignição é diretamente dependente do fator de calibração e este é dependente do tipo de rocha utilizada. Essa análise leva a conclusão de que a precisão final do ensaio de extração é um fator muito regional, ou seja, a precisão é ligada ao tipo de agregado utilizado na mistura e disponível, mas garantida com a devida calibração. Os diferentes tipos de rocha afetaram até mesmo a análise granulométrica em alguns casos. Estes fatores fazem necessário o estudo com diferentes tipos de agregados utilizados nesta pesquisa, procurando trazer para a realidade da região do Rio Grande do Sul a influência dos

diferentes tipos de rocha na precisão do ensaio de extração de ligante e granulometria através do método da ignição.

1.6.1.1 Fator de calibração

O fator de calibração C_F é um valor em porcentagem utilizado para compensar a perda de massa excedente à massa de ligante da amostra. Inicialmente essa perda excessiva foi creditada à perda de finos durante a exaustão no processo de combustão do ensaio, conforme visto na pesquisa de Hall e Wilians (1998), onde, ao final, foi apontado que a massa específica dos agregados variava após a exposição ao processo de extração.

Após esses indícios, novas pesquisas foram realizadas, como a de Prowell e Carter (2000), que procurava avaliar o efeito da extração utilizando o forno de ignição nas propriedades dos agregados. No quadro resumo da Tabela 1.5 está indicado com S qual propriedade teve diferença significativa entre a amostra virgem ou queimada durante o ensaio, além de apresentar o fator de calibração correspondente. É visto que um alto valor de C_F não necessariamente indica grande variação após a queima do agregado e que a massa específica pode variar independentemente do valor de C_F , visto que uma rocha de somente 0,10% de C_F variou sua massa específica assim como uma de 2,02%, mas não ocorreu em uma de 0,43%. A pesquisa também indicou uma grande variação no VMA e equivalente de areia em várias das rochas após a queima.

Com o avanço dos fornos de ignição, fez-se necessária uma comparação entre diferentes modelos. Prowell (2002) comparou o forno de ignição por convecção ao forno de ignição por infravermelho, concluindo que há diferença entre os valores de C_F entre os diferentes modelos, com valores menores com o modelo com ignição por infravermelho, mas com tempo de ensaio mais elevado.

Prowell e Hurley (2005) indicou que em diferentes estados norte-americanos encontravam-se rochas com altos valores de calibração e que estes estados realizaram diversas pesquisas focadas no assunto a fim de procurar uma solução, visto que agregados de alta perda proporcionavam grande variação entre os valores dos ensaios.

Tabela 1.5 – Quadro indicativo de diferenças significativas (S) de agregados antes e após queima no forno de ignição e valores de C_F

Tipo de agregado	Angularidade do agregado fino	Equivalente de areia	G_{SB} Agregado fino	Lamelaridade 5:1	Lamelaridade 3:1	G_{SB} Agregado graúdo	Gradação			Diferenças significativas	Fator de calibração C_F (%)
							Diâmetro Nominal Máximo	4,75mm	0,075mm		
Siltito 12,5mm	-	-	S	-	-	-	-	-	-	1	0,09
Quartzito 12,5 mm	S	S	S	-	-	S	-	-	-	4	0,79
Granito 12,5mm	S	S	S	-	S	S	-	-	-	5	0,30
Mistura Diabásica 12,5mm	-	S	-	-	-	-	S	-	S	3	0,43
Cascalho de rio 12,5mm	-	S	-	-	-	S	-	-	S	3	0,10
Calcário 19,0mm	-	-	S	S	-	-	-	-	-	2	0,28
Cascalho de granito 25,0mm	S	S	S	-	-	-	-	-	S	4	0,30
Siltito 25,0mm	-	-	-	-	S	S	-	-	-	2	0,09
Diabásio 25,0mm	-	-	-	-	-	S	-	-	-	1	0,14
Granito 37,5mm	-	-	-	-	-	S	-	-	-	1	2,02

Fonte: Adaptado de Prowell e Carter (2000)

Como exemplos citados por Prowell e Hurley (2005), o departamento de transporte do estado de Illinois realizou pesquisas com análise termogravimétrica (TGA) em suas dolomitas, rochas típicas da região, apontando a combustão de carbonatos como o principal responsável pela perda de massa durante o processo de combustão, onde o composto $MgCO_3$ iniciava a queima aos 40°C. Em Iowa, foi indicado que os seus agregados ainda perdiam massa mesmo após todo o consumo. No TGA foi observado que as curvas mais problemáticas advinham de agregados com grande quantidade de cloretos. Seus ensaios de extração com o forno de ignição foram corrigidos com diminuição da temperatura e do tempo de ensaio. Já em Ontario, foi desenvolvido um método modificado pelo seu departamento de transporte para seus agregados com elevada quantidade de quartzo. Concluíram que o quartzo sofria expansão em aproximadamente 573°C, transformando-se do tipo alfa para beta, influenciando até mesmo na análise granulométrica por romper os grãos de agregado.

Prowell e Hurley (2005) utilizaram 4 diferentes métodos em sua pesquisa procurando indicar as suas variações nos resultados finais de C_F e obtenção de teor de ligante em 6 diferentes agregados problemáticos. Utilizaram 3 modelos de forno, por ignição, infravermelho e um baseado em pirólise. O modelo que utiliza pirólise fornece uma atmosfera desprovida de oxigênio, com uma amostra final totalmente desprovida de orgânicos, onde a fumaça e hidrocarbonetos são destruídas em uma

câmara de oxidação localizada no superior do forno. Dentre os 4 métodos, o método de Ontario, que utilizam o forno de ignição por convecção e final de ensaio em variação menor do que 0,1g em 3 minutos consecutivos, apresentou o menor erro na obtenção de teor de ligante, em contrapartida, o modelo baseado em pirólise apresentou os menores valores de C_F .

Prowell e Youtcheff (2009) indicaram que o enxofre contido no asfalto afeta a perda de massa durante o processo de ignição, assim como a porcentagem de cal hidratada adicionada a mistura.

Já Kowalski et al. (2010) focaram sua pesquisa somente em misturas asfálticas com dolomita. Mostrando que a dolomita se decompõe em duas fases diferentes, primeiramente de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ para CaCO_3 , MgO e CO_2 , e logo após o CaCO_3 passa para CaO e CO_2 . Como conclusão chegaram a 3 pontos: propuseram redução da temperatura de ensaio para 427°C , além de mostrar que a perda de massa é função da temperatura e tempo de ensaio; a temperatura durante o ensaio chega a 60°C acima da temperatura ajustada para o ensaio; a parte de cima do cesto tem temperatura mais elevada em comparação a parte de baixo do cesto de amostra, chegando a diferença de 58°C .

1.6.2 Método da Centrifugação

O ensaio de extração de ligante, normatizado pela DNER 053/94 – Misturas betuminosas – porcentagem de betume, baseada na norma americana ASTM D2172-75 – *Quantitative extraction of bitumen from bituminous paving mixtures* e AASHTO 164-86 – *Quantitative extraction of bitumen from bituminous paving mixtures*. A norma tem como centro uma centrífuga extratora de ligante asfáltico, conhecida por Rotarex, ilustrada na Figura 1.8. As especificações do aparelho, assim como a aparelhagem necessária para realizar o ensaio estão descritos na norma. Outros detalhes necessários para o ensaio também são encontrados, como temperaturas para devida preparação das amostras, tipos de solvente para diferentes tipos de ligante, detalhes quanto ao manuseio da amostra antes e depois do ensaio e equação para aferição do teor de ligante na mistura asfáltica.

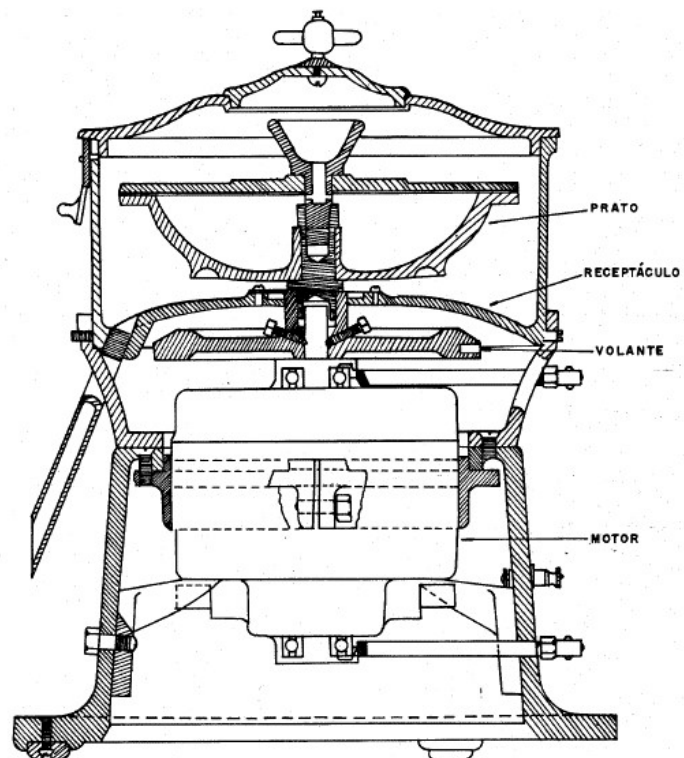
A DNER-ME 053/98 nos descreve a aparelhagem necessária para o ensaio:

- a) Aparelho extrator de ligante, elétrico ou manual, o prato deverá ter capacidade para 1,5Kg de amostra e capacidade de velocidade rotacional de 3600rpm com regulador de velocidade (Figura 1.9).
- b) Recipiente com capacidade de 5 litros, com formato de calota esférica, fundo chato e munido de duas alças laterais;
- c) Balança com sensibilidade à 0,1g e capacidade de 2kg;
- d) Estufa que mantenha a temperatura entre 80°C e 120°C;
- e) Béquer de alumínio com capacidade de 600ml;
- f) Proveta de vidro de 250ml de capacidade;
- g) Papel filtro de diâmetro igual ao diâmetro externo do prato, com furo no centro de diâmetro igual a 5cm;
- h) Colher metálica com cabo de 25 cm e capacidade de 30ml a 50ml.

Figura 1.8 – Aparelho extrator Rotarex

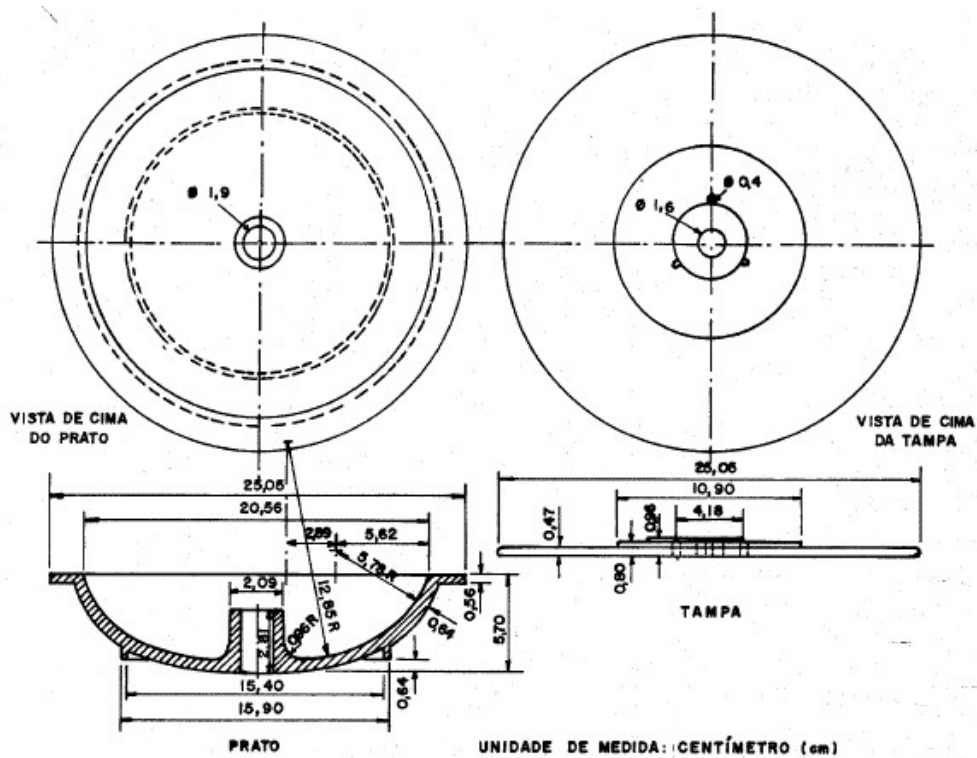


Figura 1.9 – Centrífuga Rotarex – descrição das peças



Fonte: DNER 053/94

Figura 1.10 – Centrífuga Rotarex – especificações de norma



Fonte: DNER 053/94

Pesquisas mais recentes, como a de Gonçalves et al. (2015) e Rossato et al. (2014), mostram que vários fatores influenciam diretamente nos resultados de teor de ligante do ensaio utilizando o Rotarex e granulometria após extração:

- a) Modelo do aparelho: o modelo manual se mostra pouco eficiente na extração do ligante da mistura; o modelo elétrico mostrou-se mais confiável na extração por garantir uma maior frequência de rotações por minuto, garantindo uma maior força tangencial. Logo, o tipo de aparelho influencia os valores de teor de ligante e granulometria, por um motivo simples, ao não lavar corretamente a rocha, o modelo manual concebe uma amostra final com grumos de ligante e agregados de diferentes granulometrias, ao final, estes são contabilizados em peneiras erradas;
- b) Absorção da rocha: rochas de maior absorção mostraram influência nos resultados de teor de ligante, por dificultar a total extração do ligante visto que parte do ligante deve-se encontrar dentro da rocha mesmo após a centrifugação; no caso da rocha de menor absorção, se não houver uma extração eficiente, serão formadas maiores quantidades de torrões e agregados, visto que este tipo de rocha propicia uma maior quantidade de teor efetivo, ou seja, uma maior quantidade de ligante exposto. Neste caso houve problemas quanto à aferição da granulometria quando utilizado o modelo manual do Rotarex, visto sua baixa eficiência na extração;
- c) Quantidade de finos na mistura: traços com grande quantidade de material passante na peneira n°200 tendem a ter valores elevados de teor de ligante. Parte deste material é lavado conjuntamente ao ligante da amostra, elevando erroneamente o valor de teor de ligante. Em contrapartida, misturas com baixa quantidade de finos mostram melhores resultados no ensaio de extração.

2 METODOLOGIA

A pesquisa teve como foco principal estudar e avaliar prováveis influências nos resultados finais de ensaios de obtenção de teor de ligante e granulometria de diferentes características existentes nas misturas asfálticas, como origem do agregado e faixas granulométricas.

2.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Para os ensaios de extração de ligante foram utilizados os métodos de ignição e centrifugação de misturas asfálticas e procurou-se também obter uma avaliação mediante comparação de resultados entre estes métodos.

Diferentes tipos de rocha se mostraram influentes no processo de obtenção de teor de ligante utilizando o método de ignição da ASTM D 6307. Estas influências foram estudadas por Prowell (2002), Brown e Mager (2003) e Prowell e Hurley (2005), onde foi consenso que diferentes faixas granulométricas e origem das rochas são importantes na fase de calibração do forno de ignição e esta é vital para a acurácia do ensaio. Procurando repassar para a realidade nacional, serão utilizadas rochas do Rio Grande do Sul e faixas granulométricas usuais da especificação brasileira para este estudo.

Nas pesquisas de Rossato et al. (2014) e Gonçalves et al. (2015) também foi estudada a influência da absorção de diferentes rochas, de alta e baixa absorção, na obtenção do teor de ligante e granulometria, com suas absorções ponderadas das misturas em 3% e 0,61%, respectivamente. Foi utilizado o ensaio de extração de ligante pelo método da centrifugação. As duas pesquisas também procuraram avaliar a influência da graduação da mistura, mostrando que uma maior presença de finos na mistura pode interferir nos resultados de teor de ligante utilizando o método em questão.

Neste trabalho foram utilizadas rochas de diferentes origens mineralógicas do estado do Rio Grande do Sul, empregadas como agregado mineral para a confecção de misturas de CA. Cada uma das rochas possuía alguma característica distinta desejada para a análise de dados futura. Utilizou-se CAP 50-70 para as misturas em todas as rochas, com a diferença de que em uma das rochas também foi empregado AMP 60/85.

Segue na Tabela 2.1 abaixo um resumo das características de cada uma das seis rochas utilizadas nessa pesquisa. Todas as rochas já foram utilizadas em pesquisas do GEPPASV e foram fornecidas por pedreiras de diferentes regiões do Rio Grande do Sul (Figura 2.1). As características de cada rocha foram obtidas através das metodologias normatizadas indicadas na Tabela 2.2.

Figura 2.1 – Localização das cidades de origem dos agregados da pesquisa



Tabela 2.1 – Resumo das características de cada rocha da pesquisa

Origem do agregado	Rocha	Agregado	Absorção (%)	Massa específica real (g/cm ³)	Perda por abrasão (%)	Sanidade (%)
SANTO ANT. DA PATRULHA	Basalto	Graúdo	0,978	2,825	9,88	3,47
		Miúdo	0,864	2,696	---	---
ITAARA	Riodacito	Graúdo	3,126	2,658	10,67	1,521
		Miúdo	3,551	2,569	----	---
SARANDI	Basalto	Graúdo	1,683	2,995	16,87	1,22
		Miúdo	1,906	2,965	---	---
ELDORADO DO SUL	Granito	Graúdo	0,624	2,633	21,3	0,636
		Miúdo	0,634	2,501	----	---
PELOTAS	Granito	Graúdo	1,187	2,638	21,30	---
		Miúdo	---	2,662	---	---
CAÇAPAVA DO SUL	Basalto	Graúdo	0,429	2,839	14,79	4,32
		Miúdo	0,566	2,831	---	---

Tabela 2.2 - Ensaios utilizados para caracterização dos agregados

Propriedade	Método
Absorção (%)	DNER-ME 195/97 e NBR 30/2001
Massa Específica (g/cm ³)	DNER-ME 195/97
Sanidade (%)	DNER-ME 089/94
Perda a abrasão LA (%)	DNER-ME 035/98

Após as dosagens foram confeccionadas as misturas: 3 teores para faixa B e 3 teores para faixa C, ou seja, 6 misturas por rocha. De cada mistura coletou-se 5 amostras para extrações com o forno de ignição e 5 amostras para extrações com a Centrífuga. Para cada extração foi realizada uma análise granulométrica. Um fluxograma (Figura 2.2) demonstra as etapas de ensaios para cada rocha utilizada na pesquisa. Na Tabela 2.3 são encontradas as quantidades totais de amostras.

A utilização de duas faixas granulométricas, B e C, deve-se a intenção de analisar a influência da granulometria na obtenção do teor de ligante pelos diferentes modos de extração utilizados na pesquisa, método da ignição e método da centrifugação. Cada uma dessas faixas tem características diferentes de parâmetros volumétricos, que podem se mostrar influentes na pesquisa.

Realizou-se uma dosagem Marshall para cada faixa granulométrica de cada uma das rochas, ou seja, duas dosagens por rocha, faixa B e faixa C. Além das misturas com o teor de projeto, fez-se misturas com variação de 0,5% de teor de projeto, tanto redução quanto adição, totalizando 3 teores por faixa granulométrica. De cada teor foram coletadas 5 amostras para cada extrator, como exemplificado na Tabela 2.3. As amostras para o forno de ignição têm cerca de 2.000 g, conforme norma, e as da Centrífuga cerca de 600g, capacidade do aparelho disponível no GEPPASV.

A caracterização dos ligantes utilizados na pesquisa, CAP 50-70 e AMP 60/85, está indicada na Tabela 2.4.

Figura 2.2 – Fluxograma de etapas para cada uma das rochas da pesquisa



Tabela 2.3 – Quantidade de amostras

Agregados	Extratores	Faixas	Teores de ligante	Amostras por teor	Total por faixa granulométrica
6	2	B	3	5	15
		C	3	5	15
<i>Forno de ignição**</i>					195
<i>Centrífuga**</i>					195
TOTAL**					420

*Teor de projeto, Teor de projeto +0,5%, Teor de projeto -0,5%

** somatório total com adição de uma amostragem com ligante modificado

Tabela 2.4 – Caracterização dos ligantes

PROPRIEDADE	Norma	CAP 50-70		AMP 60/85-E	
		Limites	Resultado	Limites	Resultado
Penetração (0,1mm)	NBR 6576	50 a 70	62	40 a 70	65
Ponto de Amol. (°C)	NBR 6560	≥ 46	48	≥ 60	64
Viscosidade Brookfield 135°C (Pa.s)	NBR 15184	≥ 274	335	≤ 3.000,0	1247
Viscosidade Brookfield 150°C (Pa.s)	NBR 15184	≥ 112	160	≤ 2.000,0	659
Viscosidade Brookfield 177°C (Pa.s)	NBR 15184	57 a 285	65	≤ 1.000,0	240
Recuperação elástica (%)	NBR 15086	≥ 85	---	≥ 85	86,5
Ponto de Fulgor (°C)	NBR 11341	235 min	---	235 min	235 min

2.2 DOSAGENS MARSHALL

O método vigente nos órgãos rodoviários para dosagem de concretos asfálticos é a metodologia Marshall, mesmo com os avanços científicos na área de dosagem com o método Superpave, foi escolhida uma aproximação ao panorama nacional, visando nesta pesquisa misturas com dosagens aproximadas às empregadas atualmente em pista, logo, o método Marshall foi utilizado para todas as dosagens deste trabalho.

Como parte da metodologia da pesquisa, foi escolhido um enfoque em misturas realmente empregáveis, ou seja, concretos asfálticos com quantidade correta de ligante asfáltico e aplicáveis em campo. Para tanto, foi necessária a dosagem das 14 misturas abordadas nessa pesquisa, 7 dosagens na faixa C e 7 dosagens na faixa B do DNIT.

As dosagens dos concretos asfálticos seguiram a orientação brasileira, a dosagem Marshall (DNER – ME 043/95) e utilização da *Gmm*, obtida através do Rice Test (NBR 15619). Todas as dosagens foram realizadas pelo pesquisador no laboratório do GEPPASV na UFSM, utilizando um compactador automático. As granulometrias escolhidas foram o centro dos limites da faixa B e C do DNIT (Figura 2.3 e Figura 2.4). Os agregados foram separados por peneira no laboratório, possibilitando que todas as misturas fiquem no centro da faixa pelo controle de massa por peneira, assim, todas as misturas possuem a mesma granulometria, facilitando a análise dos resultados obtidos dos ensaios.

No Brasil, a determinação do teor de ligante difere para cada órgão, instituto ou empresa. O mais recorrente é a escolha do teor de ligante em relação ao Volume

de Vazios correspondente a 4%, também sendo comum escolher uma média entre os teores obtidos através da máxima estabilidade e pela máxima massa específica aparente da amostra compactada (BERNUCCI ET AL., 2006).

Como critério de dosagem, foi escolhido o método sugerido por Ceratti e Reis (2001), onde é montado um gráfico com o Vv e RBV em função do Teor de Ligante dos CPs. No gráfico são impostos os limites de norma do Vv e RBV e a partir de linhas de tendência do Vv e RBV são obtidos 4 valores de teores de ligante em função destes limites. Partindo dos dois teores centrais, é calculada a média dentre os dois. Assim, é garantido um teor que satisfaça tanto uma quantidade correta de Vv com uma adequada RBV, chegando a um teor efetivo adequado à mistura. Abaixo segue um exemplo de umas das moldagens já realizadas (Figura 2.5 e Tabela 2.5).

Figura 2.3 – Composição granulométrica – Faixa B DNIT 031/2006 - ES

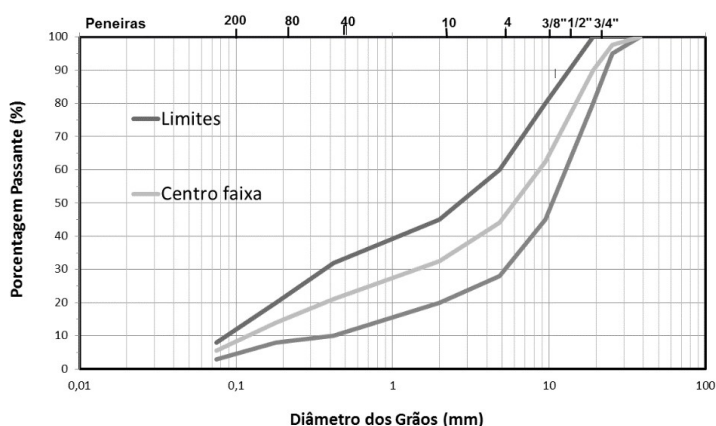


Figura 2.4 - Composição granulométrica – Faixa C DNIT 031/2006 - ES

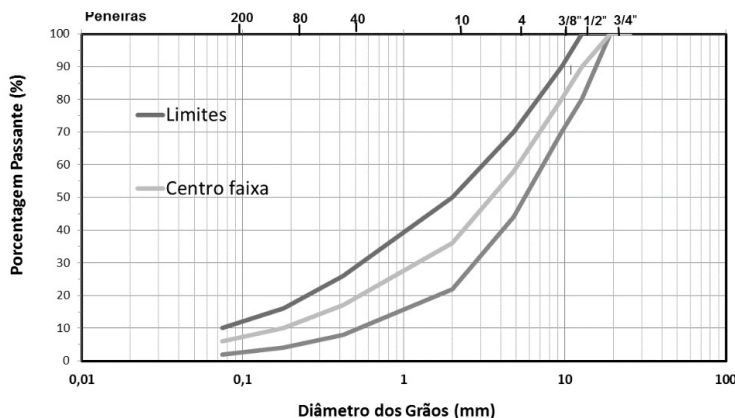


Figura 2.5 - Gráfico Vv e RBV x Teor de ligante – St. Antônio da Patrulha - Faixa C

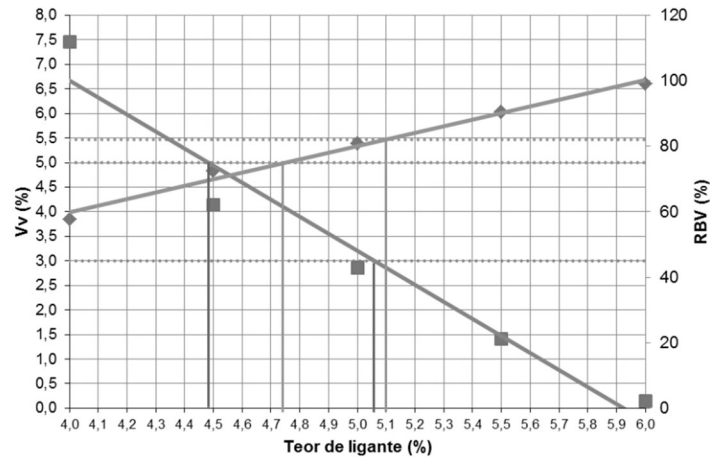


Tabela 2.5 – Determinação do teor pelo método de Ceratti e Reis (2011) - St. Antônio da Patrulha - Faixa C

X1	4,48
X2	4,73
X3	5,06
X4	5,10
Teor de projeto	4,90

Tabela 2.6 – Resumos dos dados de dosagem e calibração (CAP 50-70)

Rocha	Faixa	Gmm	Absorção Pond. (%)	Vv (%)	RBV (%)	E (N)	Teor de Projeto (%)	C _F (%)
SANTO ANT. DA PATRULHA	B	2,540	0,91	3,4	77	1.050	4,90	1,22
	C	2,525	0,89	4,0	78	900	5,30	0,91
ITAARA	B	2,365	3,38	4,1	78	1.250	5,90	0,62
	C	2,335	3,47	4,3	77	1.100	7,00	0,40
SARANDI	B	2,655	1,82	3,7	76	1.450	5,10	0,60
	C	2,635	1,86	3,7	79	1.200	5,50	0,58
ELDORADO DO SUL	B	2,397	0,63	3,5	78	1.050	5,40	0,47
	C	2,390	0,63	3,7	76	1.150	5,70	0,54
PELOTAS	B	2,425	1,19	3,5	78	1.300	5,30	0,08
	C	2,385	1,20	3,5	78	980	5,70	0,10
CAÇAPAVA DO SUL	B	2,620	0,51	3,5	77	950	5,10	0,37
	C	2,595	0,53	3,4	80	850	4,80	0,43

Tabela 2.7 - Resumos dos dados de dosagem e calibração (AMP 60/85)

Rocha	Faixa	Gmm	Absorção Pond. (%)	Vv (%)	RBV (%)	E (N)	Teor de Projeto (%)	C _F (%)
SANTO ANT. DA PATRULHA	B	2,538	0,91	3,4	77	1.100	4,80%	0,65%
	C	2,517	0,89	4,0	78	920	5,00%	0,70%

2.3 MISTURA DAS AMOSTRAS

Realizou-se uma única usinagem em um misturador mecânico para cada mistura proposta. De cada mistura foram retiradas 5 amostras para cada método de extração. As amostras para o forno de ignição e para a centrífuga foram coletadas intercaladamente e sempre seguidas de uma homogeneização da massa, procurando manter as amostras o mais semelhante possível. Assim, a amostra nº1 do forno e nº 1 da centrífuga foram retiradas em um mesmo momento e, em seguida, a massa é revirada para homogeneização; então foram retiradas as amostras nº 2 do forno e nº 2 da centrífuga, seguindo o processo até uma total amostragem da mistura (Figura 2.6).

Na Tabela 2.8 e na Tabela 2.9 estão indicados exemplos das granulometrias utilizadas na pesquisa para as diferentes misturas, partindo de um teor de projeto de 5,0% fictício. As misturas foram confeccionadas, como já mencionado, utilizando diferentes teores de ligante na faixa B e C do DNIT.

Figura 2.6 - Processo de mistura e coleta das amostras de uma mistura usinada



a) misturador mecânico



b) mistura usinada



c) amostras coletadas

Tabela 2.8 - Exemplo de granulometria entre CA's de diferentes teores usinados – Faixa B

Peneira	Passante (%)	Retido (%)	Teor de Projeto 5,0% (g)	Teor de Projeto -0,5% (g)	Teor de Projeto +0,5% (g)
1"	97,5	2,5	309	310	307
3/4"	90,0	7,5	926	931	921
3/8"	62,5	27,5	3396	3414	3378
n 4	44,0	18,5	2285	2297	2273
n 10	32,5	11,5	1420	1428	1413
n 40	21,0	11,5	1420	1428	1413
n 80	14,0	7,0	865	869	860
n 200	5,5	8,5	1050	1055	1044
Pas 200	----	5,5	679	683	676
Ligante			650	585	715
TOTAL			13000	13000	13000

Tabela 2.9 - Exemplo de granulometria entre CA's de diferentes teores usinados – Faixa C

Peneira	Passante (%)	Retido (%)	Teor de Projeto 5,0% (g)	Teor de Projeto -0,5% (g)	Teor de Projeto +0,5% (g)
1/2"	90,0	10,0	1235	1242	1229
3/8"	80,0	10,0	1235	1242	1229
n 4	58,0	22,0	2717	2731	2703
n 10	36,0	22,0	2717	2731	2703
n 40	17,0	19,0	2347	2359	2334
n 80	10,0	7,0	865	869	860
n 200	6,0	4,0	494	497	491
Pas 200	----	6,0	741	745	737
Ligante			650	585	715
TOTAL			13000	13000	13000

2.4 EXTRAÇÕES COM O FORNO DE IGNIÇÃO

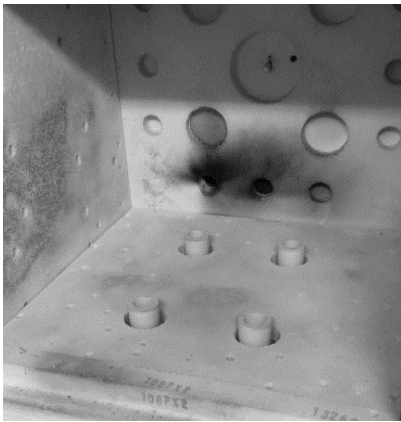
Os procedimentos para o ensaio seguem abaixo, resumidos no manual NCAT (2000) e seguido da Figura 2.7 para melhor visualização desses passos:

- a) É inicialmente aferida a massa inicial da amostra a ser ensaiada. A amostra é igualmente dividida e colocada em duas cestas protegidas que são montadas em conjunto com uma bandeja. Todo esse conjunto é colocado na câmara do forno sobre a pedra, tomando cuidado para que o conjunto cesta-bandeja não toque as laterais da câmara do forno;

- b) O ar oxigenado satura a amostra do asfalto, promovendo a combustão. Um soprador extrai o ar ambiente através das quatro aberturas do tubo de cerâmica localizado na base da câmara;
- c) Um filtro de cerâmica aquecido em 750°C, numa câmara situada acima da câmara principal, oxida os componentes voláteis;
- d) Cinco saídas de ar direcionam o ar exaurido até uma câmara superior, resfriando a exaustão através da mistura com o ar ambiente;
- e) O soprador direciona a exaustão através de uma porta de exaustão. A tubulação de exaustão direciona a exaustão para um sistema externo de exaustão.

Existe uma ressalva na ASTM D 6307 quanto à influência de aditivos e diferentes tipos de agregado na mistura nos resultados de extração. É recomendada uma calibração utilizando três amostras de mistura asfáltica e aditivo, se houver, com conhecida porcentagem de ligante (P). A amostra de calibração deve ter aproximadamente a mesma massa e graduação que serão usadas nas amostras a serem ensaiadas. As amostras de calibração devem ser colocadas em estufa a 150°C, separadamente agregado e ligante. Antes de misturar as amostras de calibração, é indicada que seja realizada a mistura de uma amostra descartável, chama de “manteiga”, com o intuito de preparar o recipiente de mistura, para que não se perca material grudado na bandeja. Então, é removida e descartada a mistura "manteiga" da bandeja, raspando-a, deixando um revestimento uniforme de resíduo de massa asfáltica, como indica a ASTM (2010, p. 2) “A mistura ‘manteiga’ impede que as amostras de calibração sejam influenciadas pela massa asfáltica residual retida na bandeja”. Feita a mistura das amostras de calibração, são determinadas a massa inicial de cada amostra (M_i) com precisão de 0,1g. Aquecer a amostra de calibração à 540 +/- 5°C até que durante 3 intervalos de 1 min consecutivos não ocorra perda de massa superior a 0,1% da massa da amostra M_i . Registrar a massa final após a ignição (M_L) com 0,1g de precisão, podendo ser feita imediatamente após a extração. É calculado então o fator de calibração (C_F) conforme a Equação 9 para cada amostra. É utilizada a média dos três valores de C_F obtidos nas amostras de calibração.

Figura 2.7 – Detalhes de instalação e equipamentos necessários para o ensaio com o forno de ignição



a) Detalhe dos cilindros cerâmicos devidamente acoplados na câmara



b) Pedra encaixada nos cilindros



c) Conjunto cestas-bandeja ajustados no interior da câmara



d) Pegador do conjunto cestas-bandeja



e) Equipamento básico de proteção

$$C_F = \left(\frac{M_I - M_L}{M_I} * 100 \right) - P \quad (9)$$

Onde:

M_I = massa total da amostra de calibração antes da ignição;

M_L = massa total da amostra de calibração após a ignição;

P = porcentagem real utilizada na mistura antes da ignição.

A mistura realmente ensaiada tem seu teor de ligante calculado (%AC) e é corrigido em função do fator de calibração C_F (Equação 10):

$$\%AC = \left(\frac{M_B - M_A}{M_B} * 100 \right) - C_F \quad (10)$$

Onde:

%AC = porcentagem de ligante na mistura previamente seca em estufa;

M_B = massa total da amostra antes da ignição;

M_A = massa total de agregado após a ignição;

C_F = fator de calibração.

2.5 EXTRAÇÕES COM A CENTRÍFUGA

Todos os ensaios de extração por centrifugação foram realizados no laboratório do GEPPASV na UFSM. Os ensaios de extração foram realizados somente com o modelo elétrico, visto que pesquisas recentes como as de Gonçalves et al. (2015) e Rossato et al. (2014) apontam para este modelo como de maior precisão, tanto de teor de ligante quanto de granulometria, devido à sua maior eficácia na extração do ligante se comparado ao modelo manual.

A norma possui algumas recomendações quanto à preparação da amostra para o ensaio, devendo esta ser colocada durante uma hora em um recipiente em estufa de 100°C a 120°C. Ao fim do tempo descrito, a amostra deve ser desmanchada com uma colher. Esse processo também é conhecido como destorroar a amostra. Quarteia-se a amostra e é colhida uma quantidade de 1kg. Lembrando que a norma só contemplava na época os modelos de centrífugas com capacidade de 1,5kg.

Um detalhe importante a ser considerado é o fato de não haver mais disponibilidade no mercado do solvente Tetracloreto de Carbono. Em substituição a este solvente será utilizado o solvente industrial Solver 87, registrado e fornecido comercialmente pela empresa LM Química Industrial Ltda. de Alvorada - RS. Este solvente é um substituto muito utilizado ultimamente por vários laboratórios. Outros solventes estão sendo utilizados também por laboratórios, como gasolina, esta indicada somente para modelos manuais de centrífugas, ou Percloroetileno.

A sequência do ensaio de extração com centrífuga segue os seguintes passos:

- a) Aquecimento da amostra à temperatura especificada, entre 80 e 100°C, e posterior destorroamento, aumentando a área de contato do solvente com o ligante, acelerando o processo;
- b) Afere-se a massa da amostra inicial a ser colocada no prato do aparelho Rotarex, devendo-se tarar a balança com o prato antes de colocar a amostra (Figura 2.8). A quantidade máxima por extrator varia por fabricante do equipamento, logo, devem-se seguir as indicações de fábrica. Essa aferição de massa é denominada na norma por “peso da amostra total”;
- c) Coloca-se o prato na centrífuga e coloca-se a primeira carga de solvente até a indicação de fábrica. É colocado o filtro de papel acima do prato (Figura 2.9) e é fechado o equipamento. O filtro de papel também possui dimensões normatizadas. É esperado um tempo de 15min para que o solvente aja na mistura;
- d) Passado o tempo de 15 min, é acionado o aparelho, inicialmente em baixa rotação, acelerando gradativamente. Quando o solvente for totalmente extraído juntamente com o ligante asfáltico, é sinal que terminou a primeira carga de solvente. Adiciona-se outra carga de solvente e inicia-se novamente a centrifugação. Este processo descrito neste item é repetido até que o solvente saia límpido, o que indica o fim da extração de ligante da amostra;
- e) O material pétreo resultante com filtro do ensaio de extração é levado à estufa até constância de massa, em uma temperatura de 80 a 100°C, indicada por norma. Afere-se sua massa. Esta é denominada por “peso final” na norma;
- f) Utiliza-se dos dados obtidos “peso do betume extraído” e “peso final” para o cálculo de “P”, sendo P a porcentagem de ligante asfáltico na Equação 9.

$$P = \left(\frac{\text{peso do betume extraído}}{\text{peso da amostra total}} \right) * 100\% \quad (11)$$

Figura 2.8 – Aferimento do “peso da amostra total”



Figura 2.9 – Preparação da amostra no Rotarex



2.6 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As amostras finais de extração de ligante permitem a análise granulométrica das misturas. Dentre os objetivos desta pesquisa está apurar a acurácia e precisão da análise granulométrica após ensaios de extração dentre os métodos de extração

de ignição e centrifugação, além, também, da influência das diferentes rochas utilizadas nas misturas, faixas granulométricas e diferentes teores de ligante.

O peneiramento é o método utilizado para análise da distribuição granulométrica de uma amostra de agregados. As amostras finais de extração de ligante possibilitam realizar a granulometria utilizando amostras finais destes ensaios. A análise granulométrica é feita a partir de uma amostra seca de agregado e esta é fracionada através das peneiras, sendo que estas são dispostas em ordem decrescente de abertura da malha. Com as massas retidas nas peneiras, essas são comparadas a massa inicial da amostra num todo (100%), assim calcula-se as porcentagens de massas retidas por tamanho da abertura das peneiras. Esse método de análise granulométrica de agregados é normalizado pela DNER-ME 083/98 – Agregados – análise granulométrica, e a coleta de amostras e sua redução pela DNER-PRO 120/97 e DNER-PRO 199/96, respectivamente.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo procura analisar diferentes influências nos resultados de ensaios de extração de ligante de concretos asfálticos, utilizando os métodos de Ignição e Centrifugação, e posterior análise granulométrica das amostras provenientes de extração.

As possíveis influências nos ensaios de extração de ligante e análise granulométrica objetivadas neste estudo são: origem mineralógica da rocha utilizada na mistura; variações no teor de ligante de projeto; diferentes faixas granulométricas; métodos de extração por Ignição e Centrifugação.

Inicialmente, é apresentada uma análise dos resultados dos ensaios de extração e granulometria encontrados nas misturas confeccionadas com rochas de origens mineralógicas distintas. Todas as rochas deste estudo foram fornecidas por diferentes pedreiras do estado do Rio Grande do Sul. Estas rochas são de corriqueira utilização em obras rodoviárias do estado.

Para cada rocha foram feitas dosagens nas faixas B e C do DNIT, pelo método Marshall. Logo, cada mistura de diferente faixa granulométrica e rocha possui um teor de projeto próprio, seguindo sempre a mesma metodologia e critério de escolha do teor de projeto.

As dosagens, misturas, coleta de amostras, extrações e análises granulométricas foram realizadas somente pelo pesquisador e no mesmo laboratório, anulando influências de diferentes práticas, operadores, laboratórios ou equipamentos.

Os métodos de extração de ligante utilizados neste estudo são:

- a) Ignição: realizados pelo método A (balança interna do equipamento) e B (balança externa), com e sem utilização do fator de calibração, afim de credenciar o método atual ou não à ensaios em amostras às cegas, sem prévio conhecimento da mistura;
- b) Centrifugação: utilizando o método de extração com aparelho de modelo elétrico;

As amostras ensaiadas nos métodos de extração foram analisadas granulometricamente buscando avaliar se esses métodos proporcionam amostras com graduações representativas da mistura ensaiada.

3.1 PEDREIRA DE SANTO ANTÔNIO DA PATRULHA (BASALTO)

Segue na Tabela 3.1 um resumo das características da rocha de Santo Antônio da Patrulha, teores de projeto para as misturas centradas na faixa B e C do DNIT e os fatores da calibração (C_F) utilizados no método de extração com o forno de ignição.

Tabela 3.1 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração

Rocha	Agregado	Absorção (%)	Perda por abrasão (%)	Sanidade (%)	Faixa	Teor de Projeto	C_F
Basalto	Graúdo	0,978	9,88	3,47	B	4,90%	1,22%
	Miúdo	0,864	---	---	C	5,30%	0,91%

Os fatores de calibração encontrados para esta rocha apresentaram valores considerados elevados pela experiência norte americana, onde fatores próximos ou superiores à 1% indicam que a rocha tem alta degradação durante a extração no forno de ignição, como já comentado no item 1.6.1. Este fator é utilizado ao fim do cálculo de extração, corrigindo perdas de massa ocorridas no decorrer da extração.

3.1.1 Determinação do teor de ligante

Iniciando pelas misturas utilizando a faixa B do DNIT, na Figura 3.1 são apresentados os valores médios de teor de ligante encontrados nos métodos de extração de ligante, montados a partir dos dados médios da Tabela 3.2. Na Figura 3.2 e Figura 3.3 fica mais claro o distanciamento dos valores médios de teor de ligante dos valores reais empregados nas misturas.

Tabela 3.2 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa B

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	4,40%		4,90%		5,40%	
	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>
FORNO DE IGNIÇÃO - MÉTODO A						
% Teor	5,57%	1,17%	6,06%	1,16%	6,65%	1,25%
% Teor -C _F	4,35%	-0,05%	4,84%	-0,06%	5,43%	0,03%
% T _C	0,15%	—	0,14%	—	0,14%	—
% Teor -C _F -T _C	4,20%	-0,20%	4,69%	-0,21%	5,29%	-0,11%
Desvio padrão	0,21%		0,17%		0,26%	
FORNO DE IGNIÇÃO - MÉTODO A						
% Teor	5,60%	1,20%	5,96%	1,06%	6,46%	1,06%
% Teor - C _F	4,38%	-0,02%	4,74%	-0,16%	5,24%	-0,16%
Desvio padrão	0,30%		0,13%		0,26%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	5,23%	0,83%	5,41%	0,51%	4,98%	-0,42%
Desvio padrão	0,46%		0,39%		0,32%	

* Média de 5 amostras

** C_F – Fator de calibração*** T_C – Fator de compensação de temperatura

Figura 3.1 – Médias dos teores de ligante – Faixa B

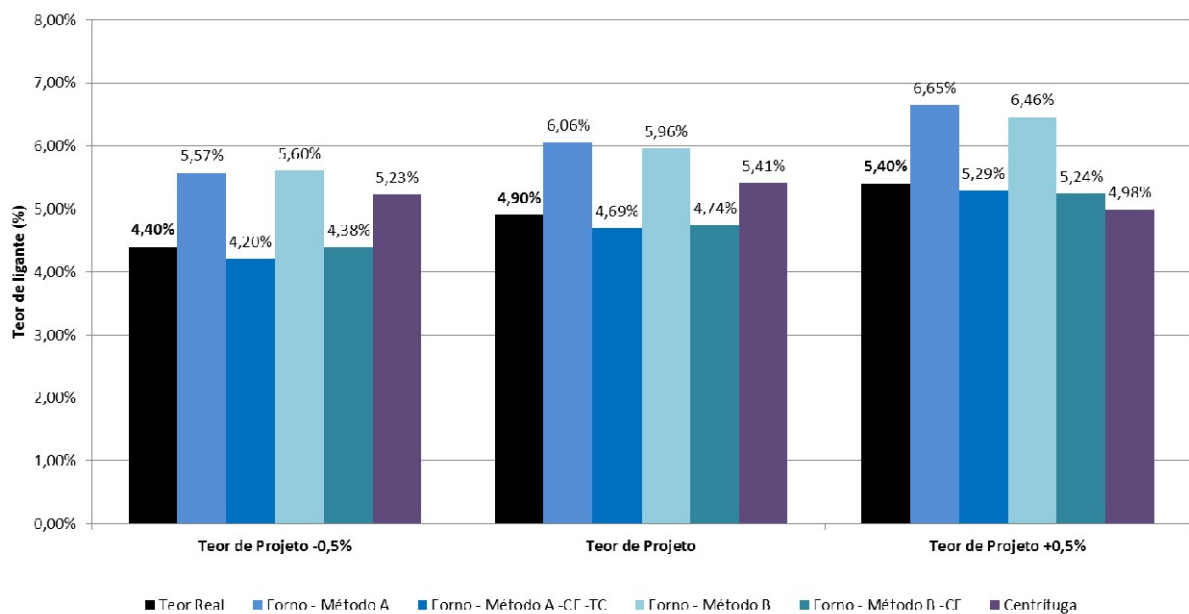


Figura 3.2 – Diferenças médias dos teores de ligante – Forno de Ignição – Faixa B

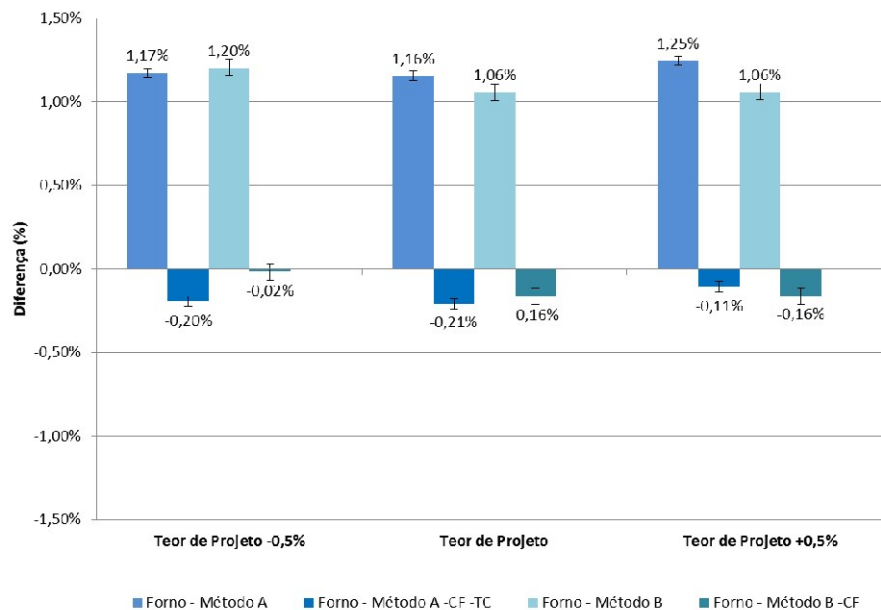
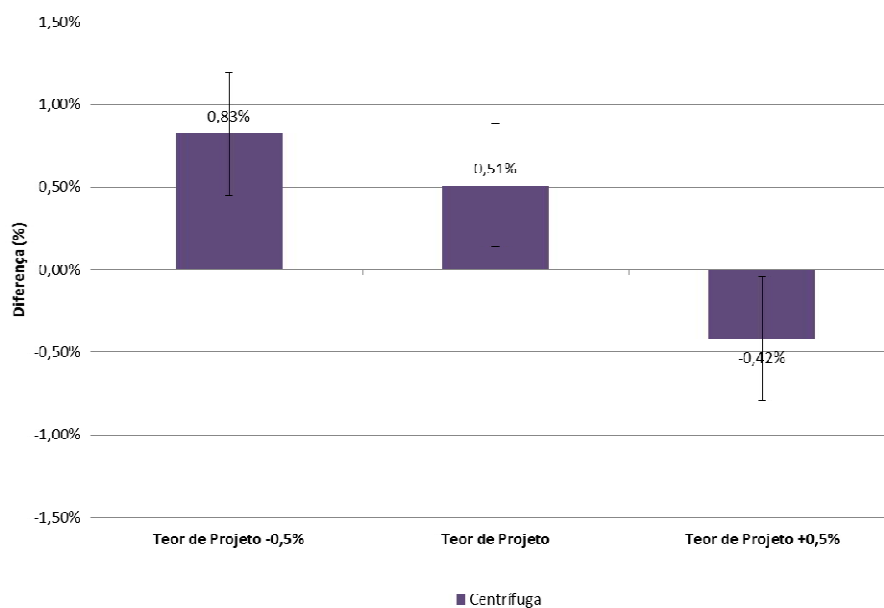


Figura 3.3 – Diferenças médias dos teores de ligante – Centrífuga – Faixa B



Analisando as médias entre os métodos de extração A e B utilizando o Forno de Ignição (Figura 3.2), fica clara a necessidade de utilização do fator de calibração C_F indicado por norma. Analizando as médias da mistura com Teor de Projeto, método A e B, há praticamente uma equiparação entre utilizar somente os dados do forno automatizado na mistura com Teor de Projeto, método A, ou utilizar uma

balança externa, este último denominado como método B. Nas misturas com variação do Teor de Projeto nota-se um distanciamento. Deve-se lembrar que a amostragem é a mesma, os dados de massa são retirados da balança interna ou externa. A provável causa de diferença está nas diferentes calibrações das balanças, tempos de aferição de massa das amostras e na correção por temperatura, o *Temperature Compensation* (T_C), onde o forno automatizado procura corrigir o resultado final de teor de ligante em função das temperaturas encontradas durante o ensaio.

Todas as misturas mostraram valores médios de teor de ligante do forno de ignição mais baixos que o valor real de mistura para essa faixa granulométrica e rocha, evidenciando uma necessidade de recalibração para a mistura, frisando que o cálculo do C_F não leva em consideração o T_C .

Resumidamente, as médias de teor de ligante se comportaram coerentes com o aumento dos teores nas misturas, mas a diferença entre as médias em comparação com os teores foi diminuindo acompanhando a adição de ligante. A questão a ser salientada é que essas diferenças são baixas e mostram uma constância dos resultados utilizando o método da Ignição frente a essas variações impostas.

O método de cetrifugação mostrou resultados muito diferentes da realidade das misturas (Figura 3.3). Na mistura Teor de Projeto -0,5%, acabou por apresentar valores altos de teor de ligante, diminuindo a diferença quando a mistura foi de Teor de Projeto, mas mesmo assim com valores elevados. Na mistura com Teor de Projeto +0,5% mostrou valores abaixo do teor da mistura. Essas três situações tem influência direta da condição de fim de ensaio e conseqüente má extração de ligante, onde a condição final desta metodologia de extração consiste em uma análise da coloração do material extraído da mangueira da centrífuga durante a centrifugação, ou seja, uma análise pessoal e subjetiva. A extração do ligante é claramente ineficiente mesmo na condição de fim de ensaio, onde as amostras com Teor de Projeto +0,5% apresentam uma extração limpa precocemente, ao caso em que o Teor de Projeto -0,5% apresenta uma extração limpa tardiamente, provocando uma necessidade de maior adição de solvente e tempo de extração, aumentando a perda de material fino conjunto ao ligante. Este fato ficará mais claro na análise granulométrica das amostras mostrada o item 3.1.2.

Dentre os dois métodos de extração aqui estudados, os valores obtidos na extração com o forno de ignição mostraram maior constância e ficaram abaixo do limite de 0,3% de variação indicado pelo DNIT. Os dados encontrados com a centrífuga mostraram uma variação inversa à quantidade de ligante empregado na mistura e ultrapassaram o limite nas diferentes variações de porcentagem de ligante nas misturas.

Analisando a Tabela 3.2 é notável que, mesmo de uma mesma amostra, há diferença de resultados entre os métodos A e B e os dados da centrífuga, não somente em dados de teor de ligante mas também na dispersão dos resultados, onde a centrifugação é o método com maior desvio padrão. Essa dispersão é provavelmente causada pela baixa quantidade de material empregável no ensaio, somente 600g, onde qualquer variação na granulometria e até pequenas variações de massa são representativas, seguidas da influência da ineficiência do extrator centrífugo. Esta realidade será melhor discutida no item 3.14, onde serão discutidas as diferenças de teor de ligante e granulometria entre amostras de uma mesma mistura.

A Tabela 3.3 traz os dados médios de teor de ligante encontrados nas misturas utilizando faixa C do DNIT, servindo como base para a Figura 3.4, enquanto a Figura 3.5 e Figura 3.6 apresentam as diferenças dessas médias encontradas nos diferentes métodos de extração em relação ao teor real das misturas.

Tratando dos resultados dos métodos A e B do forno de ignição na faixa C do DNIT (Figura 3.5), é reforçada a necessidade de utilização do C_F na metodologia vigente, visto que, sem este, os resultados também se mostram muito acima dos valores reais nas misturas.

O teor médio encontrado para as misturas com -0,5% e +0,5% de teor de ligante tiveram resultados semelhantes (Figura 3.5). Já a média encontrada para a mistura com Teor de Projeto ficou abaixo para o método A e acima para o método B. Essa distância entre as médias desses dois métodos pode ter origem em diferentes erros durante o decorrer do ensaio automatizado, mas principalmente por fuma possível alha na balança interna do forno, já que as médias pela metodologia B mostraram valores entoados com as demais misturas.

Os resultados de teor de ligante utilizando a centrífuga seguem muito distantes do real utilizado nas misturas, com o mesmo comportamento das misturas

com Faixa B, onde ocorre decréscimo do resultado do ensaio em função da adição de ligante na mistura, esse fato ficará mais claro no item 3.1.2, onde é feita a análise granulométrica.

Tabela 3.3 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	4,80%		5,30%		5,80%	
	Média*	Diferença	Média*	Diferença	Média*	Diferença
MÉTODO A						
% Teor	5,96%	1,16%	6,25%	0,95%	6,88%	1,08%
% Teor -C _F	5,05%	0,25%	5,34%	0,04%	5,97%	0,17%
% T _C	0,15%	—	0,15%	—	0,15%	—
% Teor -C _F -T _C	4,90%	0,10%	5,20%	-0,10%	5,82%	0,02%
Desvio padrão	0,09%		0,11%		0,06%	
MÉTODO B						
% Teor	5,81%	1,01%	6,31%	1,01%	6,80%	1,00%
% Teor - C _F	4,90%	0,10%	5,40%	0,10%	5,89%	0,09%
Desvio padrão	0,08%		0,09%		0,06%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	6,09%	1,29%	6,11%	0,81%	6,07%	0,27%
Desvio padrão	0,32%		0,07%		0,25%	

*média de 5 amostras

Figura 3.4 - Médias dos teores de ligante – Faixa C

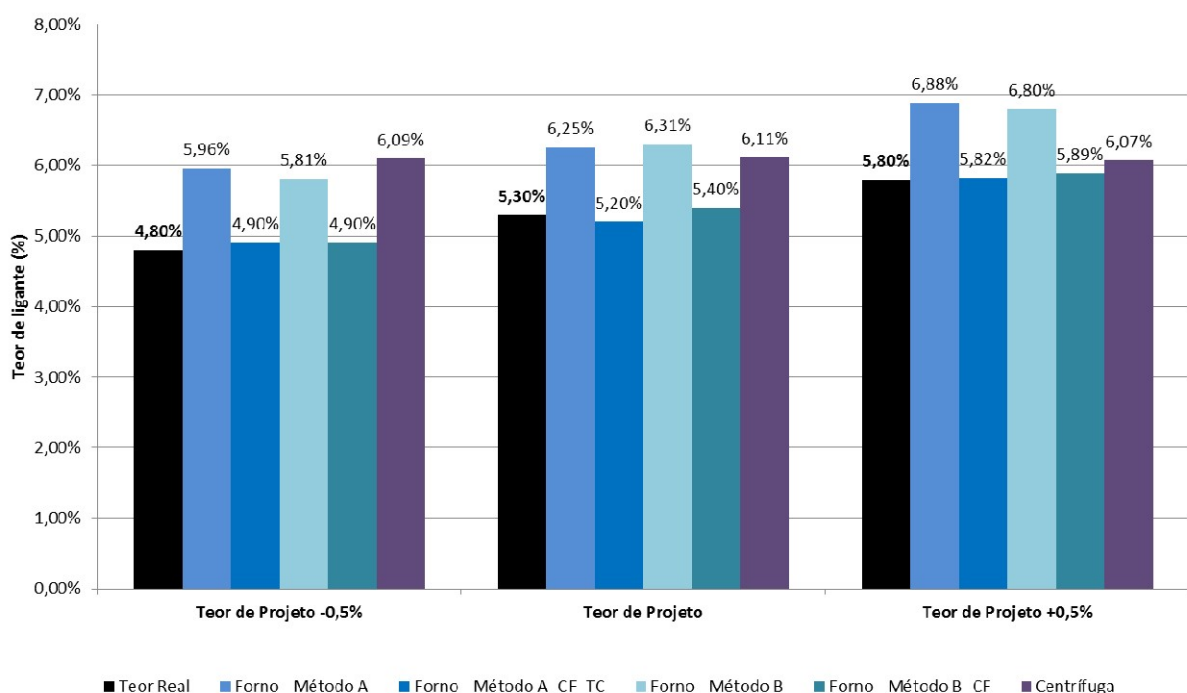


Figura 3.5 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C

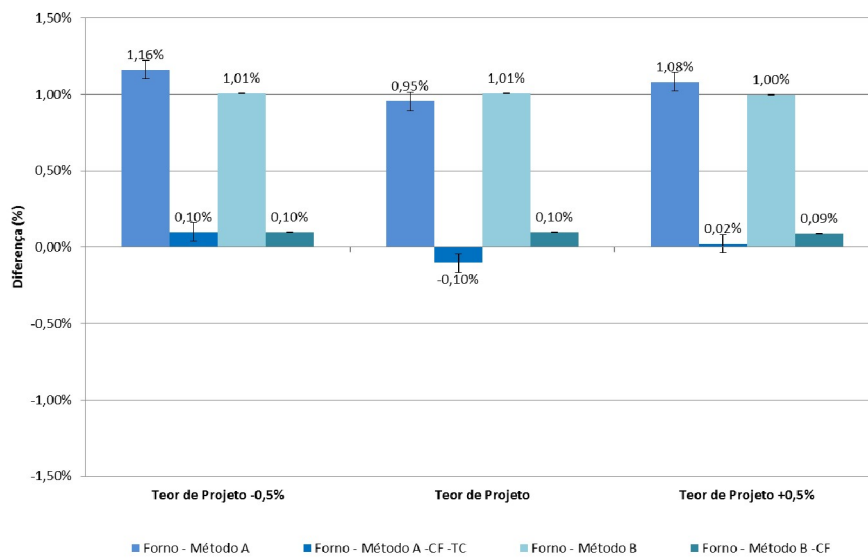
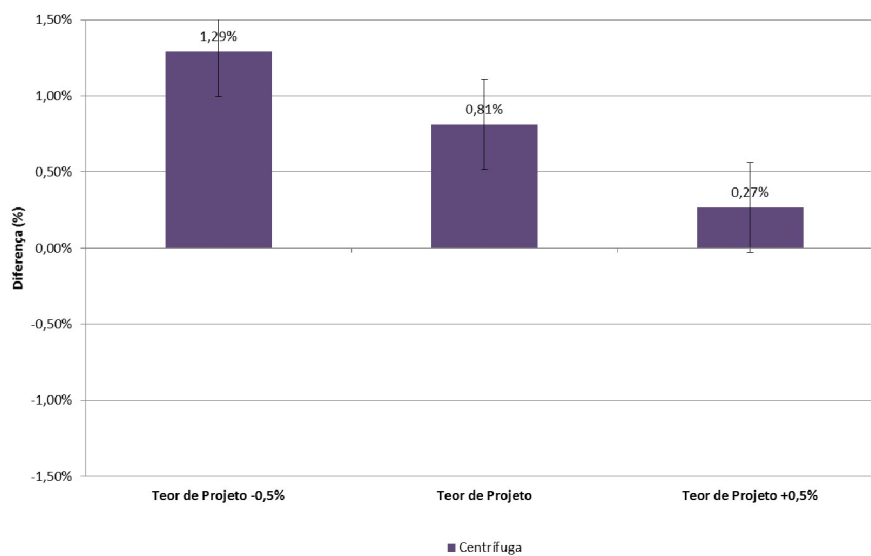


Figura 3.6 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa C



Na Figura 3.7 pode ser observada a incompleta extração de ligante entre os diferentes teores, principalmente no caso do Teor de Projeto +0,5%, onde é visto que a extração é menos eficiente. Misturas com menor quantidade de ligante facilitam a extração de ligante conjunta a passante na n°200, em contrapartida, misturas com excesso de ligante dificultam a extração, acumulando ligante com finos em peneiras mais grossas. Como estamos tratando de faixa C, que são misturas mais finas, as médias de teores elevados são compatíveis com a pasta ligante-filler

que se deposita nas peneiras mais grossas. Ao analisar os dados de granulometria isso ficará mais claro.

Figura 3.7 – Amostras finais de extração de diferentes teores - centrífuga



Observando os dados de extração de ligante das amostras dos diferentes tipos de mistura na Faixa C, é ratificado o aumento de dispersão dos resultados se compararmos os dois métodos de Ignição e Centrifugação, ainda tendo possível causa a grande diferença no tamanho das amostras e ineficiência na extração de ligante pela centrífuga (Tabela 3.3).

Uma explicação matemática simples explica a maior variação de dados da Centrífuga: a variação de 1g massa final de uma amostra de 600g, pode provocar quase 0,20% de variação no teor de ligante, já numa amostra de 2000g, esse mesmo 1g provocaria somente 0,05% de variação de resultado de teor de ligante. A maior dispersão de resultados da centrífuga também é encontrada na análise granulométrica, vista no item a seguir.

3.1.2 Análise granulométrica

Como pode ser visto nas curvas granulométricas da Figura 3.8 e suas diferenças médias quanto ao projeto (Figura 3.9), o forno de ignição mostrou-se muito eficiente para as misturas com faixa B do DNIT. Tanto os valores médios como os desvios padrões calculados por peneira não mostraram variação maior que os limites impostos pelo DNIT, ou seja, as análises se mostraram confiáveis no controle

tecnológico, demonstrando que a mistura está dentro da faixa de trabalho e muito próxima da curva de projeto (Tabela 3.4).

Diferentemente da confiabilidade dos dados de granulometria das amostras do forno de ignição, as análises granulométricas utilizando amostras finais da Centrífuga mostraram curvas granulométricas distorcidas, tanto em média quanto em desvio padrão, evidenciando a baixa acurácia e também baixa precisão (Figura 3.10 e Figura 3.11). Essas curvas deslocadas estão ligadas diretamente à extração falha do ligante das amostras, onde, quanto maior a quantidade de ligante na mistura, mais grossa é a curva encontrada. A dispersão de dados está ligada a pouca quantidade de material disposto para análise e também ligada a extração ineficiente, visto que o modelo utilizado comumente, e também nesta pesquisa, comporta somente 600g de material para ensaio (Tabela 3.5). Esse comportamento não é próprio somente desta rocha, faixa ou teor de ligante, foi um comportamento padrão entre as misturas da pesquisa. Esse comportamento será melhor analisado em itens específicos (3.9 e 3.10)

Ao analisar as curvas granulométricas das amostras de misturas na faixa C do forno de ignição, é encontrado um maior deslocamento nas curvas granulométricas se comparados aos dados da faixa B desta mesma rocha, provocado provavelmente por uma diminuição na eficiência da extração de ligante. As curvas mostraram misturas mais grossas que o projeto, mas com dados ainda dentro dos limites do Manual de Pavimentação e próximos da curva de projeto (Figura 3.12, Figura 3.13 e Tabela 3.6).

Os dados para faixa C fornecidos pelas amostras da centrífuga mantiveram o baixo padrão de acurácia, onde as curvas ficaram fora dos limites impostos para algumas peneiras, extrapolados nas diferentes misturas. O padrão de distorção das curvas granulométricas se manteve, onde as curvas se mostraram mais grossas a medida que se aumentava a quantidade de ligante (Figura 3.14, Figura 3.15, Tabela 3.7). Nota-se que há aumento de acúmulo de material fino nas peneiras mais grossas, aumentando à medida que se adiciona ligante à mistura.

Tabela 3.4 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	1,9%	-0,6%	1,9%	-0,6%	4,0%	1,5%	7,0%
3/4"	7,5%	6,4%	-1,1%	6,8%	-0,7%	5,2%	-2,3%	7,0%
3/8"	27,5%	28,1%	0,6%	26,7%	-0,8%	25,8%	-1,7%	7,0%
n° 4	18,5%	20,4%	1,9%	20,3%	1,8%	19,9%	1,4%	7,0%
n°10	11,5%	13,3%	1,8%	14,0%	2,5%	14,5%	3,0%	5,0%
n°40	11,5%	10,3%	-1,2%	10,3%	-1,2%	10,3%	-1,2%	5,0%
n°80	7,0%	5,0%	-2,0%	5,2%	-1,8%	5,1%	-1,9%	5,0%
n°200	8,5%	9,7%	1,2%	9,8%	1,3%	9,8%	1,3%	3,0%
Pas.200	5,5%	4,9%	-0,6%	5,1%	-0,4%	5,4%	-0,1%	2,0%

Figura 3.8 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

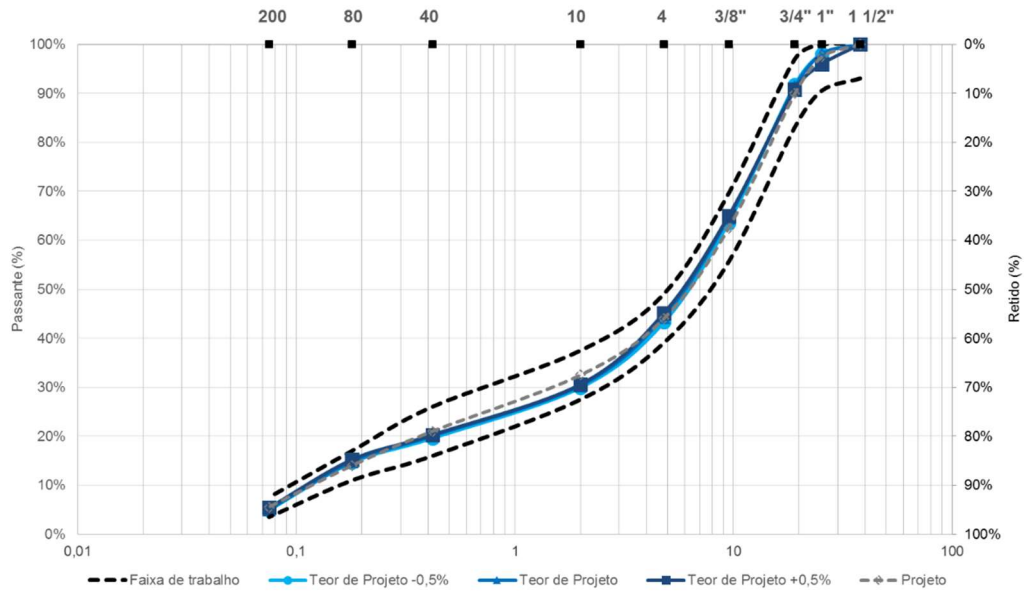


Figura 3.9 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B

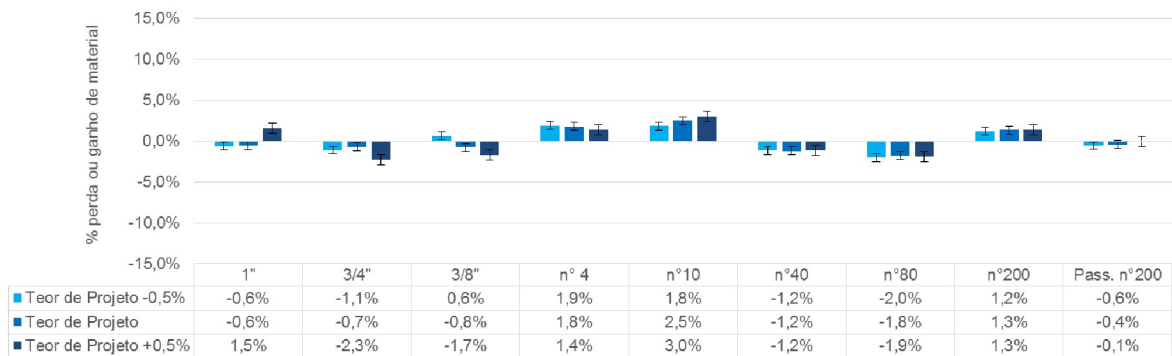


Tabela 3.5 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	5,4%	2,9%	1,7%	-0,8%	6,3%	3,8%	7,0%
3/4"	7,5%	3,9%	-3,6%	11,3%	3,8%	9,2%	1,7%	7,0%
3/8"	27,5%	21,8%	-5,7%	29,5%	2,0%	37,7%	10,2%	7,0%
n° 4	18,5%	19,2%	0,7%	18,8%	0,3%	17,2%	-1,3%	7,0%
n°10	11,5%	14,6%	3,1%	10,7%	-0,8%	8,6%	-2,9%	5,0%
n°40	11,5%	13,6%	2,1%	10,6%	-0,9%	7,9%	-3,6%	5,0%
n°80	7,0%	6,3%	-0,7%	5,3%	-1,7%	3,7%	-3,3%	5,0%
n°200	8,5%	9,2%	0,7%	7,7%	-0,8%	5,8%	-2,7%	3,0%
Pas.200	5,5%	5,9%	0,4%	4,5%	-1,0%	3,7%	-1,8%	2,0%

Figura 3.10 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

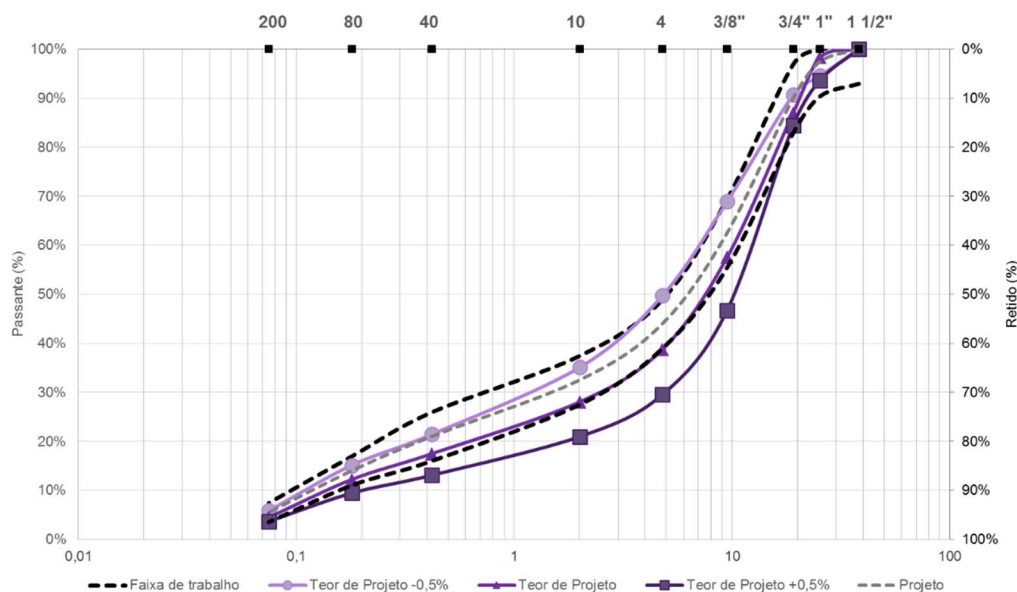


Figura 3.11 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B

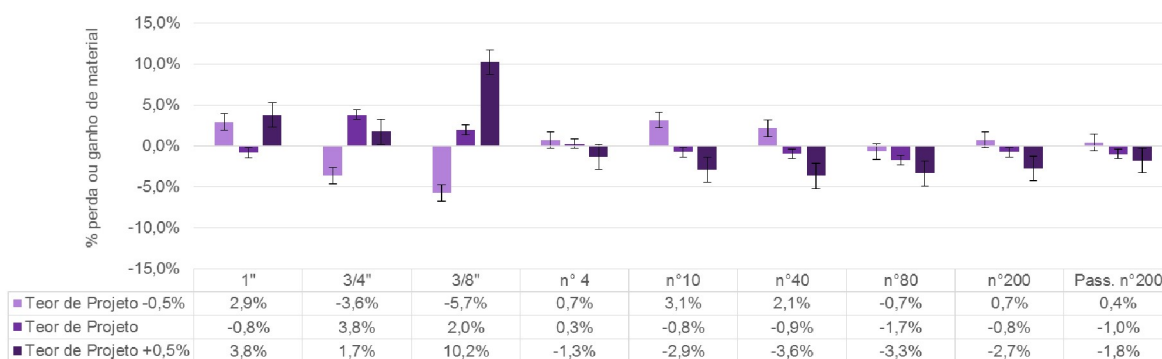


Tabela 3.6 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	17,4%	7,4%	15,0%	5,0%	15,6%	5,6%	7,0%
3/8"	10,0%	3,6%	-6,4%	4,3%	-5,7%	4,3%	-5,7%	7,0%
n° 4	22,0%	23,2%	1,2%	22,6%	0,6%	22,5%	0,5%	7,0%
n°10	22,0%	24,2%	2,2%	25,2%	3,2%	25,3%	3,3%	5,0%
n°40	19,0%	15,7%	-3,3%	16,3%	-2,7%	16,1%	-2,9%	5,0%
n°80	7,0%	4,8%	-2,2%	4,8%	-2,2%	4,5%	-2,5%	5,0%
n°200	4,0%	5,9%	1,9%	5,5%	1,5%	5,7%	1,7%	3,0%
Pas.200	6,0%	5,3%	-0,7%	6,3%	0,3%	6,1%	0,1%	2,0%

Figura 3.12 Médias entre os teores - forno de ignição — Faixa C

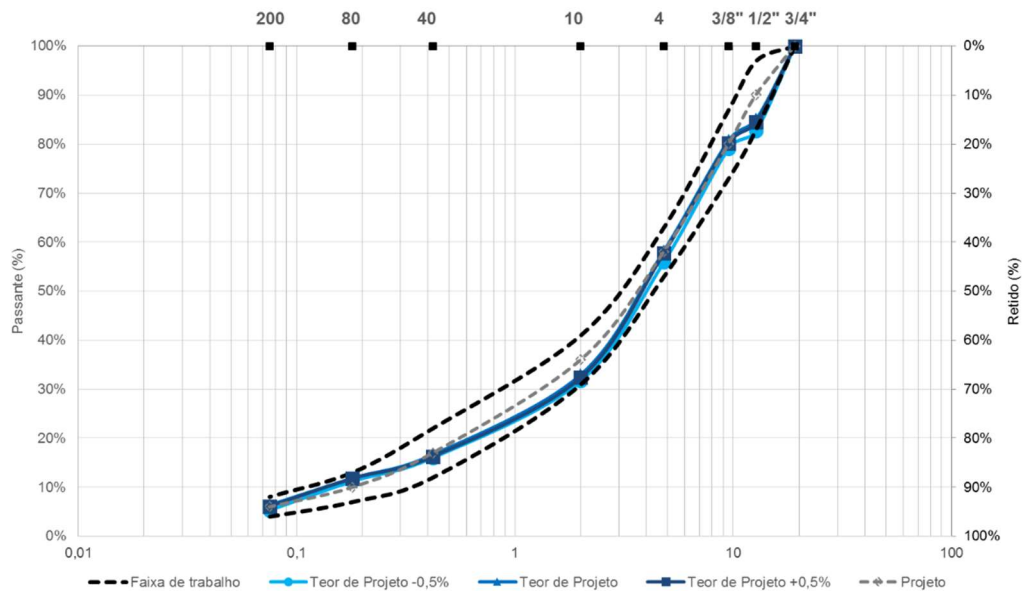


Figura 3.13 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C

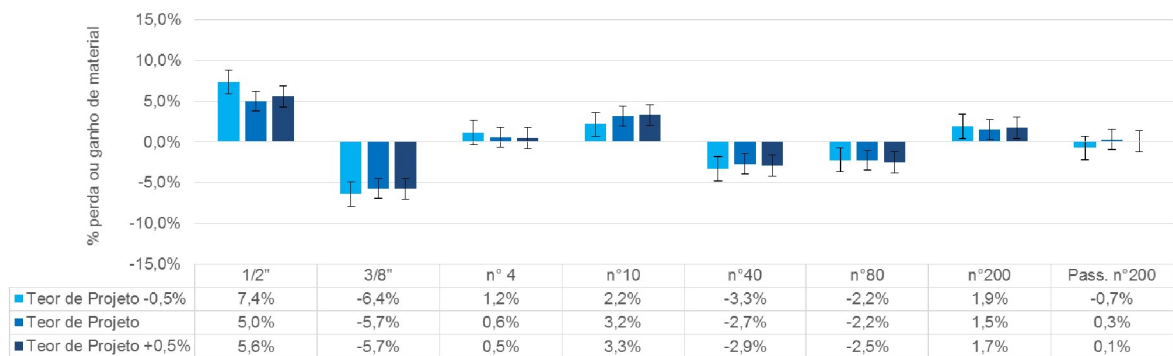


Tabela 3.7 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	12,6%	2,6%	16,8%	6,8%	21,9%	11,9%	7,0%
3/8"	10,0%	3,5%	-6,5%	5,8%	-4,1%	7,6%	-2,4%	7,0%
n° 4	22,0%	20,6%	-1,4%	22,5%	0,5%	23,1%	1,1%	7,0%
n°10	22,0%	29,9%	7,9%	25,4%	3,4%	22,3%	0,3%	5,0%
n°40	19,0%	18,3%	-0,7%	15,8%	-3,2%	13,6%	-5,4%	5,0%
n°80	7,0%	4,7%	-2,3%	4,0%	-3,0%	3,5%	-3,5%	5,0%
n°200	4,0%	4,8%	0,8%	4,3%	0,3%	3,8%	-0,2%	3,0%
Pas.200	6,0%	5,6%	-0,4%	5,3%	-0,7%	4,3%	-1,7%	2,0%

Figura 3.14 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C

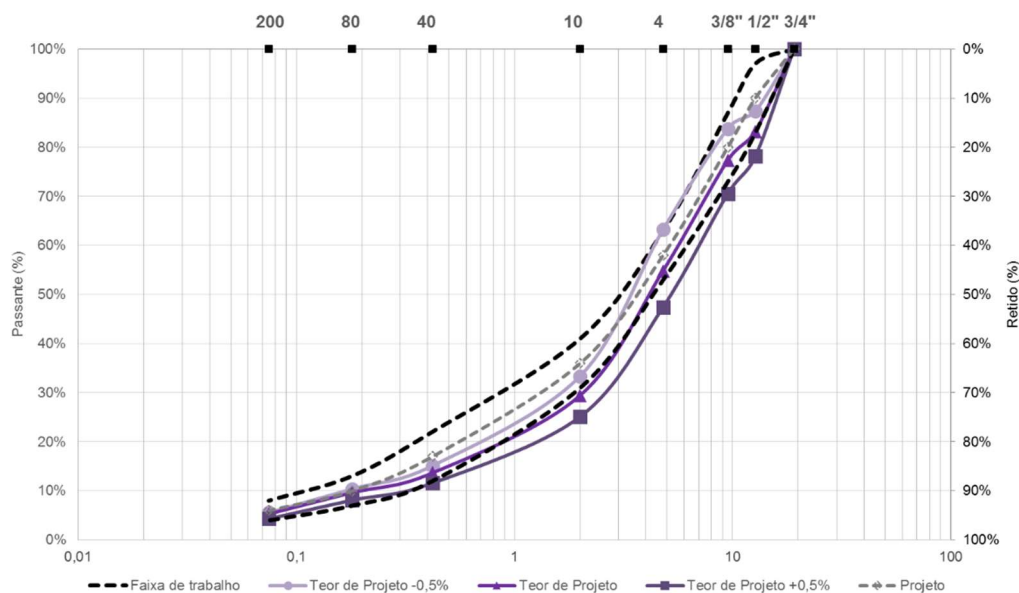
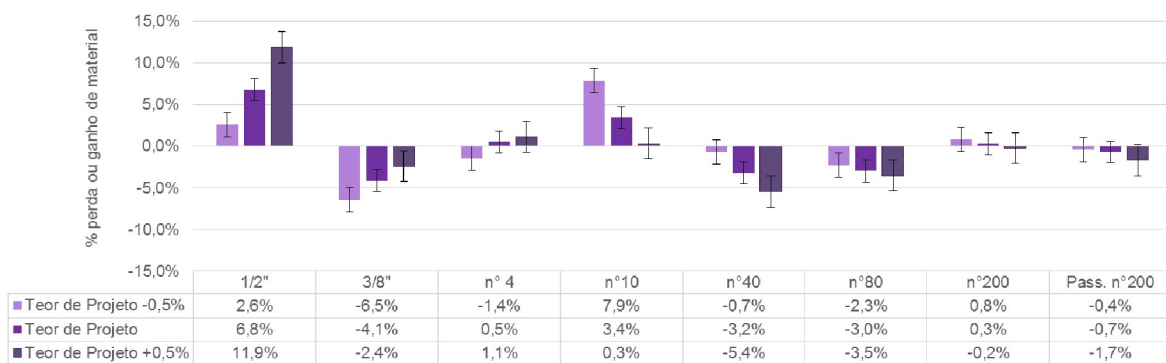


Figura 3.15 Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C



3.2 PEDREIRA DE ITAARA (RIODACITO)

A rocha de Itaara foi escolhida para o estudo principalmente por possuir uma conhecida alta absorção. Dentre as análises, serão abordadas as influências deste fator nos resultados de teor de ligante e granulometria. Na Tabela 3.8 são mostrados os resultados das principais características da rocha, seus valores de teor de projeto para ambas faixas, B e C, seguidos de seus fatores de calibração C_F , onde estes se mostraram dentro de valores considerados normais na bibliografia revisada, ou seja, abaixo de 1%.

Tabela 3.8 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração

Rocha	Agregado	Absorção (%)	Perda por abrasão (%)	Sanidade (%)	Faixa	Teor de Projeto	C_F
Riodacito	Graúdo	3,126	10,67	1,521	B	5,90%	0,62%
	Miúdo	3,551	14,41	---	C	7,00%	0,40%

3.2.1 Determinação do teor de ligante

A Tabela 3.9 apresenta as médias gerais e teores empregados nas misturas. As médias do forno de ignição para misturas na faixa B do DNIT (Figura 3.16) mostraram-se próximas ao Teor de Projeto -0,5% e Teor de Projeto. A média do Teor de Projeto +0,5% acabou por ficar no limite de 0,3% de variação do DNIT. As misturas apresentaram dados com elevação na média conforme o aumento da porcentagem de ligante da mistura, ou seja, um aumento e perda de massa elevando-se proporcionalmente à quantidade de ligante adicionada. Os dados brutos de extração corroboram que o forno de ignição não estaria apto a ser utilizado para ensaios de obtenção de teor de ligante de misturas desconhecidas ao utilizar a metodologia vigente, dependente do fator C_F .

A situação de elevação nas médias com o acréscimo de ligante, pode estar ligada à porosidade da rocha. Deve ser salientado que o forno de ignição tem sua extração baseada na combustão do ligante até que não haja variações maiores do que 0,1g durante 3 minutos consecutivos. Ou seja, além do ligante efetivo, há a necessidade da queima do ligante ainda nos poros do agregado. As médias de

tempo de ensaio foram maiores, se comparadas as médias das misturas de outras rochas.

Tabela 3.9 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa B

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	5,40%		5,90%		6,40%	
	Média*	Diferença	Média*	Diferença	Média*	Diferença
MÉTODO A						
% Teor	6,20%	0,80%	6,74%	0,84%	7,47%	1,07%
% Teor -C _F	5,58%	0,18%	6,12%	0,22%	6,85%	0,45%
% T _C	0,15%	—	0,15%	—	0,15%	—
% Teor -C _F -T _C	5,43%	0,03%	5,96%	0,06%	6,70%	0,30%
Desvio padrão	0,26%		0,34%		0,26%	
MÉTODO B						
% Teor	6,12%	0,72%	6,66%	0,76%	7,43%	1,03%
% Teor - C _F	5,50%	0,10%	6,04%	0,14%	6,81%	0,41%
Desvio padrão	0,23%		0,29%		0,31%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	5,87%	0,47%	6,12%	0,22%	6,16%	-0,24%
Desvio padrão	0,19%		0,57%		0,33%	

*média de 5 amostras

Figura 3.16 - Médias dos teores de ligante – Faixa B

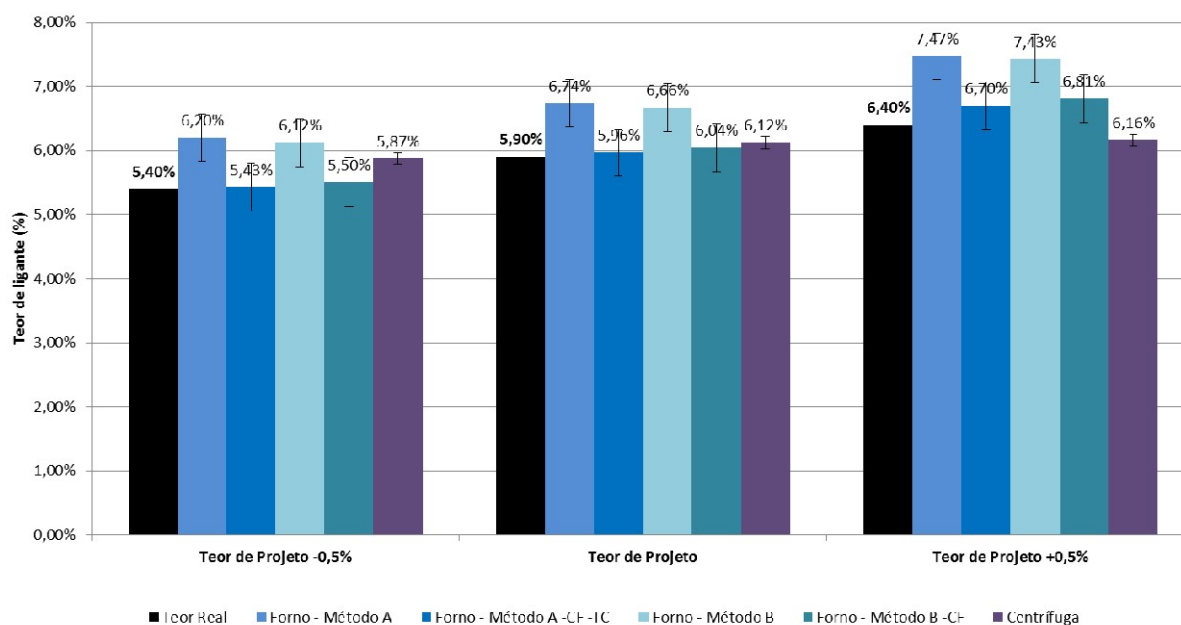


Figura 3.17 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição - Faixa B

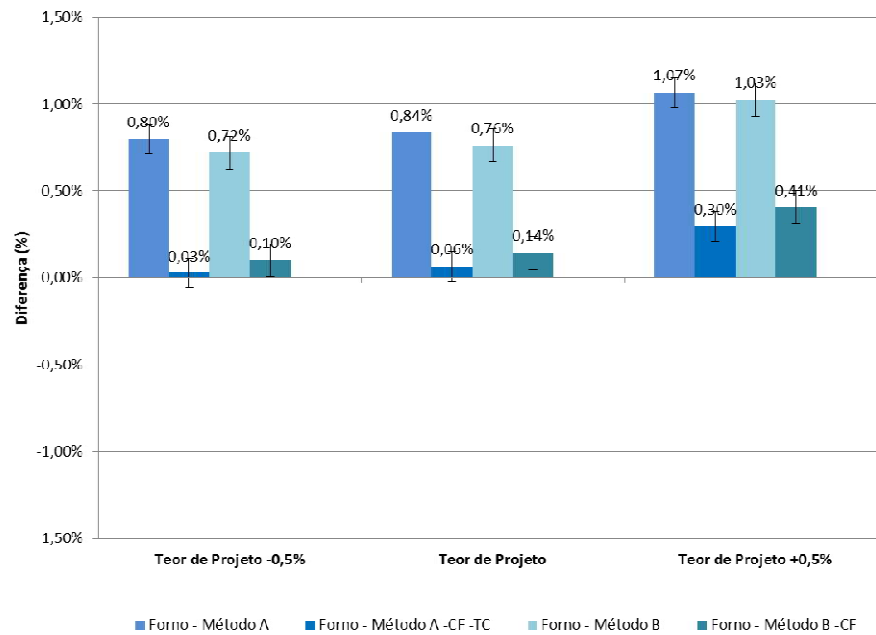
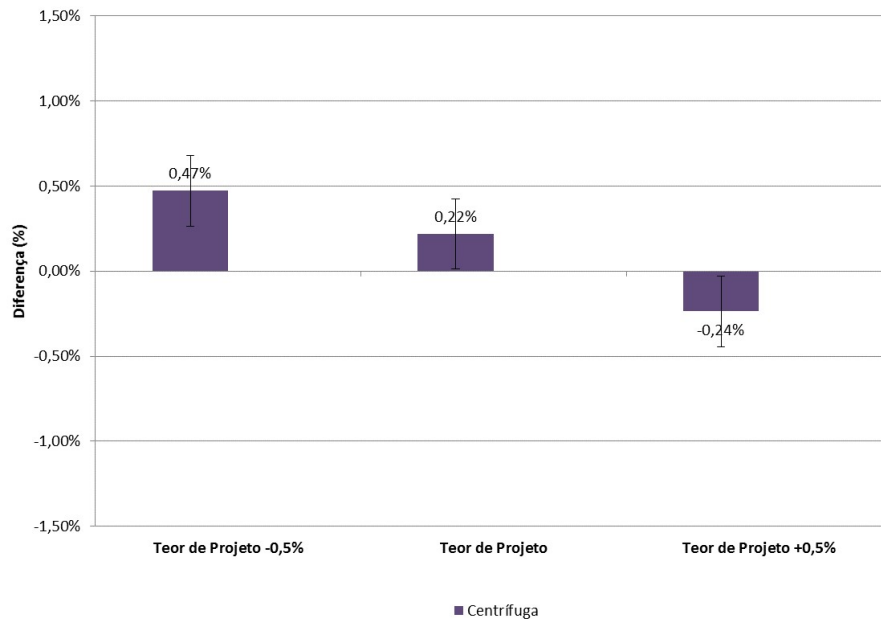


Figura 3.18 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga - Faixa B



As médias de teor de ligante em misturas faixa B encontradas com a centrífuga ainda mostram falta de acurácia e corroboram a conclusão chegada anteriormente com os dados obtidos da centrífuga (Figura 3.18). Os resultados de teor de ligante são altos em misturas com pouco ligante, diminuindo em misturas com maior quantidade de ligante. Deve-se salientar que o erro mostrado nos dados

com a centrífuga se mostram quase o dobro em comparação aos dados obtidos do forno de ignição. Isto está ligado à maior dispersão de resultados. A maior sensibilidade a variações de massa por parte das amostras da centrífuga deve ser novamente pontuada (Tabela 3.9).

Os resultados médios de extração para as misturas na faixa C mostraram comportamento similar aos dados da faixa B, mas com maior variação entre as diferentes misturas, com as médias mais elevadas para a mistura com maior quantidade de ligante (Tabela 3.10). Somente pelo método B na mistura com +0,5% de ligante houve desobediência ao limite de 0,3% de variação de ligante. Esse fato ainda pode estar ligado à porosidade da rocha, que tardia o ensaio por provocar um atraso na extração do ligante absorvido pelos agregados (Figura 3.19 e Figura 3.20).

Semelhante à pesquisa de Gonçalves et al. (2015), os dados de extração com a centrífuga nas misturas na faixa C, com a mesma rocha e ligante, mostraram valores próximos do real teor das misturas (Figura 3.21). Deve ser reforçado que a análise granulométrica também mostrou baixa eficiência da extração com a centrífuga, como será visto no item 3.2.2. Logo, os dados de teor de ligante aqui apresentados como bons, são na realidade um equilíbrio entre ligante não extraído e perda de finos na centrifugação.

Tabela 3.10 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	6,50%		7,00%		7,50%	
	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>
MÉTODO A						
% Teor	7,25%	0,75%	7,56%	0,56%	8,33%	0,83%
% Teor -C _F	6,85%	0,35%	7,16%	0,16%	7,93%	0,43%
% T _C	0,15%	—	0,15%	—	0,15%	—
% Teor -C _F -T _C	6,70%	0,20%	7,00%	0,00%	7,78%	0,28%
Desvio padrão	0,28%		0,09%		0,15%	
MÉTODO B						
% Teor	7,08%	0,58%	7,52%	0,52%	8,30%	0,80%
% Teor - C _F	6,68%	0,18%	7,12%	0,12%	7,90%	0,40%
Desvio padrão	0,25%		0,16%		0,24%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	6,58%	0,08%	6,93%	-0,07%	7,39%	-0,11%
Desvio padrão	0,28%		0,24%		0,43%	

*média de 5 amostras

Figura 3.19 - Médias dos teores de ligante – Faixa C

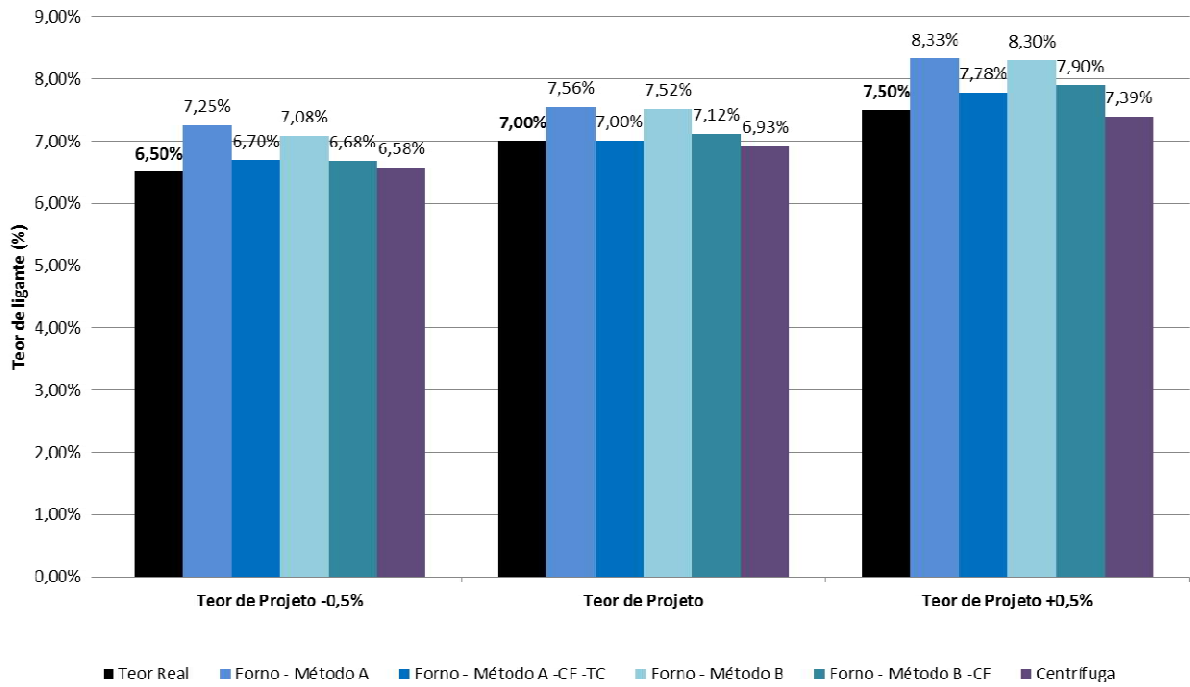


Figura 3.20 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C

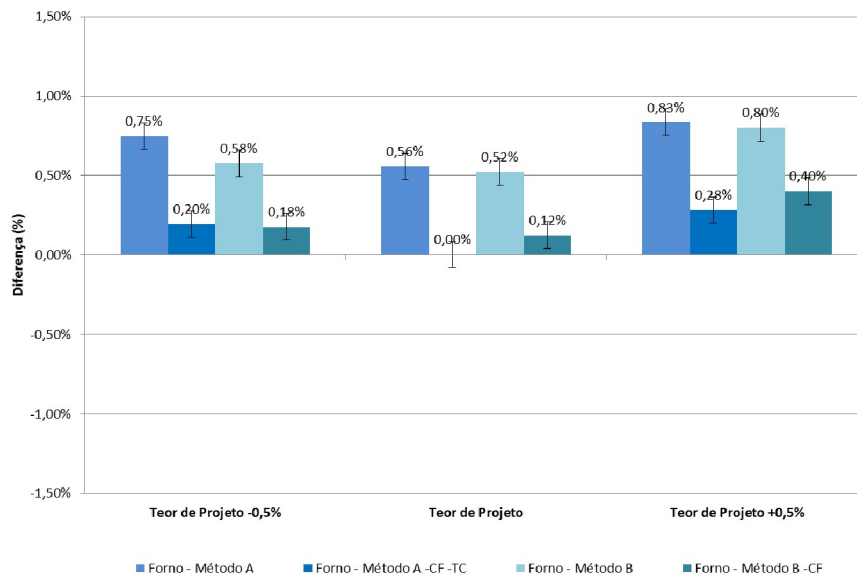
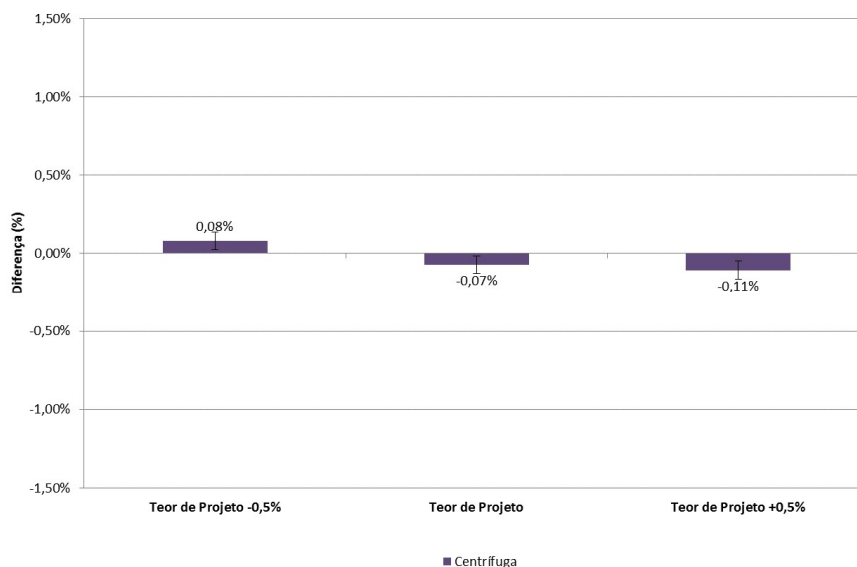


Figura 3.21 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa C



3.2.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica mostrou-se confiável utilizando amostras finais de ensaio de extração com o forno de ignição (Figura 3.22 e Figura 3.23). Todas as misturas na faixa B mostraram estar dentro da faixa de trabalho, não comprometendo o controle tecnológico das misturas ensaiadas. Em nenhuma das peneiras houve variação ou extrapolação dos limites de trabalho para o projeto do concreto asfáltico (Tabela 3.11).

Tabela 3.11 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	1,9%	-0,6%	1,7%	-0,8%	2,4%	-0,1%	7,0%
3/4"	7,5%	7,9%	0,4%	8,2%	0,7%	6,7%	-0,8%	7,0%
3/8"	27,5%	28,2%	0,7%	27,8%	0,3%	28,2%	0,7%	7,0%
n° 4	18,5%	17,8%	-0,7%	18,1%	-0,4%	17,9%	-0,6%	7,0%
n°10	11,5%	12,0%	0,5%	11,7%	0,2%	11,9%	0,4%	5,0%
n°40	11,5%	12,8%	1,3%	12,8%	1,3%	13,2%	1,7%	5,0%
n°80	7,0%	4,7%	-2,3%	4,7%	-2,3%	5,2%	-1,8%	5,0%
n°200	8,5%	9,3%	0,8%	9,3%	0,8%	8,8%	0,3%	3,0%
Pas.200	5,5%	5,5%	0,0%	5,7%	0,2%	5,6%	0,1%	2,0%

Figura 3.22 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

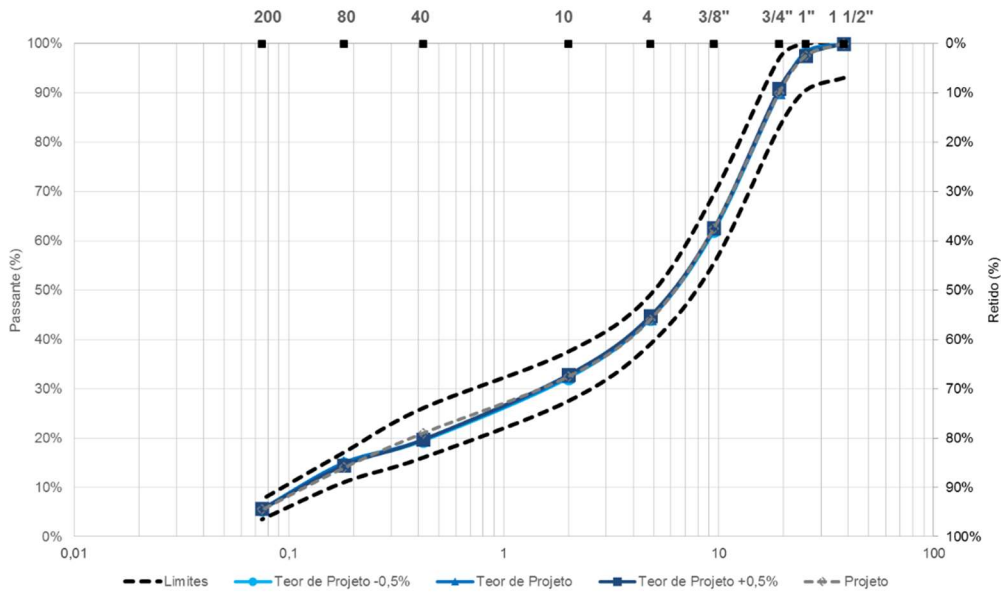
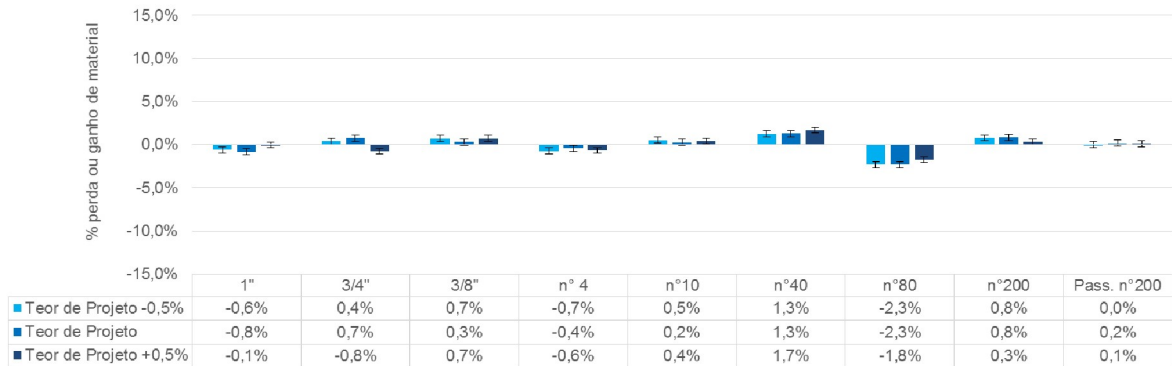


Figura 3.23 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B



A centrífuga teve novamente baixo desempenho na extração de ligante, provocando acúmulo de material em peneiras erradas, como pode ser visto na Figura 3.26, onde há exemplos de grumos de agregado e ligante somados no retido na 3/8". Vendo os dados da diferença das médias encontradas comparadas ao projeto (Figura 3.24, Figura 3.25 e Tabela 3.12), fato já comentado com a rocha analisada anteriormente, é possível verificar que há um distanciamento da curva de projeto conforme há adição de ligante na mistura, fato que se repetiu novamente e mostrou-se como um padrão no decorrer da pesquisa.

Tabela 3.12– Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	2,2%	-0,3%	2,3%	-0,2%	7,6%	5,1%	7,0%
3/4"	7,5%	7,7%	0,2%	8,7%	1,2%	5,9%	-1,6%	7,0%
3/8"	27,5%	27,8%	0,3%	29,6%	2,1%	31,1%	3,6%	7,0%
n° 4	18,5%	18,7%	0,2%	18,8%	0,3%	18,2%	-0,3%	7,0%
n°10	11,5%	13,9%	2,4%	13,8%	2,3%	11,8%	0,3%	5,0%
n°40	11,5%	10,9%	-0,6%	10,0%	-1,5%	9,6%	-1,9%	5,0%
n°80	7,0%	5,4%	-1,6%	4,9%	-2,1%	4,7%	-2,3%	5,0%
n°200	8,5%	7,8%	-0,7%	7,2%	-1,3%	6,6%	-1,9%	3,0%
Pas.200	5,5%	5,6%	0,1%	4,8%	-0,7%	4,4%	-1,1%	2,0%

Figura 3.24 Médias entre os teores - centrífuga — Faixa B

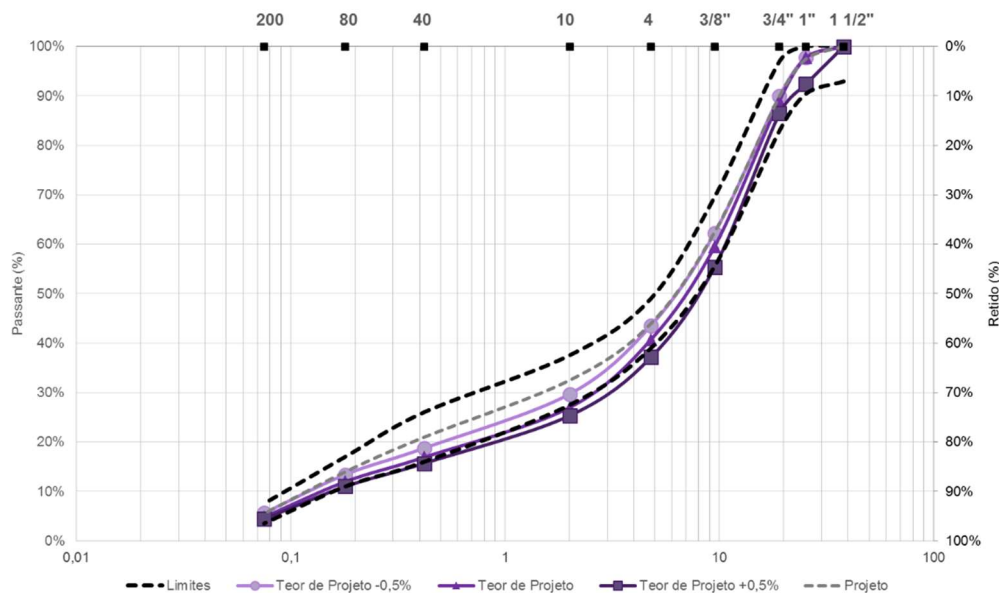


Figura 3.25 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B

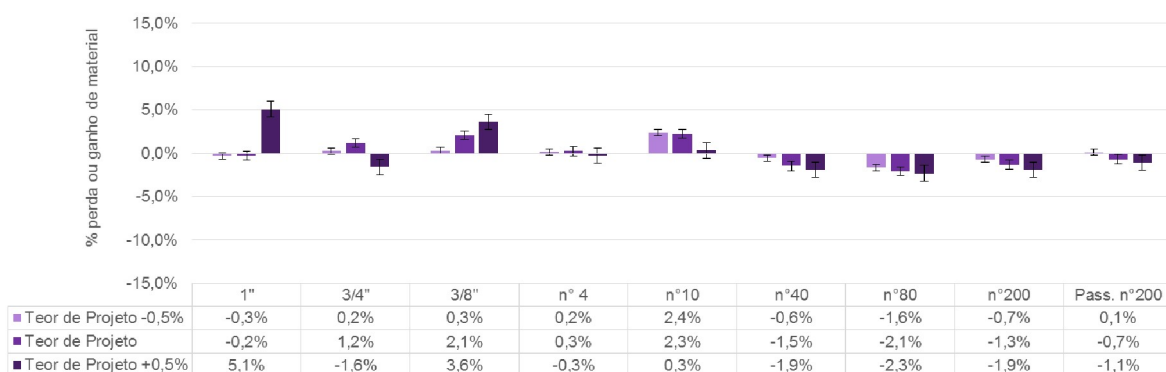


Figura 3.26 – Exemplos de material acumulado na peneira 3/8” de diferentes amostras - centrífuga



Os dados das análises granulométricas das misturas na faixa C com esta rocha confirmam a eficiência da extração com o forno de ignição. As misturas mesmo com diferentes teores de ligante tiveram seus dados dentro da faixa de trabalho, não comprometendo um possível controle tecnológico (Figura 3.27, Figura 3.28, Tabela 3.13)

As extrações com a centrífuga se mostraram pouco eficientes também nas misturas com faixa C desta rocha, onde as médias das amostras ficam fora do limite de projeto para as três misturas. Os dados acabaram por mostrar dados ainda piores que nas misturas com faixa B, provavelmente pelo comportamento mais fino das misturas com faixa C, onde há maior acúmulo de material fino com ligante em peneiras mais grossas. Como as misturas na faixa C tem uma maior área específica, é dificultada ainda mais a extração do ligante (Figura 3.29, Figura 3.30 e Tabela 3.14).

Tabela 3.13 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	11,5%	1,5%	12,3%	2,3%	12,5%	2,5%	7,0%
3/8"	10,0%	8,2%	-1,8%	8,1%	-1,9%	7,5%	-2,5%	7,0%
n° 4	22,0%	22,6%	0,6%	22,3%	0,3%	22,8%	0,8%	7,0%
n°10	22,0%	25,5%	3,5%	23,6%	1,6%	21,5%	-0,5%	5,0%
n°40	19,0%	16,4%	-2,6%	17,0%	-2,0%	20,0%	1,0%	5,0%
n°80	7,0%	5,6%	-1,4%	5,5%	-1,5%	4,6%	-2,4%	5,0%
n°200	4,0%	5,5%	1,5%	5,4%	1,4%	5,3%	1,3%	3,0%
Pas.200	6,0%	4,8%	-1,2%	5,9%	-0,1%	5,7%	-0,3%	2,0%

Figura 3.27 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C

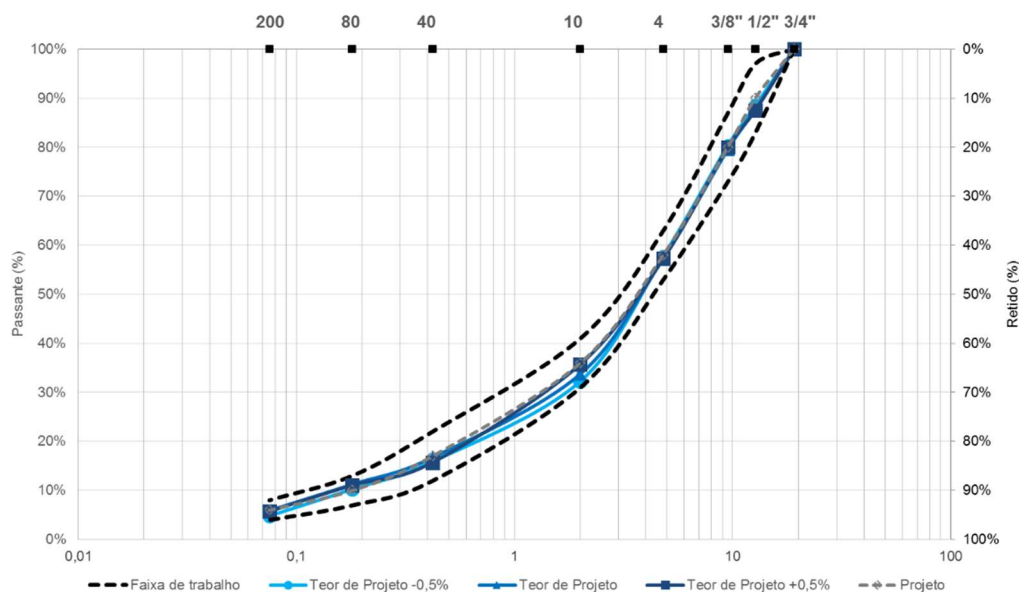


Figura 3.28 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C

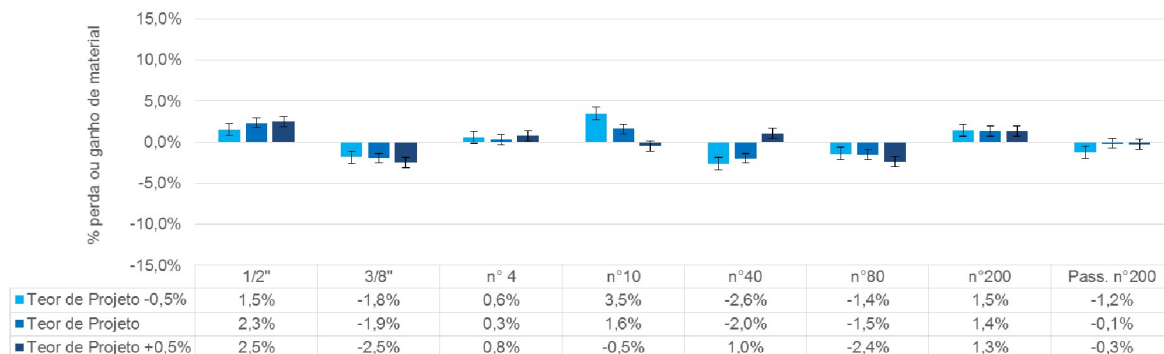


Tabela 3.14 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	14,8%	4,8%	15,0%	5,0%	17,5%	7,5%	7,0%
3/8"	10,0%	9,7%	-0,3%	8,4%	-1,6%	9,2%	-0,8%	7,0%
n° 4	22,0%	23,2%	1,2%	24,3%	2,3%	22,4%	0,4%	7,0%
n°10	22,0%	22,9%	0,9%	25,1%	3,1%	23,4%	1,4%	5,0%
n°40	19,0%	15,7%	-3,3%	14,5%	-4,5%	14,9%	-4,1%	5,0%
n°80	7,0%	4,5%	-2,5%	4,3%	-2,7%	4,7%	-2,3%	5,0%
n°200	4,0%	4,7%	0,7%	4,5%	0,5%	4,0%	0,0%	3,0%
Pas.200	6,0%	4,5%	-1,5%	3,7%	-2,3%	3,9%	-2,1%	2,0%

Figura 3.29 – Médias entre os teores - centrífuga– Faixa C

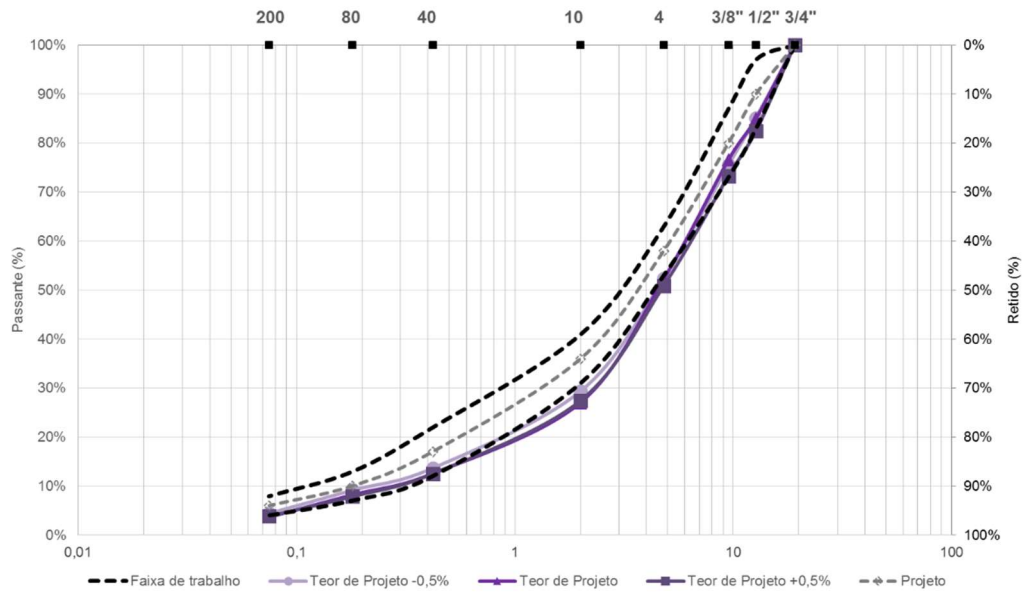
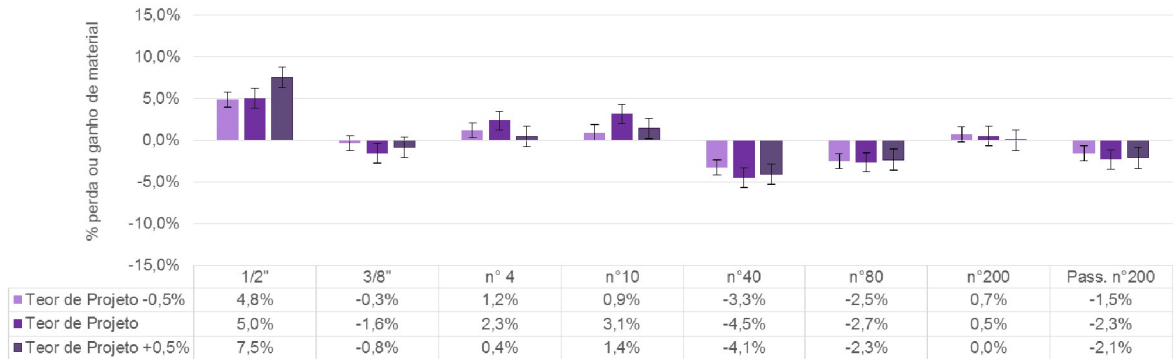


Figura 3.30 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C



3.3 PEDREIRA DE SARANDI (BASALTO)

Segue na Tabela 3.15 um resumo das características da rocha de Sarandi, teores de projeto para as misturas centradas na faixa B e C do DNIT e os fatores de C_F , estes se mostraram abaixo dos níveis elevados de 1%. Esta rocha é basáltica e possui absorção intermediária e baixa sanidade, mas com uma perda por abrasão considerável.

Tabela 3.15 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração

Rocha	Agregado	Absorção (%)	Perda por abrasão (%)	Sanidade (%)	Faixa	Teor de Projeto	C _F
Basalto	Graúdo	1,683	16,87	1,22	B	5,10%	0,60%
	Miúdo	1,906	---	---	C	5,50%	0,58%

3.3.1 Determinação do teor de ligante

Podem ser observados na Tabela 3.16 e Figura 3.31 os valores médios obtidos nos ensaios de extração de ligante das diferentes misturas na faixa B do DNIT.

Na Figura 3.32 é possível avaliar melhor os dados dos métodos A e B do forno de ignição em relação ao teor empregado nas misturas. Fica claro que todas as médias se mostraram abaixo do teor real para as três misturas. Esse fato poderia ser facilmente corrigido com uma recalibração no caso de o operador entender ser necessário.

Deve-se lembrar que o C_F foi calculado de uma média de três amostras de calibração como indica a norma norte americana do método de extração por ignição. No manual da NCAT é indicada e encorajada a possibilidade de o operador em sua experiência refazer as calibrações caso ache necessário e também verificações quanto ao comportamento do forno, sinalizando possível necessidade de manutenção. Procurou-se manter o purismo das indicações de norma, afim de poder ser indicadas as mais diferentes experiências encontradas durante todo o processo de extração com o forno de ignição, visto que se trata de um método novo para o nosso país.

Assim como nas rochas que já passaram por análise, houve diferença entre as metodologias A e B, podendo ser diferenças entre calibrações de balança, tempos distintos de aferição de massa e a diferença já indicada de que a metodologia automatizada A, possui um fator a mais de calibração, o T_C. Os resultados de A e B com calibrações aplicadas se aproximaram entre si, tendo uma diferença de 0,10% na mistura com Teor de Projeto. Nenhuma das misturas teve média com diferença superior ao limite de 0,3% (Figura 3.32).

Na Tabela 3.16 e Figura 3.33 é reforçado o desvio dos dados médios obtidos na centrífuga em relação à média real de teor de ligante, muito semelhantes a outras

misturas já analisadas, ficando acima do teor de projeto na mistura com -0,5% de ligante, decrescendo ao ponto que se aumenta a até +0,5% o teor de ligante em mistura.

Os dados da Tabela 3.16 reforçam que o desvio padrão das extrações com a centrífuga apresentam maior dispersão dos dados se comparados aos dados das amostras do forno de ignição. A ligação deste fato à quantidade amostrada e condições finais de ensaios distintas é reforçada por parte do pesquisador. Adverte-se que o forno de ignição possui uma condição puramente matemática de fim de ensaio, ao contrário da centrífuga, onde sua condição é ligada à uma análise visual por parte do operador.

Os dados de diferença média encontrados nas amostradas do forno de ignição na faixa C em relação ao teor das misturas (Tabela 3.17), mostraram um comportamento semelhante ao que aparece com a extratora centrífuga, indicando um declínio de eficiência do forno, indicando a necessidade de manutenção. As médias se mostram elevadas em misturas de teor baixo, ocorrendo o inverso com misturas de alto valor de ligante, médias abaixo do teor de ligante da mistura (Figura 3.34 e Figura 3.35). Deve-se salientar que as médias passaram do limite imposto de 0,3% para a mistura Teor de Projeto -0,5% e ficaram próximas do limite na Teor de Projeto +0,5%, mas esta última com uma média abaixo do teor da mistura. A rocha de Sarandi foi a 3ª rocha ensaiada e a 1ª com o indicativo de perda de eficiência do equipamento. Foi realizada a primeira manutenção do forno com lubrificação da ventoinha do exaustor, limpeza do soprador e dos cilindros cerâmicos da balança interna, como indicado no manual do equipamento quando se compreender necessário. As extrações não foram refeitas, assim deixa-se registrada a experiência por completo do processo da pesquisa com esse equipamento.

A rocha de Caçapa do Sul, última ensaiada, também apresentou indicativos de ineficiência, mas em menor proporção, visto que conjunto ao período de ensaio com a rocha de Sarandi houve quebra de 2 exaustores. Estes exaustores não previam a instalação do forno e não eram apropriados para altas temperaturas.

Como já mencionado, os dados médios de teor de ligante com a centrífuga seguiram o mesmo padrão supracitado (Figura 3.36), com altos valores para misturas com teor abaixo de projeto e valores baixos para misturas com excesso de ligante. Os dados das amostras da centrífuga seguem com desvio padrão maior que as amostras do Forno de Ignição para os dois métodos, A e B (Tabela 3.17).

Tabela 3.16 – Resumo dos dados de teor de ligante - Faixa B

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	4,60%		5,10%		5,60%	
	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>
MÉTODO A						
% Teor	5,21%	0,61%	5,75%	0,65%	6,10%	0,50%
% Teor -C _F	4,61%	0,01%	5,15%	0,05%	5,50%	-0,10%
% T _C	0,15%	—	0,15%	—	0,13%	—
% Teor -C _F -T _C	4,46%	-0,14%	5,00%	-0,10%	5,36%	-0,24%
Desvio padrão	0,33%		0,29%		0,45%	
MÉTODO B						
% Teor	5,06%	0,46%	5,50%	0,40%	5,95%	0,35%
% Teor - C _F	4,46%	-0,14%	4,90%	-0,20%	5,35%	-0,25%
Desvio padrão	0,35%		0,37%		0,40%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	5,15%	0,55%	5,44%	0,34%	5,17%	-0,43%
Desvio padrão	0,36%		0,48%		0,54%	

*média de 5 amostras

Figura 3.31 - Médias dos teores de ligante – Faixa B

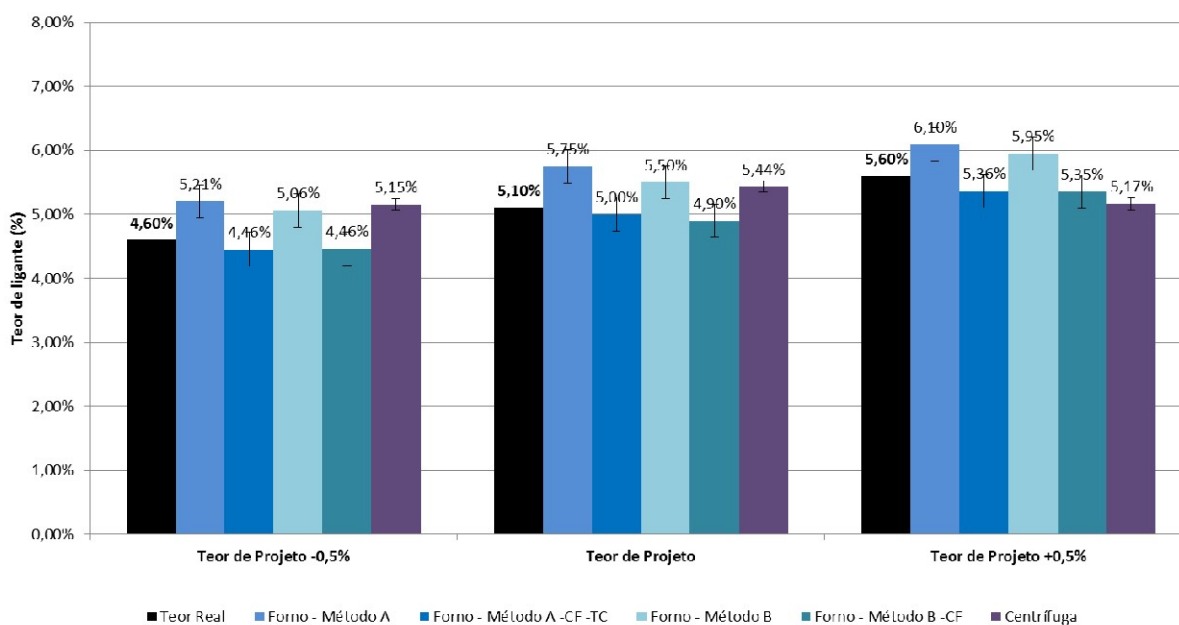


Figura 3.32 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa B

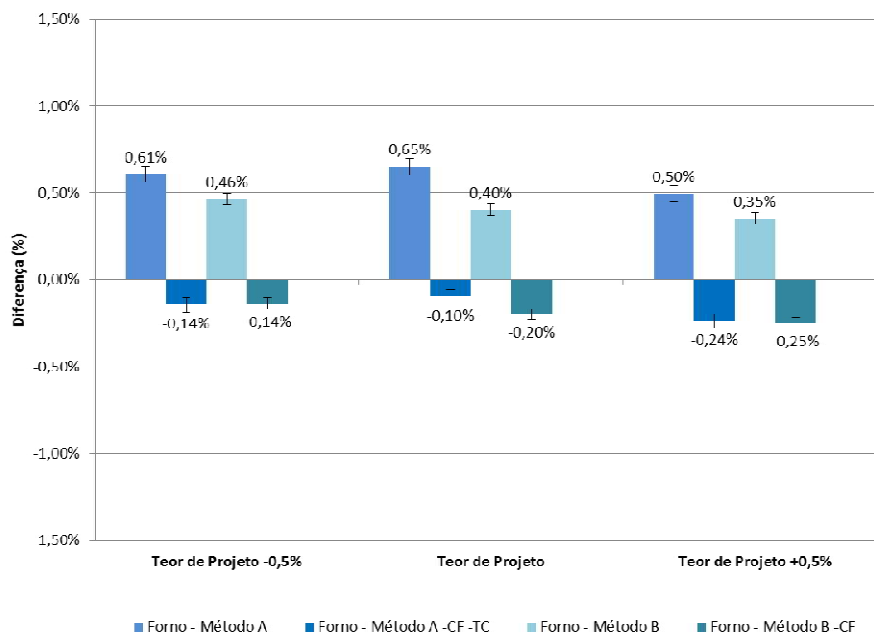


Figura 3.33 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa B

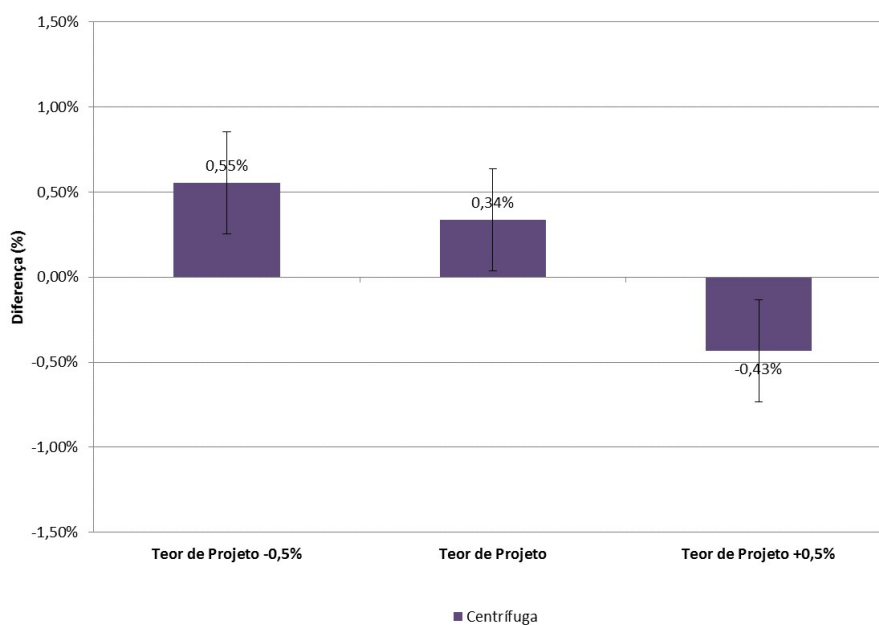


Tabela 3.17 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	5,00%		5,50%		6,00%	
	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>
MÉTODO A						
% Teor	6,08%	1,08%	6,28%	0,78%	6,54%	0,54%
% Teor -C _F	5,50%	0,50%	5,70%	0,20%	5,96%	-0,04%
% T _C	0,15%	—	0,15%	—	0,15%	—
% Teor -C _F -T _C	5,35%	0,35%	5,55%	0,05%	5,81%	-0,19%
Desvio padrão	0,07%		0,20%		0,26%	
MÉTODO B						
% Teor	5,89%	0,89%	6,01%	0,51%	6,29%	0,29%
% Teor - C _F	5,31%	0,31%	5,43%	-0,07%	5,71%	-0,29%
Desvio padrão	0,06%		0,29%		0,31%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	5,36%	0,36%	5,74%	0,24%	5,82%	-0,18%
Desvio padrão	0,39%		0,39%		0,48%	

*média de 5 amostras

Figura 3.34 - Médias dos teores de ligante – Faixa C

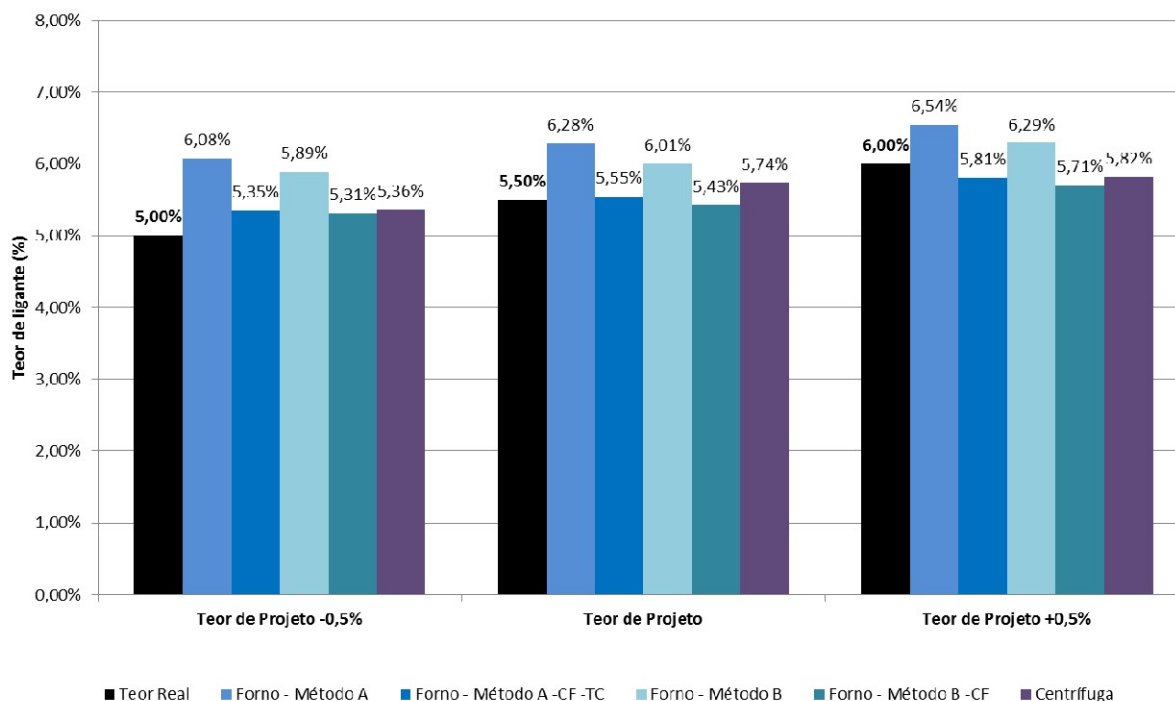


Figura 3.35 - Diferenças médias dos teores de ligante e erro – forno de ignição - Faixa C

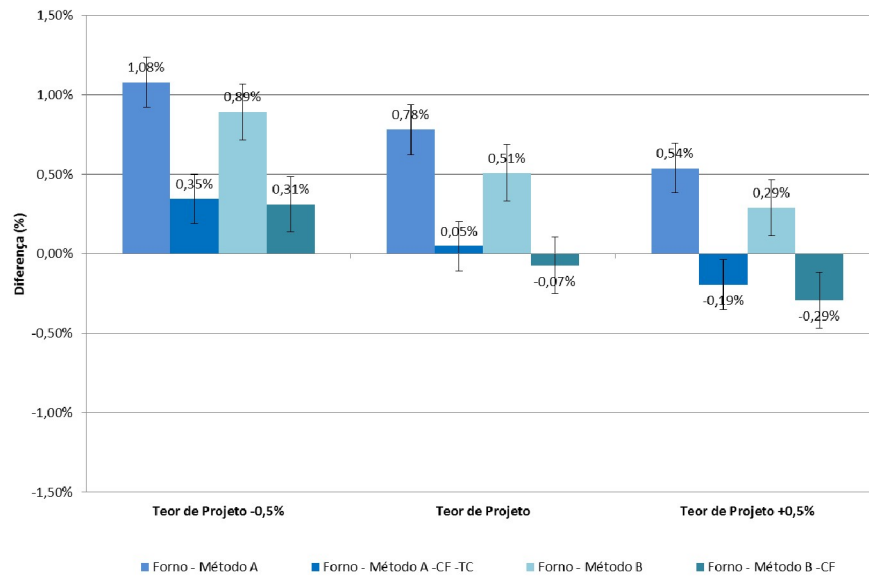
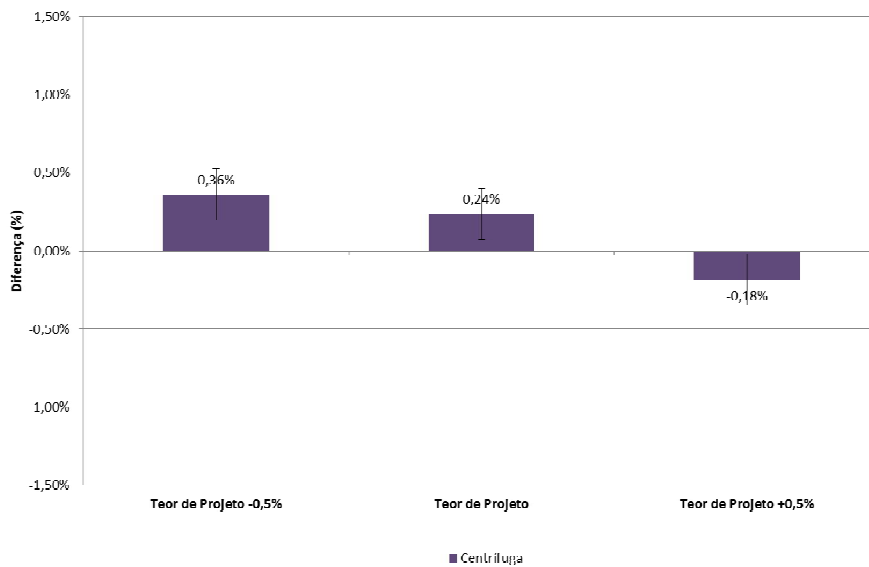


Figura 3.36 – Diferenças médias dos teores de ligante e erro – centrífuga - Faixa C



3.3.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica para as misturas da faixa B com amostras do forno de ignição mantém um bom padrão de comportamento (Tabela 3.18), sempre dentro dos limites e próximos à granulometria de projeto (Figura 3.37 e Figura 3.38).

Tabela 3.18 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	2,7%	0,2%	2,3%	-0,2%	1,5%	-1,0%	7,0%
3/4"	7,5%	7,6%	0,1%	8,5%	1,0%	8,0%	0,5%	7,0%
3/8"	27,5%	28,5%	1,0%	29,2%	1,7%	28,7%	1,2%	7,0%
n° 4	18,5%	18,5%	0,0%	17,9%	-0,6%	18,3%	-0,2%	7,0%
n°10	11,5%	10,7%	-0,8%	10,2%	-1,3%	10,8%	-0,7%	5,0%
n°40	11,5%	11,3%	-0,2%	11,2%	-0,3%	11,4%	-0,1%	5,0%
n°80	7,0%	4,4%	-2,6%	4,2%	-2,8%	4,4%	-2,6%	5,0%
n°200	8,5%	9,8%	1,3%	9,8%	1,3%	10,6%	2,1%	3,0%
Pas.200	5,5%	6,6%	1,1%	6,7%	1,2%	6,3%	0,8%	2,0%

Figura 3.37 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

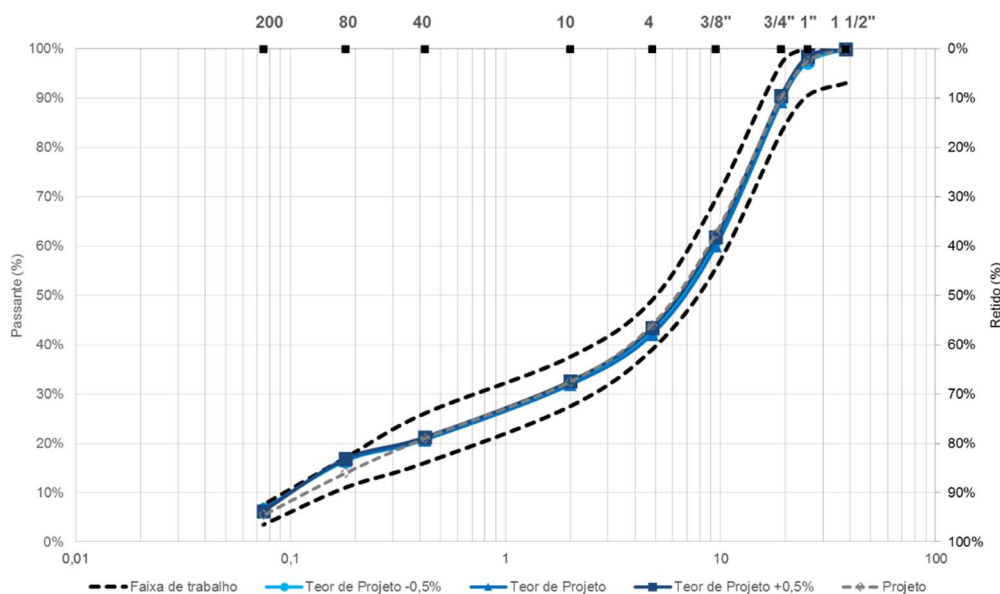
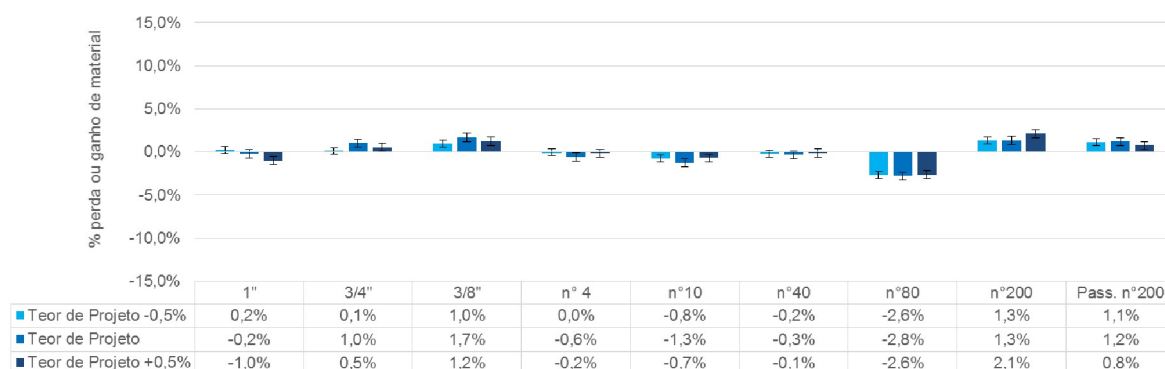


Figura 3.38 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B



As curvas granulométricas obtidas através de amostras extraídas da centrífuga seguem o mesmo padrão já citado: curvas indicando misturas mais grossas a medida que é elevado o teor de ligante (Tabela 3.19, Figura 3.39 e Figura 3.40). Dentre as três misturas, somente a mistura Teor de Projeto +0,5% indicou uma média fora do limite imposto pelo DNIT. Esse fato será melhor comentado e visualizado no item 3.9, que trata da análise dos dados gerais obtidos com a centrífuga.

Os dados das análises granulométricas das misturas na faixa C ratificam a eficiência da extração com o forno de ignição, não afetando um possível controle tecnológico (Tabela 3.20, Figura 3.41 e Figura 3.42).

Semelhante às outras curvas encontradas a partir das extrações com a centrífuga, ocorreu um deslocamento das curvas da faixa C em relação à curva de projeto, sendo gradual conforme a quantidade de ligante é adicionada à mistura. A única mistura que trouxe sua curva ultrapassando os limites de execução foi a mistura Teor de Projeto +0,5%, mostrando uma curva mais grossa do que a realmente empregada (Tabela 3.21, Figura 3.43 e Figura 3.44). Assim como nas misturas já abordadas, o deslocamento da graduação com a adição de ligante na mistura mostra-se novamente ligada à baixa eficiência da centrífuga na extração do ligante.

Tabela 3.19 – Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	3,1%	0,6%	1,8%	-0,7%	4,0%	1,5%	7,0%
3/4"	7,5%	4,8%	-2,7%	3,8%	-3,7%	7,8%	0,3%	7,0%
3/8"	27,5%	25,6%	-1,9%	30,9%	3,4%	35,1%	7,6%	7,0%
n° 4	18,5%	18,9%	0,4%	21,4%	2,9%	18,4%	-0,1%	7,0%
n°10	11,5%	13,1%	1,6%	12,7%	1,2%	9,7%	-1,8%	5,0%
n°40	11,5%	13,8%	2,3%	12,3%	0,8%	10,5%	-1,0%	5,0%
n°80	7,0%	4,7%	-2,3%	4,6%	-2,4%	3,5%	-3,5%	5,0%
n°200	8,5%	10,4%	1,9%	8,6%	0,1%	7,5%	-1,0%	3,0%
Pas.200	5,5%	5,6%	0,1%	3,9%	-1,6%	3,5%	-2,0%	2,0%

Figura 3.39 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

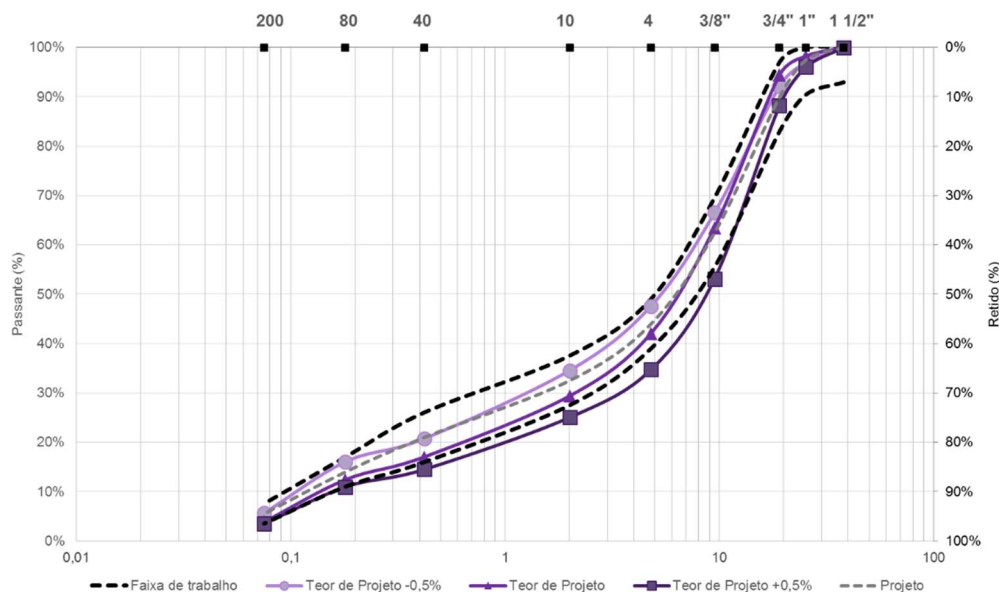


Figura 3.40 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B

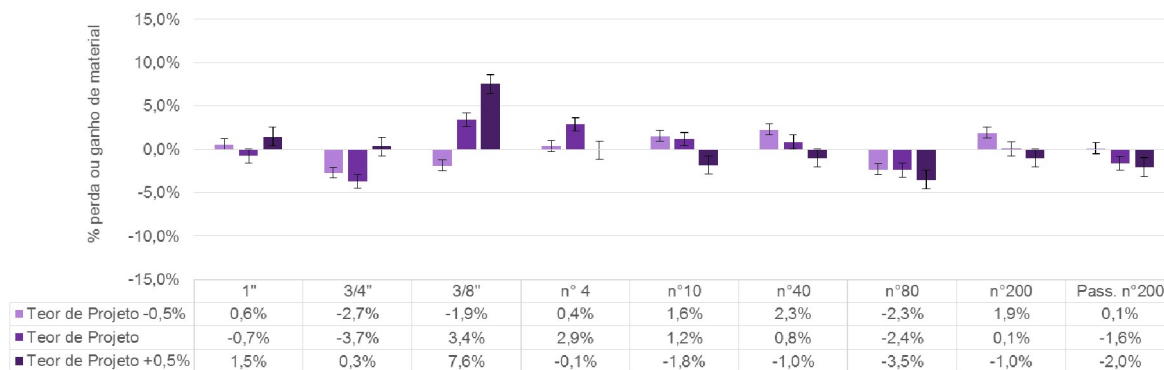


Tabela 3.20 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	12,5%	2,5%	12,0%	2,0%	12,0%	2,0%	7,0%
3/8"	10,0%	9,2%	-0,8%	9,4%	-0,6%	9,3%	-0,7%	7,0%
n° 4	22,0%	22,1%	0,1%	20,9%	-1,1%	21,7%	-0,3%	7,0%
n°10	22,0%	20,5%	-1,5%	20,7%	-1,3%	20,5%	-1,5%	5,0%
n°40	19,0%	18,4%	-0,6%	19,4%	0,4%	19,1%	0,1%	5,0%
n°80	7,0%	4,6%	-2,4%	4,5%	-2,5%	4,3%	-2,7%	5,0%
n°200	4,0%	6,2%	2,2%	6,3%	2,3%	6,0%	2,0%	3,0%
Pas.200	6,0%	6,4%	0,4%	6,8%	0,8%	6,0%	1,0%	2,0%

Figura 3.41 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C

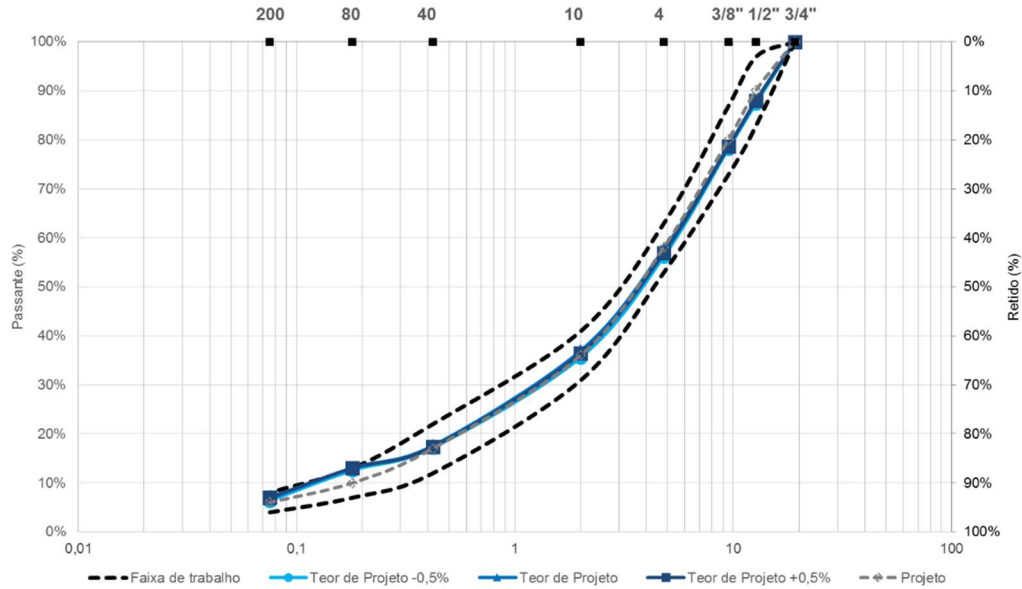


Figura 3.42 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C

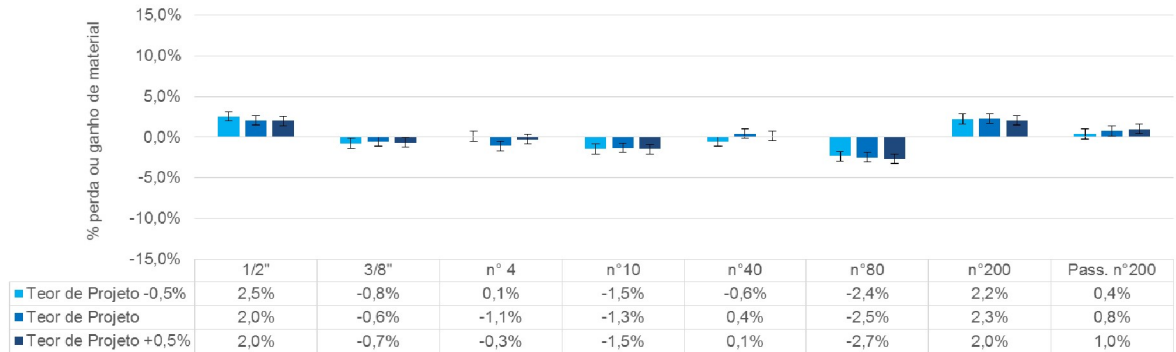


Tabela 3.21 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	11,4%	1,4%	12,2%	2,2%	19,4%	9,4%	7,0%
3/8"	10,0%	9,9%	-0,1%	11,1%	1,1%	10,9%	0,9%	7,0%
n° 4	22,0%	19,7%	-2,3%	22,6%	0,6%	20,2%	-1,8%	7,0%
n°10	22,0%	21,9%	-0,1%	20,3%	-1,7%	19,3%	-2,7%	5,0%
n°40	19,0%	20,6%	1,6%	18,8%	-0,2%	17,2%	-1,8%	5,0%
n°80	7,0%	4,3%	-2,7%	4,2%	-2,8%	3,7%	-3,3%	5,0%
n°200	4,0%	6,5%	2,5%	6,1%	2,1%	5,1%	1,1%	3,0%
Pas.200	6,0%	5,6%	-0,4%	4,8%	-1,2%	4,2%	-1,8%	2,0%

Figura 3.43 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C

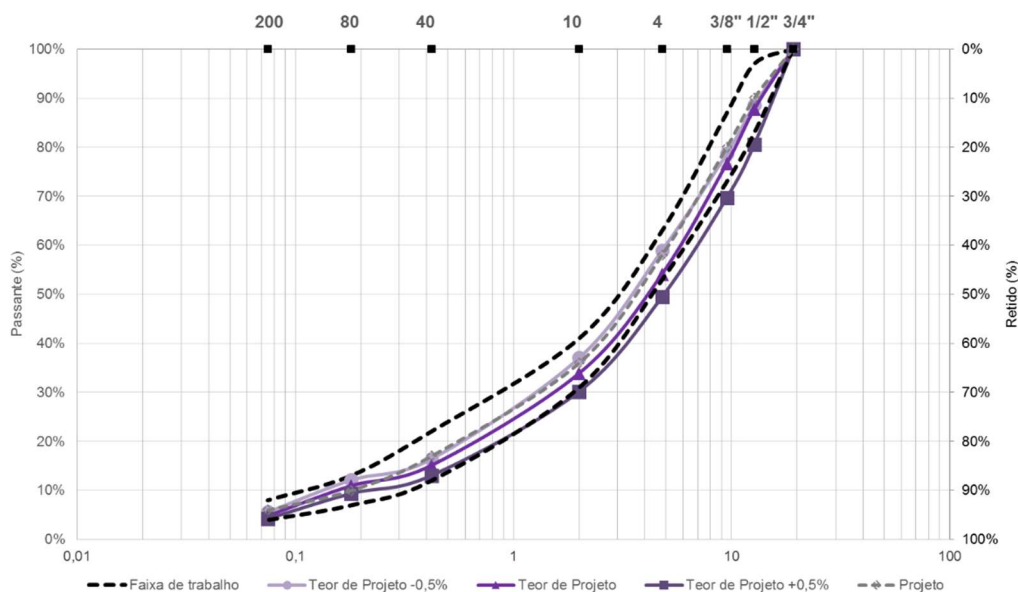
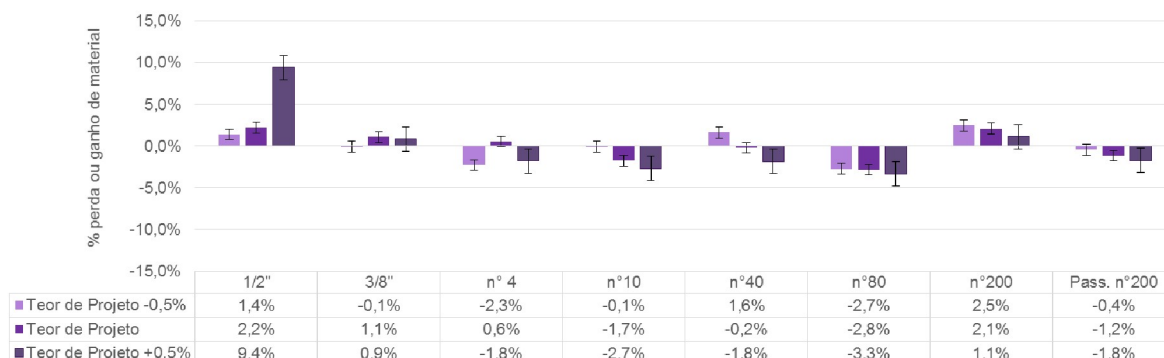


Figura 3.44 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C



3.4 PEDREIRA DE CAÇAPAVA DO SUL (BASALTO)

A rocha basáltica de Caçapava do Sul tem suas características da faixa B e C do DNIT apresentadas na Tabela 3.22, sendo o último agregado ensaiado na pesquisa. A cidade é conhecida por sua diversidade de agregados de diferentes origens mineralógicas. Os dados de calibração C_F ficaram adentro do que é considerado normal, sem exceder o limite de alta perda, igual ou superior à 1%.

Tabela 3.22 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração

Rocha	Agregado	Absorção (%)	Perda por abrasão (%)	Sanidade (%)	Faixa	Teor de Projeto	C _F
Basalto	Graúdo	0,429	14,79	4,32	B	5,10%	0,37%
	Miúdo	0,566	---	---	C	4,80%	0,47%

3.4.1 Determinação do teor de ligante

As médias de teor de ligante obtidas para as misturas da Faixa B são apresentadas na Tabela 3.23 e Figura 3.45. Ocorreu uma particularidade na média de teor da mistura Teor de projeto +0,5%, apontando uma média abaixo do teor de projeto, não ultrapassando o limite de 0,3%, mas mesmo assim uma média baixa em comparação às outras misturas e, até mesmo, em comparação às médias de outras rochas (Figura 3.46).

Essa mistura, Teor de projeto +0,5%, foi a última mistura ensaiada em laboratório, acusando provavelmente um declínio na eficiência do forno de ignição, semelhante ao ocorrido nas misturas na faixa C da rocha de Sarandi, mas em menor proporção. As prováveis causas estão listadas no manual do forno de ignição, sendo apontadas em direção à necessidade de manutenção dos mecanismos de exaustão e do soprador. A manutenção básica é recomendada sempre que surgem indicativos de perda de eficiência, com limpeza do exaustor e soprador, até manutenções mais pontuais e severas, como reposição de peças do equipamento, mas nada que tenha se mostrado necessário mediante avaliação do operador. Como já comentado, foram necessários concertos reparos da exaustão instalada externamente ao forno.

As amostras finais do forno de ignição, das misturas com indicativos de baixa eficiência na extração, mostraram alguns resquícios de ligante na bandeja do cesto de amostra, trazendo certa dificuldade para retirar o material fino ali depositado, necessitando até mesmo de raspagem com espátula, o que não ocorreu em nenhuma das outras misturas.

Os dados médios de teor de ligante da centrífuga não mostraram diferença se comparado a outras misturas também ensaiadas no aparelho, reforçando a baixa eficiência do equipamento diante variação de teor de ligante. Mesmo com acurácia na mistura Teor de Projeto, nas outras misturas com variação de ligante provocaria

conclusões equivocadas acerca do teor de ligante empregado (Tabela 3.23 e Figura 3.47).

Foram obtidas boas médias de teor de ligante para as misturas na faixa C com o forno de ignição, tanto método A quanto método B, e médias muito elevadas para os resultados da centrífuga, sem um visível comportamento padrão com a variação de ligante (Tabela 3.24, Figura 3.48, Figura 3.49 e Figura 3.50).

A centrífuga apresentou elevada perda de filler nas misturas faixa C na fase de análise granulométrica, possivelmente ligada a rocha ter um passante na peneira nº200 excessivamente fino, possivelmente facilitando a alta perda de passante na peneira nº 200 durante a centrifugação.

Tabela 3.23 – Resumo dos dados de teor de ligante - Faixa B

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	4,60%		5,10%		5,60%	
	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>
MÉTODO A						
% Teor	5,24%	0,64%	5,80%	0,70%	5,98%	0,38%
% Teor -C _F	4,77%	0,17%	5,33%	0,23%	5,51%	-0,09%
% T _C	0,12%	—	0,10%	—	0,13%	—
% Teor -C _F -T _C	4,65%	0,05%	5,22%	0,12%	5,38%	-0,22%
Desvio padrão	0,23%		0,07%		0,29%	
MÉTODO B						
% Teor	5,18%	0,58%	5,48%	0,38%	5,96%	0,36%
% Teor - C _F	4,71%	0,11%	5,01%	-0,09%	5,49%	-0,11%
Desvio padrão	0,25%		0,34%		0,32%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	4,99%	0,39%	5,10%	0,00%	5,36%	-0,24%
Desvio padrão	0,24%		0,32%		0,35%	

*média de 5 amostras

Figura 3.45 - Médias dos teores de ligante – Faixa B

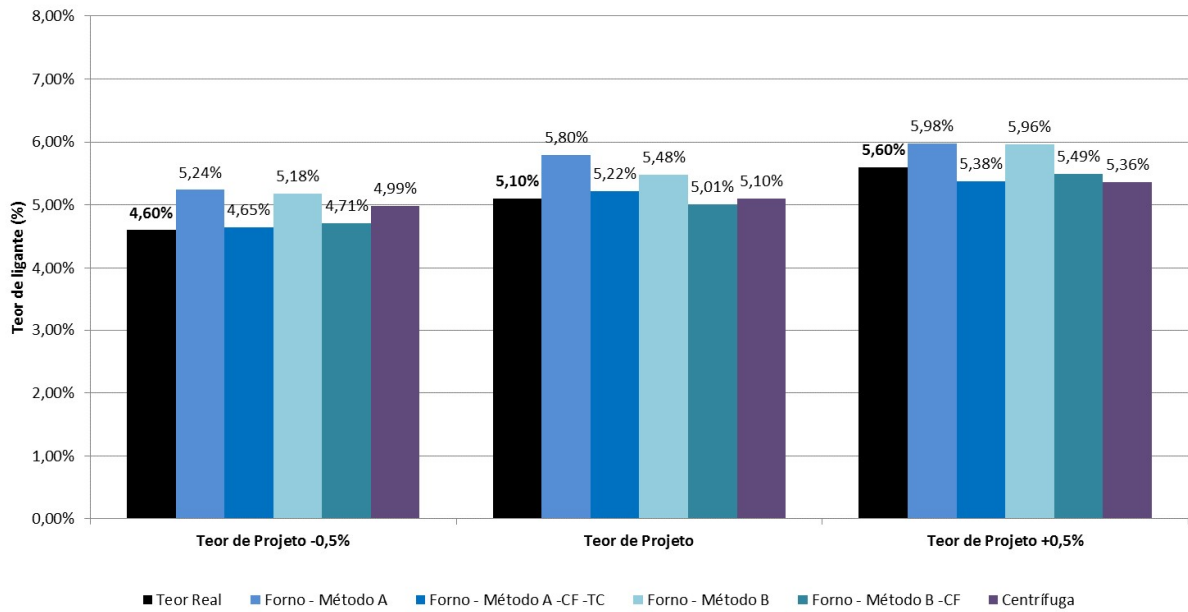


Figura 3.46 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa B

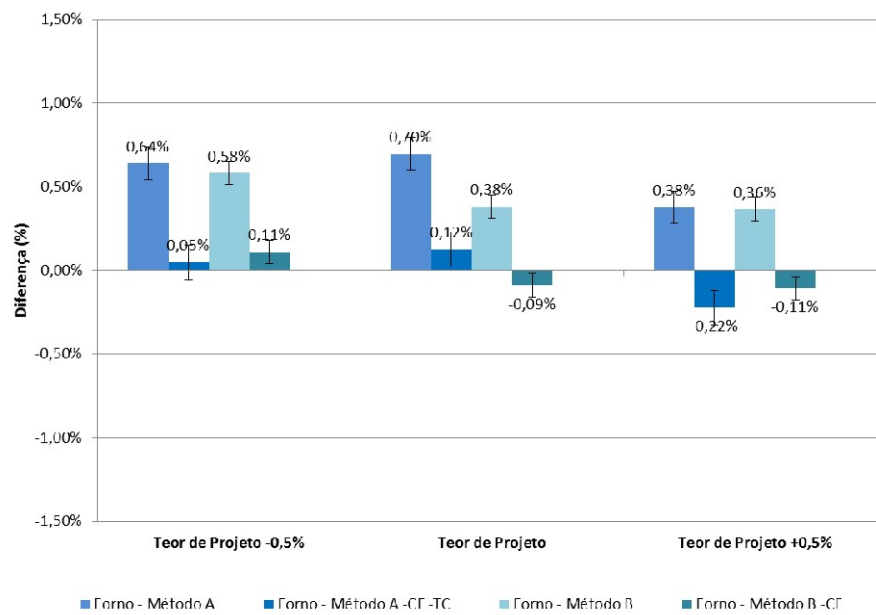


Figura 3.47 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa B

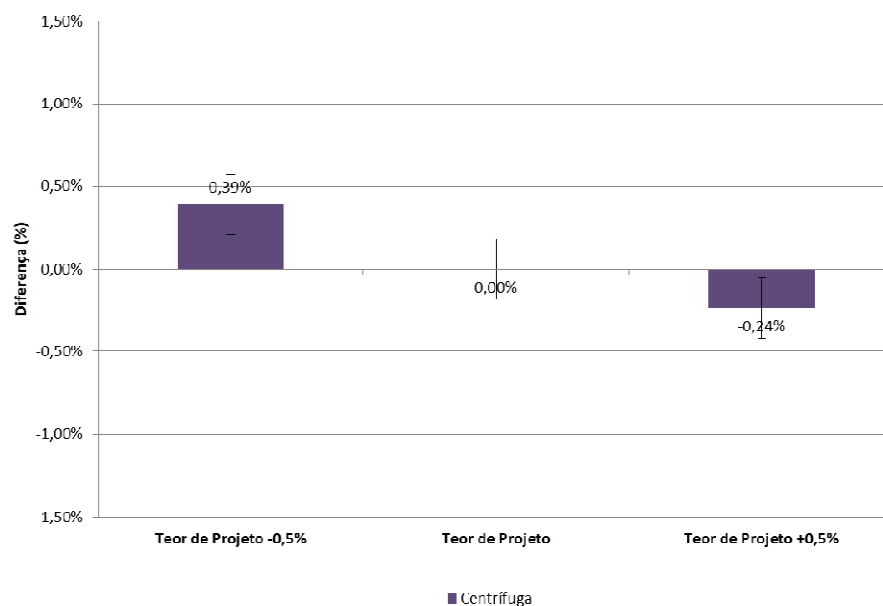


Tabela 3.24 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO 0,0%		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	4,30%		4,80%		5,30%	
	Média*	Diferença	Média*	Diferença	Média*	Diferença
MÉTODO A						
% Teor	4,98%	0,68%	5,44%	0,64%	5,89%	0,59%
% Teor -C _F	4,55%	0,25%	5,01%	0,21%	5,46%	0,16%
% T _C	0,14%	—	0,12%	—	0,12%	—
% Teor -C _F -T _C	4,41%	0,11%	4,89%	0,09%	5,33%	0,03%
Desvio padrão	0,17%		0,13%		0,16%	
MÉTODO B						
% Teor	4,94%	0,64%	5,36%	0,56%	5,76%	0,46%
% Teor - C _F	4,51%	0,21%	4,93%	0,13%	5,33%	0,03%
Desvio padrão	0,16%		0,10%		0,13%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	5,22%	0,92%	6,01%	1,21%	6,20%	0,90%
Desvio padrão	0,09%		0,17%		0,48%	

*média de 5 amostras

Figura 3.48 - Médias dos teores de ligante – Faixa C

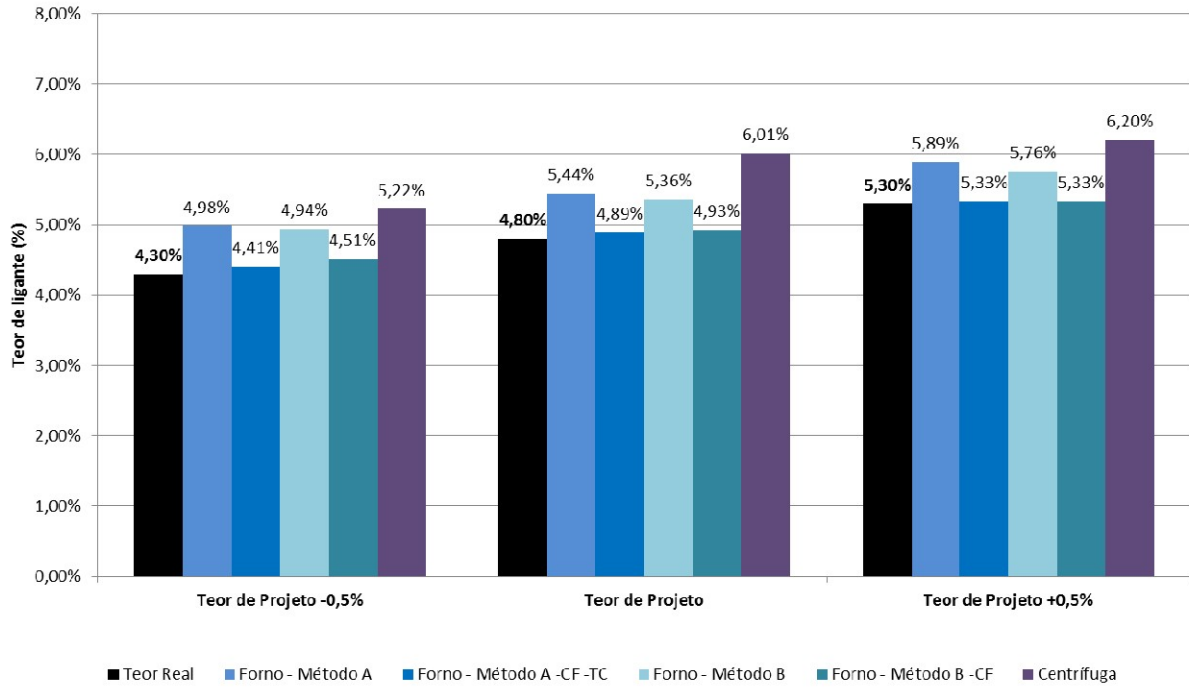


Figura 3.49 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C

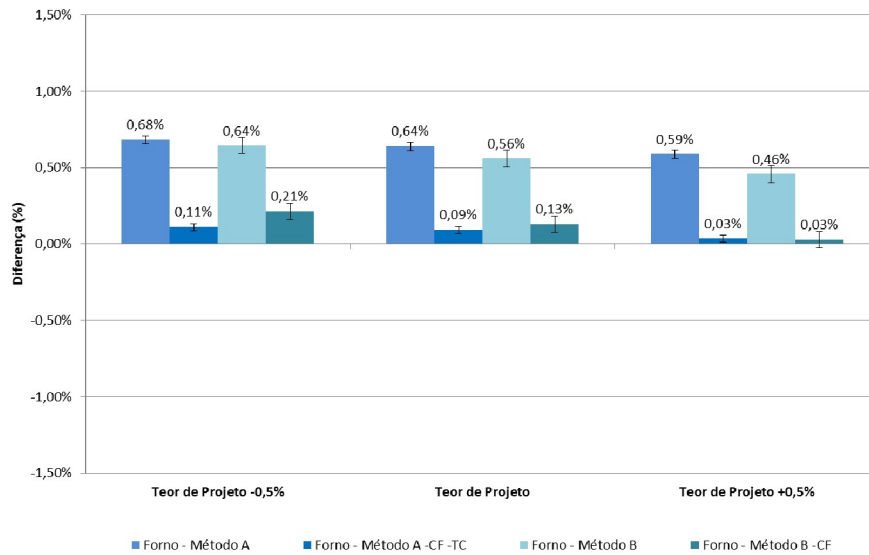
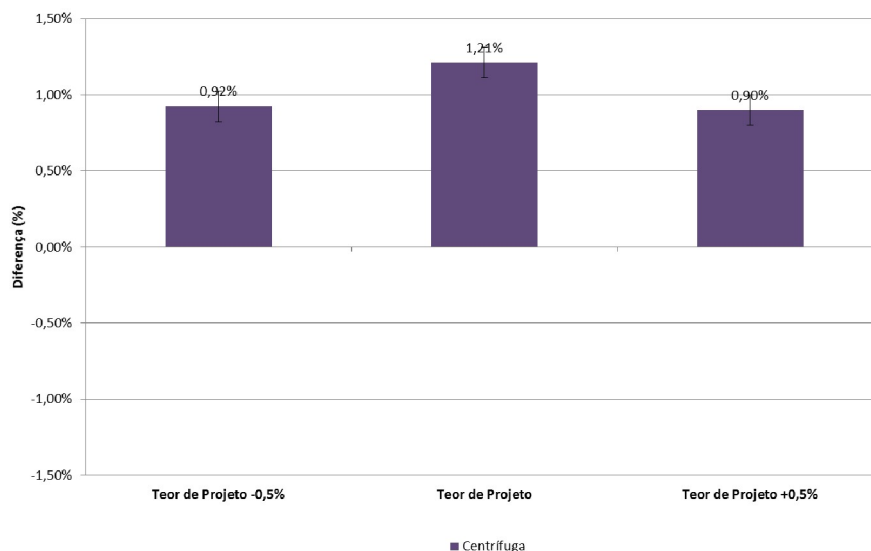


Figura 3.50 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa C



3.4.2 Análise granulométrica

As curvas granulométricas médias da faixa B obtidas com amostras do forno estão apresentadas na Tabela 3.25 e Figura 3.51. Todas com bom comportamento, dentro da faixa de controle e com baixa variação em relação à curva de projeto (Figura 3.52).

As curvas granulométricas médias da faixa B obtidas com amostras da centrífuga apresentaram distorção em relação à curva de projeto, com as 3 misturas fora dos limites de projeto (Tabela 3.26 e Figura 3.53). Na Figura 3.54 fica mais visível o acúmulo de material fino nas peneiras mais grossas.

Assim como nas misturas da faixa B, o forno de ignição apresentou curvas médias muito próximas da curva de projeto das misturas na faixa C (Tabela 3.27 e Figura 3.55). Na Figura 3.56 fica clara a baixa variação da granulometria apresentada pelo ensaio com o forno de ignição.

Assim como nas misturas na faixa B desta rocha, a centrífuga apresentou curvas granulométricas médias na faixa C distantes da curva de projeto (Tabela 3.28 e Figura 3.57). Na Figura 3.58 está melhor exemplificada a variação das curvas entre as diferentes peneiras em relação ao projeto. Deve ser salientado que ocorreu excessiva perda de material passante na peneira nº 200, provocando até mesmo alteração nos dados de teor de ligante.

Tabela 3.25 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	2,4%	-0,1%	3,4%	0,9%	3,4%	0,9%	7,0%
3/4"	7,5%	7,6%	0,1%	5,2%	-2,3%	7,0%	-0,5%	7,0%
3/8"	27,5%	27,7%	0,2%	27,3%	-0,2%	27,8%	0,3%	7,0%
n° 4	18,5%	17,8%	-0,7%	19,2%	0,7%	18,5%	0,0%	7,0%
n°10	11,5%	12,3%	0,8%	12,1%	0,6%	11,7%	0,2%	5,0%
n°40	11,5%	12,6%	1,1%	12,8%	1,3%	12,5%	1,0%	5,0%
n°80	7,0%	6,1%	-0,9%	5,6%	-1,4%	6,6%	-0,4%	5,0%
n°200	8,5%	7,5%	-1,0%	7,5%	-1,0%	6,2%	-2,3%	3,0%
Pas.200	5,5%	6,0%	0,5%	6,9%	1,4%	6,3%	0,8%	2,0%

Figura 3.51 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

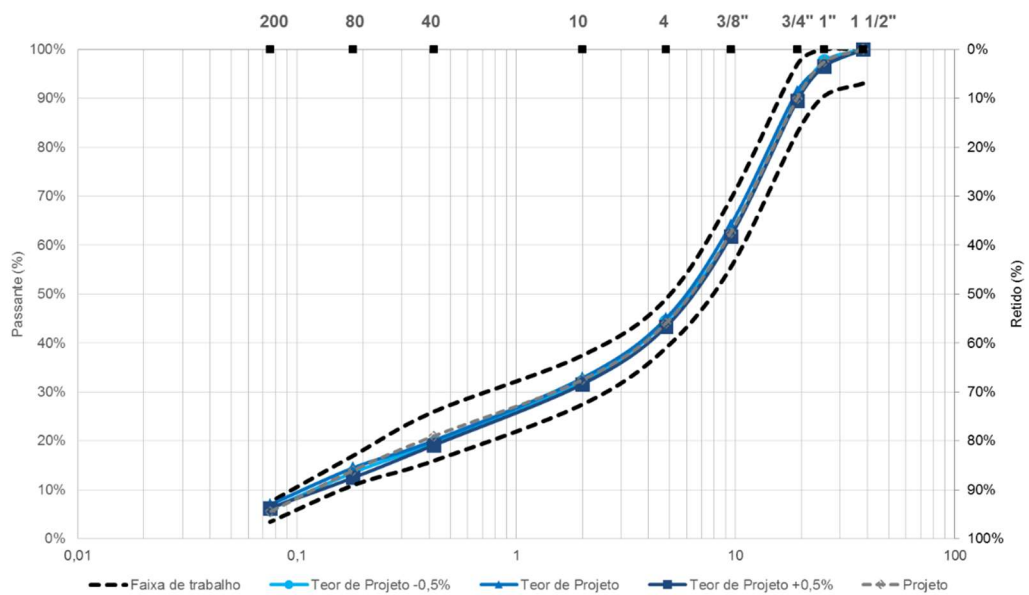


Figura 3.52 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B

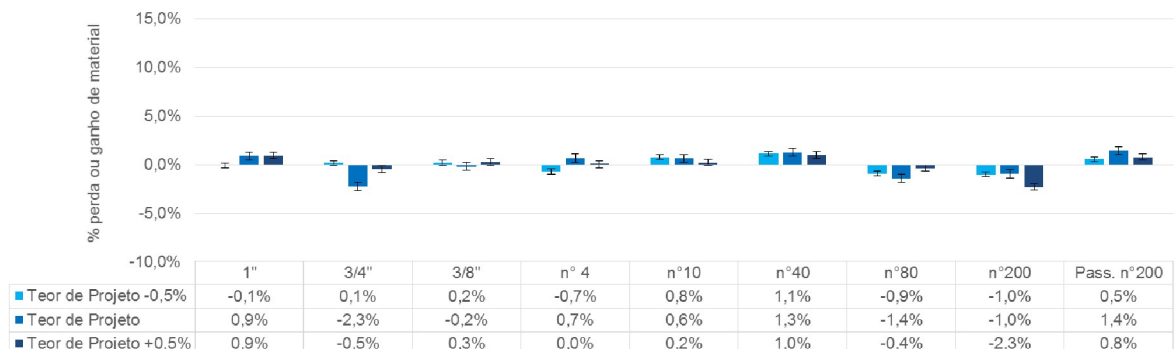


Tabela 3.26 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	2,7%	0,2%	3,6%	1,1%	8,5%	6,0%	7,0%
3/4"	7,5%	8,5%	1,0%	17,7%	10,2%	12,2%	4,7%	7,0%
3/8"	27,5%	39,5%	12,0%	34,5%	7,0%	35,3%	7,8%	7,0%
n° 4	18,5%	16,7%	-1,8%	15,1%	-3,4%	15,8%	-2,7%	7,0%
n°10	11,5%	9,6%	-1,9%	8,5%	-3,0%	9,5%	-2,0%	5,0%
n°40	11,5%	10,1%	-1,4%	9,6%	-1,9%	8,6%	-2,9%	5,0%
n°80	7,0%	4,2%	-2,8%	3,8%	-3,2%	3,5%	-3,5%	5,0%
n°200	8,5%	5,5%	-3,0%	4,9%	-3,6%	4,4%	-4,1%	3,0%
Pas.200	5,5%	3,3%	-2,2%	2,3%	-3,2%	2,3%	-3,2%	2,0%

Figura 3.53 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

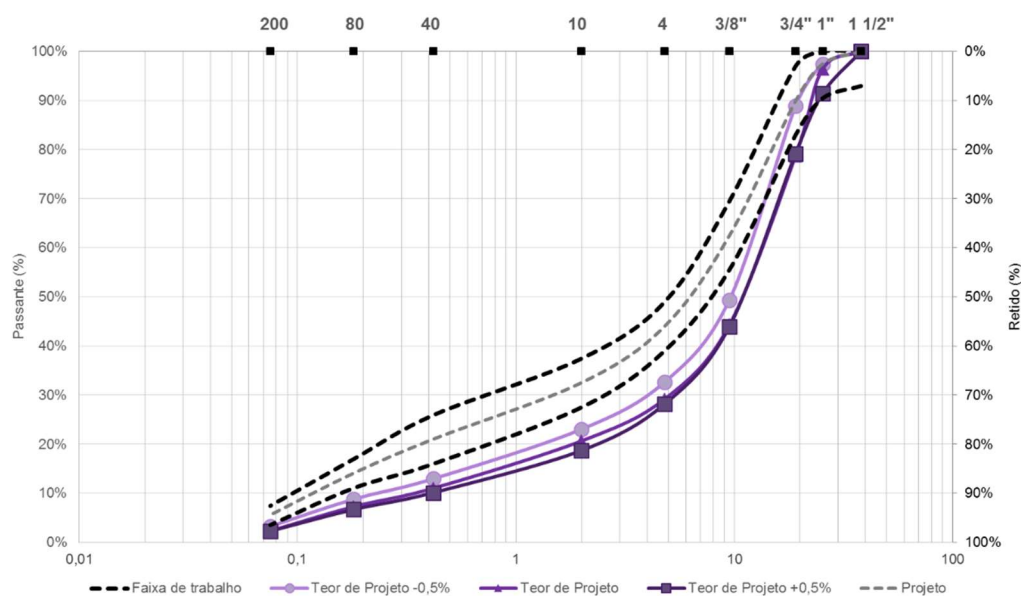


Figura 3.54 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B



Tabela 3.27 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	10,4%	0,4%	12,1%	2,1%	11,1%	1,1%	7,0%
3/8"	10,0%	9,1%	-0,9%	9,1%	-0,9%	8,6%	-1,4%	7,0%
n° 4	22,0%	24,1%	2,1%	22,5%	0,5%	23,1%	1,1%	7,0%
n°10	22,0%	20,3%	-1,7%	20,9%	-1,1%	22,0%	0,0%	5,0%
n°40	19,0%	20,2%	1,2%	20,6%	1,6%	21,1%	2,1%	5,0%
n°80	7,0%	5,5%	-1,5%	5,0%	-2,0%	5,1%	-1,9%	5,0%
n°200	4,0%	4,6%	0,6%	4,4%	0,4%	3,9%	-0,1%	3,0%
Pas.200	6,0%	5,9%	-0,1%	5,5%	-0,5%	5,1%	-0,9%	2,0%

Figura 3.55 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C

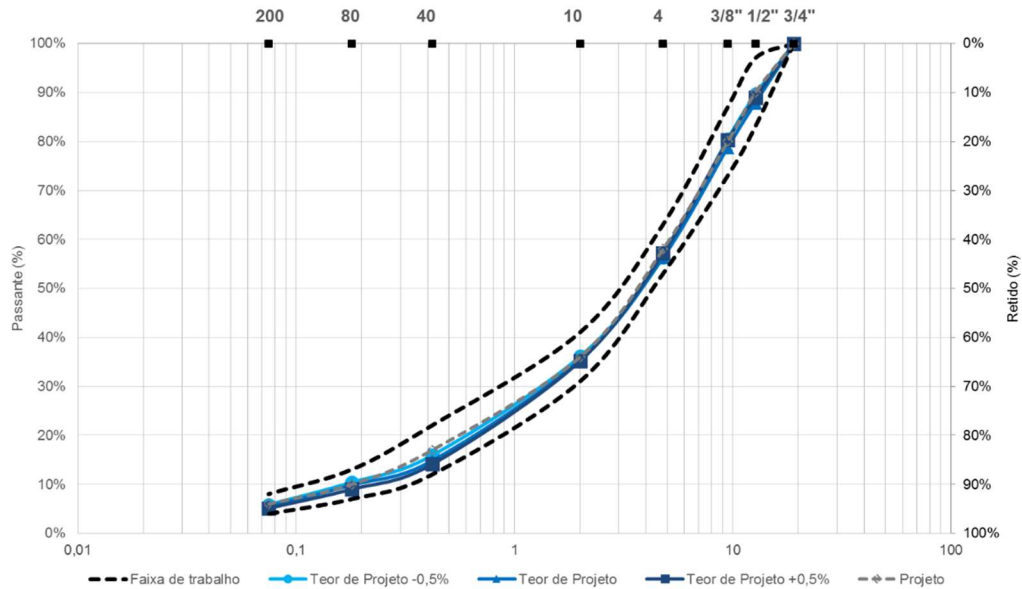


Figura 3.56 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C

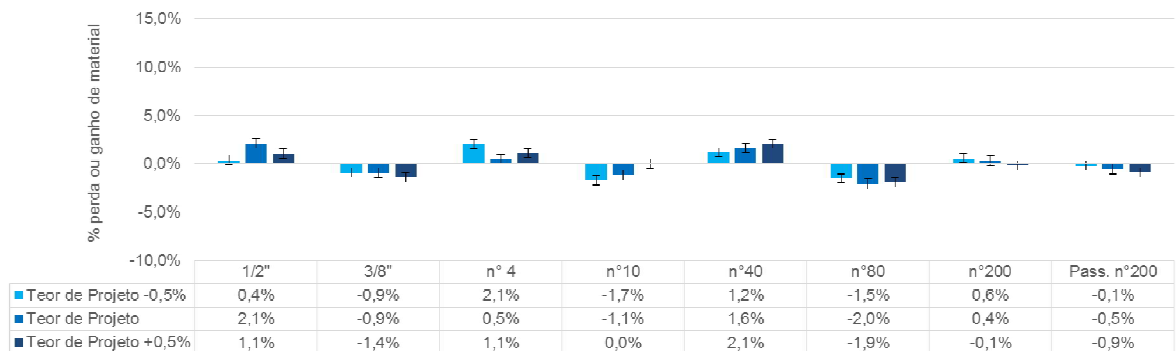


Tabela 3.28 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	17,1%	7,1%	15,4%	5,4%	22,6%	12,6%	7,0%
3/8"	10,0%	11,8%	1,8%	9,3%	-0,7%	14,0%	4,0%	7,0%
n° 4	22,0%	24,7%	2,7%	23,8%	1,8%	21,8%	-0,2%	7,0%
n°10	22,0%	17,4%	-4,6%	20,9%	-1,1%	16,5%	-5,5%	5,0%
n°40	19,0%	17,4%	-1,6%	18,8%	-0,2%	15,7%	-3,3%	5,0%
n°80	7,0%	4,5%	-2,5%	4,6%	-2,4%	3,7%	-3,3%	5,0%
n°200	4,0%	3,7%	-0,3%	3,7%	-0,3%	3,0%	-1,0%	3,0%
Pas.200	6,0%	3,4%	-2,6%	3,5%	-2,5%	2,6%	-3,4%	2,0%

Figura 3.57 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C

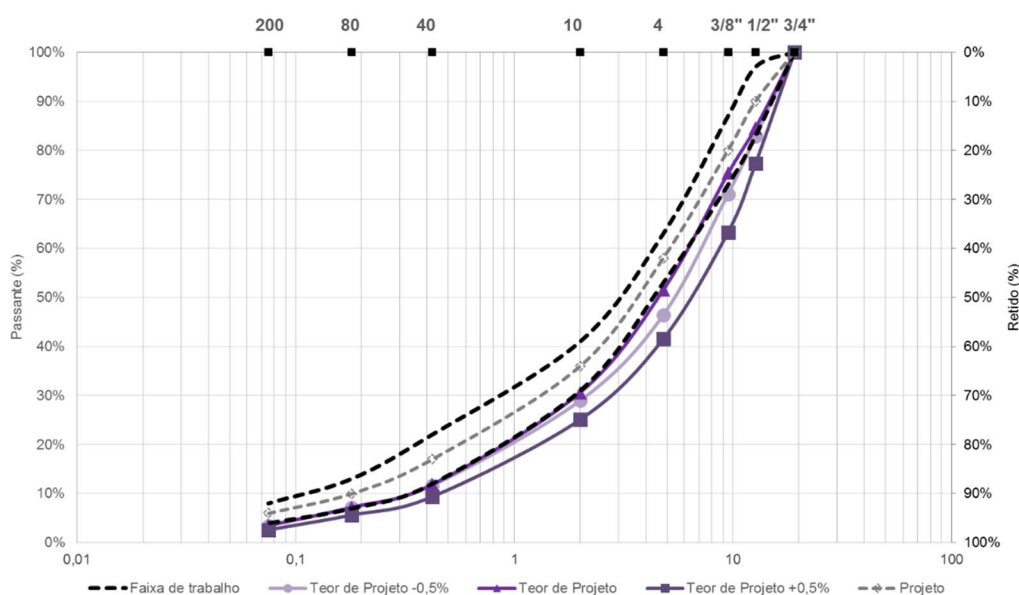
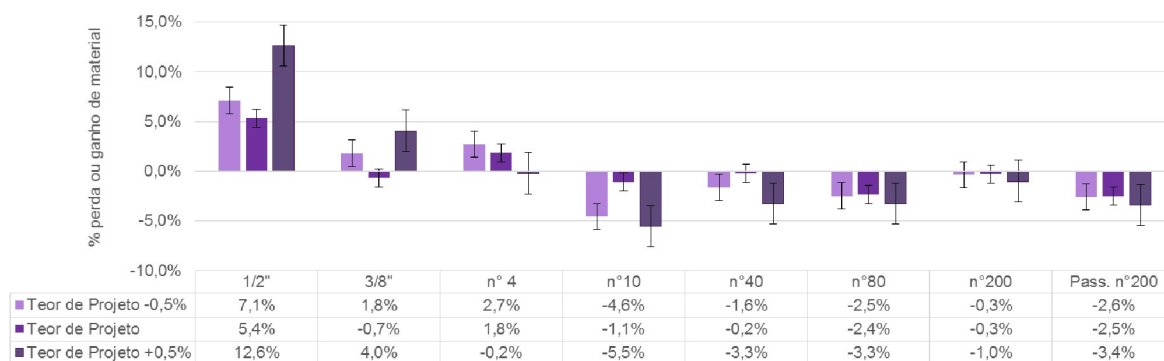


Figura 3.58 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C



3.5 PEDREIRA DE ELDORADO DO SUL (GRANITO)

A rocha de Eldorado do Sul é um granito com alta perda por abrasão, sendo a principal característica desejada para análise. Outro fator interessante é a conhecida baixa adesividade de ligante a este tipo de rocha. Abaixo são encontrados os dados principais de caracterização interessantes à pesquisa, teores de projeto e fatores de calibração, estes situados abaixo de 1%, valores considerados normais no histórico de pesquisas do forno de ignição (Tabela 3.29).

Tabela 3.29 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração

Rocha	Agregado	Absorção (%)	Perda por abrasão (%)	Sanidade (%)	Faixa	Teor de Projeto	C _F
Granito	Graúdo	0,624	21,3	0,636	B	5,40%	0,47%
	Miúdo	0,634	28,53	----	C	5,70%	0,54%

3.5.1 Determinação do teor de ligante

Os dados de obtenção de teor de ligante em forma de médias das misturas na faixa B estão representados na Tabela 3.30. Assim como nas rochas anteriormente analisadas, deve ser desconsiderada a possibilidade de ensaios sem calibração utilizando o forno de ignição com a metodologia normatizada. Os dados sem calibração são muito distantes do teor empregado nas três diferentes misturas (Figura 3.59 e Figura 3.60), mas uma alternativa será melhor exposta no item 3.16, onde, a partir de regressões lineares, chegou-se a equações empíricas com um bom grau de confiabilidade que poderiam ser utilizadas para situações em que não seria possível conseguir um valor de C_F.

Visualizando as diferenças médias na Figura 3.60, utilizando o forno de ignição, tanto metodologia A quanto B, é notável a proximidade das médias em relação aos valores de projeto nas três misturas. A mistura com adição de 0,5% de ligante teve médias mais baixas, mas com somente 0,10% de diferença para o teor real empregado, indicando uma possível ineficiência da extração em teores elevados de ligante ou também como indicativo de possível necessidade de manutenção do equipamento.

Na Tabela 3.30, que apresenta os dados de teor de ligante das misturas na faixa B desta rocha, mostra-se uma semelhança dos valores do desvio padrão entre os diferentes métodos de extração, até mesmo da centrífuga, que até aqui sempre apresentou dados mais díspares se comparados aos do forno de ignição.

Os dados mostrados na Figura 3.61 confirmam o comportamento dos dados obtidos com a centrífuga, já visualizado também em outras rochas e diferentes faixas granulométricas. Esse comportamento será melhor discutido no item 3.9, que trata somente dos dados e ensaio com a centrífuga.

Tabela 3.30 – Resumo dos dados de teor de ligante - Faixa B

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>
	4,90%		5,40%		5,90%	
MÉTODO A						
% Teor	5,48%	0,58%	5,98%	0,58%	6,40%	0,50%
% Teor -C _F	5,01%	0,11%	5,51%	0,11%	5,93%	0,03%
% T _C	0,12%	—	0,11%	—	0,13%	—
% Teor -C _F -T _C	4,89%	-0,01%	5,40%	0,00%	5,80%	-0,10%
Desvio padrão	0,24%		0,15%		0,27%	
MÉTODO B						
% Teor	5,32%	0,42%	5,84%	0,44%	6,28%	0,38%
% Teor - C _F	4,85%	-0,05%	5,37%	-0,03%	5,81%	-0,09%
Desvio padrão	0,23%		0,11%		0,24%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	5,15%	0,25%	5,20%	-0,20%	5,31%	-0,59%
Desvio padrão	0,27%		0,15%		0,27%	

*média de 5 amostras

Figura 3.59 - Médias dos teores de ligante – Faixa B

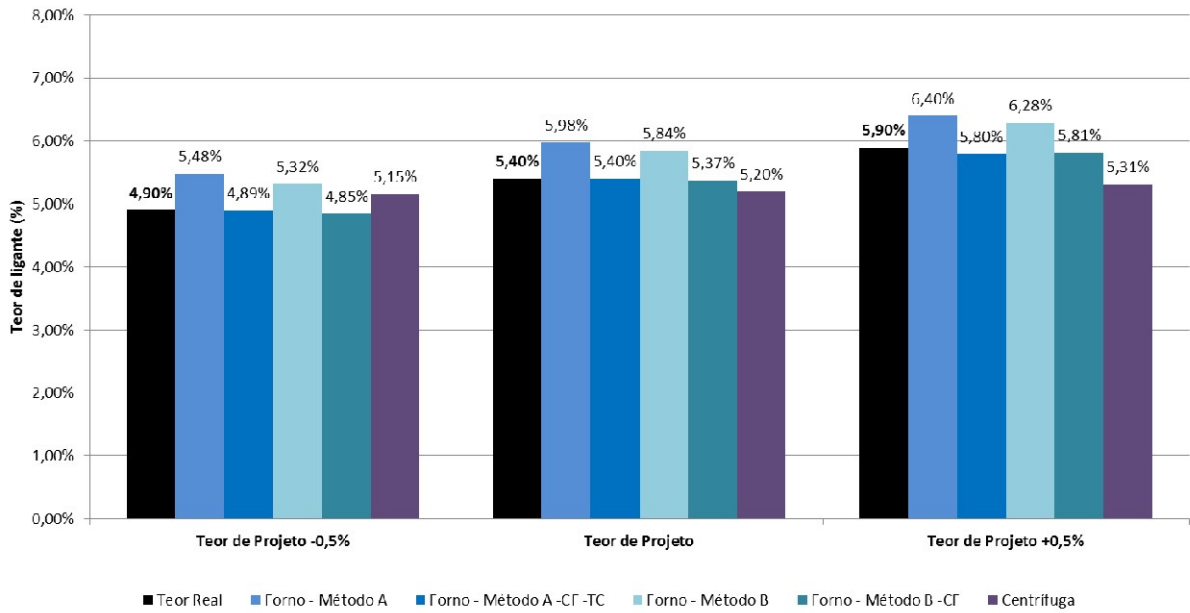


Figura 3.60 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa B

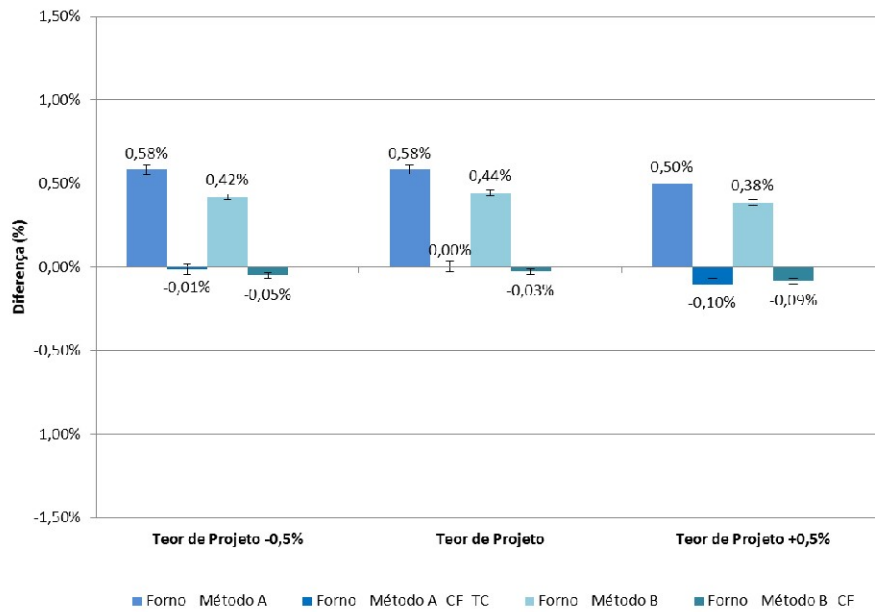
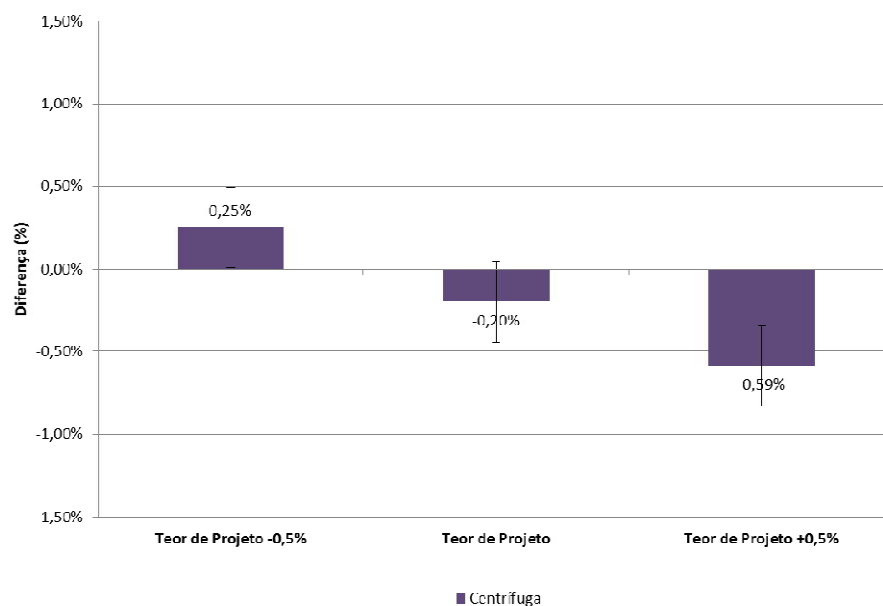


Figura 3.61 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa B



A Tabela 3.31 e Figura 3.62 apresentam os dados médios de teor de ligante na faixa C para a rocha de Eldorado do Sul. Observa-se no gráfico da Figura 3.63 que os dados obtidos com o forno de ignição ficaram abaixo da média. Há quase um comportamento padrão de diminuição da diferença com o aumento do teor de ligante. Esses dados abaixo da utilizada na mistura mostram que ao utilizar uma mistura mais fina a eficiência da extração pode ter diminuído ou mesmo uma confirmação de necessidade de manutenção da exaustão. Uma recalibração poderia ser realizada afim de aproximar os dados, ficando por conta da experiência do operador. Em nenhuma das três misturas houve ultrapassagem do limite de 0,3% de variação, logo, optou-se por manter os valores obtidos.

A Figura 3.64 corrobora a pouca eficiência do extrator centrífugo. No caso desta rocha, além do comportamento de diminuição do distanciamento das médias com ao aumentar a porcentagem de ligante, a mistura com Teor de Projeto +0,5% acabou fornecendo um valor muito próximo do realmente empregado na mistura. Uma situação diferente de outras misturas, onde o comum era uma média abaixo do teor empregado, como por exemplo na Figura 3.36.

Novamente o desvio padrão da extratora centrífuga se mostrou maior que o encontrado no forno de ignição, tanto método A quanto B (Tabela 3.31).

Tabela 3.31 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	Média*	Diferença	Média*	Diferença	Média*	Diferença
	5,20%		5,70%		6,20%	
MÉTODO A						
% Teor	5,80%	0,60%	6,27%	0,57%	6,72%	0,52%
% Teor -C _F	5,26%	0,06%	5,73%	0,03%	6,18%	-0,02%
% T _C	0,14%	—	0,13%	—	0,14%	—
% Teor -C _F -T _C	5,12%	-0,08%	5,61%	-0,09%	6,04%	-0,16%
Desvio padrão	0,23%		0,09%		0,24%	
MÉTODO B						
% Teor	5,76%	0,56%	6,12%	0,42%	6,52%	0,32%
% Teor - C _F	5,22%	0,02%	5,58%	-0,12%	5,98%	-0,22%
Desvio padrão	0,23%		0,10%		0,28%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	5,60%	0,40%	5,95%	0,25%	6,16%	-0,04%
Desvio padrão	0,16%		0,44%		0,47%	

*média de 5 amostras

Figura 3.62 - Médias dos teores de ligante – Faixa C

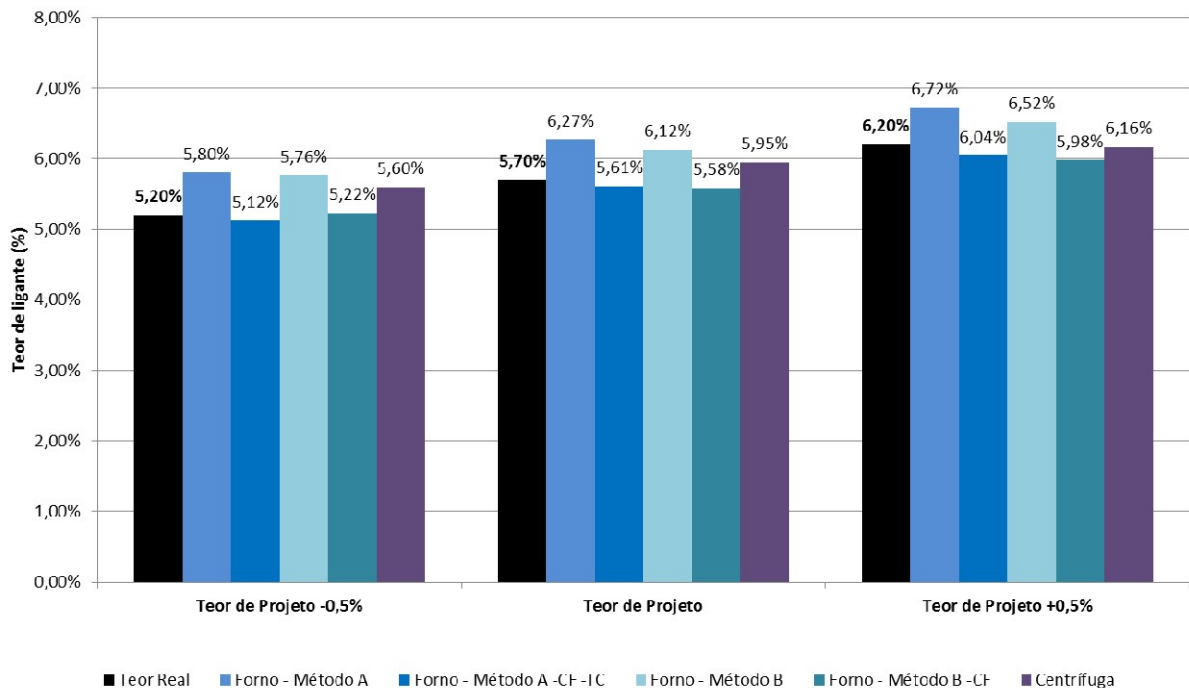


Figura 3.63 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C

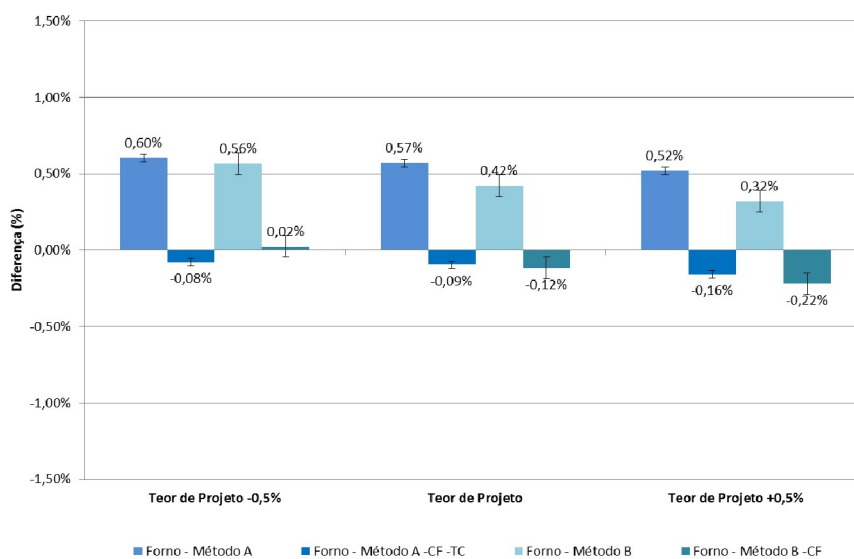
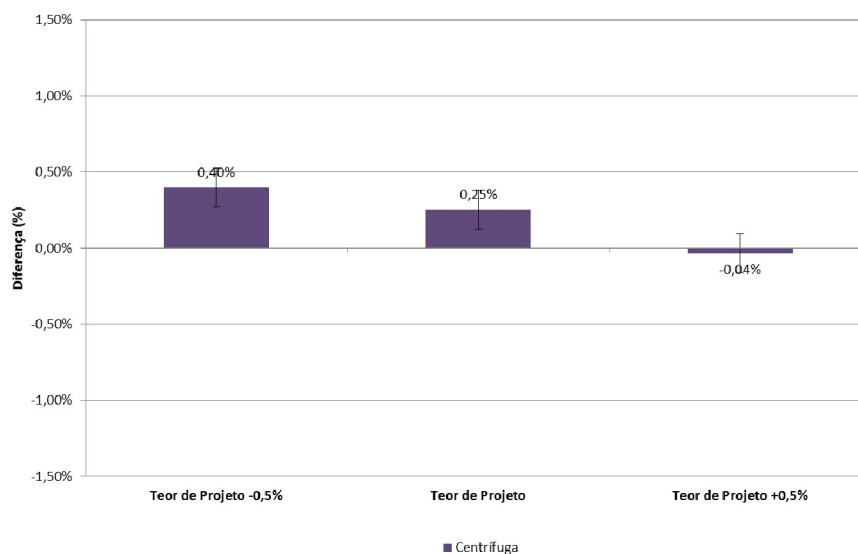


Figura 3.64 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga - Faixa C



3.5.2 Análise granulométrica

Assim como em outras rochas já analisadas, e seguindo o comportamento geral encontrado na pesquisa, as curvas médias de granulometria para faixa B ficaram muito próximas do projeto, com variações muito baixas, independentemente do teor de ligante empregado na mistura (Tabela 3.32, Figura 3.65 e Figura 3.66).

Tabela 3.32 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	2,4%	-0,1%	1,6%	-0,9%	2,3%	-0,2%	7,0%
3/4"	7,5%	6,8%	-0,7%	7,8%	0,3%	7,0%	-0,5%	7,0%
3/8"	27,5%	25,9%	-1,6%	25,0%	-2,5%	24,8%	-2,7%	7,0%
n° 4	18,5%	20,1%	1,6%	21,1%	2,6%	21,0%	2,5%	7,0%
n°10	11,5%	11,8%	0,3%	11,4%	-0,1%	11,4%	-0,1%	5,0%
n°40	11,5%	12,5%	1,0%	12,6%	1,1%	12,8%	1,3%	5,0%
n°80	7,0%	5,8%	-1,2%	6,3%	-0,7%	6,5%	-0,5%	5,0%
n°200	8,5%	8,3%	-0,2%	7,9%	-0,6%	7,7%	-0,8%	3,0%
Pas.200	5,5%	6,3%	0,8%	6,2%	0,7%	6,4%	0,9%	2,0%

Figura 3.65 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

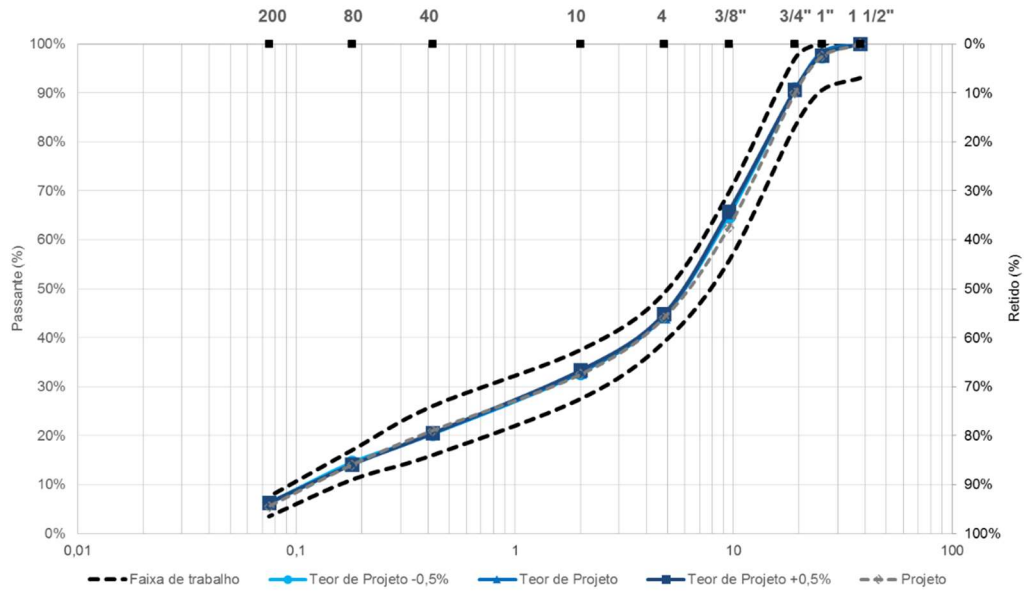
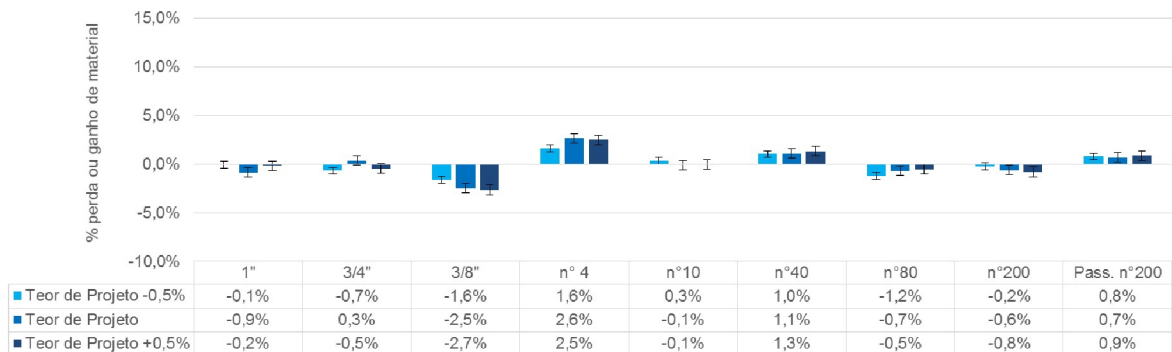


Figura 3.66 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B



A extração inadequada do ligante pela centrífuga acabou por descaracterizar as curvas granulométricas das misturas na faixa B, onde todas passaram do limite imposto para as peneiras (Figura 3.67). Fica claro o acúmulo de material fino nas peneiras de maior diâmetro ao observar a Tabela 3.33 e Figura 3.68, indicando uma incorreta perda de material em várias peneiras com acúmulo de material nas peneiras de maior diâmetro. A curva média da mistura com Teor de Projeto -0,5% mostrou uma menor distorção dos dados, se comparada às outras duas, mas mesmo assim próxima do limite de variação de projeto.

A Tabela 3.34, Figura 3.69 e Figura 3.70 confirmam uma boa análise granulométrica a partir de amostras do forno de ignição com misturas na faixa C.

A análise das curvas granulométricas retiradas das amostras da centrífuga nas misturas na faixa C, mostram a distorção provocada pela má extração de ligante. Todas as curvas ficaram erroneamente fora das especificações, mostrando ainda o padrão de maior distanciamento do projeto com o aumento de ligante (Figura 3.71, Figura 3.72 e Tabela 3.35).

Tabela 3.33 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido Médio	Diferença	Retido Médio	Diferença	Retido Médio	Diferença	
1"	2,5%	3,5%	1,0%	7,0%	4,5%	4,0%	1,5%	7,0%
3/4"	7,5%	9,4%	1,9%	6,0%	-1,5%	13,3%	5,8%	7,0%
3/8"	27,5%	28,5%	1,0%	34,6%	7,1%	42,7%	15,2%	7,0%
n° 4	18,5%	20,6%	2,1%	19,9%	1,4%	13,6%	-4,9%	7,0%
n°10	11,5%	10,4%	-1,1%	9,0%	-2,5%	7,4%	-4,1%	5,0%
n°40	11,5%	11,8%	0,3%	10,3%	-1,2%	8,3%	-3,2%	5,0%
n°80	7,0%	4,3%	-2,7%	3,8%	-3,2%	3,2%	-3,8%	5,0%
n°200	8,5%	7,4%	-1,1%	6,1%	-2,4%	5,0%	-3,5%	3,0%
Pas.200	5,5%	4,1%	-1,4%	3,3%	-2,2%	2,6%	-2,9%	2,0%

Figura 3.67 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

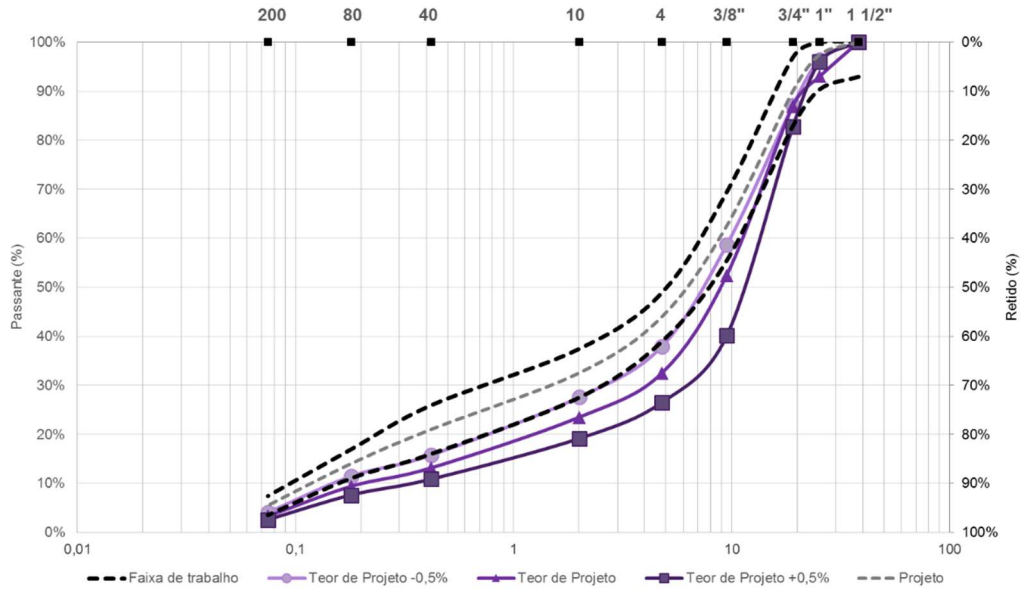


Figura 3.68 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B

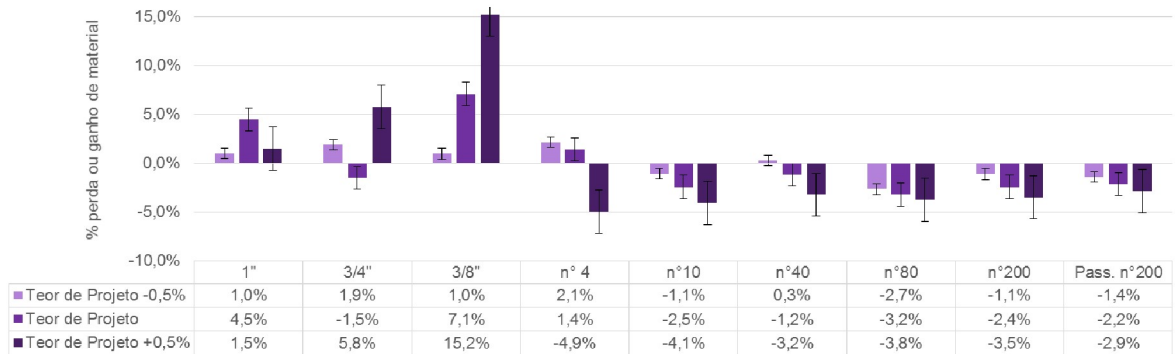


Tabela 3.34 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido Médio	Diferença	Retido Médio	Diferença	Retido Médio	Diferença	
1/2"	10,0%	11,1%	1,1%	11,0%	1,0%	11,3%	1,3%	7,0%
3/8"	10,0%	8,7%	-1,3%	9,1%	-0,9%	8,6%	-1,4%	7,0%
n° 4	22,0%	22,6%	0,6%	23,4%	1,4%	22,8%	0,8%	7,0%
n° 10	22,0%	24,3%	2,3%	23,3%	1,3%	24,0%	2,0%	5,0%
n° 40	19,0%	17,1%	-1,9%	17,2%	-1,8%	16,9%	-2,1%	5,0%
n° 80	7,0%	4,8%	-2,2%	4,9%	-2,1%	5,3%	-1,7%	5,0%
n° 200	4,0%	5,0%	1,0%	4,8%	0,8%	4,8%	0,8%	3,0%
Pas.200	6,0%	6,4%	0,4%	6,2%	0,2%	6,2%	0,2%	2,0%

Figura 3.69 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C

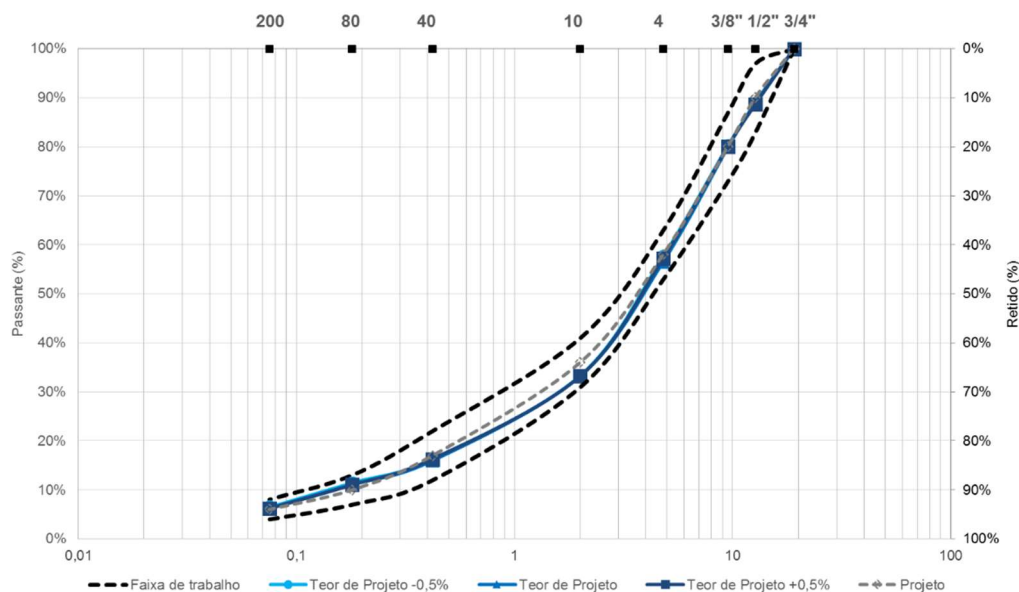


Figura 3.70 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C

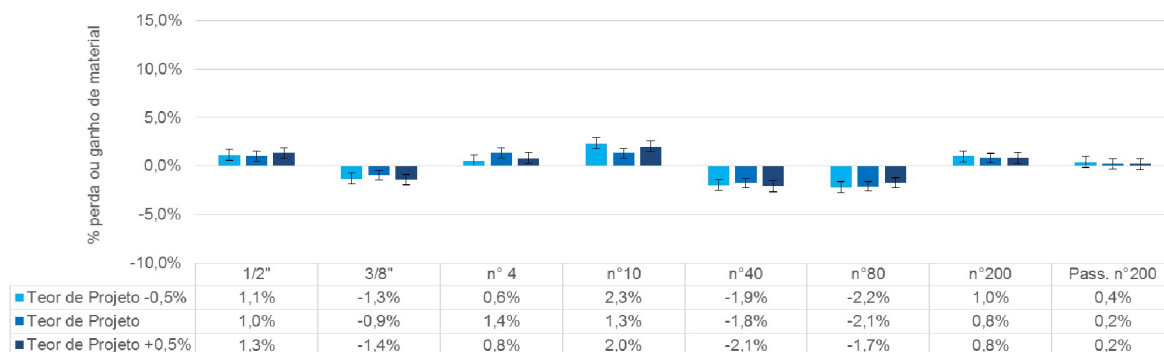


Tabela 3.35 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	12,0%	2,0%	16,1%	6,1%	16,5%	6,5%	7,0%
3/8"	10,0%	11,5%	1,5%	10,5%	0,5%	12,3%	2,3%	7,0%
n° 4	22,0%	24,4%	2,4%	23,5%	1,5%	24,4%	2,4%	7,0%
n°10	22,0%	23,8%	1,8%	23,4%	1,4%	21,7%	-0,3%	5,0%
n°40	19,0%	16,0%	-3,0%	15,7%	-3,3%	15,0%	-4,0%	5,0%
n°80	7,0%	4,3%	-2,7%	4,1%	-2,9%	3,8%	-3,2%	5,0%
n°200	4,0%	3,9%	-0,1%	3,6%	-0,4%	3,4%	-0,6%	3,0%
Pas.200	6,0%	4,0%	-2,0%	3,0%	-3,0%	3,0%	-3,0%	2,0%

Figura 3.71 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C

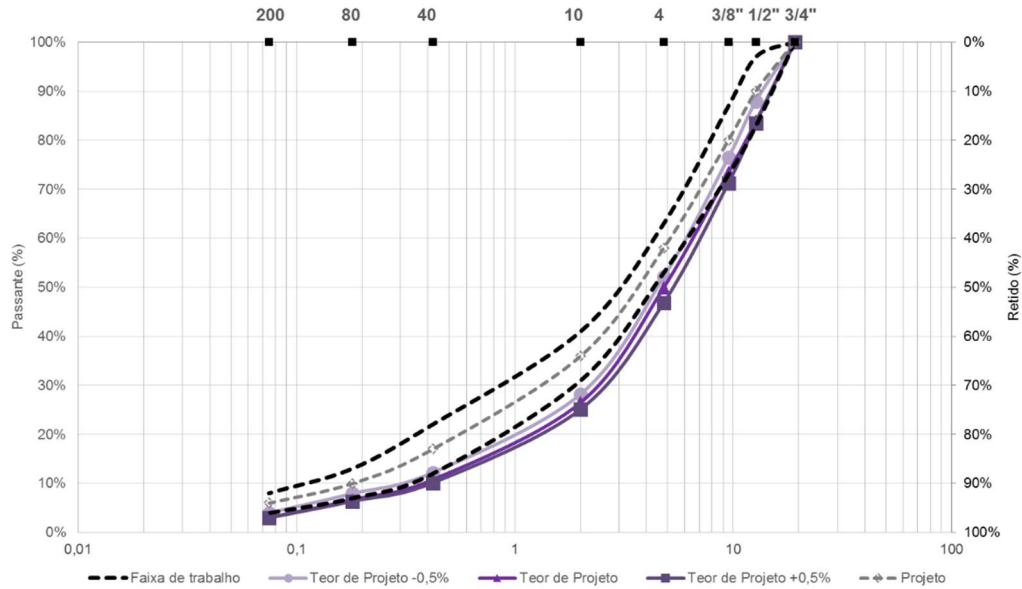
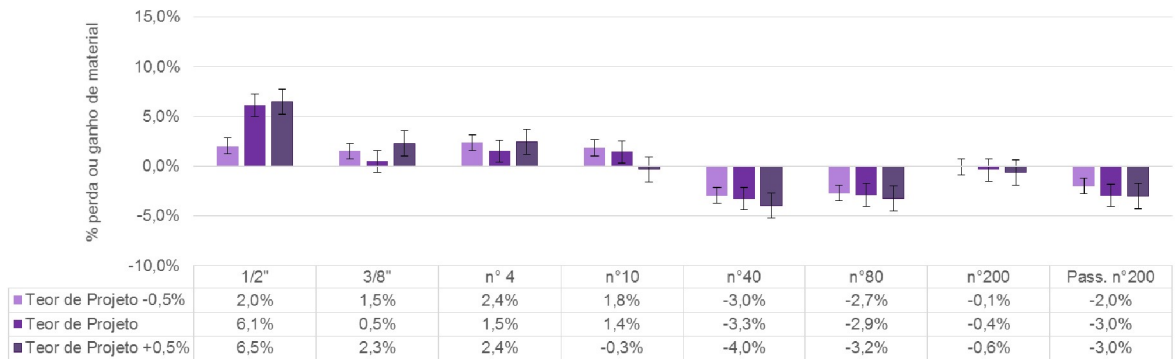


Figura 3.72 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C



3.6 PEDREIRA DE PELOTAS (GRANITO)

Dentre as rochas estudadas, o granito de Pelotas apresentou o menor fator de calibração C_F , faixa B e C do DNIT, como pode ser observado na Tabela 3.36, onde são encontrados também os dados resumo das características da rocha e teores de projeto. A rocha de Pelotas trata-se de um agregado muito utilizado em obras viárias do estado.

Tabela 3.36 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração

Rocha	Agregado	Absorção (%)	Perda por abrasão (%)	Sanidade (%)	Faixa	Teor de Projeto	C _F
Granito	Graúdo	1,187	21,30	---	B	5,30%	0,08%
	Miúdo	---	---	---	C	5,70%	0,10%

3.6.1 Determinação do teor de ligante

A Tabela 3.37 e Figura 3.73 apresentam as médias para as misturas na faixa B. Já é possível notar as médias mais baixas em relação às outras rochas já analisadas. Observando as diferenças das médias em relação ao teor empregado nas misturas (Figura 3.74) tornar-se mais clara a baixa variação dos resultados do forno de ignição para esta rocha, onde mesmo os dados sem calibração já são próximos ao teor das misturas. Na Figura 3.75 é visto que o comportamento da centrífuga permanece o mesmo, com dados elevados para mistura com pouco ligante, decaindo à medida que é adicionado ligante na mistura.

Mesmo obtendo dados médios com pouca diferença em relação aos valores reais de mistura, a Tabela 3.37 mostra que a dispersão dos dados foi elevada. Assim como em praticamente todos os casos já citados, os dados de teor de ligante da centrífuga apresentaram uma maior dispersão, revelando um valor maior de desvio padrão. Esse comportamento será melhor explicado no item 3.14, onde serão mostrados exemplos de diferença de resultados entre amostras de uma mesma mistura.

Tratando agora dos resultados para as misturas na faixa C (Tabela 3.38 e Figura 3.76), não houveram surpresas, seguindo a rocha de Pelotas como a rocha com menores diferenças dos dados em relação aos teores utilizados nas misturas. Na Figura 3.77, onde são apresentados separadamente os dados encontrados no forno de ignição em forma de diferença em relação aos teores das misturas, é visível que o comportamento se aproxima do mesmo encontrado nos dados da centrífuga em outros momentos já citados aqui neste capítulo, começando com valores acima do real para a mistura Teor de Projeto -0,5% e decaindo com a adição de ligante as misturas, aponte de inverter o sinal na mistura Teor de Projeto +0,5%. A diferença a ser observada é que os dados do forno de ignição ainda mostram valores muito

próximos dos realmente empregados, com distanciamento máximo em 0,15% com as devidas calibrações da metodologia.

Com relação aos dados mostrados pela centrífuga na faixa C (Figura 3.78), é notável o comportamento diferente na mistura Teor de Projeto +0,5% em relação as outras rochas da pesquisa. A mistura Teor de Projeto -0,5% apresentou as maiores diferenças médias se comparada com as outras misturas, o que se provou um comportamento característico do equipamento durante a pesquisa.

Se comparados com a maioria dos dados encontrados durante a presente pesquisa, os dados de desvio padrão para as diferentes extrações mostraram-se bem baixos (Tabela 3.38), mas mantendo a centrífuga como extração de maior desvio padrão se comparada ao forno de ignição.

Tabela 3.37 – Resumo dos dados de teor de ligante - Faixa B

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	4,80%		5,30%		5,80%	
	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>
MÉTODO A						
% Teor	4,99%	0,19%	5,60%	0,30%	5,93%	0,13%
% Teor -C _F	4,91%	0,11%	5,52%	0,22%	5,85%	0,05%
% T _C	0,14%	—	0,13%	—	0,12%	—
% Teor -C _F -T _C	4,78%	-0,02%	5,39%	0,09%	5,73%	-0,07%
Desvio padrão	0,27%		0,38%		0,19%	
MÉTODO B						
% Teor	4,94%	0,14%	5,51%	0,21%	5,79%	-0,01%
% Teor - C _F	4,86%	0,06%	5,43%	0,13%	5,71%	-0,09%
Desvio padrão	0,30%		0,34%		0,13%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	5,16%	0,36%	5,25%	-0,05%	5,62%	-0,18%
Desvio padrão	0,64%		0,42%		0,37%	

*média de 5 amostras

Figura 3.73 - Médias dos teores de ligante – Faixa B

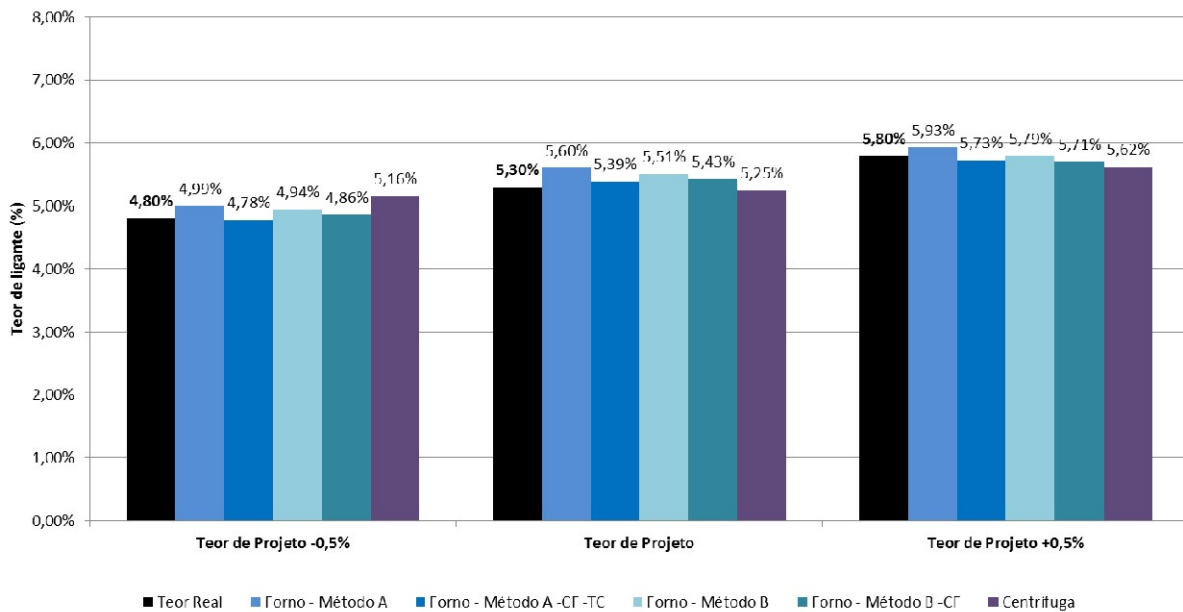


Figura 3.74 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa B

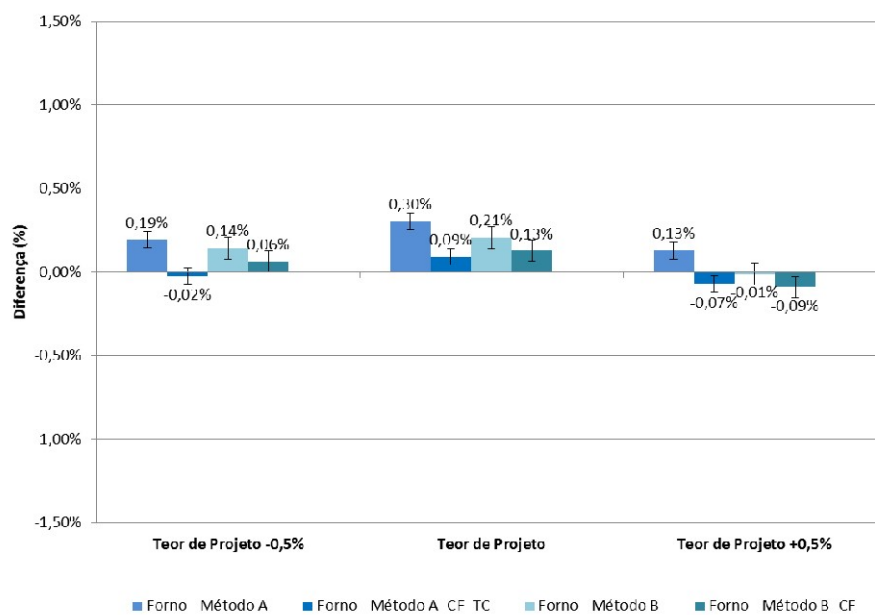


Figura 3.75 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa B

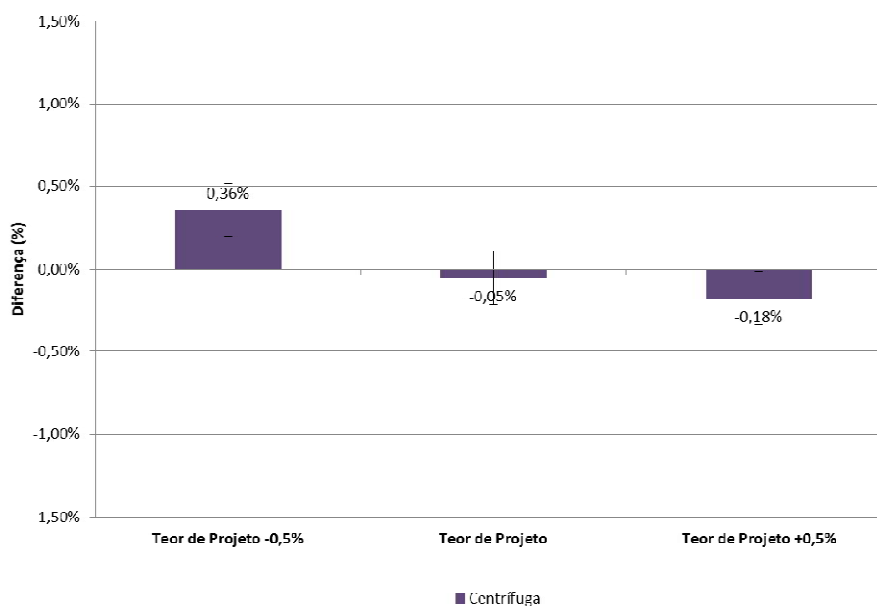


Tabela 3.38 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	5,20%		5,70%		6,20%	
	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>
MÉTODO A						
% Teor	5,54%	0,34%	5,91%	0,21%	6,29%	0,09%
% Teor -C _F	5,44%	0,24%	5,81%	0,11%	6,19%	-0,01%
% T _C	0,14%	—	0,13%	—	0,14%	—
% Teor -C _F -T _C	5,29%	0,09%	5,69%	-0,01%	6,05%	-0,15%
Desvio padrão	0,14%		0,08%		0,18%	
MÉTODO B						
% Teor	5,45%	0,25%	5,80%	0,10%	6,16%	-0,04%
% Teor - C _F	5,35%	0,15%	5,70%	0,00%	6,06%	-0,14%
Desvio padrão	0,16%		0,08%		0,17%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	5,49%	0,29%	5,90%	0,20%	6,41%	0,21%
Desvio padrão	0,14%		0,17%		0,22%	

*média de 5 amostras

Figura 3.76 - Médias dos teores de ligante – Faixa C

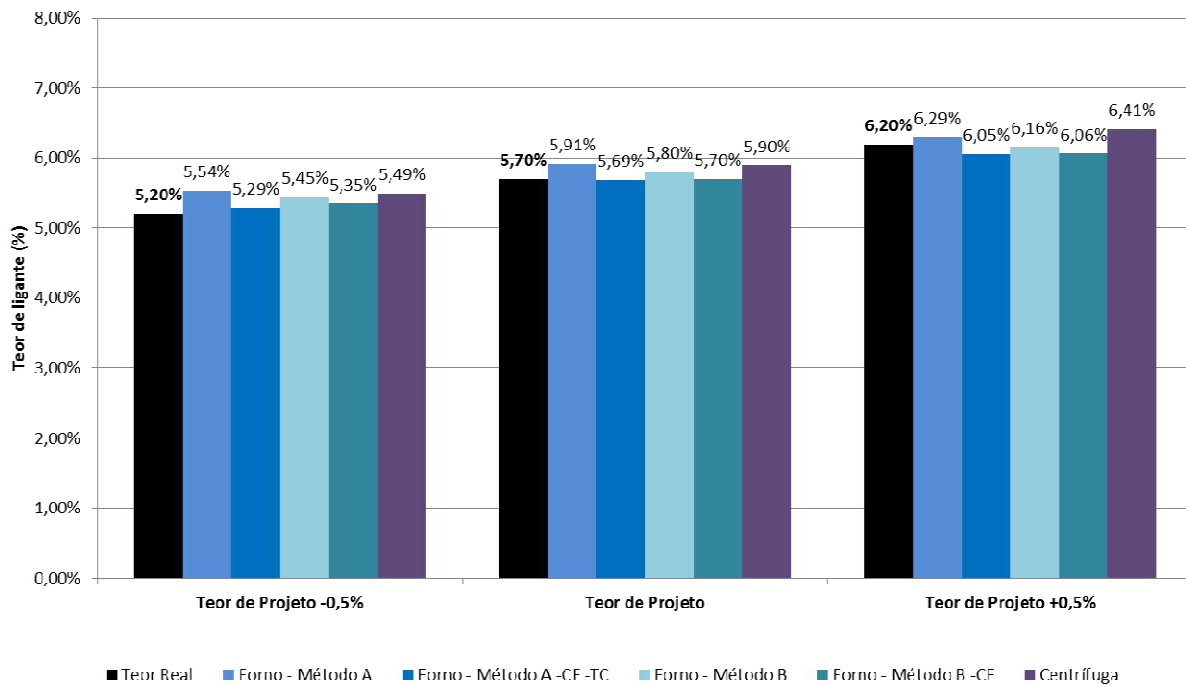


Figura 3.77 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C

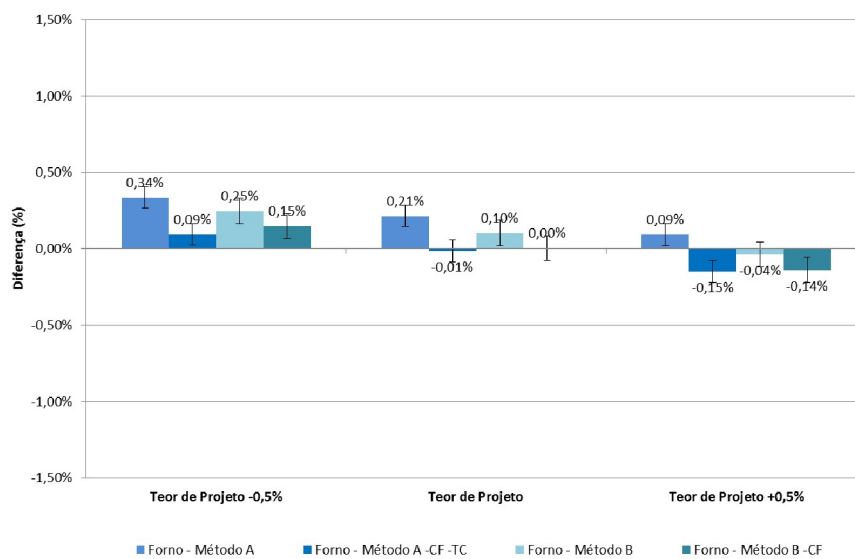
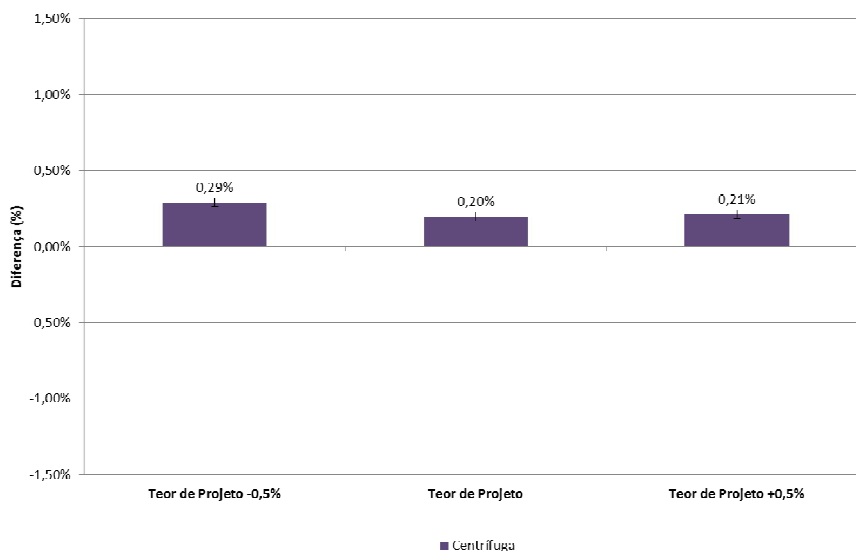


Figura 3.78 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa C



3.6.2 Análise granulométrica

As curvas granulométricas médias encontradas através de amostras do forno de ignição (Figura 3.79), faixa B, apresentaram um bom comportamento geral entre as peneiras (Tabela 3.39), exceto na 3/8" e n°4, onde ocorreu perda na peneira mais grossa e acúmulo na conseqüente. Isto ocorreu nas três misturas ensaiadas, mas somente na Teor de Projeto +0,5% não ocorreu uma ultrapassagem dos limites impostos para cada uma (Figura 3.80 e Tabela 3.39). Os limites foram ultrapassados em baixos valores de porcentagem, e indicariam uma possível falha no processo de peneiramento do material, como foi a primeira conclusão do autor, mas ao ver os dados da faixa C, não pode ser reforçada essa conclusão.

O comportamento de perda seguida de acúmulo entre as peneiras 3/8" e n°4 também foi visualizado nas misturas na faixa B com amostras da centrífuga (Tabela 3.40, Figura 3.81 e Figura 3.82). Fazendo uma análise prévia dos dados na Faixa C, é dito que não ocorre esse comportamento, um possível erro no peneiramento do material foi encarado como possibilidade, mas essa realidade passa a ser pouco provável em vista dos dados encontrados na faixa C. Deve-se considerar que somente a mistura com maior quantidade de ligante apresentou uma curva fora dos limites impostos pela DNIT (Tabela 3.40).

Tabela 3.39 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	2,3%	-0,2%	1,5%	-1,0%	2,7%	0,2%	7,0%
3/4"	7,5%	7,7%	0,2%	6,8%	-0,7%	6,8%	-0,7%	7,0%
3/8"	27,5%	19,5%	-8,0%	20,9%	-6,6%	21,3%	-6,2%	7,0%
n° 4	18,5%	25,4%	6,9%	26,0%	7,5%	24,9%	6,4%	7,0%
n°10	11,5%	13,0%	1,5%	12,4%	0,9%	12,5%	1,0%	5,0%
n°40	11,5%	10,0%	-1,5%	10,0%	-1,5%	9,9%	-1,6%	5,0%
n°80	7,0%	7,0%	0,0%	7,1%	0,1%	7,1%	0,1%	5,0%
n°200	8,5%	7,9%	-0,6%	8,5%	0,0%	7,7%	-0,8%	3,0%
Pas.200	5,5%	7,2%	1,7%	6,8%	1,3%	7,0%	1,5%	2,0%

Figura 3.79 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

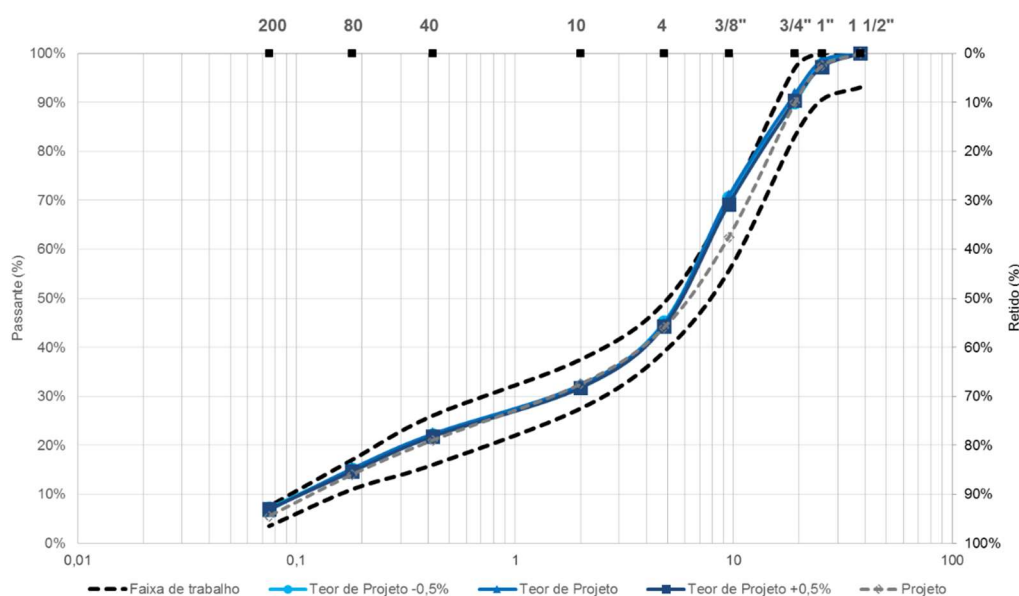


Figura 3.80 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B

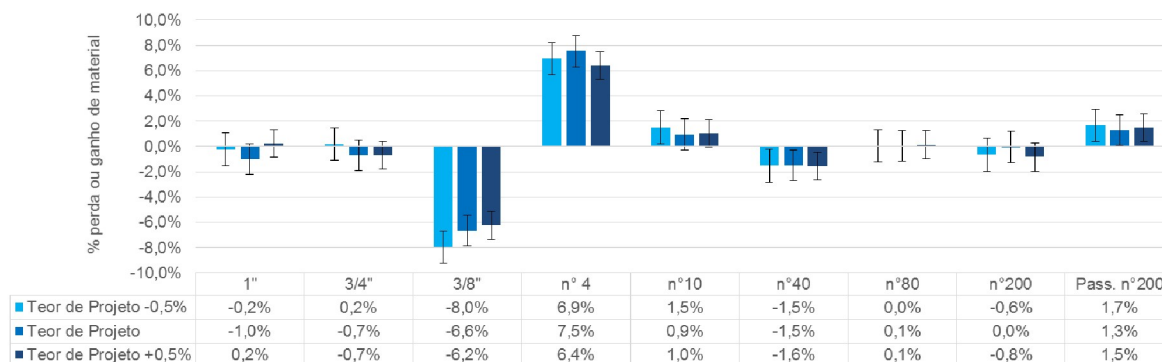


Tabela 3.40 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	3,0%	0,5%	4,3%	1,8%	8,5%	1,0%	7,0%
3/4"	7,5%	4,5%	-3,0%	10,1%	2,6%	29,6%	2,1%	7,0%
3/8"	27,5%	23,3%	-4,2%	25,8%	-1,7%	23,8%	5,3%	7,0%
n° 4	18,5%	25,9%	7,4%	22,6%	4,1%	11,8%	0,3%	7,0%
n°10	11,5%	13,1%	1,6%	11,7%	0,2%	9,1%	-2,4%	5,0%
n°40	11,5%	10,2%	-1,3%	8,9%	-2,6%	5,8%	-1,2%	5,0%
n°80	7,0%	7,0%	0,0%	5,9%	-1,1%	6,4%	-2,1%	5,0%
n°200	8,5%	7,7%	-0,8%	6,3%	-2,2%	4,3%	-1,2%	3,0%
Pas.200	5,5%	5,4%	-0,1%	4,5%	-1,0%	8,5%	1,0%	2,0%

Figura 3.81 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

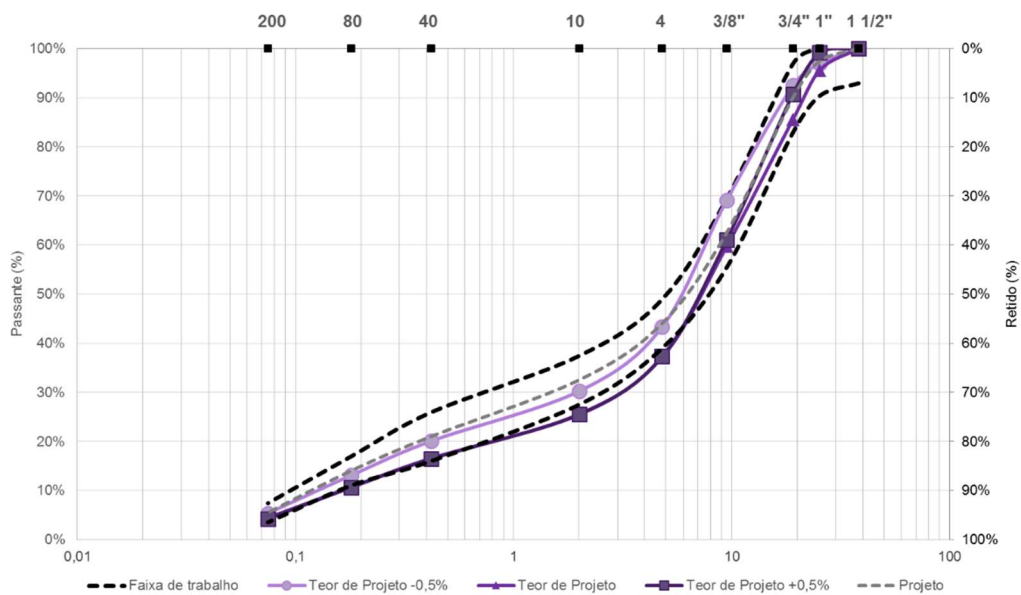
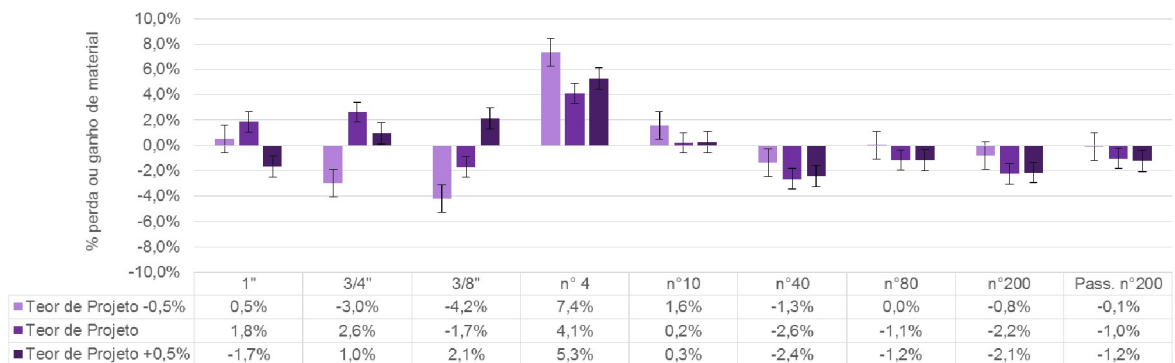


Figura 3.82 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B



Abordando agora os dados do forno de ignição para as misturas na faixa C (Tabela 3.41, Figura 3.83 e Figura 3.84) fica clara a homogeneidade dos dados de granulometria que suas amostras proporcionam. Com a análise desta rocha, a 5ª ensaiada desde o início dos ensaios, deve ser apontada a confiança passada pelos dados obtidos com o forno de ignição, mantendo uma constância entre as variações de faixa granulométrica, rochas e teores impostos na pesquisa.

Diferentemente de outras curvas já analisadas a partir de dados da centrífuga, que se diferenciavam à medida que o teor era variado, houve uma grande proximidade entre as curvas das diferentes misturas na faixa C desta rocha. O que ocorreu neste caso é um exemplo de precisão seguido de uma baixa acurácia, ou seja, os dados são próximos entre eles, mas afastados dos realmente empregados (Figura 3.85, Figura 3.86, Tabela 3.42).

Tabela 3.41 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	9,4%	-0,6%	10,1%	0,1%	11,0%	1,0%	7,0%
3/8"	10,0%	7,5%	-2,5%	7,8%	-2,2%	8,3%	-1,7%	7,0%
n° 4	22,0%	23,5%	1,5%	24,0%	2,0%	23,2%	1,2%	7,0%
n°10	22,0%	23,9%	1,9%	23,0%	1,0%	21,0%	-1,0%	5,0%
n°40	19,0%	17,2%	-1,8%	16,8%	-2,2%	18,2%	-0,8%	5,0%
n°80	7,0%	6,8%	-0,2%	6,7%	-0,3%	6,7%	-0,3%	5,0%
n°200	4,0%	4,9%	0,9%	5,0%	1,0%	4,9%	0,9%	3,0%
Pas.200	6,0%	6,6%	0,6%	6,6%	0,6%	6,7%	0,7%	2,0%

Figura 3.83 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C

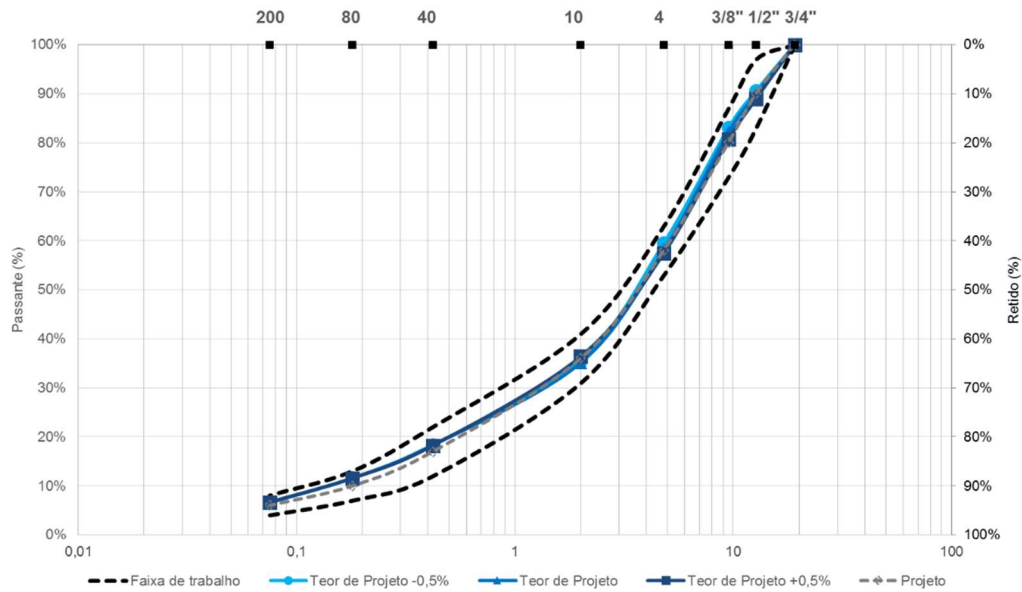


Figura 3.84 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C

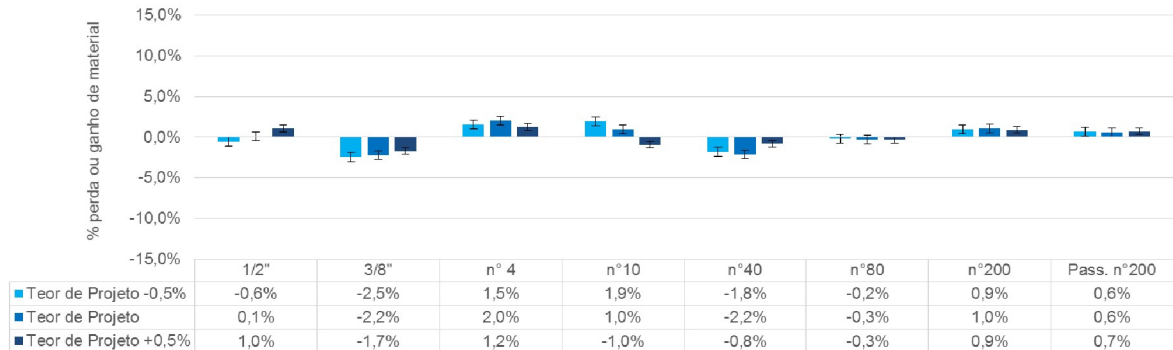


Tabela 3.42 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	12,7%	2,7%	11,5%	1,5%	9,3%	-0,7%	7,0%
3/8"	10,0%	10,8%	0,8%	11,9%	1,9%	12,4%	2,4%	7,0%
n° 4	22,0%	22,4%	0,4%	22,6%	0,6%	23,0%	1,0%	7,0%
n°10	22,0%	22,1%	0,1%	22,9%	0,9%	24,3%	2,3%	5,0%
n°40	19,0%	17,2%	-1,8%	17,5%	-1,5%	17,4%	-1,6%	5,0%
n°80	7,0%	5,5%	-1,5%	5,0%	-2,0%	5,2%	-1,8%	5,0%
n°200	4,0%	3,9%	-0,1%	3,9%	-0,1%	3,9%	-0,1%	3,0%
Pas.200	6,0%	5,4%	-0,6%	4,7%	-1,3%	4,4%	-1,6%	2,0%

Figura 3.85 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C

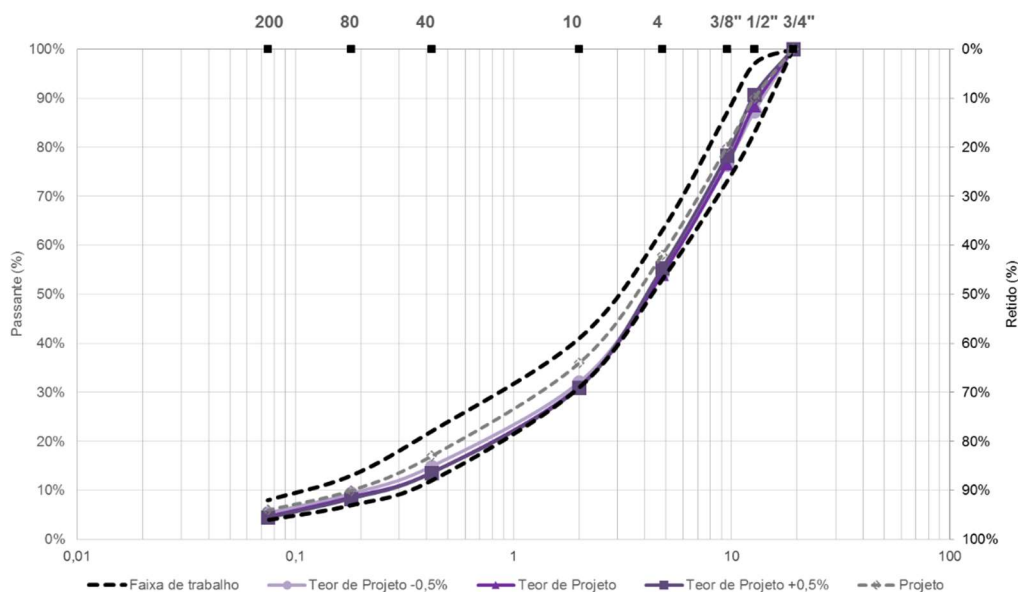
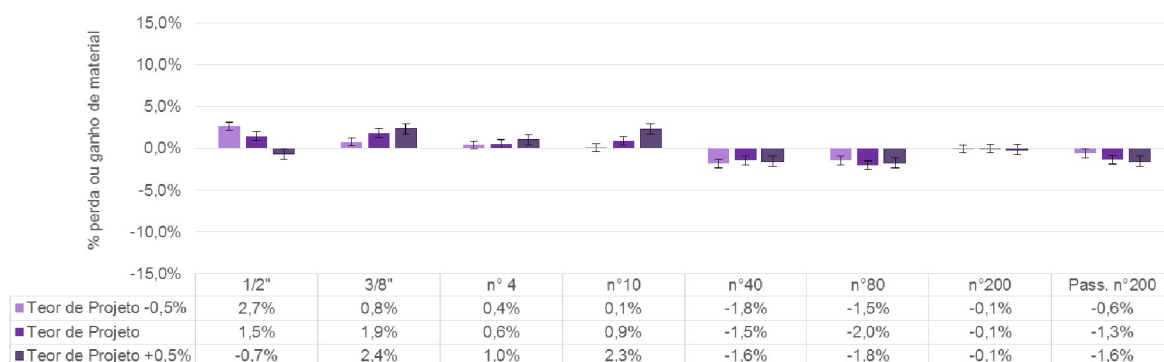


Figura 3.86 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C



3.7 PEDREIRA DE SANTO ANTÔNIO DA PATRULHA (BASALTO) – AMP 60/85

Segue na Tabela 3.43 um resumo das características da rocha de Santo Antônio da Patrulha, teores de projeto para as misturas com AMP 60/85 e centradas na faixa B e C do DNIT e os fatores da calibração (C_F).

Os valores de C_F encontrados para esta rocha com misturas com AMP 60/85 apresentaram valores mais baixos em comparação aos valores com CAP 50-70, estes que foram considerados elevados por ultrapassar 1%, como já comentado no item 1.6.1.

Tabela 3.43 – Características da rocha, Teores de Projeto e Fator de Calibração

Rocha	Agregado	Absorção (%)	Perda por Abrasão (%)	Sanidade (%)	Faixa	Teor de Projeto	C _F
Basalto	Graúdo	0,978	9,88	3,47	B	4,80%	0,65%
	Miúdo	0,864	---	---	C	5,00%	0,68%

3.7.1 Determinação do teor de ligante

O AMP 60/85 não se mostrou influente nos resultados de teor de ligante para faixa B utilizando forno de ignição, mostrando até mesmo resultados melhores do que os encontrados com CP 50-70 para esta mesma rocha e faixa granulométrica. Os resultados da centrífuga mostraram médias dependentes do teor de ligante, similares às outras misturas da pesquisa, confirmando o comportamento de baixa acurácia (Tabela 3.44, Figura 3.87, Figura 3.88, Figura 3.89).

Nas médias de teor de ligante com misturas na faixa C utilizando ligante AMP 60/85, não houve grande distinção entre as médias encontradas com CAP 50-70, apresentando resultados igualmente confiáveis para as médias do forno de ignição. Os resultados da centrífuga mostraram médias de teor de ligante acima dos teores reais das misturas assim como quando utilizado de CAP 50-70 para esta rocha (Tabela 3.45, Figura 3.90, Figura 3.91, Figura 3.92).

Tabela 3.44 – Resumo dos dados de teor de ligante - Faixa B

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	4,30%		4,80%		5,30%	
	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>	<i>Média*</i>	<i>Diferença</i>
MÉTODO A						
% Teor	5,18%	0,88%	5,57%	0,77%	6,15%	0,85%
% Teor -C _F	4,53%	0,23%	4,92%	0,12%	5,50%	0,20%
% T _C	0,15%	----	0,15%	----	0,14%	----
% Teor -C _F -T _C	4,38%	0,08%	4,78%	-0,02%	5,36%	0,06%
Desvio padrão	0,21%		0,13%		0,17%	
MÉTODO B						
% Teor	5,09%	0,79%	5,45%	0,65%	6,04%	0,74%
% Teor - C _F	4,44%	0,14%	4,80%	0,00%	5,39%	0,09%
Desvio padrão	0,22%		0,15%		0,21%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	4,82%	0,52%	5,00%	0,20%	4,35%	-0,95%
Desvio padrão	0,35%		0,14%		0,34%	

*média de 5 amostras

Figura 3.87 - Médias dos teores de ligante – Faixa B

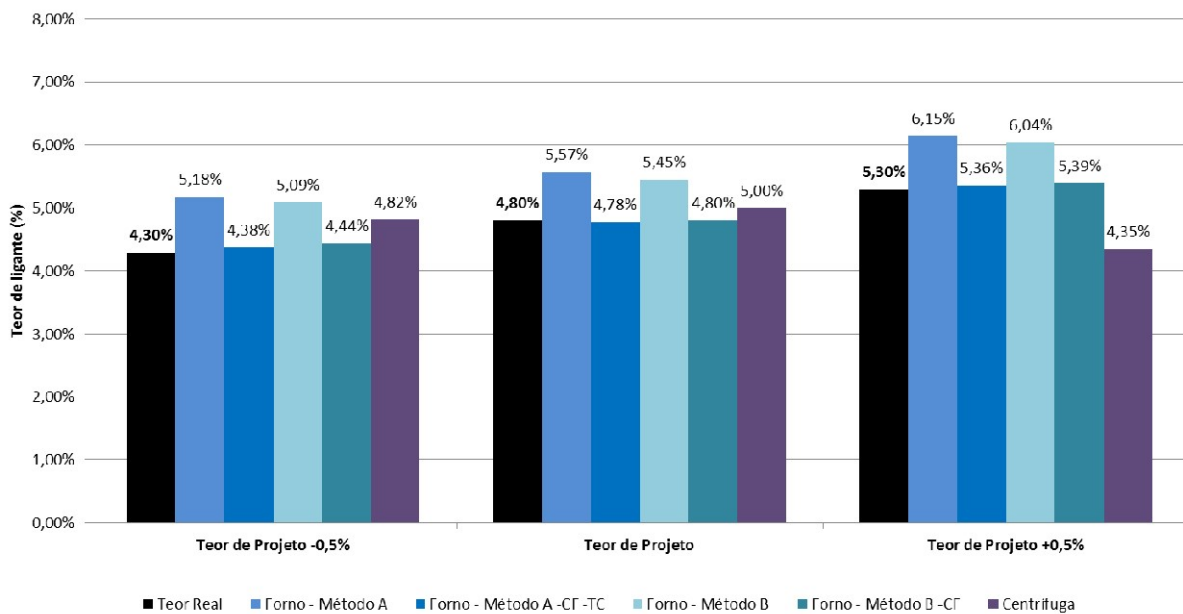


Figura 3.88 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de Ignição – Faixa B

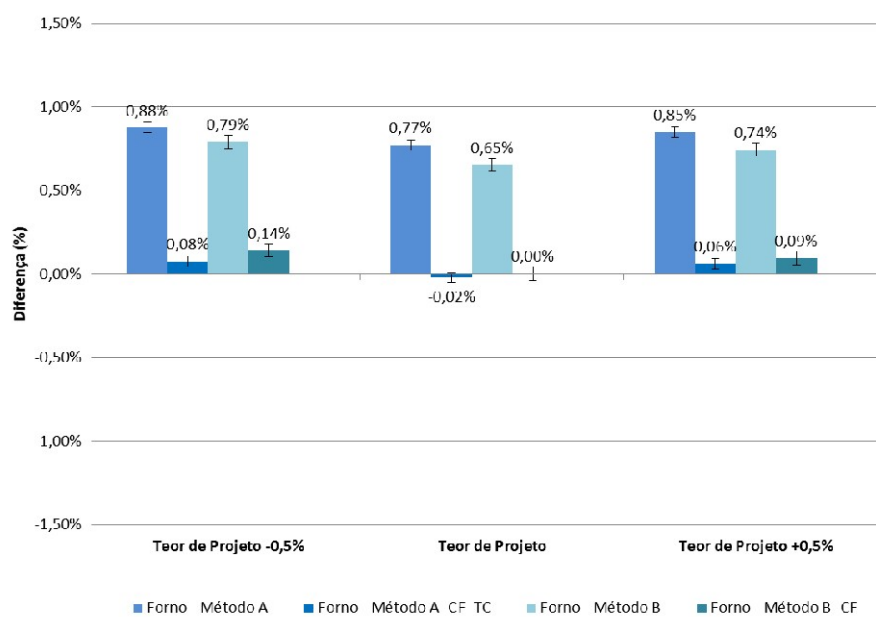


Figura 3.89 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa B

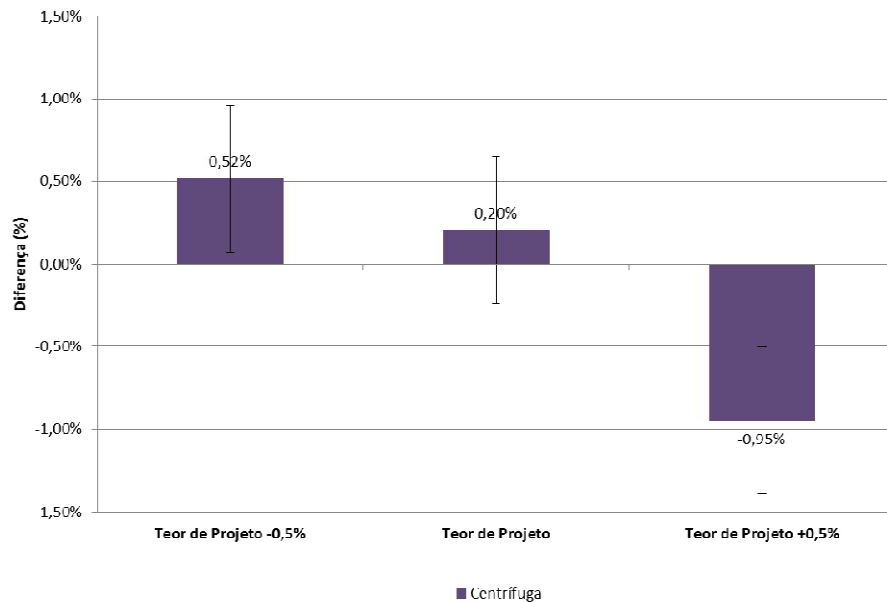


Tabela 3.45 – Resumo dos dados de teor de ligante – Faixa C

	TEOR DE PROJETO -0,5%		TEOR DE PROJETO		TEOR DE PROJETO +0,5%	
	4,50%		5,00%		5,50%	
	Média*	Diferença	Média*	Diferença	Média*	Diferença
MÉTODO A						
% Teor	5,39%	0,89%	5,84%	0,84%	6,40%	0,90%
% Teor -C _F	4,71%	0,21%	5,16%	0,16%	5,72%	0,22%
% T _C	0,14%		0,14%		0,15%	
% Teor -C _F -T _C	4,57%	0,07%	5,02%	0,02%	5,57%	0,07%
Desvio padrão	0,11%		0,15%		0,02%	
MÉTODO B						
% Teor	5,26%	0,76%	5,68%	0,68%	6,29%	0,79%
% Teor - C _F	4,58%	0,08%	5,00%	0,00%	5,61%	0,11%
Desvio padrão	0,12%		0,16%		0,08%	
CENTRÍFUGA						
% Teor	5,37%	0,87%	5,31%	0,31%	5,99%	0,49%
Desvio padrão	0,11%		0,25%		0,26%	

*média de 5 amostras

Figura 3.90 - Médias dos teores de ligante – Faixa C

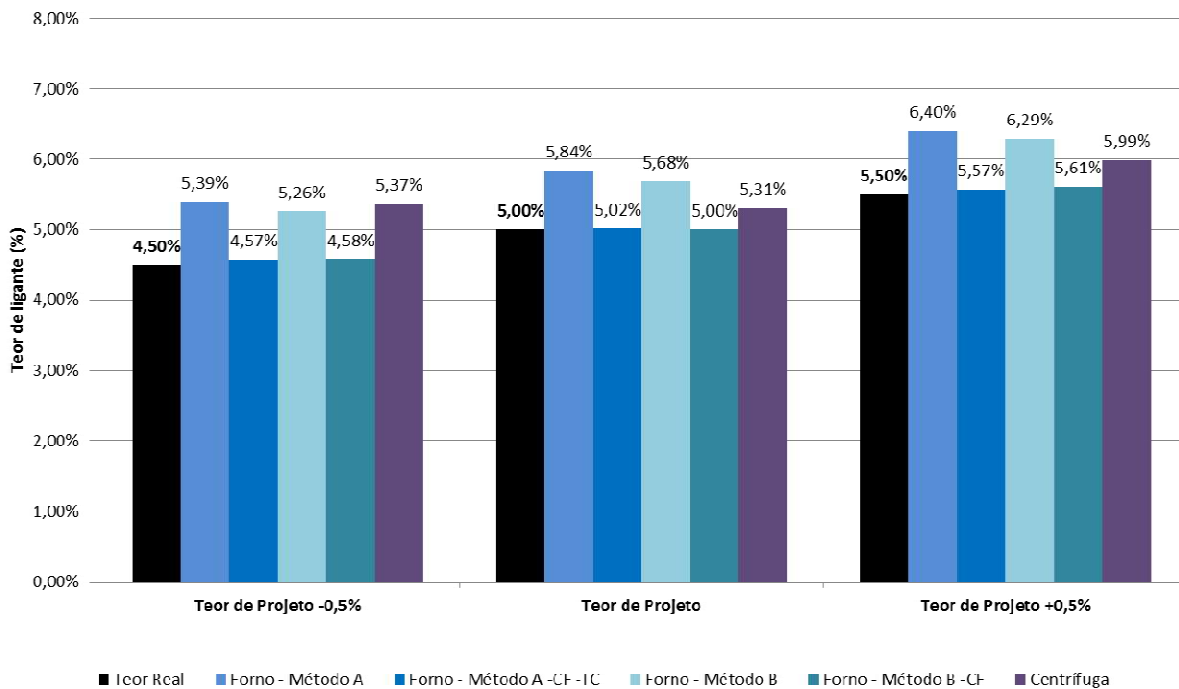


Figura 3.91 – Diferenças médias dos teores de ligante – forno de ignição – Faixa C

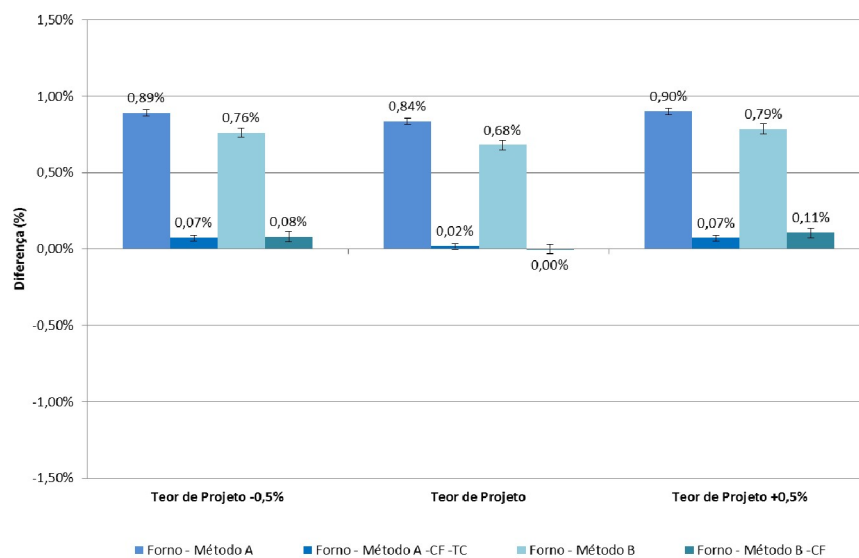
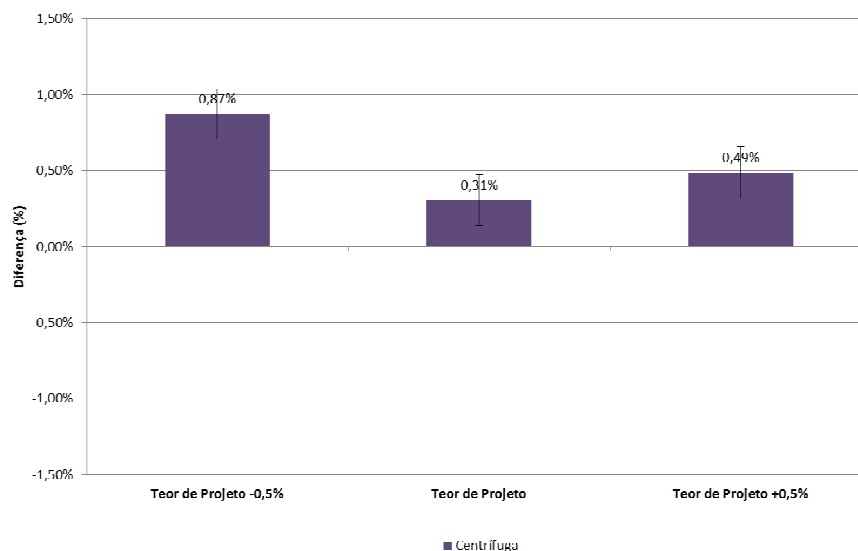


Figura 3.92 – Diferenças médias dos teores de ligante – centrífuga – Faixa C



3.7.2 Análise granulométrica

As curvas granulométricas médias do forno de ignição para faixa B mostraram bons valores, com baixa variação em comparação à curva de projeto, tendo somente as parcelas retidas na n° 200 e passante na n° 200 como diferencial em comparação aos dados das misturas com CAP 50-70, com perda na n°200 e um pouco de ganho no passante. A média de passante na n° 200 passou em 0,2% do limite imposto pelo DNIT.

Não diferente das outras misturas, as curvas granulométricas médias para faixa B com AMP 60/85 proporcionadas pela centrífuga também apresentam distorção. As 3 misturas apresentaram curvas fora dos limites, tendo maior parcela dos finos depositados nas peneiras mais grossas, provocando um maior distanciamento à medida que se adiciona ligante à mistura (Tabela 3.47, Figura 3.95 e Figura 3.96).

Utilizando AMP 60/85 nas misturas na faixa C manteve-se a confiabilidade das curvas médias de granulometria a partir de amostras do forno de ignição, com resultados até mesmo mais próximos da curva de projeto do que as curvas médias com CAP 50-70 (Tabela 3.48, Figura 3.97, Figura 3.98).

Tabela 3.46 - Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	2,5%	0,0%	1,5%	-1,0%	0,8%	-1,7%	7,0%
3/4"	7,5%	6,7%	-0,8%	6,6%	-0,9%	4,8%	-2,7%	7,0%
3/8"	27,5%	27,6%	0,1%	29,0%	1,5%	29,7%	2,2%	7,0%
n° 4	18,5%	19,9%	1,4%	19,3%	0,8%	20,5%	2,0%	7,0%
n°10	11,5%	10,8%	-0,7%	11,0%	-0,5%	11,3%	-0,2%	5,0%
n°40	11,5%	11,2%	-0,3%	11,2%	-0,3%	12,6%	1,1%	5,0%
n°80	7,0%	6,9%	-0,1%	7,3%	0,3%	5,5%	-1,5%	5,0%
n°200	8,5%	6,7%	-1,8%	7,8%	-0,7%	7,5%	-1,0%	3,0%
Pas.200	5,5%	7,7%	2,2%	6,2%	0,7%	7,2%	1,7%	2,0%

Figura 3.93 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa B

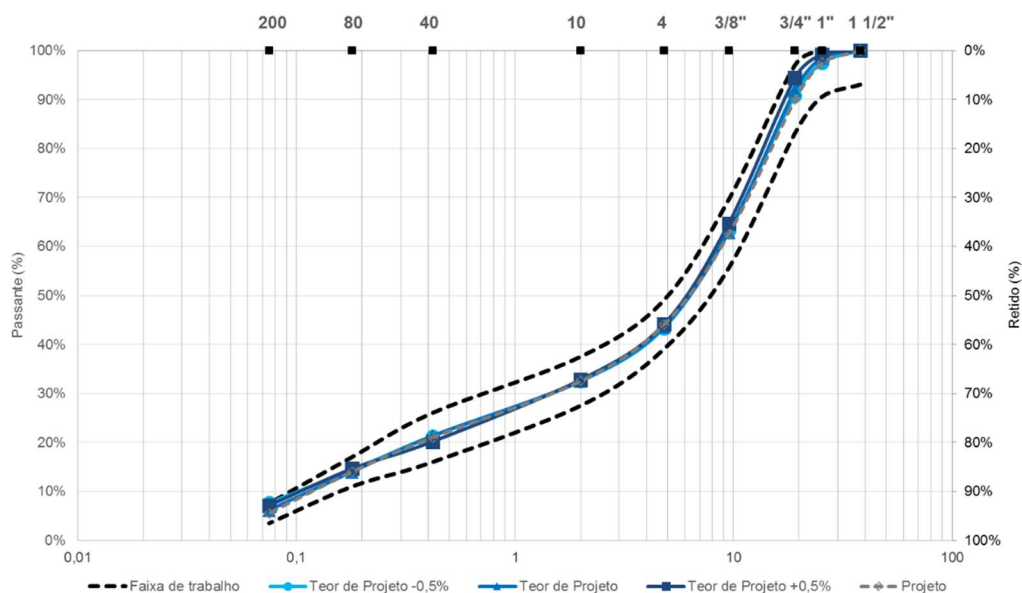


Figura 3.94 – Diferenças médias de material retidos por peneira – forno de ignição - Faixa B

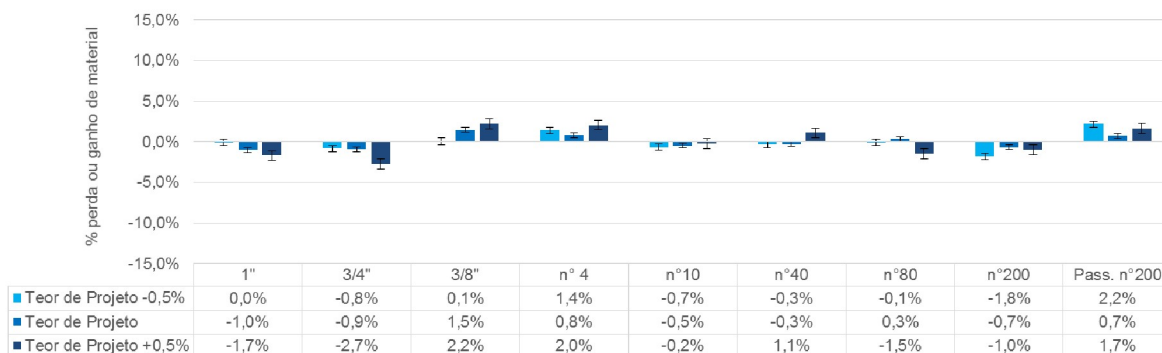


Tabela 3.47 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1"	2,5%	3,8%	1,3%	3,7%	1,2%	10,9%	8,4%	7,0%
3/4"	7,5%	9,3%	1,8%	10,6%	3,1%	20,3%	12,8%	7,0%
3/8"	27,5%	29,7%	2,2%	33,6%	6,1%	31,6%	4,1%	7,0%
n° 4	18,5%	20,8%	2,3%	19,2%	0,7%	13,0%	-5,5%	7,0%
n°10	11,5%	8,8%	-2,7%	8,3%	-3,2%	5,5%	-6,0%	5,0%
n°40	11,5%	9,8%	-1,7%	8,9%	-2,6%	6,9%	-4,6%	5,0%
n°80	7,0%	5,9%	-1,1%	5,0%	-2,0%	4,0%	-3,0%	5,0%
n°200	8,5%	6,3%	-2,2%	5,8%	-2,7%	4,3%	-4,2%	3,0%
Pas.200	5,5%	5,7%	0,2%	5,0%	-0,5%	3,6%	-1,9%	2,0%

Figura 3.95 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa B

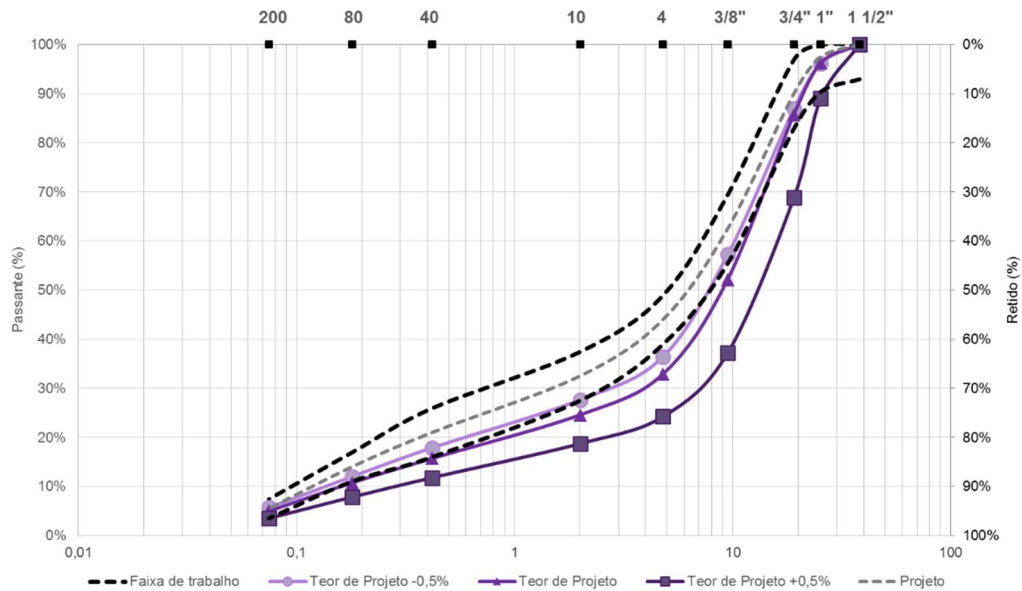


Figura 3.96 – Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B

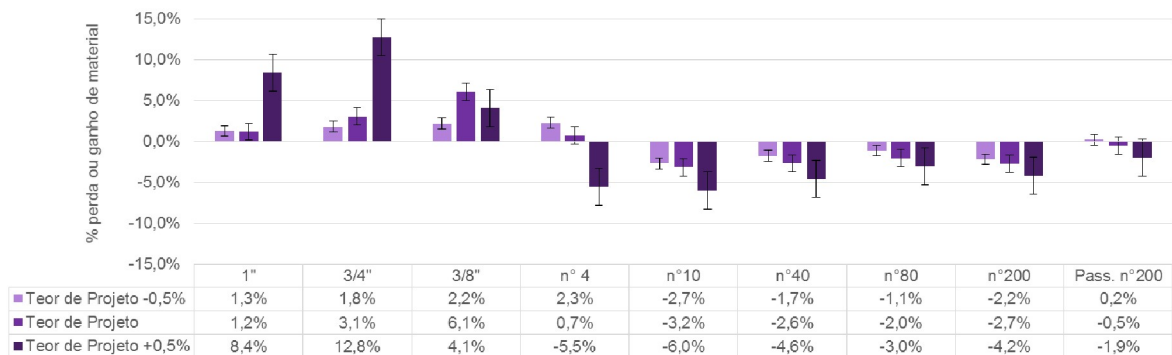


Tabela 3.48 – Médias entre os teores – forno de ignição – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	9,7%	-0,3%	11,0%	1,0%	10,0%	0,0%	7,0%
3/8"	10,0%	9,4%	-0,6%	8,5%	-1,5%	9,4%	-0,6%	7,0%
n° 4	22,0%	23,2%	1,2%	24,1%	2,1%	23,8%	1,8%	7,0%
n°10	22,0%	21,2%	-0,8%	20,9%	-1,1%	21,2%	-0,8%	5,0%
n°40	19,0%	18,9%	-0,1%	18,4%	-0,6%	18,6%	-0,4%	5,0%
n°80	7,0%	6,8%	-0,2%	6,5%	-0,5%	6,5%	-0,5%	5,0%
n°200	4,0%	3,8%	-0,2%	3,7%	-0,3%	3,7%	-0,3%	3,0%
Pas.200	6,0%	7,1%	1,1%	6,9%	0,9%	6,9%	0,9%	2,0%

Figura 3.97 – Médias entre os teores - forno de ignição – Faixa C

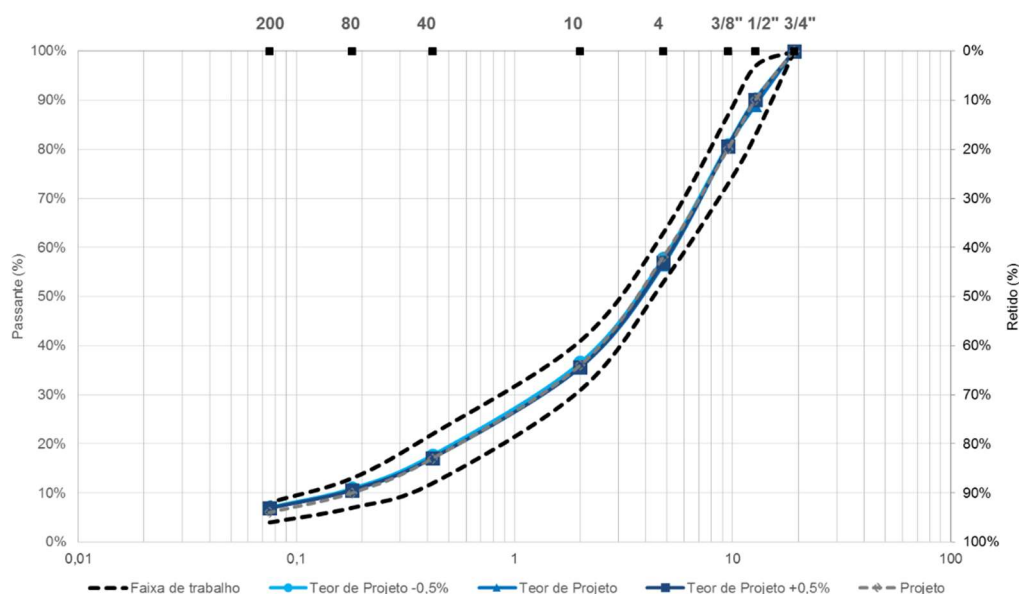
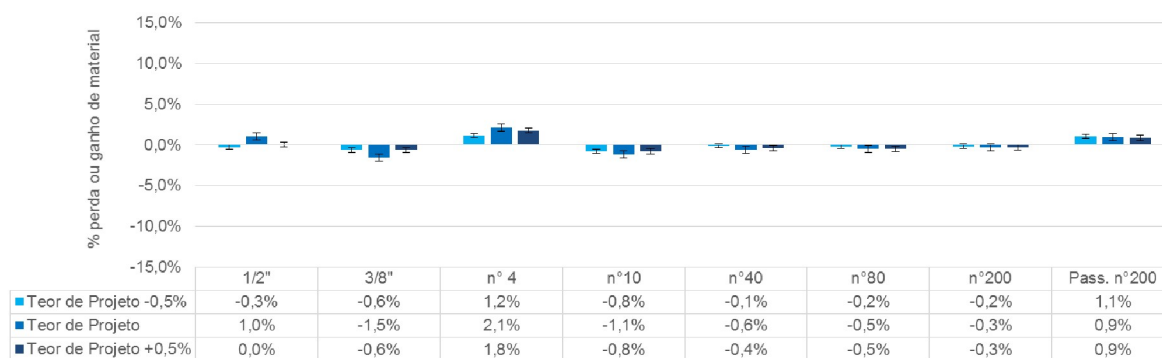


Figura 3.98 - Diferenças médias de material retidos por peneira - forno de ignição - Faixa C



Em nenhuma das 3 misturas na faixa C com AMP 60/85 encontrou-se curvas médias dentro do limite de projeto para as amostras provenientes da centrífuga. As curvas médias do AMP 60/85 mostraram um maior deslocamento em relação à curva de projeto se comparadas às misturas com CAP 50-70, evidenciando uma extração ainda mais ineficiente do ligante das amostras (Tabela 3.49, Figura 3.99, Figura 3.100).

Tabela 3.49 – Média entre os teores – centrífuga – Faixa C

Peneira	Projeto	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%		Limites
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença	
1/2"	10,0%	19,2%	9,2%	22,1%	12,1%	22,7%	12,7%	7,0%
3/8"	10,0%	10,9%	0,9%	12,0%	2,0%	11,9%	1,9%	7,0%
n° 4	22,0%	23,4%	1,4%	23,5%	1,5%	21,5%	-0,5%	7,0%
n°10	22,0%	16,7%	-5,3%	15,0%	-7,0%	16,2%	-5,8%	5,0%
n°40	19,0%	15,9%	-3,1%	14,9%	-4,1%	15,2%	-3,8%	5,0%
n°80	7,0%	5,3%	-1,7%	4,8%	-2,2%	4,9%	-2,1%	5,0%
n°200	4,0%	3,6%	-0,4%	3,4%	-0,6%	3,4%	-0,6%	3,0%
Pas.200	6,0%	5,1%	-0,9%	4,3%	-1,7%	4,2%	-1,8%	2,0%

Figura 3.99 - Médias entre os teores – centrífuga – Faixa C

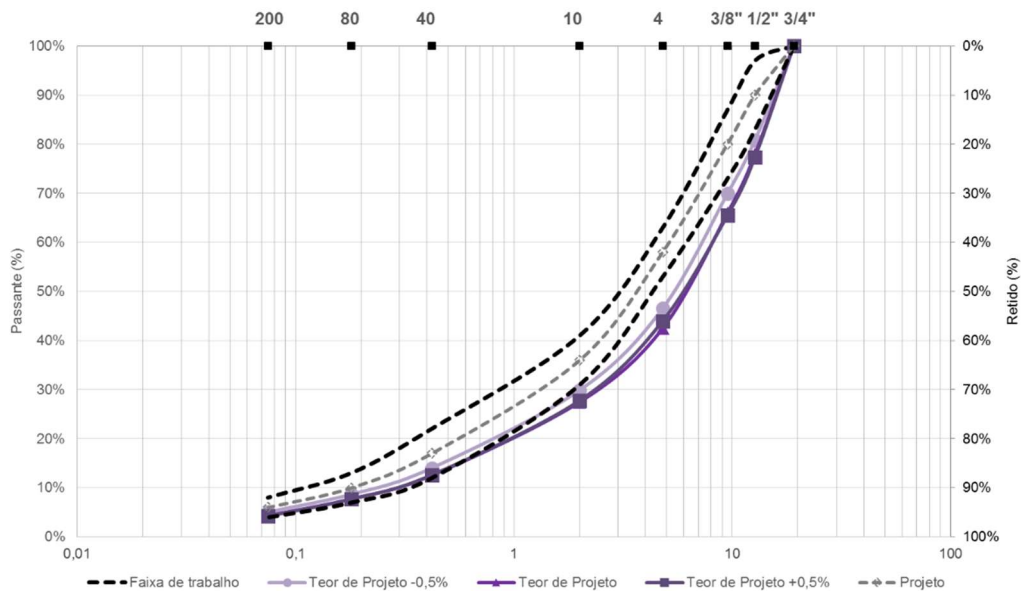


Figura 3.100 - Diferenças médias de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C



3.8 PARTICULARIDADES SOBRE O EMPREGO DO FORNO DE IGNIÇÃO

O forno de ignição, quando aplicado para obtenção de teor de ligante, apresentou bom comportamento entre as diferentes misturas da pesquisa. Apesar de bons resultados, os dados se mostraram menos precisos e acurados se comparados aos das pesquisas desenvolvidas por Brown e Mager (2003) e Prowell (2002). A dispersão de resultados no presente estudo se mostrou maior que os limites de 0,17% de desvio padrão apontados na norma americana, que têm essas pesquisas como referência.

Com os dados obtidos neste estudo é possível mostrar que o forno de ignição tem uma boa resposta em seus dados de teor de ligante ao serem utilizadas amostras coletadas de uma massa, diferentemente das pesquisas de Brown e Mager (2003) e Prowell (2002) que utilizaram amostras confeccionadas separadamente, uma a uma. Mesmo com uma diferente abordagem de controle laboratorial, o forno de ignição se mostrou sim uma melhor alternativa para os ensaios de teor de ligante com a centrífuga.

Ainda tratando dos dados de teor de ligante, o fator de calibração C_F é confirmado como parte essencial do processo de extração por ignição com a metodologia vigente e é fundamental para garantia da acurácia de seus resultados de teor de ligante. Com a metodologia normatizada, não é recomendável utilizar o forno de ignição em amostras de concretos asfálticos sem possuir a dosagem do mesmo, já que a etapa de calibração necessita de conhecimento total da mistura: tipo de ligante, teor de ligante empregado, origem do agregado e granulometria. É

recomendado ainda que se aumente a média de resultados de 3 réplicas da mistura a ser ensaiada na fase de calibração, o mínimo exigido por norma, porque as amostras mesmo sendo idênticas ainda possuem dispersão entre elas, provavelmente ligadas às variações de temperatura entre os ensaios e disposição dentro do cesto de ensaio.

Uma alternativa para a situação de não haver possibilidade de uma amostragem passar pela fase de calibração é indicada no item 3.16. Neste item são apresentadas regressões lineares dos dados desta pesquisa, onde foi possível chegar a equações com boa confiabilidade, com valores de R^2 superiores a 0,8. Uma ampliação da quantidade de dados provavelmente aprimoraria essas equações, chegando a valores ainda maiores de confiabilidade, principalmente se fosse ampliada a amostragem com diferentes ligantes e diferentes agregados.

Para casos com altos valores de calibração, como o encontrado na rocha de Santo Antônio da Patrulha com CAP 50-70, é indicado até mesmo uma condição diferente de término de ensaio como aconselhado na pesquisa de Prowell e Hurley (2005). A recomendação seria alterar de 0,1g para 1g o limite de variação de massa por três minutos consecutivos de ensaio, ou seja, se a amostra não mostrar variações de massa maiores que este limite, a extração é interrompida. Deve-se lembrar que esta condição não é normatizada e a pesquisa tratou somente com a condição da norma ASTM D 6307, variação menor ou igual a 0,1%.

Além da calibração, há uma compensação de temperatura T_c posteriormente indicada pelo forno de ignição automatizado. O manual do equipamento fornece apenas uma breve explicação da existência deste número, ligando-o às variações de temperatura durante o ensaio e ao comportamento da balança, já que altas temperaturas acabam por influenciar no comportamento das células de carga. Mesmo assim, não há uma fórmula ou indicação no manual ou na literatura técnica da origem deste valor. Esse número é utilizado no cálculo final de teor de ligante pela metodologia A, que aborda fornos automatizados. Na metodologia B não há tal número, já que esta utiliza somente balança externa, sendo o forno de ignição somente um agente de combustão da amostra. O que deve ser entendido, ou discutido, é que na fase de obtenção dos fatores de calibração C_F não há alusão a tal número. Durante as análises das diferentes misturas aqui pesquisadas é vista a diferença entre os dados das diferentes metodologias, A e B, e foi muito comum o

método A ter ficado abaixo dos teores reais em cerca de 0,10% a 0,20%, valores muito próximos da média geral de 0,15% de valor para o T_c .

Ainda sobre a dispersão dos resultados de teor de ligante e porque até mesmo nas amostras de calibração há dispersão de resultados, na Figura 3.101 há uma condição muito comum vista nas amostras finais, onde fica claro que o ligante não é extraído em sua totalidade. Parte da amostra se deposita na bandeja abaixo da cesta do conjunto, material que passa pelas aberturas do conjunto de cestas. O conjunto de cestas é muito eficaz ao promover aberturas que facilitam a combustão da amostras, mas a bandeja, por falta de opção, é fechada e acaba por dificultar a combustão do material que ali se deposita. Em duas oportunidades distintas o forno de ignição apresentou certa queda na eficiência da extração de ligante, como já visto na análise isolada de cada rocha, todas ligadas à necessidade de manutenção do equipamento, ou seja, por experiência aqui registrada, deve ser mantida constante a manutenção do soprador e exaustor do equipamento.

Figura 3.101 – Ligante não queimado no ensaio de extração - forno de ignição



Tratando agora das curvas granulométricas obtidas através das amostras finais do forno de ignição, é inquestionável que o aparelho proporcionou ótimos resultados. Dentre as diversas variações de misturas impostas, como rochas, faixas granulométricas e de teor de ligante, o forno de ignição se mostrou muito eficaz, semelhante ao encontrado em pesquisas como a de Prowell (2002). As poucas e

baixas variações encontradas provavelmente são ligadas mais a uma necessidade de manutenção periódica e ao processo de amostragem e peneiramento durante os ensaios de granulometria. Diferentes pesquisas, como as de Brown e Mager (2003) e Prowell e Hurley (2005), aprovaram o forno de ignição como um eficiente método de análise granulométrica também perante variações de agregados, granulometrias e outras variações nas misturas asfálticas.

Um ponto que deve ser mencionado é quanto ao sistema de exaustão onde o forno de ignição será instalado. Durante o período de ensaios, foram totalizadas 4 quebras de exaustores, 2 conjuntos, onde cada um estragou 2 vezes. O fato deles terem estragado foi decorrente da não previsão de instalação do forno de ignição, este que promove exaustões em altas temperaturas e uma grande quantidade de ligante queimado. Dentre os fatos ocorridos foram: o derretimento de parte dos exaustores, mesmo sendo localizados a quase 6m de distância da saída do aparelho e rompimento parcial dos rotores devido ao depósito de material proveniente dos fumos.

3.9 PARTICULARIDADES DO EMPREGO DA CENTRÍFUGA

A centrífuga, no decorrer dos ensaios desta pesquisa, apresentou baixa confiabilidade. Verificações de conformidade de serviços através deste equipamento poderiam causar prejuízos ao revelar dados equivocados da situação da produção. Dentre as variadas rochas, faixas granulométricas e teores de ligante das misturas impostas, foram poucas as situações em que os dados de extração obtidos foram compatíveis com os das misturas. Os dados médios de diferença de teor de ligante em relação aos valores realmente empregados se mostraram mais elevados nas misturas com menor quantidade de ligante. Em contrapartida, essa diferença diminuiu ao acrescentar ligante nas misturas. Esse comportamento está unicamente ligado à baixa eficiência do extrator centrífugo, tanto em manter a parcela fina de agregado isolada da extração de ligante com o solvente, como também associada à extração ineficiente do ligante da amostra. Esse fato acabaria por não possibilitar uma análise correta de uma variação de ligante de uma mistura.

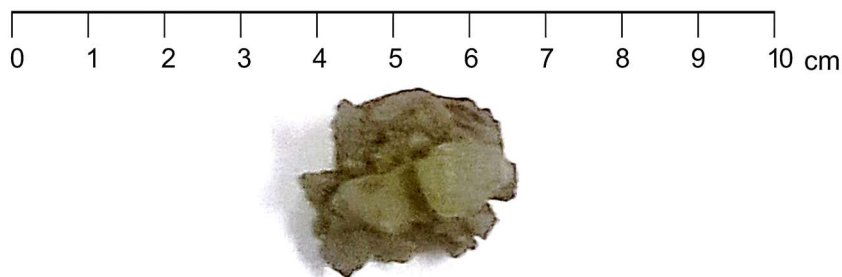
A Figura 3.102 e Figura 3.103 contêm exemplos da baixa eficiência da extração com a centrífuga. Na primeira imagem (Figura 3.102) é visto que ainda há ligante na amostra final e que há várias partículas ainda aderidas entre si com

ligante, partículas estas de diferentes tamanhos. Na segunda figura (Figura 3.103) há um desses acúmulos de diferentes partículas de agregado e ligante, mostrado em escala, procurando melhor esclarecer essa falta de acurácia das análises de teor de ligante e também na análise granulométrica com amostras finais da centrifuga.

Figura 3.102 – Exemplo de amostra com extração pouco eficiente - centrifuga



Figura 3.103 – Exemplo em escala de material acumulado



Como ocorrem variações em função do teor de ligante na mistura, essas incidem em variações nas análises granulométricas, como visto em todas as rochas já analisadas. Em poucos casos a centrifuga proporcionou análises granulométricas coerentes com a mistura, próximas à curva de projeto ou dentro dos limites de trabalho, mas sempre manifestando dependência da variação de teor de ligante, com curvas mais grossas à medida que se acrescentava ligante às misturas.

Ainda sobre a análise granulométrica, a dispersão entre as peneiras foi elevada, devido também à pequena massa disponível para ensaio, cerca de 600g por amostra. Porém, como as curvas granulométricas também se mostraram dependentes do teor da mistura, um aumento na amostragem não resultaria necessariamente em resultados mais próximos à curva de projeto.

3.10 EFICIÊNCIA COMPARATIVA DOS DISTINTOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO

Dentre os dois métodos aqui abordados, é muito clara a confiabilidade nos resultados do forno de ignição, tanto na obtenção do teor de ligante quanto das curvas granulométricas, mas é recomendável considerar a natureza do material que se pretende examinar, devendo ter-se a clareza de que é necessária uma boa prática de amostragem seguida de uma mínima quantidade de amostras. É muito comum atualmente contestações de serviços com dados provenientes de um único ensaio de extração de ligante. Uma análise com no mínimo duas amostras se faz necessária, como será melhor explanado no item 3.14.

A centrífuga obteve resultados de muito baixa acurácia na maior parte da pesquisa, possibilitando a contestação de sua real funcionalidade dentro de avaliações de um controle tecnológico. Nessa pesquisa foi exposto que em uma situação real de variação de ligante, seria impraticável ajustar algum procedimento ou até um fator de calibração para os dados da centrífuga, influenciando diretamente em equívocos na usinagem ou no controle tecnológico.

Por ser uma metodologia utilizada amplamente na fiscalização, seria recomendável que o método de centrifugação fosse substituído pelo ensaio de extração utilizando o forno de ignição, afim de evitar equívocos no controle de serviços e diminuindo a possibilidade de prejuízos em obras de pavimentação.

Ao utilizar o forno de ignição, o aumento do tamanho da amostragem provocaria uma melhora nos resultados, aumentando a confiabilidade, tanto para dados de teor de ligante quanto de análise granulométrica. Lembrando que a fase de calibração é imprescindível na metodologia vigente. Boas práticas são sempre indicadas para assegurar a acurácia e precisão dos ensaios de controle tecnológico: a fase de amostragem, o manuseio das amostras, calibração de balança, manutenção do exaustor e manutenção geral do forno.

3.11 INFLUÊNCIA DAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS NOS RESULTADOS DE EXTRAÇÃO E GRANULOMETRIA

O forno de ignição mostrou dados diferenciados de teor de ligante entre as faixas granulométricas B e C, mesmo para uma mesma rocha, mostrando influência

da graduação nos seus ensaios. Na pesquisa de Prowell (2002), uma das principais conclusões segue o mesmo raciocínio recém citado, onde foi concluído que a diferença de degradação dos agregados após os ensaios mostrou ser ligada ao tipo de graduação do concreto asfáltico.

Quanto à análise granulométrica, as curvas construídas a partir de amostras do forno de ignição mostraram-se confiáveis, com boa resposta em todas as misturas, ficando dentro dos limites e próximas ao projeto.

De modo geral, a centrífuga mostrou dados igualmente equivocados tanto para faixa B quanto faixa C, mas de maneiras distintas, onde o grau de variação das curvas médias da faixa B se mostrou mais elevado. Na faixa C também ocorreram tais deslocamentos das curvas, mas com menor diferença entre os distintos teores.

A análise granulométrica obtida da centrífuga mostra que a magnitude da variação entre as faixas segue a mesma lógica do comportamento dos dados de teor de ligante. Enquanto que na faixa B há maior distinção das curvas entre teores de mistura, na faixa C o grau de deslocamento das curvas umas das outras se mostrou menor.

3.12 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DAS ROCHAS NOS RESULTADOS DE EXTRAÇÃO E GRANULOMETRIA

O forno de ignição não apresentou visível influência ou padrões nos resultados finais de obtenção de teor de ligante e granulometria ligados às propriedades das rochas estudadas, mas sim a origem mineralógica. Esses fatos já foram abordados em outras pesquisas como as de Brown e Mager (2003), Prowell (2002), Prowell e Hurley (2005) e Kowalski et al. (2010), que corroboram a conclusão a que se chega aqui: a composição química da rocha e graduação da mistura determinam o nível de degradação dos agregados durante o ensaio.

As rochas que mostraram maior nível de degradação, necessitando um maior valor de C_F foram as rochas de Santo Antônio da Patrulha, Itaara e Sarandi, sendo essas rochas basálticas. As rochas de menores valores de C_F foram encontrados nos granitos de Eldorado do Sul e Sarandi.

Quanto às análises granulométricas obtidas através de amostras do forno de ignição, é notável o bom comportamento frente todas as variações impostas na pesquisa. Não obstante, chegaram a essas conclusões a pesquisa de Brown e

Mager (2003), onde o forno de ignição também foi apontado como um equipamento de melhor desempenho que aqueles que empregam solventes.

Focando nos dados de teor de ligante da centrífuga, como já mencionado, houve muita variação entre os diferentes teores, logo, procurando um comportamento ligado à origem das rochas, serão tratados neste item somente os dados das misturas com teor de projeto.

As misturas com teor de projeto da faixa B mostraram valores acima do valor de projeto para os basaltos. Em contrapartida, os granitos apresentaram teores abaixo do teor de ligante de projeto, independentemente da absorção, já que a rocha de Pelotas possui absorção maior que 1% e não apresentou diferença de teor semelhante aos basaltos, conhecidos pela absorção acima de 3%.

Os basaltos e granitos apresentaram valores elevados de teor de ligante na faixa C, tendo somente o Riodacito de Itaara, com absorção de 3,5%, médias próximas do teor empregado na mistura. Quanto às outras rochas, é visto que possuem comportamento semelhante em suas médias de teor de ligante por serem sempre acima do valor de projeto, com o distanciamento de 0,81% creditado à rocha de St. Antônio da Patrulha, e o menor à Pelotas, com 0,20%. Contudo, nenhuma dessas duas é um ponto de máximo ou mínimo nos valores de absorção da pesquisa, logo, a absorção não se mostrou um parâmetro influente. A rocha de Itaara, tendo absorção tão alta, e amostras com visível extração ineficaz, foi a única a demonstrar valores próximos do teor empregado, mas com valores de material passante na n°200 proporcionalmente baixos, logo, demonstra uma compensação entre o ligante não extraído e a massa de filler perdida no ensaio.

3.13 INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE LIGANTE NOS RESULTADOS DE EXTRAÇÃO E GRANULOMETRIA

A maior parcela da pesquisa abordou misturas com CAP 50-70, mas também foi utilizado AMP 60/85 com objetivo de analisar uma possível influência nos resultados para misturas com ligante modificado. A rocha escolhida para ser abordada com misturas com os dois tipos de ligante foi a de Santo Antônio da Patrulha.

Resumidamente, o único comportamento diferenciado ficou a cargo dos valores de calibração C_F encontrados para as misturas com AMP 60/85, com valores

um pouco menores que os das misturas com CAP 50-70. Essa diferenciação entre esses diferentes ligantes pode ter ligação nas suas composições químicas e reações com o agregado em temperaturas elevadas, como apontado por Prowell e Youtcheff (2009), onde os pesquisadores avaliaram as reações de diferentes ligantes com diferentes concentrações de SO₂, chegando também à conclusão de que as reações entre o ligante e o agregado durante o processo de combustão no forno de ignição pode influenciar nos valores de C_F.

Os outros fatores abordados, como médias dos teores de ligante entre as diferentes misturas e granulometrias, no forno de ignição, não mostraram comportamento diferenciado que pudesse evidenciar uma influência da utilização do asfalto modificado por polímero. No caso da centrífuga, as misturas com AMP 60/85 mostraram queda na eficiência em comparação ao CAP 50-70, tanto nos resultados de teor de ligante quanto granulometria.

Portanto, pelas condições metodológicas abordadas: o ligante polimérico não interferiu nos resultados finais de teor de ligante encontrados com o forno de ignição, mas diminuiu ainda mais a eficiência de extração da centrífuga. Há necessidade de estudos adicionais com outros ligantes, como o asfalto-borracha.

3.14 INFLUÊNCIA DA COLETA DAS AMOSTRAS EM LABORATÓRIO NOS RESULTADOS DE TEOR DE LIGANTE E GRANULOMETRIA

Dentro do processo de controle tecnológico deve-se destacar a importância da amostragem, além de se buscar um equipamento de boa precisão e acurácia para ensaios de controle de teor de ligante e granulometria. Uma correta amostragem, tanto em qualidade quanto em quantidade, terá uma representatividade da realidade da mistura.

Dentre as metodologias de extração aplicadas na presente pesquisa, os dados mostram que o método da centrifugação é muito sensível a variações das mais diversas, teor de ligante utilizado na mistura, variações de massa total das amostras e nas peneiras que as compõe. Ao abordar separadamente os resultados de teor de ligante e granulometria, nessa pesquisa não se revelou uma possibilidade de que com o aumento da amostragem ocorra obrigatoriamente uma melhoria dos resultados da centrífuga, mesmo utilizando médias de 5 amostras, ou seja, as médias não convergem para o valor realmente empregado na mistura.

Por outro lado, o simples fato de aumentar de uma para duas amostras, mostrou resultados mais acurados para o forno de ignição, tanto de teor de ligante quanto granulometria.

Mesmo utilizando-se de um adequado controle de mistura em laboratório e na coleta das amostras, intercalando a coleta de amostras do forno de ignição com as da centrífuga, o comportamento das duas metodologias foi totalmente avesso, como já visto em outros itens.

Neste item em específico, é apontada uma outra abordagem das amostras. Como exemplo, serão apresentados resultados obtidos com amostras de Santo Antônio da Patrulha e Itaara com CAP 50-70, procurando representar abordagem de não descarte de amostras, mas sim uma complementação dos dados das amostras. Serão utilizadas somente duas amostras para formar as médias de teor de ligante e granulometria.

3.14.1 Exemplo de Santo Antônio da Patrulha

É muito comum o descarte de amostras de extração quando estas são diferenciadas do teor de projeto, ou seja, são descartadas quando o operador idealiza que o ensaio tenha sido mal realizado ou que tenha ocorrido uma coleta equivocada. Fazendo uma análise de amostras que apresentaram teores ditos opostos, máximos e mínimos dentre as 5 amostras coletadas, de uma mesma mistura e método de extração, fica evidente que ao realizar uma média entre esses 2 valores ainda são encontrados valores de teor de ligante e granulometria representativos da mistura ensaiada.

As amostras do forno de ignição, com essa abordagem de 2 amostras de valores ditos extremos opostos dentre as 5 ensaiadas, ainda foram encontrados valores abaixo de variações de 0,3% para teores de ligante, enquanto a média de 2 amostras da centrífuga apresentaram o mesmo baixo desempenho de uma médias das 5 amostras, tanto para misturas com faixa B (Tabela 3.50, Figura 3.104, Figura 3.105) quanto misturas com faixa C (Tabela 3.51, Figura 3.106, Figura 3.107).

As médias encontradas para somente 2 amostras mostraram muita semelhança com os resultados das médias com 5 amostras entre as misturas das duas faixas, ou seja, mesmo analisando somente 2 amostras de comportamento

diferenciado coletadas de uma mesma mistura, elas apresentaram médias equivalentes a amostragem de 5.

As granulometrias médias de 2 amostras também ficaram dentro da faixa de trabalho como nas médias de 5 no caso das amostras do forno de ignição, enquanto que as médias de 2 amostras da centrífuga mostraram a mesma distorção entre as variações de teor de ligante encontradas nas médias de 5 amostras.

Tabela 3.50 - Análise de 2 amostras com teores de maior distinção entre 5 – Faixa B

	Teor de Projeto -0,5%	Teor de Projeto	Teor de Projeto +0,5%			
Teor da mistura	4,40%	4,90%	5,40%			
FORNO DE IGNIÇÃO						
	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras
Teor médio	4,28%	4,20%	4,66%	4,69%	5,37%	5,29%
Diferença	0,12%	-0,20%	-0,24%	-0,21%	-0,03%	-0,11%
CENTRÍFUGA						
	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras
Teor médio	5,13%	5,23%	5,50%	5,41%	4,92%	4,98%
Diferença	0,73%	0,83%	0,60%	0,51%	-0,48%	-0,42%

Figura 3.104 - Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos - forno de ignição – Faixa B

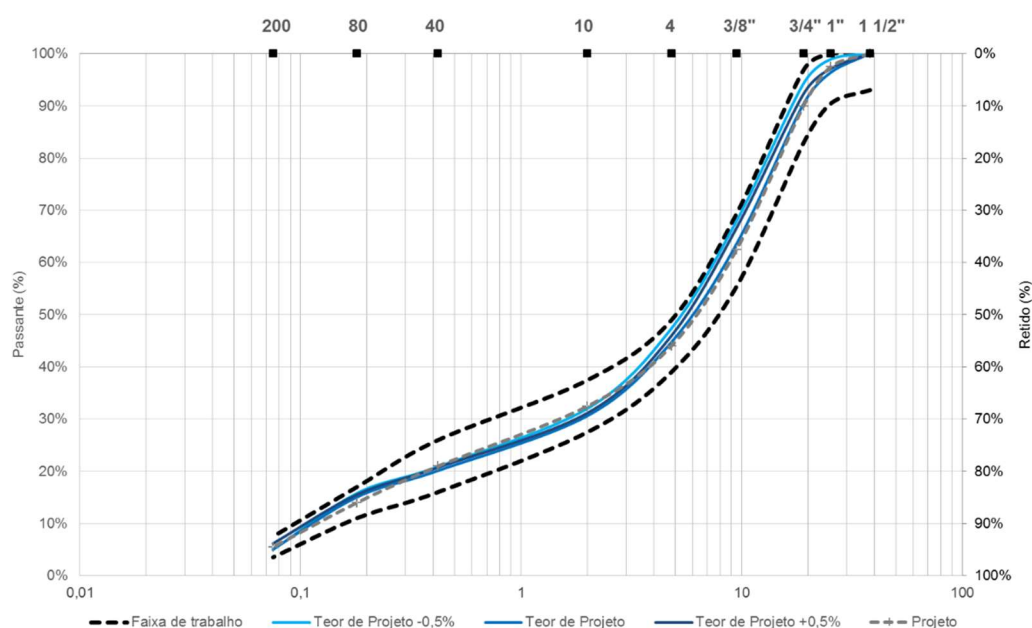


Figura 3.105 - Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos – centrífuga – Faixa B

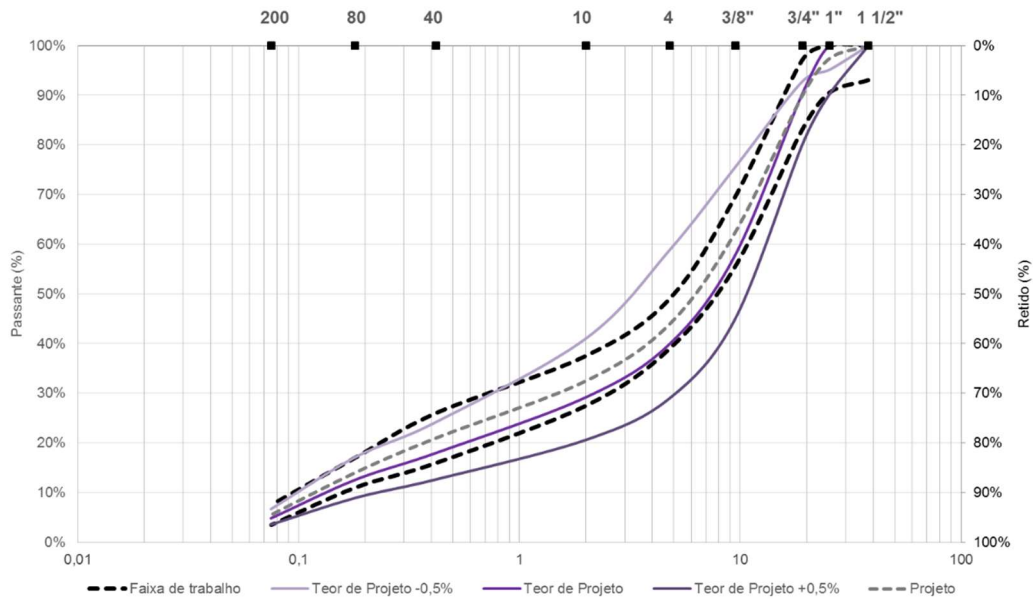


Tabela 3.51 - Análise de 2 amostras com teores de maior distinção entre 5 - Faixa C

	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%	
Teor da mistura	4,80%		5,30%		5,80%	
FORNO DE IGNIÇÃO						
	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras
Teor médio	4,90%	4,90%	5,08%	5,20%	5,78%	5,82%
Diferença	0,10%	0,10%	-0,22%	-0,10%	-0,02%	0,02%
CENTRÍFUGA						
	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras
Teor médio	6,17%	6,09%	6,14%	6,11%	6,01%	6,07%
Diferença	1,37%	1,29%	0,84%	0,81%	0,21%	0,27%

Figura 3.106 – Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos - forno de ignição – Faixa C

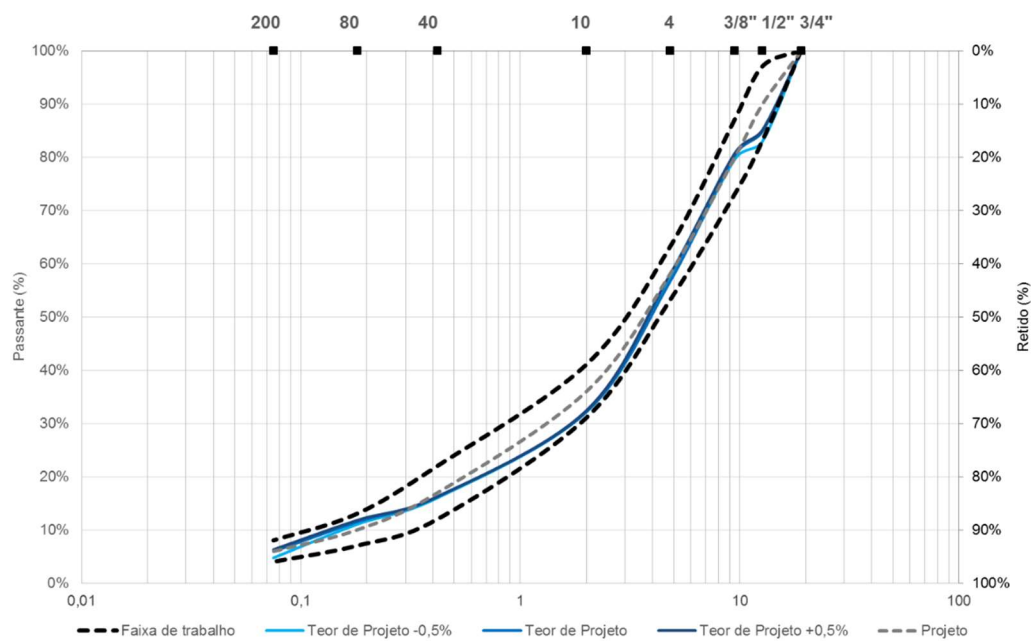
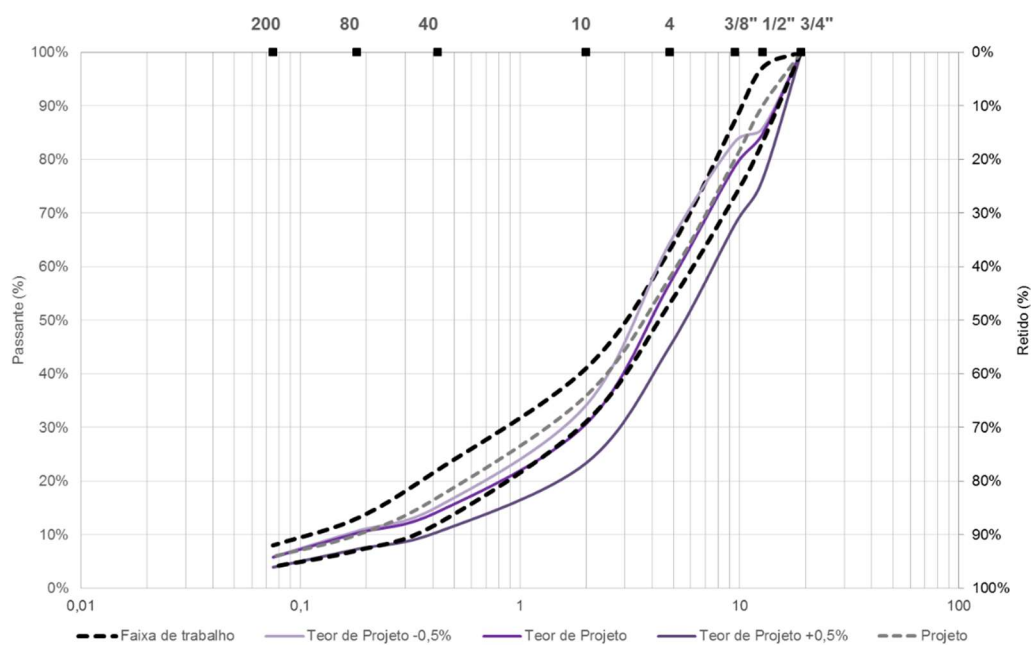


Figura 3.107 – Médias entre amostras de teores máximos e mínimos – centrífuga – Faixa C



3.14.2 Exemplo de Itaara

Procurando a mesma abordagem de não descarte de amostras, foram também escolhidas 2 amostras com resultados mais afastados entre si dentre as 5 coletadas de uma mesma mistura, como já explanado com os dados de Santo Antônio da Patrulha. O comportamento das médias de 2 amostras é novamente muito semelhante aos dados médios de 5 amostras, tanto para o forno de ignição quanto para a centrífuga em todas misturas, faixa B (Tabela 3.52, Figura 3.108 e Figura 3.109) e faixa C (Tabela 3.53, Figura 3.110 e Figura 3.111).

As médias de 2 amostras da centrífuga para misturas na faixa B e C seguiram o mesmo comportamento da análise granulométrica com médias de 5 amostras, mostrando valores deturpados pela extração incompleta do ligante e perda de finos. Os teores médios de 2 amostras também mostraram ser pouco acurados na faixa B e bem próximos do teor de mistura na faixa C, a mesmo comportamento das médias de 5 amostras.

Tabela 3.52 – Análise de 2 amostras com teores de maior distinção entre 5 – Faixa B

	Teor de Projeto -0,5%		Teor de Projeto		Teor de Projeto +0,5%	
Teor da mistura	5,40%		5,90%		6,40%	
FORNO DE IGNIÇÃO						
	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras
Teor médio	5,53%	5,43%	5,99%	5,96%	6,74%	6,70%
Diferença	0,13%	0,03%	0,09%	0,06%	0,34%	0,30%
CENTRÍFUGA						
	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras
Teor médio	5,75%	5,87%	6,36%	6,12%	6,13%	6,16%
Diferença	0,35%	0,47%	0,46%	0,22%	-0,27%	-0,24%

Figura 3.108 - Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos - forno de ignição – Faixa B

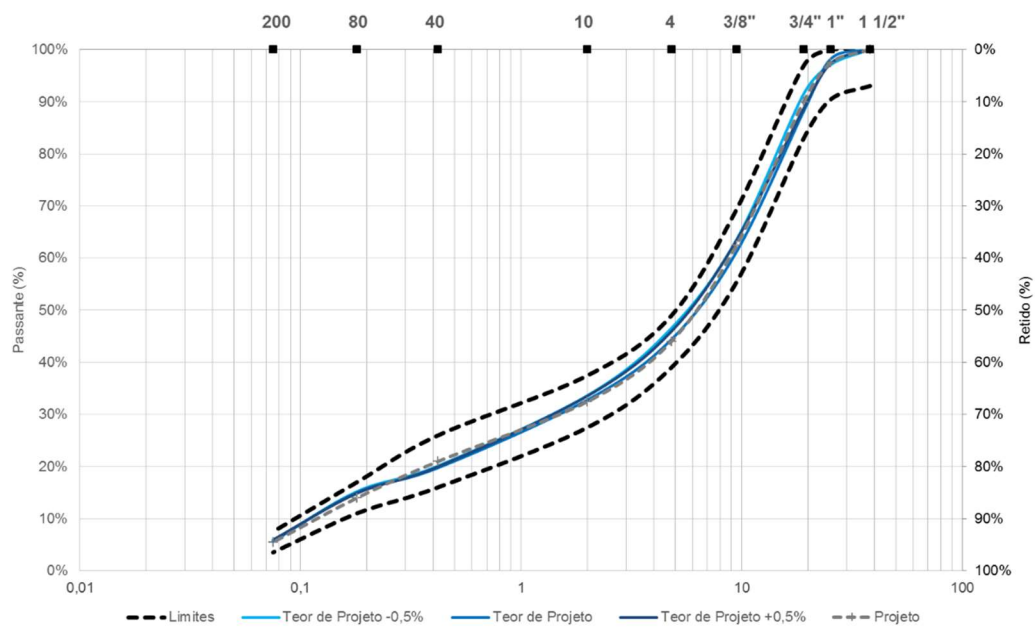


Figura 3.109 - Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos - centrífuga – Faixa B

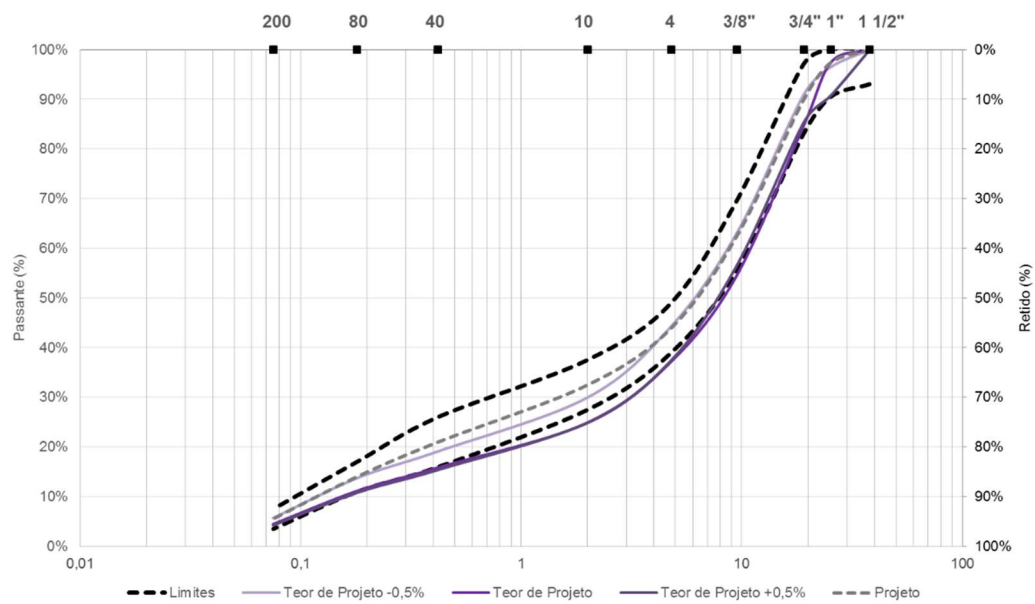


Tabela 3.53 – Análise de 2 amostras com teores de maior distinção entre 5 – Faixa C

	Teor de Projeto -0,5%	Teor de Projeto	Teor de Projeto +0,5%
Teor da mistura	6,50%	7,00%	7,50%

FORNO DE IGNIÇÃO						
	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras
Teor médio	6,88%	6,70%	7,04%	7,00%	7,76%	7,78%
Diferença	0,38%	0,20%	0,04%	0,00%	0,26%	0,28%

CENTRÍFUGA						
	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras	2 amostras	5 amostras
Teor médio	6,69%	6,58%	6,92%	6,93%	7,42%	7,39%
Diferença	0,19%	0,08%	-0,08%	-0,07%	-0,08%	0,11%

Figura 3.110 – Médias entre amostras de teores máximos e mínimos - forno de ignição – Faixa C

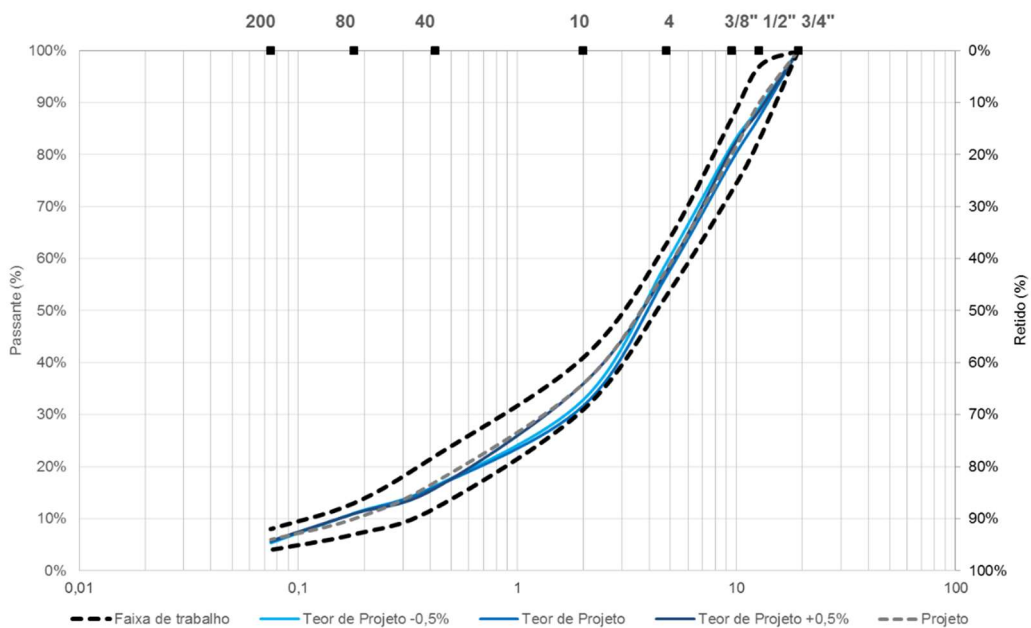
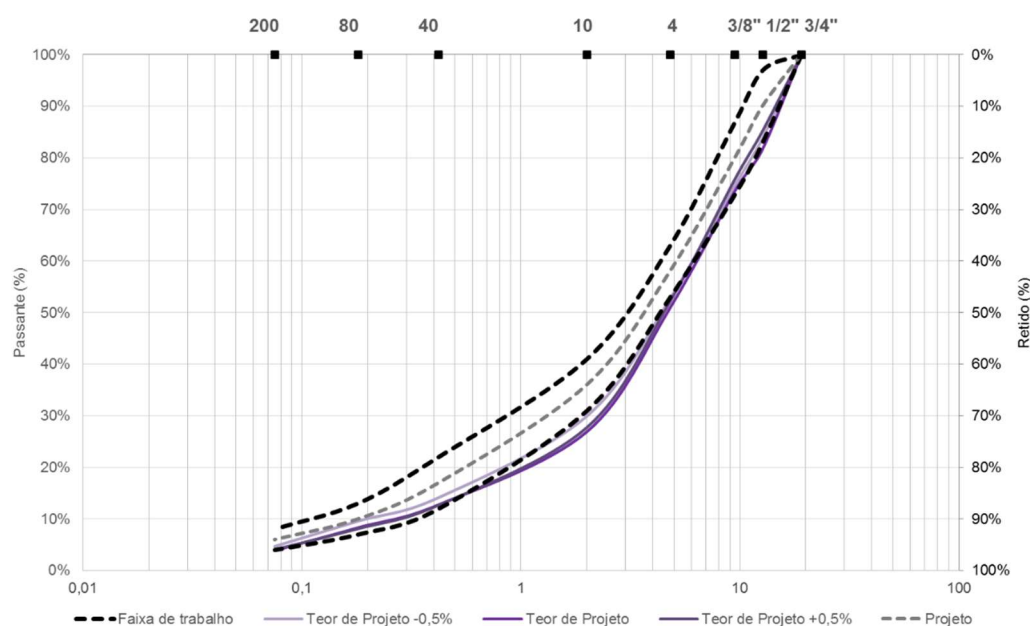


Figura 3.111 - Médias entre 2 amostras de teores máximos e mínimos - centrífuga – Faixa C



3.15 TEMPERATURA DAS AMOSTRAS NO MÉTODO DA CENTRIFUGAÇÃO

A norma de extração de ligante com a centrífuga (DNER 053/94) não trata da temperatura inicial da amostra durante a aplicação do solvente, tão somente trata da temperatura necessária para destorroamento da amostra. Por uma questão físico-química, foram realizados alguns ensaios adicionais que indicassem se uma temperatura dita ótima provocaria uma melhoria nos resultados de obtenção de ligante e granulometria, ou seja, uma temperatura que catalisasse a reação do solvente na amostra e mitigasse a perda de finos durante o processo e extração. A quantidade de solvente utilizado também foi controlada.

Foram confeccionadas 3 amostras idênticas de 600g para cada faixa, B e C do DNIT, todas no centro da respectiva faixa e com 5,0% de teor de ligante. Para escolha das temperaturas, em níveis seguros, foram avaliados os dados de fábrica do solvente, afim de excluir temperaturas que pudessem provocar acidentes, contudo, foi possível realizar os ensaios com amostras em temperatura de mistura (152°C). Além desta, foi escolhido utilizar amostras à 100°C, uma temperatura comum e indicada para destorroamento na DNER 053/94, e também em temperatura ambiente (22°C).

A temperatura de 100°C mostrou os melhores resultados, sendo a temperatura com maior aproximação na obtenção de teor de ligante e também a que utilizou a menor quantidade de solvente. A temperatura ambiente (22°C) e a temperatura de mistura (152°C) necessitaram maior quantidade de solvente até que se chegasse a condição final de ensaio, sendo que as amostras à 22°C apresentaram teores baixos, assim como as amostras à 152°C apresentaram teores elevados de ligante (Tabela 3.54, Tabela 3.55).

Os resultados de granulometria não se mostraram bons em nenhuma das 3 temperaturas ou faixas granulométricas aqui testadas. Seguindo o padrão da pesquisa, todas amostras ficaram fora dos limites de trabalho, mas ficando evidenciado que quanto maior a temperatura da amostra, mais fina se apresenta a curva granulométrica, e quanto menor a temperatura, mais grossa se apresenta a curva, provocada pela extração falha do ligante em temperaturas mais baixas (Tabela 3.56, Tabela 3.57, Figura 3.112 e Figura 3.113).

Os dados de teor de ligante e granulometria obtidos mostraram indícios de que a temperatura inicial da amostra, no momento da aplicação do solvente, pode otimizar a obtenção de ligante, ficando aqui registrada uma sugestão de pesquisa futura focada neste tema, podendo abordar diferentes solventes e temperaturas de amostras, diferentes ligantes e diferentes faixas granulométricas.

Tabela 3.54 – Extrações na centrífuga em diferentes temperaturas - Faixa B

	Amostra B1 (22°C)	Amostra B2 (100°C)	Amostra B3 (152°C)
Teor da amostra	5,00%	5,00 %	5,00 %
Teor obtido	4,82%	4,95%	5,53%
Erro do teor obtido	-0,18%	-0,05%	0,53%
Quantidade de solvente*	1200 mL	900 mL	1000 mL

*solvente utilizado na extração até a condição final

Tabela 3.55 – Extrações na centrífuga em diferentes temperaturas - Faixa C

	Amostra C1 (22°C)	Amostra C2 (100°C)	Amostra C3 (152°C)
Teor da amostra	5,00%	5,00 %	5,00 %
Teor obtido	4,81%	5,23%	5,73%
Erro do teor obtido	-0,19%	0,23%	0,73%
Quantidade de solvente*	1200 mL	900 mL	1100 mL

*solvente utilizado na extração até a condição final

Tabela 3.56 – Granulometrias das amostras na faixa B

Peneira	Projeto	Amostra 1 (22°C)		Amostra 2 (100°C)		Amostra 3 (152°C)	
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença
3/4"	10,0%	10,5%	0,5%	10,2%	0,2%	9,8%	-0,2%
3/8"	27,5%	41,0%	13,5%	37,0%	9,5%	36,2%	8,7%
n° 4	18,5%	17,5%	-1,0%	19,0%	0,5%	18,9%	0,4%
n°10	11,5%	11,4%	-0,1%	12,6%	1,1%	12,1%	0,6%
n°40	11,5%	7,7%	-3,8%	8,4%	-3,1%	9,8%	-1,7%
n°80	7,0%	3,3%	-3,7%	4,1%	-2,9%	4,1%	-2,9%
n°200	8,5%	5,6%	-2,9%	5,7%	-2,8%	6,4%	-2,1%
Pas.200	5,5%	3,0%	-2,5%	3,0%	-2,5%	2,9%	-2,6%

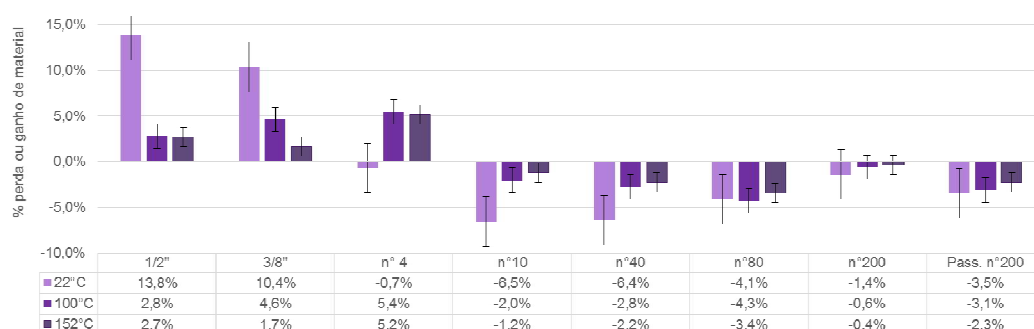
Figura 3.112 - Diferenças de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa B



Tabela 3.57 - Granulometrias das amostras na faixa C

Peneira	Projeto	Amostra 1 (22°C)		Amostra 2 (100°C)		Amostra 3 (152°C)	
		Retido	Diferença	Retido	Diferença	Retido	Diferença
1/2"	10,0%	23,8%	13,8%	12,8%	2,8%	12,7%	2,7%
3/8"	10,0%	20,4%	10,4%	14,6%	4,6%	11,7%	1,7%
n° 4	22,0%	21,3%	-0,7%	27,4%	5,4%	27,2%	5,2%
n°10	22,0%	15,5%	-6,5%	20,0%	-2,0%	20,8%	-1,2%
n°40	19,0%	12,6%	-6,4%	16,2%	-2,8%	16,8%	-2,2%
n°80	7,0%	2,9%	-4,1%	2,7%	-4,3%	3,6%	-3,4%
n°200	4,0%	2,6%	-1,4%	3,4%	-0,6%	3,6%	-0,4%
Pas.200	6,0%	2,5%	-3,5%	2,9%	-3,1%	3,7%	-2,3%

Figura 3.113 - Diferenças de material retidos por peneira – centrífuga - Faixa C



3.16 REGRESSÕES LINEARES E EQUAÇÕES EMPÍRICAS

Com os dados de teor de ligante apurados, foi possível construir os gráficos de médias obtidas nos ensaios de extração em função dos teores realmente empregados nas misturas e gráficos de médias de teores obtidos já corrigidos com C_F e T_C em função dos teores reais, assim, permitindo aplicar regressão linear afim de obter as equações das curvas (Figura 3.114, Figura 3.115, Figura 3.116, Figura 3.117 e Figura 3.118). As equações para obtenção de teor de ligante foram montadas a partir das médias dos dados do forno de ignição (método A e método B) e centrífuga, onde somente os dados do forno de ignição conseguiram estabelecer modelos com R^2 acima de 0,80, chegando até mesmo a valores próximos à 1,0 quando utilizados valores médios com dados corrigidos por C_F e T_C (Tabela 3.58).

Tabela 3.58 – Equações obtidas com os dados médios de teor de ligante

Dados utilizados	Equação	
Forno de ignição Método A (dados brutos)	$Teor\ real = 0,9056*x - 0,1197$ $R^2 = 0,84$	(12)
Forno de ignição Método A (dados corrigidos)	$Teor\ real = 0,9432*x + 0,3053$ $R^2 = 0,96$	(13)
Forno de ignição Método B (dados brutos)	$Teor\ real = 0,8905*x + 0,0768$ $R^2 = 0,82$	(14)
Forno de ignição Método B (dados corrigidos)	$Teor\ real = 0,9288*x + 0,3624$ $R^2 = 0,95$	(15)
Centrífuga	$Teor\ real = 0,8813*x + 0,4295$ $R^2 = 0,56$	(16)

Onde:

x = teor de ligante obtido na extração

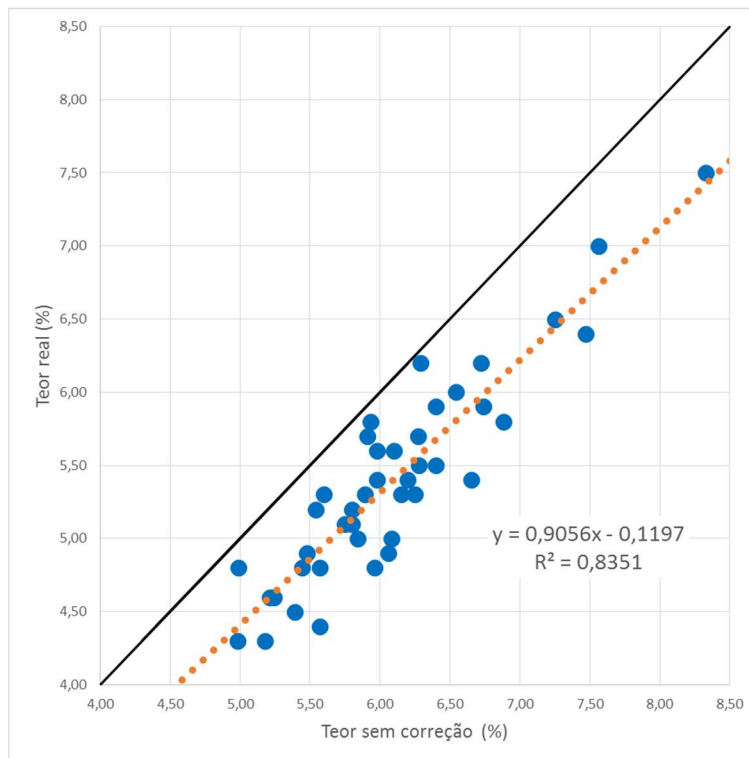
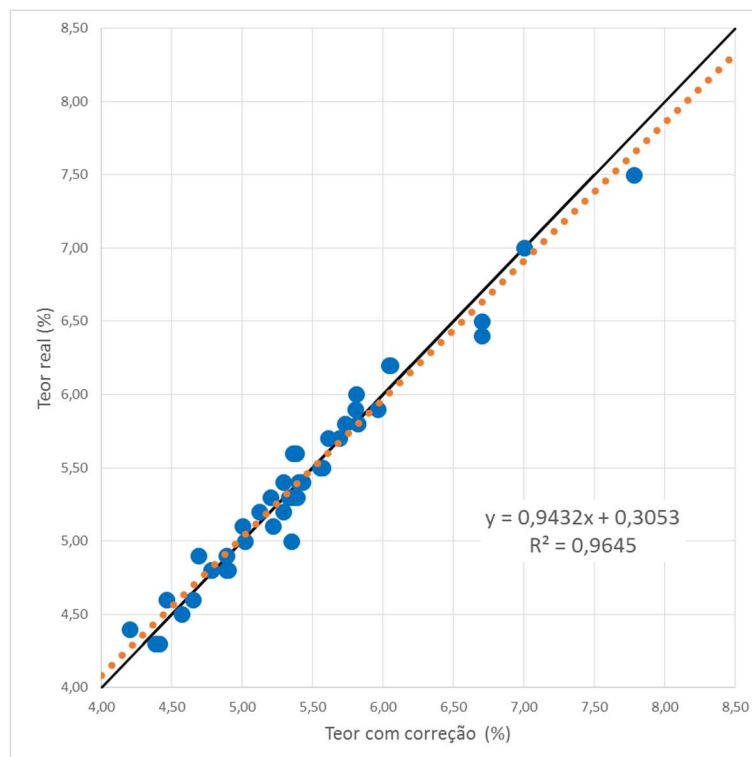
Figura 3.114 – Gráfico de médias de Teor real *versus* Teor sem correção (método A)Figura 3.115 - Teor real *versus* Médias de teor com correção (método A)

Figura 3.116 - Teor real versus Médias de teor sem correção (método B)

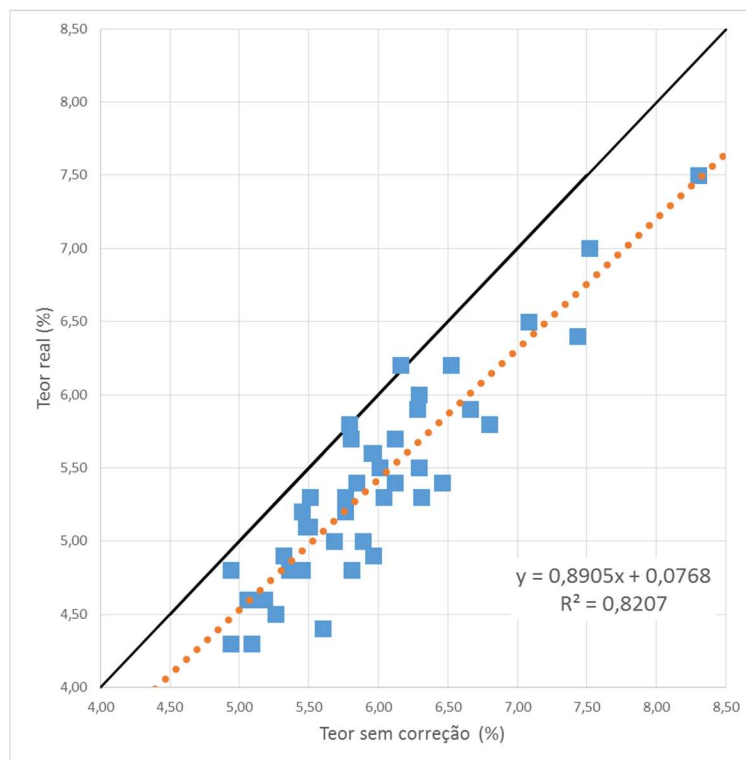


Figura 3.117 - Teor real versus Médias de teor com correção (método B)

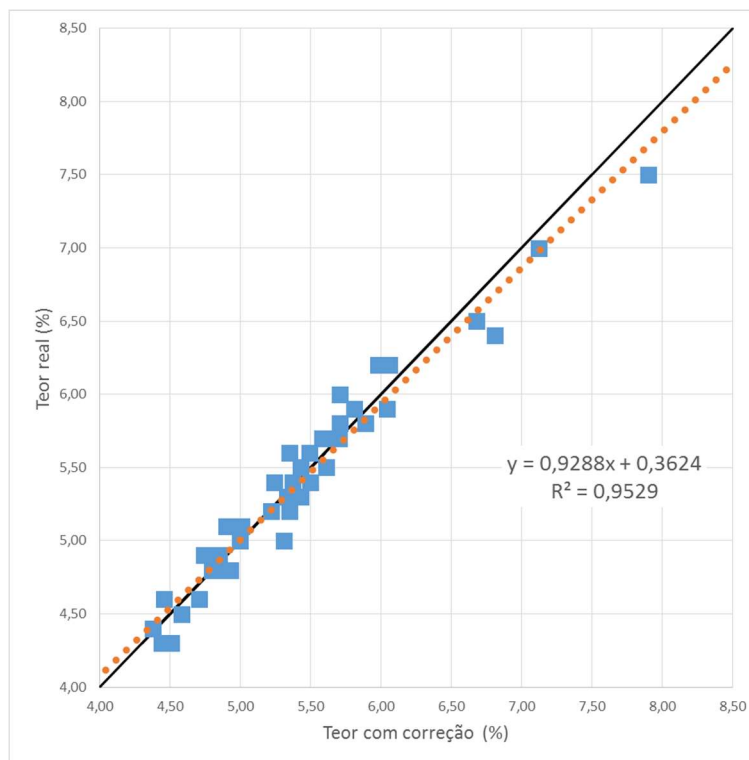
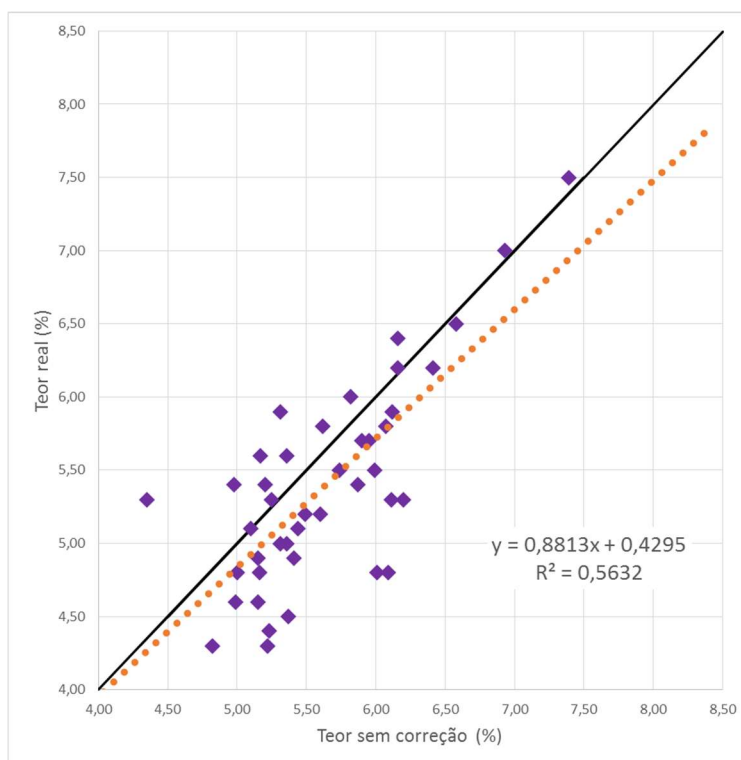


Figura 3.118 - Teor real versus Médias de teor sem correção (centrífuga)

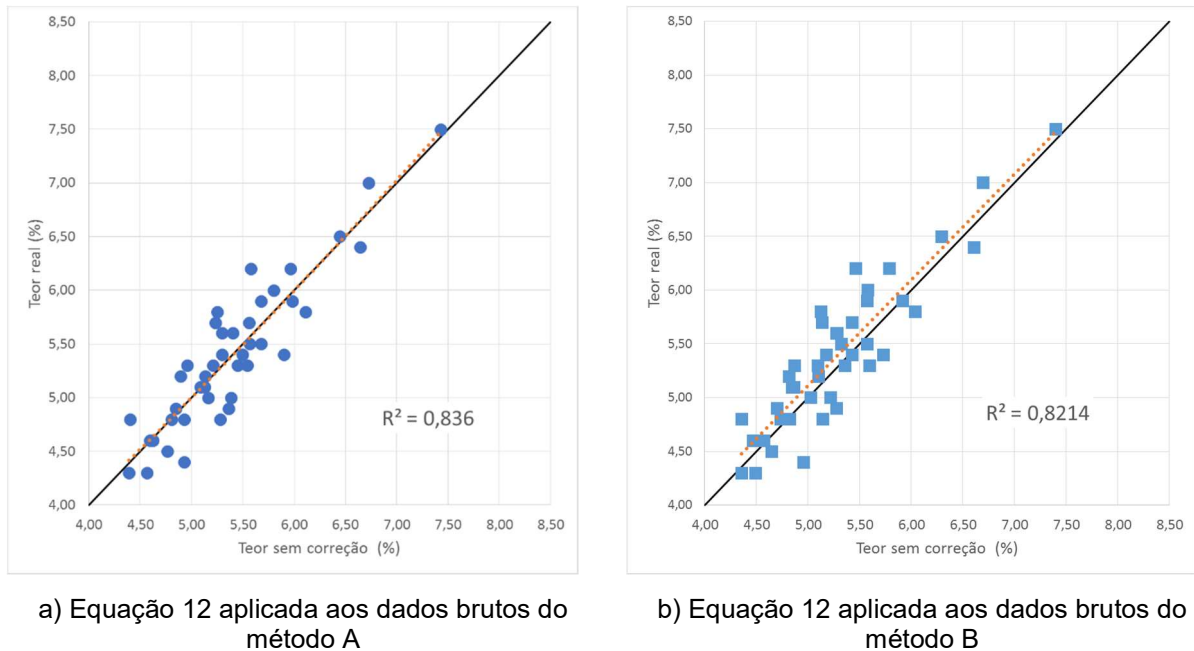


Com esses modelos matemáticos revelou-se a possibilidade de aplicabilidade do forno de ignição também para obtenção de teor de ligante de amostras de concretos asfálticos desconhecidos, desprovidos de possibilidade de passar pela fase de calibração por não possuir seus dados de dosagem.

Com a finalidade de avaliar essa possibilidade de aplicação das equações empíricas (12) e (14), as fórmulas foram reaplicadas nos dados brutos, passando os resultados para forma de médias de 5 pontos e fez-se uma nova regressão linear, onde obteve-se novamente boas respostas, tanto pelo método A como pelo método B, com R^2 de 0,84 e 0,82, respectivamente (Figura 3.119).

Uma ampliação na amostragem, abrangendo uma maior quantidade de misturas com diferentes rochas, granulometrias e ligantes, poderia ampliar a confiabilidade dessas equações, aprimorando o modelo e viabilizando o emprego do forno de ignição em casos que atualmente ele não é empregável por sua limitação metodológica em que se encontra atualmente, onde é diretamente dependente do valor de C_F .

Figura 3.119 – Resultados médios da equação 12 aplicada nos dados brutos do forno de ignição



O desvio padrão apresentado pela equação 12 foi de 0,2%, um ótimo valor se for considerado que a equação 12 é função somente do dado de calibração médio de 5 amostras sem calibração alguma.

As variações máximas encontradas nos dados obtidos através da equação 12 foram das rochas de St. Antônio da Patrulha e Pelotas, as rochas de maior e menor C_F , respectivamente, ou seja, na primeira houve falta de correção pela equação, por se tratar de uma rocha de elevada perda de massa, ocorrendo o inverso no caso da segunda rocha citada, que teve excesso de correção.

Ainda procurando uma aplicação da equação 12 em misturas desprovidas de dados de calibração, foram realizadas 3 misturas na faixa C adicionais ao estudo, com uma rocha de Dilermando de Aguiar, evitando rochas do escopo da pesquisa. As amostras foram confeccionadas em laboratório com referência nos dados de dosagem disponibilizados pela empresa.

Análogo às outras misturas, foram feitas 3 amostras com o teor de projeto e 3 amostras com variação de +/- 0,5% de teor de ligante. Na Tabela 3.59 é visto que a equação 12 apresentou dados com variação menor do que 0,2% em relação ao aplicado realmente nas misturas, mostrando bons resultados e indicando que um estudo mais amplo na área poderia apresentar dados ainda mais confiáveis.

Tabela 3.59 – Equação 12 aplicada a dados sem calibração de misturas com agregado de Dilermando de Aguiar

	Teor de Projeto -0,5%	Teor de Projeto	Teor de Projeto +0,5%
Teor Real	4,50 %	5,00 %	5,50 %
Teor Forno (Bruto)*	5,07 %	5,49 %	5,97 %
Teor obtido (Equação 12)*	4,47 %	4,85 %	5,29 %
Erro do teor obtido*	-0,03 %	-0,15 %	-0,21 %

*média de 3 amostras

3.17 SÍNTESE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

Dentre as principais observações da fase de análise dos dados do forno de ignição, tem-se:

- a) O forno de ignição apresentou resultados muito bons e não há grande distinção entre os dados de obtenção de teor de ligante da metodologia A e B do forno de ignição, ambos com boa acurácia e precisão. A diferença entre seus dados está ligada provavelmente à diferença de tempo de pesagem, ligada à umidade da amostra final e ao fator de T_C , inerente ao método automatizado A;
- b) O fator de calibração C_F utilizado para cálculo do teor de ligante é confirmado como parte fundamental para garantia da acurácia de seus resultados com a metodologia vigente;
- c) Foi indicada na pesquisa uma alternativa para a metodologia atual, composta por equações empíricas baseadas somente nos dados brutos de teor de ligante do forno de ignição, independentemente então da etapa de calibração da metodologia vigente;
- d) Os resultados de teor de ligante e granulometria mostraram maior dependência da origem mineralógica do agregado mineral utilizado na mistura e não ligada às propriedades como absorção e sanidade, como se acreditava no início da pesquisa;
- e) As amostras com CAP 50-70 e AMP 60/85 diferenciaram-se somente nos valores de C_F . As misturas com o ligante modificado apresentaram valores de C_F um pouco menores que os das misturas com o ligante convencional;
- f) Os dados do forno de ignição mostraram boa resposta frente a variações de teor de ligante nas misturas;

As principais observações da fase de análise dos dados da centrífuga, são:

- a) Os dados de obtenção de teor de ligante não apresentaram boa resposta nas diferentes variações impostas na pesquisa, com baixa acurácia e também baixa precisão;
- b) A extração incompleta do ligante provocou alteração direta nos dados de teor de ligante e distorção nas curvas granulométricas proporcionadas pelas amostras pós-extração;
- c) Nos dados da centrífuga também não foram constatados padrões ou resultados que apontem a absorção como fator preponderante nos dados de teor de ligante e granulometria;
- d) A variação de teor de ligante nas misturas teve grande influência nos dados de obtenção de teor de ligante e granulometria. Misturas com baixo teor de ligante apontaram valores acima do teor de projeto e misturas com adição de ligante apresentaram resultados abaixo do teor de projeto;
- e) Mesmo com um pequeno número de dados, demonstrou-se que a temperatura da amostra submetida à centrifugação é influente no processo de extração de ligante.

4 CONCLUSÕES

Estabeleceu-se como foco desta pesquisa a avaliação dos ensaios de determinação de teor de ligante por ignição e centrifugação e controle de granulometria de concretos asfálticos, ensaios de elevada importância no controle tecnológico de concretos asfálticos.

a) Quanto à comparação entre os métodos de extração por ignição e centrifugação, conclui-se que:

- O método de determinação de teor de ligante que apresentou melhores resultados foi o de ignição, tanto pela metodologia A como pela metodologia B. Mesmo diante das diferentes variações impostas na pesquisa, seus resultados se mostraram acurados e com boa precisão, tanto em dados de teor de ligante como granulometria, promovendo sempre uma boa extração do ligante das amostras;
- O fator de calibração C_F utilizado para cálculo do teor de ligante do forno de ignição é confirmado como parte fundamental para garantia da acurácia de seus resultados com a metodologia vigente. Seria impossível utilizar o forno de ignição para controle tecnológico de misturas que não fosse possível aplicar essa parte da metodologia, que é dependente do projeto do concreto asfáltico e necessita reprodução de amostras do CA a ser ensaiado em laboratório: mesma granulometria, agregado, teor de ligante e aditivos. Foi indicada aqui uma alternativa para a metodologia, composta por uma equação empírica baseada somente nos dados brutos de teor de ligante, independentemente então da fase de calibração, mostrando bons resultados;
- O método A, automatizado, ainda possui um fator de correção denominado T_C , ligado principalmente às variações de temperatura durante o ensaio e ao comportamento da balança, já que altas temperaturas acabam por influenciar no comportamento das células de carga da balança;
- A extração de ligante utilizando a centrífuga não mostrou boa resposta nas diferentes variações impostas na pesquisa. Os seus resultados médios de teor de ligante apresentaram dependência do teor de ligante aplicado na mistura: valores altos para misturas com teores baixos e valores baixos

para misturas com teores altos, revelando resultados pouco confiáveis se comparados aos dados de teor do forno de ignição. Tal comportamento está ligado à extração incompleta do ligante, influenciando até mesmo na fase de análise granulométrica, onde o depósito de material fino em peneiras mais grossas provocou distorções nas curvas granulométricas.

b) Quanto à influência de diferentes faixas granulométricas, conclui-se que:

- O forno de ignição mostrou variações diferenciadas de teor de ligante entre as faixas granulométricas B e C, mas com comportamentos semelhantes e abaixo do limite de 0,3%. A pesquisa de Prowell (2002) corrobora que a degradação dos agregados durante os ensaios mostrou ser ligada à graduação do CA. Quanto à análise granulométrica, as curvas construídas a partir de amostras do forno de ignição mostraram-se confiáveis, com boa resposta em todas as misturas, ficando dentro dos limites e próximas ao projeto;
- As curvas granulométricas obtidas em amostras da centrifuga mostraram dados igualmente equivocados tanto para faixa B quanto faixa C, onde o grau de distorção das curvas médias da faixa B se mostrou mais elevado. Na faixa C também ocorreram tais deslocamentos das curvas, mas com menor diferença ao variar o teor da mistura.

c) Quanto à influência de utilização de diferentes rochas, com propriedades distintas, nos resultados finais de controle de teor de ligante e granulometria, conclui-se que:

- Os resultados da pesquisa não mostraram dependência ou padrões que apontassem influência de propriedades dos agregados tal como absorção, resistência à abrasão, adesividade ou sanidade;
- Os resultados de teor de ligante e granulometria obtidos através do forno de ignição mostraram maior dependência da origem mineralógica do agregado mineral utilizado, possivelmente ligada a alterações físico-químicas nos agregados após a queima no forno. Pesquisas como as de Brown e Mager (2003), Prowell (2002), Prowell e Hurley (2005) e Kowalski et al. (2010), corroboram a conclusão a que se chega aqui: a origem mineralógica da rocha e graduação da mistura são determinantes da acurácia dos resultados de teor de ligante. As rochas que mostraram

maior nível de degradação, necessitando um maior valor de C_F , foram os basaltos e menores valores de C_F nos granitos;

- Os dados da centrifuga mostraram valores acima do valor de projeto para as rochas basálticas na graduação mais grossa. Em contrapartida, as rochas graníticas apresentaram teores abaixo do teor de ligante de projeto. As rochas basálticas e graníticas apresentaram valores elevados de teor de ligante na faixa C. Nos dados da centrífuga também não foram constatados padrões ou resultados que apontem a absorção como fator preponderante nos dados de teor de ligante e granulometria.

d) Quanto à influência de diferentes teores de ligante nos ensaios de extração e granulometria, conclui-se que:

- Dentre a utilização de CAP 50-70 ou AMP SBS 60/85, o único comportamento diferenciado ficou a cargo dos valores de calibração C_F do forno encontrados para as misturas com o ligante modificado, com valores um pouco menores de C_F que os das misturas com o ligante convencional;
- Os dados da centrifuga não mostraram valores que apontem perceptível influência na utilização de ligante convencional ou modificado por polímero.

e) Quanto à influência de diferentes teores de ligante nos ensaios de extração e granulometria:

- Os dados do forno de ignição mostraram boa resposta frente a variações de teor de ligante nas misturas;
- Em contrapartida, a variação de teor de ligante nas misturas influenciou os dados da centrífuga, tanto na obtenção de teor de ligante como na análise granulométrica. Misturas com baixo teor de ligante apontaram valores acima do teor da mistura e misturas com adição de ligante apresentaram resultados abaixo do teor da mistura para quase todas as rochas e graduações. Essas diferentes variações de teor de ligante nas misturas também influenciaram as curvas granulométricas obtidas pela centrífuga, expondo curvas mais finas para misturas com pouco ligante e curvas mais grossas para misturas com excesso de ligante.

De modo geral, o forno de ignição se mostrou como uma ótima alternativa em comparação aos ensaios que utilizam solventes, tanto na obtenção de teor de

ligante como na análise granulométrica. Em nenhum momento da pesquisa o forno apresentou alguma espécie de incerteza quanto aos dados obtidos de seus ensaios. Um maior emprego deste método no controle tecnológico de concretos asfálticos acrescentaria maior qualidade de serviços por promover dados acurados e precisos.

A metodologia atual não possibilita o emprego do forno de ignição em concretos asfálticos desprovidos de possibilidade de passar pela fase de calibração, mas nesta pesquisa foram indicadas duas equações empíricas de boa confiabilidade que auxiliariam nesses casos em que somente é possível obter os dados brutos de teor de ligante.

A centrífuga apresentou dados de baixa acurácia e precisão em praticamente todas as condições impostas durante a pesquisa, tanto para obtenção de teor de ligante como granulometria. Por se tratar de um ensaio de utilização corriqueira, deveria ter apresentado dados mais concisos, que não apresentassem grande margem de erro. Erros estes que ultrapassaram os limites de teor de ligante e granulometria do DNIT nas mais diversas condições impostas na pesquisa. Logo, seu emprego no controle tecnológico de concretos asfálticos pode estar acarretando equívocos no controle de qualidade, possivelmente causando diversos prejuízos na pavimentação asfáltica, uma área da engenharia que envolve grandes custos e é essencial ao país, assim, necessitando de acurácia e precisão no controle de seus serviços.

A norma que trata da metodologia da centrífuga não impõe uma faixa de temperatura da amostra para o ensaio. Partindo de uma dúvida baseada na físico-química, alguns ensaios adicionais foram realizados para verificar se temperaturas mais elevadas trariam influência significativa na reação solvente-ligante e resultado final de teor de ligante. Foi possível observar que há influência da temperatura da amostra nos resultados de obtenção de teor de ligante e granulometria. Um estudo mais amplo e aprofundado pode conceber uma melhor conclusão desse assunto.

4.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Partindo das observações realizadas durante a pesquisa, sugere-se para futuras pesquisas focadas na utilização do forno de ignição e centrífuga:

- a) Utilização de maior gama de ligantes;

- b) Propostas de modificações nos métodos de extração, procurando melhorar os resultados de obtenção de teor de ligante;
- c) Comparação entre diferentes solventes e até mesmo um solvente em alternativa aos citados em norma;
- d) Um estudo mais aprofundado que busque uma temperatura inicial das amostras na centrífuga que otimize a reação do solvente e procurar mostrar uma influência da variação da temperatura do ensaio nos resultados obtidos de teor de ligante e granulometria;
- e) Expandir a aplicação de rochas das mais diferentes naturezas e origens mineralógicas;
- f) Aprofundar o estudo da degradação dos agregados ao passarem pelo processo de ignição com o forno de ignição;
- g) Colocar a prova os dois métodos de extração frente a variados tipos de coleta de amostras;
- h) Validação das equações empíricas propostas no trabalho.

REFERÊNCIAS

ABDUL-MALAK, M., FOWLER, D., CONSTANTINO, C. **Aggregate Characteristics Governing Performance of Seal Coat Highway Overlays**. *Transportation Research Record 1547*, Transportation Research Board, Washington, DC, 15-22. 1996.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Avaliação de Métodos de Dosagem de Misturas Asfálticas e sua Relação com as Propriedades Mecânicas**. Relatório final. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS – ANP. **Resolução ANP Nº 19, DE 11.7.2005 – Anexo I: Regulamento Técnico Nº 3/2005**. Disponível em <
[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/julho/ranp%2019%20-%202005.xml?f=templates\\$fn=default.htm&sync=1&vid=anp:10.1048/enu](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/julho/ranp%2019%20-%202005.xml?f=templates$fn=default.htm&sync=1&vid=anp:10.1048/enu) > Acesso em: 19 de nov. 2015.

_____. **Resolução ANP Nº 31, DE 9.10.2007**. Disponível em <
http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2007/outubro/ranp%2031%20-%202007.xml > Acesso em: 01 de dez. 2015.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY – ASDR. **Toxicological Profile for Trichloroethylene**, U.S. Public Health Service, Department of Health and Human Services, Atlanta, GA, 2014.

AIREY, G.D.; HUNTER, A.E., COLLOP, A.C. **The Effect of Asphalt Mixture Gradation and Compaction Energy on Aggregate Degradation**. *Construction and Building Materials*, Volume 22, 972–980. 2008.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 308 - Determining the Asphalt Binder Content of Hot Mix Asphalt (HMA) by the Ignition Method**. Washington State Department of Transportation, Washington, DC, 2013.

_____. **AASHTO 164-86** – Quantitative extraction of bitumen from bituminous paving mixtures. Washington State Department of Transportation, Washington, DC, 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6307:2010 - Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method**. West Conshohocken, Pensilvânia, 2015.

_____. **ASTM C 128:2015 - Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate**. West Conshohocken, Pensilvânia, 2015.

_____. **ASTM D 2172:75** – Quantitative extraction of bitumen from bituminous paving mixtures. West Conshohocken, Pensilvânia, 1975.

ANITELLI, A. **Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2013.

ANTRIM, J.D; BUSCHING, H.W, **Asphalt Content Determination by the Ignition Method**. *Highway Research Record No. 213, Highway Research Board, Washington, DC, 1969.*

ASPHALT INSTITUTE. **Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types**. MS-2. 104 p. Lexington, KY, 1979.

_____. **Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types**. MS-2. 6thed. 141 p. Lexington, KY, 1997.

_____. **Superpave Mix design**. SP-2. 3thed. 97 p. Lexington, KY, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 30**. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **ABNT NBR 15619**. Misturas asfálticas – Determinação da massa específica medida em amostras não compactadas. Rio de Janeiro. 2008.

BALBO, J. T., **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo, SP: Oficina de textos, 2007.

BERNUCCI, L. B., DA MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B.. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, RJ: Petrobras: Adeda, 2006.

BERNUCCI, L. B., MOURA, E., FURLAN, A. P., MOTTA, R. S., LEITE, F. C.; FARIA, V. **Efeito do teor de tipo de ligante na formação de trilhas de roda em misturas asfálticas**. 19^o Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

BROWN, E. R., MAGER, S. **Asphalt Content by Ignition Round Robin Study**. *NCAT Report No. 95-3. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, AL, 2003.*

BROWN, E.R., MURPHY, N. **Asphalt Content Determination by the Ignition Method, Final Report - Project #930-285, Alabama Department of Transportation, Montgomery, Alabama, 1994.**

BESSA, I. S., BRANCO, V. T. F. C., SOARES, J. B. **Avaliação da resistência ao polimento e à degradação de agregados utilizando a abrasão los angeles e o processamento digital de imagens**. 7^o Congresso Brasileiro de Rodovias & Concessões. Foz do Iguaçu, 2011.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales**. Dissertação de mestrado. Programa de

Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2014.

BLÜCHER, E.. **Mecânica dos solos para engenheiros rodoviários – volume I**. Ed. Edgard Blücher. São Paulo, 1951.

BURATI, J. L.; WEED, R. M.; HUGHES, C. S.; HILL, H. S. **Optimal procedures for quality assurance specifications**. Final Report, FHWA-RD- 02-095. Clemson University. Clemson, 2003.

BURR, B. L., R. R. DAVISON, C. J. GLOVER, J. A. BULLIN, **Solvent Removal from Asphalt**, *Transportation Research Record* 1269, TRB, *National Research Council*. Washington, DC, 1990.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Mapa geológico do Rio Grande do Sul**. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/publique/media/mapa_rio_grande_sul.pdf> Acesso em: 30 de out. 2015.

CERATTI, J. A. P, REIS, R. M. M. **Manual de Dosagem de Concreto Asfáltico**. São Paulo, SP. Oficina de Textos, 2011.

CHOUBANE, B., MUSSELMAN, J. A., PAGE, G. C. **Precision and Accuracy of the Ignition Method for Determining Asphalt Content**. *Transportation Research Record* 1616. *Florida Department of Transportation, State Materials Office*. Waldo Road, Gainesville, FL, 2006.

COMINSKY, R. J., HUBER, G. A., KENNEDY, T. W., ANDERSON, M. **The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays**. *Strategic Highway Research Program SHRP*, National Research Council, Washington, D.C, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/95** – Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, RJ, 1995

_____. **DNER-ME 043/95** – Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, RJ, 1995

_____. **DNER-ME 053/94**. Misturas Betuminosas - percentagem de betume. Rio de Janeiro, RJ, 1994.

_____. **DNER-ME 083/98**. Agregado – análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006**. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, RJ: IPR1994.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Hot-Mix Bituminous Paving Manual**. FHWA-ED-88-028. U.S. Department Of Transportation, 1985.

FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V. **Controle tecnológico e controle de qualidade - um alerta sobre sua importância.** Anais do Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Brasília, DF, 2004.

GARCIA, C. H., TIA, M., ROQUE, R., CHOUBANE, B. **An evaluation of an alternative solvent extraction of asphalt to reduce health and environmental hazards.** *Transportation Research Board*, Washington, 2000.

GATCHALIAN, D., MASAD, E., CHOWDHURY, A., LITTLE, D. **Characterization of Aggregate Resistance to Degradation in Stone Matrix Asphalt Mixtures.** *Research Report ICAR – 204-1F. International Center for Aggregates Research. Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, TX.* 2006.

GONÇALVES, B. C. S., PEREIRA, D. S., SPECHT, L. P., ROSSATO, F. P., CÂNDIDO, K. G. D., MATTOS, R. F. **Análise de dispersão de resultados do controle de teor de ligante de misturas asfálticas com agregados de baixa absorção a partir do Rotarex.** 44º RAPv e 17º ENACOR. Foz do Iguaçu, PR, 2015. 17p.

GOUVEIA, L. T. **Avaliação do Ensaio de Angularidade do Agregado Fino (FAA) da Especificação Superpave.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, SP, 2002.

____. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,. São Paulo, SP, 2006.

GUSMÃO, R. P., MAIO, S.R., CARREIRA, M. E. S., ESTEVES, M. G., AMÊNDOLA P. L. **Diagnóstico Brasil. A ocupação do território e o meio ambiente.** IBGE, 170 p. Rio de Janeiro, 1990.

HALL, K. D., WILLIAMS, S. G. **Effects of the Ignition Method on Aggregate Properties.** *Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1998

HARVEY, J. T., DEACON, J. A., TSAI, B. W., MONISMITH, C. L. **Fatigue performance concrete mixes and its relationship to asphalt concrete pavement performance in California.** *Asphalt Research Program, CAL/APT Program - Institute of Transportation Studies - University of California, Berkeley*, 1995.

HURLEY, G. C. **Evaluation of infrared ignition furnace for determination of asphalt content.** *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, AL*, 2003.

JÚNIOR, F. A., GIAMPAGLIA, H. R.. **Pavimentação Urbana.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, SP, 1992.

KANDHAL, P. S., KHATRI, M. A. **Evaluation of asphalt absorption by mineral aggregates.** Relatório Técnico 91 - 4, *National Center for Asphalt Technology*, 1991.

____. **Relating asphalt absorption to properties of asphalt cement and aggregates.** Relatório Técnico 92 - 2, *National Center for Asphalt Technology*, 1992.

KOWALSKI, K. K., MCDANIEL, R. S., OLEK, J., SHAH, A. **Determining of the Binder Content of Hot Mix Asphalt Containing Dolomitic Aggregates Using the Ignition Oven.** *Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University*. West Lafayette, Indiana, 2010.

LÁO, T., SANTO, V. L. E., RAMOS, C. R. **Determinação do Teor de Ligante em Misturas Asfálticas a Quente Através do Forno de Ignição por Convecção – Parte 1.** *Revista Asfalto em Revista*, n° 38, nov/dez 2014.

____. **Determinação do Teor de Ligante em Misturas Asfálticas a Quente Através do Forno de Ignição por Convecção – Parte 2.** *Revista Asfalto em Revista*, n° 38, jan/fev 2015.

____. **Determinação do Teor de Ligante em Misturas Asfálticas a Quente Através do Forno de Ignição por Convecção.** 21° Encontro de Asfalto. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

LANE, B.; ROGERS, C. E SENIOR, S. **The Micro-Deval Test for Aggregates in Asphalt Pavement.** *8th Annual Symposium of International Center for Aggregate Research*, Denver, CO, 2000.

LEE, D. Y.; GUINN, J. A.; KANDHAL, P. S.; DUNNING, R. L. **Absorption of asphalt into porous aggregates.** Relatório Técnico UIR-90-009, *Strategic Highway Research Program (SHRP)*, 1990.

LEINZ, V. **Geologia Geral.** Editora Companhia Editora Nacional, 15ª ed., São Paulo, 2003.

MACIEL FILHO, C. L. **Introdução à geologia de engenharia.** Editora UFSM, 3ª ed. Santa Maria: RS, 2008.

MALLICK, R. B., BROWN, E. R. **Development of a Method for Early Prediction of the Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Test.** *Transportation Research Record No. 1654, Transportation Research Board, National Research Council*, Washington, D. C., 1999.

MAHMOUD, E. **Development of Experimental Methods for the Evaluation of Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion, and Breakage.** Dissertação de Mestrado. *Texas A&M University*, College Station, TX. 2005.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de misturas asfálticas; efeito da compactação por impacto e giratória.** Tese de Doutorado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 640 p., 2015.

MENEGAT, R.; PORTO, M., L.; CARRARO, C., C.; FERNANDES, L., A., D. **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS, 1998.

NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY - NCAT. **Asphalt Content Tester Operation Manual and Parts List Series 1087. Revision G. Software**. Barnstead Thermolyne Corporation, Dubuque, Iowa, 2000.

OLIVEIRA, A. M. dos S., BRITO, A. N. S. de. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, 1998.

NOGUEIRA, M. L. **Avaliação do controle de qualidade de misturas asfálticas e análise do reflexo do nível de qualidade no desempenho dos revestimentos asfálticos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PEATE, D. W., HAWKESWORTH, C. J., MANTOVANI, M. S. M. **Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): Classification of magma types and their spatial distribution**. Bull. Volcanol., Napoli, 1992.

PINHEIRO, R. J. B. **Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000, 240p.

PROWELL, B. D. **Evaluation of infrared ignition furnace for determination of asphalt content**. NCAT Report 02-05. National Center for Asphalt Technology, Auburn University 2002.

PROWELL, B. D., CARTER, C. B. **Evaluation of the effect on aggregate properties of samples extracted using the ignition furnace**. Virginia Department of Transportation and The University of Virginia. Charlottesville, Virginia, 2000.

PROWELL, B. D., HURLEY, G. C. **Refinement of the hot mix asphalt ignition method for high loss aggregates**. NCAT Report 05-05. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, AL, 2005.

PROWELL, B. D., YOUTCHEFF, J. **Effect of Lime on Ignition Furnace Calibration**. NCAT Report 05-05. Transportation Research Record 1712, Virginia AL, 2009.

ROGERS, C. **Canadian Experience with the Micro-Deval Test for Aggregates**. *Advances in Aggregates and Armourstone Evaluation* 13, 139-147. 1998.

ROBERTS, F. L., KANDHAL, P. S., BROWN, E. R. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction**. NAPA Research and Education Foundation, National Center for Asphalt Technology - NCAT, Lanham, Maryland, USA, 1996.

ROISENBERG, A., MARQUES, J. C., BACHI, F. A., FRANTZ, J. C. **Geologia da Folha Gravataí**. Programa Geologia do Brasil. Levantamentos Geológicos Básicos. Brasília, 2008.

ROSSATO, F. P., PEREIRA, D. S., SPECHT, L. P., PINHEIRO, R. J. B., CERVO, T. C., ECHEVERRIA, J. A., MATTOS, R. F.. **Análise de dispersão de resultados do controle de teor de ligante de misturas asfálticas a partir do Rotarex**. 43º RAPv e 17º ENACOR. Maceió, AL, 2014. 12p.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2004.

TAIRA, C., FURLAN, A. P., FABBRI, G. T. P. **Avaliação do efeito do asfalto modificado com polímero nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas**. Congresso de pesquisa e ensino em transportes XVII ANPET. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

VIERO, A. C. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. CPRM, 250 p. Porto Alegre, RS, 2010.

TOMAZELLI, L. J., VILLWOCK, J. A. **Geologia Costeira do Rio Grande do Sul**. Notas Técnicas, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, UFRGS. Porto Alegre, 1995.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. IARC Monographs On The Evaluation Of Carcinogenic Risks To Humans: Volume 47: Some Organic Solvents, Resin Monomers and Related Compounds, Pigments and Occupational Exposures in Paint Manufacture and Painting. IARC Press. International Agency For Research On Cancer - IARC. Lyon, França, 1989.

_____. **Guidelines for indoor air quality: Selected pollutants**. Geneva, Switzerland, 2010.

WU, Y., PARKER, F., KANDHAL P. **Aggregate Toughness/Abrasion Resistance and Durability/Soundness Tests Related to Asphalt Concrete Performance in 82 Pavements**. *Transportation Research Record 1638, Transportation Research Board, Washington, DC, 85-93. 1998.*

YU, L. **Determination of Asphalt Content and Aggregate Gradation of HMA by Ignition Heating**. Tese de mestrado, Auburn University, Auburn, Alabama, 1992.