

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE
TRANSPORTES (PETRAN)

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS CONFECCIONADAS COM AGREGADOS
SINTÉTICOS DE ARGILA CALCINADA QUANTO A
DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Fábio Roberto Garcia Nunes

Dissertação submetida ao
Programa de Mestrado em
Engenharia de Transportes da
Universidade federal do Ceará,
como parte dos requisitos para
a obtenção do título de Mestre
em Ciências (MSc.) em
Engenharia de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares

Fortaleza
2006

FICHA CATALOGRÁFICA

NUNES, FABIO ROBERTO GARCIA

Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Confeccionadas Com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada Quanto a Deformação Permanente. Fortaleza, 2006.

XX, 203 fl., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

1. Agregados de Argila (ASAC)
3. Viscoplasticidade

2. Região Amazônica
4. Drucker Prager

CDD 388

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NUNES, F. R. G. (2006). Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Confeccionadas Com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada Quanto a Deformação Permanente. Dissertação de Mestrado – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 203 fl.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Fabio Roberto Garcia Nunes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Confeccionadas Com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada Quanto a Deformação Permanente.

Mestre / 2006

É concedida à Universidade Federal do Ceará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Fabio Roberto Garcia Nunes

Rua Belgrado, Numero 20, Quadra 47, Cj. Campos Elíseos – Manaus/AM

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS CONFECCIONADAS
COM AGREGADOS SINTÉTICOS DE ARGILA CALCINADA QUANTO A
DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Fabio Roberto Garcia Nunes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE
TRANSPORTES (PETRAN), DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC), COMO
PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS
(M.Sc.) EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Aprovado por:

Prof^o Jorge Barbosa Soares, Ph.D.
(Orientador – UFC)

Prof^a Suelly Helena de Araújo Barroso, D.Eng.
(Examinadora Interna – UFC)

Prof^a Consuelo Alves da Frota, D.Sc.
(Examinadora Externa – UFAM)

Prof^o Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho, D.Sc.
(Examinador Externo – UFPE)

FORTALEZA, CE – BRASIL
OUTUBRO – 2006

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Raimunda Garcia, à professora Consuelo Alves da Frota e a todos que me ajudaram em mais essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela oportunidade de estudar e pelas realizações profissionais e pessoais.

À minha mãe Raimunda Conceição da Silva Garcia, que sempre me colocou para estudar e me incentivou a crescer, tanto pessoalmente quanto profissionalmente.

Ao professor Jorge Barbosa Soares, que me orientou e sempre foi muito paciente principalmente nos erros de formato e de português desta dissertação.

Aos meus amigos de laboratório Thiago Botelho e Joabe Araújo que foram de fundamental importância no início deste trabalho.

À professora Consuelo Alves da Frota, pelo incentivo dado no decorrer do trabalho principalmente nos momentos que precederam a defesa.

A um grande amigo que fiz durante o curso de mestrado, o engenheiro civil Luiz Antonio Santana que sempre me ajudou discutindo assuntos de grande relevância para a minha vida.

Ao meu grande amigo Cleudinei Lopes da Silva, por te me ajudado bastante a respeito da preparação e confecção de agregados sintéticos de argila calcinada.

Ao meu grande amigo Flávio Vasconcelos de Souza, pela força e incentivo dado no decorrer do trabalho.

Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN / UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (MSc.) em Engenharia de Transportes.

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS CONFECCIONADAS COM AGREGADOS SINTÉTICOS DE ARGILA CALCINADA QUANTO A DEFORMAÇÃO PERMANENTE.

Fabio Roberto Garcia Nunes

Outubro / 2006

Orientador: Jorge Barbosa Soares

Esta dissertação é centrada na obtenção de parâmetros que governam o processo de deformação permanente em misturas asfálticas, especificamente misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada (ASAC's). Para tanto foi utilizado um modelo viscoplástico de dano contínuo, que leva em conta diversos fatores que influenciam o processo de deformação permanente a altas temperaturas nestes materiais. Dentre eles a dependência da taxa de carregamento ou deslocamento, dependência da pressão confinante, da dilatação, da fricção entre os agregados, do intertravamento entre os agregados e do dano. O modelo é baseado na teoria de viscoplasticidade de Perzyna com uma função de fluência de Drucker-Prager modificada para levar em conta o efeito do dano. O modelo foi utilizado para descrever o comportamento mecânico de quatro misturas asfálticas confeccionadas com ASAC obtido a partir de três localidades distintas do estado do Amazonas. Os ensaios foram realizados de forma a se obter sistematicamente os parâmetros do modelo e as leis de evolução de endurecimento e amolecimento que governam o comportamento das misturas. Os ensaios consistiram em uma série de ensaios triaxiais de compressão a três taxas de deslocamento e três pressões confinantes. Duas taxas de deslocamento foram utilizadas na obtenção dos parâmetros do modelo, enquanto a terceira foi utilizada para se verificar os parâmetros obtidos. O modelo existente testado mostrou potencial de capturar os resultados experimentais de forma satisfatória.

Palavras-Chaves: Agregados Sintéticos de Argila; Viscoplasticidade; Região Amazônica.

Abstract of Thesis submitted to PETRAN / UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.) in Transportation Engineering.

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF ASPHALT MIXES MADE WITH SYNTHETIC CLAY AGGREGATE AS THE PERMANENT DEFORMATION.

Fabio Roberto Garcia Nunes

Outubro / 2006

Supervisor: Jorge Barbosa Soares

This dissertation is focused in obtaining parameters to describe the process of permanent deformation in asphalt mixtures, specifically asphalt mixtures containing some synthetic clay aggregate (SCA's). An existing viscoplastic continuum damage model was used. The model takes into account several factors that influence the process of permanent deformation at high temperatures in these materials. Among them, the load or displacement rate dependency, confining pressure dependency, dilation, aggregate friction, aggregate interlocking and damage. The model is based on Perzyna's theory of viscoplasticity with Drucker-Prager yield function modified to account the effect of damage. The model was used to describe the mechanical behavior of four asphalt mixtures made with SCA obtained from three different places from the state of Amazonas. The experiment was performed to systematically determine the model parameters and the evolution laws that describe asphalt mixes hardening and softening. The experiment consisted of a set of compressive triaxial strength tests conducted at three displacement rates and three confining pressures. Two displacement rates were used for obtaining the model parameters while a third rate was used to verify the obtained parameters. The existing model has shown potential to, satisfactorily capture the experimental results.

Keywords: Clay Aggregates ; Viscoplasticity; Amazon Region.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 PROBLEMA DA PESQUISA.....	3
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivo Geral.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2	7
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS DE ARGILA EM PAVIMENTAÇÃO.....	7
2.2 APROXIMAÇÕES MECANÍSTICAS PARA MODELAR O COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	11
2.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM PLASTICIDADE.....	14
2.3.1 Superfície de Fluência de Drucker-Prager	15
2.3.2 Leis de Fluxo Associativas e Não Associativas.....	17
2.3.3 Endurecimento e Amolecimento.....	17
2.4 MODELO VISCOPLÁSTICO CONSIDERANDO O DESENVOLVIMENTO DE DANO PARA MISTURAS ASFÁLTICAS.....	18
2.4.1 Mecanismo de Deformação Permanente.....	18
2.4.2 Modelo Viscoplastico com Dano	19
2.4.2.1 Dano	25
2.4.3 Função Potencial	27
2.5 TENSÃO E DEFORMAÇÃO EFETIVA.....	29
2.6 PARÂMETROS DO MODELO E LEIS DE EVOLUÇÃO	31
2.6.1 Parâmetro de Endurecimento (κ)	31
2.6.2 Parâmetro de Dano (ξ)	32
2.7 ESTUDO PARAMÉTRICO DO MODELO	35
CAPÍTULO 3	41
CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	41
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE UTILIZADO NAS MISTURAS ASFÁLTICAS	41
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA PARA FINS DE CALCINAÇÃO	45

3.2.1	Coleta das Amostras.....	49
3.2.2	Verificação da potencialidade à calcinação	52
3.2.2.1	Análise Granulométrica.....	54
3.2.2.2	Limites de Atterberg.....	57
3.2.2.3	Seleção expedita pelo Processo de Fervura – Ensaio de Autoclave.....	57
3.2.2.4	Perda de Massa após Fervura	58
3.2.2.5	Abrasão <i>Los Angeles</i>	59
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS ASAC's PARA UTILIZAÇÃO NAS MISTURAS ASFÁLTICAS	59
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO SEIXO UTILIZADO NAS MISTURAS ASFÁLTICAS	61
3.5	CARACTERIZAÇÃO DA AREIA UTILIZADA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS	63
3.6	CARACTERIZAÇÃO DO FILER UTILIZADO NAS MISTURAS ASFÁLTICAS	65
CAPÍTULO 4	67
DOSAGENS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	67
4.1	MISTURAS UTILIZANDO AGREGADOS SINTÉTICOS DE SOLOS ARGILOSOS TÍPICOS DA BR 319.....	75
4.1.1	Enquadramento das Misturas.....	75
4.1.2	Determinação dos Teores de Asfalto e Parâmetros Volumétricos.....	77
4.2	MISTURAS UTILIZANDO AGREGADO SINTÉTICO DE SOLO ARGILOSO DE MANAUS.....	80
4.2.1	Enquadramento das Misturas.....	80
4.2.2	Determinação dos Teores de Asfalto e Índices Físicos.....	82
4.3	MISTURAS UTILIZANDO AGREGADO SINTÉTICO DE SOLO ARGILOSO DE URUCU	86
4.3.1	Enquadramento das Misturas.....	86
4.3.2	Determinação dos Teores de Asfalto e Índices Físicos.....	88
4.4	MISTURA TIPO CONCRETO ASFÁLTICO PADRÃO.....	91
4.5	DISCUSSÃO QUANTO AOS PARÂMETROS FÍSICOS DAS MISTURAS	93
CAPÍTULO 5	95
PROGRAMA EXPERIMENTAL E ANÁLISE DOS RESULTADOS	95
5.1	DESCRIÇÃO DO ENSAIO	95
5.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	97
5.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	102
5.3.1	Relação entre os parâmetros do modelo e as propriedades do material	104

CAPÍTULO 6	117
VIABILIDADE ECONÔMICA.....	117
CAPÍTULO 7	126
CONCLUSÕES.....	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
APÊNDICE A.....	136
APÊNDICE B.....	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1: Representação esquemática das deformações nas misturas asfálticas	11
Figura 2. 2: Diagrama tridimensional da superfície de fluência de Drucker-Prager	16
Figura 2. 3: Diagrama esquemático da superfície de fluência para o modelo de Drucker-Prager.	23
Figura 2. 4: Superfícies potencial e de fluência (DESSOUKY, 2005)	27
Figura 2. 5: Efeito do parâmetro de endurecimento κ	35
Figura 2. 6: Efeito do parâmetro α	36
Figura 2. 7: Efeito do parâmetro ξ	37
Figura 2. 8: Efeito do parâmetro Γ	38
Figura 2. 9: Efeito do parâmetro N	39
Figura 2. 10: Efeito da taxa de deslocamento	40
Figura 2. 11: Efeito da pressão confinante	40
Figura 3. 1: Manaus – Revestimento danificado.	46
Figura 3. 2: BR 319 / km13 – Revestimento sendo recuperado.	47
Figura 3. 3: BR 319 / km 23 – Trecho com erosão	47
Figura 3. 4: BR 319 / km 150 – Revestimento deteriorado.	48
Figura 3. 5: BR 319 / km 178 – Ponte de madeira deteriorada	48
Figura 3. 6: BR 319 / km 200 – Revestimento trincado.	49
Figura 3. 7: Província de Urucu - AM – Revestimento comprometido	49
Figura 3. 8: Amostra MAO	50
Figura 3. 9: Amostra PUC.	51
Figura 3. 10: Amostra BR 08	51
Figura 3. 11: Amostra BR 14	52
Figura 3. 12: Argila em processo de homogeneização.	53
Figura 3. 13: Argila homogeneizada	53
Figura 3. 14: Argila sendo cortada através de telas.	54
Figura 3. 15: ASAC produzido	54
Figura 3. 16: Resumo das análises granulométricas	55
Figura 3. 17: Curvas granulométricas – Amostras de argila natural	56
Figura 3. 18: Granulometria dos ASAC's	60
Figura 3. 19: Curva granulométrica - seixo rolado	62
Figura 3. 20: Curva granulométrica - areia	64
Figura 3. 21: Curva granulométrica - Cimento Portland.	66
Figura 4. 1: Mistura sendo colocada no molde cilíndrico	70
Figura 4. 2: Mistura solta no molde	70
Figura 4. 3: Processo de compactação por impacto (75 golpes)	71
Figura 4. 4: Mistura compactada dimensões 105mm × 62mm	71
Figura 4. 5: Potencial de absorção de ligante em agregados porosos	73
Figura 4. 6: Mistura solta sendo pesada ao ar	74
Figura 4. 7: Processo de agitação mecânica e aplicação de vácuo.	74
Figura 4. 8: Curvas granulométricas das misturas BR 08 e BR 14 – <i>Superpave</i>	76
Figura 4. 9: Densidade máxima × teor de ligante das misturas BR 08 e BR 14	77

Figura 4. 10: Volume de vazios \times teor de ligante das misturas BR 08 e BR 14.....	78
Figura 4. 11: Relação betume-vazios \times teor de ligante das misturas BR 08 e BR 14.	79
Figura 4. 12: Curva granulométrica da mistura MAO.....	82
Figura 4. 13: Densidade máxima medida \times teor de ligante da mistura MAO.	83
Figura 4. 14: Volume de vazios \times teor de ligante da mistura MAO.....	84
Figura 4. 15: Relação betume-vazios \times teor de ligante da mistura MAO.....	85
Figura 4. 16: Curva granulométrica da mistura PUC.	88
Figura 4. 17: Densidade máxima medida \times teor de ligante da mistura PUC.....	89
Figura 4. 18: Volume de vazios \times teor de ligante da mistura PUC.	90
Figura 4. 19: Relação betume-vazios \times teor de ligante da mistura PUC.	91
Figura 4. 20: Curva granulométrica da mistura SEIXO.	92
Figura 5. 1: Equipamento utilizado para realização dos ensaios triaxiais.	95
Figura 5. 2: Câmara utilizada nos ensaios.	96
Figura 5. 3: Pistão usado na aplicação do deslocamento.	96
Figura 5. 4: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s sem pressão confinante.....	97
Figura 5. 5: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s e pressão confinante de 100kPa.....	98
Figura 5. 6: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s e pressão confinante de 200kPa.....	98
Figura 5. 7: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s sem pressão confinante.....	99
Figura 5. 8: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s e pressão confinante de 100kPa.....	99
Figura 5. 9: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s e pressão confinante de 200kPa.....	100
Figura 5. 10: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,0032 mm/s sem pressão confinante.....	100
Figura 5. 11: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s e pressão confinante de 100kPa.....	101
Figura 5. 12: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s e pressão confinante de 200kPa.....	101
Figura 5. 13: Esquema de uma curva tensão \times deformação (DESSOUKY, 2005).	103
Figura 5. 14: Parâmetro Γ para as misturas confeccionadas.....	104
Figura 5. 15: Parâmetro N para as misturas confeccionadas.	105
Figura 5. 16: Superfície de fluência inicial.	106
Figura 5. 17: Modelo \times experimento ASAC BR 08 / Tensão de fluência.	107
Figura 5. 18: Modelo \times experimento ASAC BR 14 – Tensão de fluência.	108
Figura 5. 19: Modelo \times experimento ASAC MAO – Tensão de fluência.	108
Figura 5. 20: Modelo \times experimento ASAC PUC – Tensão de fluência.....	109
Figura 5. 21: Modelo \times experimento ASAC SEIXO – Tensão de fluência.....	109
Figura 5. 22: Evolução do parâmetro κ para as misturas.	110
Figura 5. 23: Evolução do dano.	111
Figura 5. 24: Modelo \times experimento para a taxa de 0,0032mm/s – ASAC BR 08.	112
Figura 5. 25: Modelo \times experimento para a taxa de 0,0032mm/s – ASAC BR 14.	113

Figura 5. 26: Modelo × experimento para a taxa de 0,0032mm/s – ASAC MAO.	113
Figura 5. 27: Modelo × experimento para a taxa de 0,0032mm/s – ASAC PUC.....	114
Figura 5. 28: Modelo × experimento para a taxa de 0,0032mm/s – SEIXO.....	114
Figura 5. 29: Resposta do modelo à tensão constante.	115
Figura 6. 1: Análise espacial dos dados e delimitação das áreas de exclusão.	118
Figura 6. 2: Mapa com afloramentos de argila.	119
Figura 6. 3: Mapa com afloramentos de argila e margens de proteção.	120
Figura B. 1: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s – BR 14...	145
Figura B. 2: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s – BR 14.	149
Figura B. 3: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s – BR 14153	
Figura B. 4: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s – BR 08...	157
Figura B. 5: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s – BR 08.	161
Figura B. 6: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s – BR 08165	
Figura B. 7: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s – MAO....	169
Figura B. 8: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s – MAO..	173
Figura B. 9: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s – MAO	177
Figura B. 10: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s – PUC ...	181
Figura B. 11: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s – PUC .	185
Figura B. 12: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s – PUC	189

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1: Sistema de Classificação de Agregados Sintéticos (Texas Highway Department, 1969).	7
Tabela 3. 1: Resultado do DSR - Amostra envelhecida, RTFO e PAV.....	43
Tabela 3. 2: Resultado de ensaio de DSR - Amostra envelhecida no RTFO e não envelhecida.	44
Tabela 3. 3: Características do cimento asfáltico de petróleo (CAP).	44
Tabela 3. 4: Localização geográfica das amostras.....	50
Tabela 3. 5: Resultado das análises granulométricas.....	55
Tabela 3. 6: Fração de solos finos nas amostras.	56
Tabela 3. 7: Limites de Atterberg.	57
Tabela 3. 8: Autoclave.	58
Tabela 3. 9: Perda de massa após fervura.	58
Tabela 3. 10: Abrasão Los Angeles.	59
Tabela 3. 11: Características dos ASAC's.....	60
Tabela 3. 12: Características do seixo rolado.	61
Tabela 3. 13: Características da areia.	63
Tabela 3. 14: Especificação do DNER para composição granulométrica de agregado miúdo em misturas.....	64
Tabela 3. 15: Características cimento Portland.....	65
Tabela 3. 16: Especificação do DNER para composição granulométrica de material de enchimento em misturas asfálticas.....	66
Tabela 4. 1: Pontos de controle e zona de restrição para diâmetro máximo de 9,50mm..	69
Tabela 4. 2: Parâmetros de dosagem conforme norma DNER ES 313/97.	69
Tabela 4. 3: Composição das misturas com as amostras 08 e 14 colhidas na BR 319.	75
Tabela 4. 4: Enquadramento das misturas BR 08 e BR 14 na especificação Superpave..	75
Tabela 4. 5: Variação da densidade máxima em relação ao teor de ligante nas misturas BR 08 e BR 14.	77
Tabela 4. 6: Teor de asfalto e índices físicos das misturas BR 08 e BR 14.....	78
Tabela 4. 7: Composição das misturas com a amostra de solo argiloso de Manaus.....	80
Tabela 4. 8: Enquadramento da mistura MAO nas especificações Superpave.....	81
Tabela 4. 9: Variação da densidade máxima em relação ao teor de ligante na mistura MAO.	83
Tabela 4. 10: Teor de asfalto e índices físicos da mistura MAO.....	84
Tabela 4. 11: Composição das misturas com a amostra de solo argiloso de Urucu.	86
Tabela 4. 12: Enquadramento da mistura PUC nas especificações Superpave.	87
Tabela 4. 13: Variação da densidade máxima em relação ao teor de ligante na mistura PUC.....	89
Tabela 4. 14: Índices físicos da mistura PUC.	90
Tabela 4. 15: Composição da mistura padrão utilizado.....	91
Tabela 4. 16: Teor de asfalto e índices físicos da mistura SEIXO.	92
Tabela 4. 17: Índices físicos para os teores ótimos das misturas.....	94

Tabela 6. 1: Dimensões das áreas identificadas.....	121
Tabela 6. 2: Tabela com os custos de extração e transporte de argila em estado natural.	123
Tabela 6. 3: Custos com armazenamento e produção.....	123
Tabela 6. 4: Custos com pessoal para operar a usina.....	124
Tabela 6. 5: Custo com o gás natural.....	124
Tabela 6. 6: Custos com recuperação da jazida utilizada.	124
Tabela 6. 7: Custo com suporte de vida.....	125

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No Brasil, os pavimentos rodoviários em geral encontram-se com elevado grau de deterioração, sendo que estas ocorrem precocemente, muito antes de completar o tempo determinado em projeto (CNT, 2006). Tais problemas se devem principalmente ao acúmulo excessivo de deformações permanentes e ao trincamento por fadiga. Estes fenômenos, entre outros fatores, devem-se ao comportamento viscoso dos ligantes asfálticos e à concentração de tensões na interface agregado-ligante, respectivamente. Se por um lado, a redução da fração volumétrica de ligante asfáltico na mistura diminui a susceptibilidade às deformações permanentes, o aumento na fração volumétrica de agregados pétreos eleva a susceptibilidade ao trincamento.

De um modo geral, as misturas que apresentam maior quantidade de material de granulometria fina (ex. Areia Asfalto Usinado a Quente – AAUQ), necessitam de maior teor de ligante asfáltico, sendo estas mais susceptíveis a desenvolver deformações permanentes.

A Região Norte, especialmente a região amazônica, é desfavorecida de materiais pétreos para uso em pavimentação. Assim sendo, o principal tipo de mistura asfáltica usado na construção de pavimentos asfálticos rodoviários nesta região tem sido a AAUQ. O uso de tais misturas, como comentado anteriormente, tem proporcionado acúmulo excessivo de deformações permanentes nos pavimentos asfálticos, o que reduz de forma considerável o conforto dos usuários das rodovias, além de aumentar os custos com manutenção dos veículos.

Uma das formas encontradas para superar esse problema da escassez de material

pétreo na região é a utilização de agregados graúdos fabricados a partir da queima de argila, produzindo-se assim o chamado Agregado Sintético de Argila Calcificada (ASAC). A primeira experiência na utilização de ASAC para estabilização das camadas de pavimentos construídos na região amazônica foi conduzida pelo então Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1981), atual Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT. A argila, depois de homogeneizada era pelotizada e queimada a aproximadamente 1000 °C.

Estudos recentes mostraram que, de acordo com o método Marshall para projeto de misturas asfálticas, as misturas produzidas com o ASAC apresentam desempenho superior ao Concreto Asfáltico (CA) convencional confeccionado com seixo e ao AAUQ (FROTA *et al.*, 2003).

Por ser um material com propriedades ainda pouco conhecidas se faz necessário analisar as misturas asfálticas confeccionadas com ASAC procurando relacionar seus constituintes com os modos de falha observados nos pavimentos asfálticos da região, principalmente a deformação permanente.

Em geral, os estudos desenvolvidos adotam duas formas para modelar o processo de deformação permanente em misturas asfálticas: modelagem do contínuo e modelagem micro-mecânica.

Os modelos contínuos apresentam resultados satisfatórios e são de fácil implementação em códigos de elementos finitos, podendo assim prever o comportamento mecânico da mistura asfáltica sob diferentes condições de contorno procurando simular as condições de campo. No entanto, tais modelos não levam em conta o efeito da microestrutura no comportamento macroestrutural do material (LEE e KIM, 1998).

Os modelos micro-mecânicos levam em consideração a microestrutura das misturas asfálticas, no entanto, possuem precisão limitada para modelar a complexa geometria das misturas asfálticas em elementos finitos, além de consumirem muito tempo

computacional em suas análises, limitando assim sua aplicação como modelos de previsão de desempenho, quando se considera o atual estágio de desenvolvimento dos computadores (SOUZA, 2005).

1.2 PROBLEMA DA PESQUISA

A região amazônica, em sua grande parte, constitui-se geologicamente por argilitos, siltitos e arenitos finos a médios, com intercalações de linhitos, eventualmente com intercalações de camadas de gipsita e carbonatos.

Desde o terciário, submeteram-se tais rochas a um intenso intemperismo laterítico, o que modificou suas principais características geotécnicas, além de originar uma extensa cobertura de solo residual sobre as referidas rochas, em prejuízo da extração das mesmas como fontes de material pétreo. As assinaladas características geológicas levam à carência de materiais apropriados (agregados) para a construção dos pavimentos. Portanto, a região necessita de uma alternativa viável para suprir a necessidade de agregados para a construção de pavimentos e obras civis.

O estudo dos Agregados Sintéticos de Argila Calcinada (ASAC) se justifica pelo fato desse material se constituir, por vezes, na única solução de agregado graúdo para a construção civil e de rodovias em regiões longínquas e com baixa navegabilidade dos rios na região, na época do verão.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento mecânico das misturas asfálticas confeccionadas com ASAC como agregado graúdo, analisando parâmetros que refletem o processo de deformação permanente nesses materiais que posteriormente poderão ser utilizados como parâmetros de entrada para a análise de pavimentos asfálticos contendo esse tipo de

mistura. Observa-se que o objetivo da presente pesquisa no que diz respeito à caracterização mecânica das misturas analisadas ficará restrito a ensaios triaxiais estáticos, ensaios estes até então não realizados na caracterização de misturas no país, pelo menos do conhecimento do autor. Outros parâmetros mecânicos mais convencionalmente usados no Brasil como estabilidade, resistência a tração, módulo de resiliência, vida de fadiga, creep, são no momento objeto de estudo do mesmo grupo de pesquisa do autor na UFAM.

1.3.2 Objetivos Específicos

Têm-se como objetivos específicos:

- a) Caracterizar quanto aos seus potenciais de calcinação as argilas encontradas em três locais do estado do Amazonas, quais sejam: (1) na capital Manaus; (2) provenientes da BR 319; (3) da Província Petrolífera de Urucu.
- b) Caracterizar as misturas asfálticas confeccionadas com ASAC, utilizando a teoria da viscoplasticidade de forma a analisar parâmetros ligados ao processo de deformação permanente nessas misturas;
- c) Avaliar o potencial de desenvolvimento de deformações permanentes das misturas confeccionadas com ASAC e comparar com a mistura padrão utilizada no estado do Amazonas;
- d) Estudar a viabilidade econômica da utilização de ASAC nos pavimentos da região amazônica.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O conteúdo restando do trabalho está distribuído da seguinte forma:

No CAPÍTULO 2, apresenta-se à revisão bibliográfica contendo experiências da utilização de ASAC na pavimentação, o comportamento mecânico das misturas asfálticas e o modelo viscoplástico desenvolvido na Texas A&M University (THASHMAM, 2003; DESSOUKY, 2005), que será utilizado na caracterização das misturas.

No CAPÍTULO 3, apresenta-se os resultados de caracterização dos materiais utilizados no trabalho e ainda o potencial de calcinação das quatro amostras de argila usadas para a fabricação do ASAC.

No CAPÍTULO 4, apresenta-se os resultados das dosagens das misturas asfálticas confeccionadas com ASAC e ainda a dosagem da mistura padrão confeccionada com seixo.

No CAPÍTULO 5, apresenta-se os resultados experimentais para as misturas asfálticas confeccionadas e ainda uma comparação dos parâmetros obtidos para cada mistura através de regressão.

No CAPÍTULO 6, apresenta-se um breve estudo de viabilidade econômica comparando-se o custo de 1m^3 de ASAC com o custo de 1m^3 de seixo.

No CAPÍTULO 7, apresenta-se as conclusões do trabalho, onde, de forma sucinta, são mostradas as principais considerações do mesmo e as recomendações para trabalhos futuros.

No APÊNDICE A, apresenta-se a dedução da equação analítica do modelo para o estado triaxial de tensões.

No APÊNDICE B, apresenta-se as planilhas do Excel utilizadas na obtenção dos parâmetros do modelo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS DE ARGILA EM PAVIMENTAÇÃO

A tecnologia de emprego de agregados de argila em pavimentação rodoviária desenvolveu-se nos EUA na década de 1960, principalmente nos estados do Texas e da Luisiana, regiões onde a carência de agregados naturais viabilizou economicamente o seu uso. Esta experiência culminou em 1969 com a publicação pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Texas de um relatório especial intitulado *A Recommended Synthetic Coarse Aggregate Classification System*, estabelecendo um sistema de classificação de agregados de argila utilizado até hoje. A Tabela 2.1 apresenta esta classificação.

Tabela 2. 1: Sistema de Classificação de Agregados Sintéticos (Texas Highway Department, 1969).

CLASSE	GRUPO	Massa Específica Aparente (ton/m ³)		Saturação em 100 minutos	Congel. e Degelo	Desgaste após fervura	Abrasão <i>Los Angeles</i>
		Mín.	Máx.	% máx.	Perda %	% máx.	% máx.
I Argila Expandida	A	0,88	0,56	15	7	6	35
	B	0,88	0,56	20	15	6	40
	C	0,88	0,56	-	-	10	45
II Argila Não Expandida	A	-	0,88	-	7	6	35
	B	-	0,88	-	15	6	40
	C	-	0,88	-	-	10	35

Os agregados de argila, segundo esse sistema, estão divididos em duas classes, cada uma com três grupos A, B e C, organizados em ordem decrescente de qualidade. Deve-se notar que a classe I corresponde aos agregados de argila expandida, enquanto que a classe II corresponde aos agregados de argila não expandida (calcinação). Os parâmetros numéricos indicados na Tabela 2.1 referem-se aos seguintes ensaios:

- Determinação da massa específica aparente: esse ensaio é feito com agregados passando na peneira de 1/2" (12,7mm) e retidos na peneira nº 4 (4,75mm). A amostra deve também apresentar 30 a 70% de grãos retidos na peneira de 3/8" (9,53mm);
- Determinação da saturação com 100 minutos: esse ensaio não é necessário para as camadas de pavimentos tratadas com material betuminoso. Porém, tal ensaio é decisivo para a seleção de agregados para uso em estruturas e pavimentos de concreto de cimento Portland em climas frios, porque se chegou à conclusão de que quando a saturação dos agregados graúdos é maior do que 25%, durante a execução das obras, a resistência do concreto ao congelamento e degelo decresce bastante. Para a determinação da saturação com 100 minutos dos agregados graúdos, há a necessidade de se determinar a densidade absoluta, por intermédio de picnômetro de pressão (1200psi), bem como a absorção de água com um tempo de 100 minutos;
- Determinação do desgaste por congelamento e degelo: esse ensaio não é necessário para regiões climáticas onde o fenômeno de congelamento não ocorre;
- Determinação do desgaste na água após fervura: esse ensaio é o mais decisivo na seleção e classificação dos agregados de argila, podendo, até mesmo, prescindir do ensaio de desgaste de abrasão *Los Angeles*. A aparelhagem usada é a comum de um laboratório de solos, acrescido somente de uma panela de pressão de uso doméstico. O teste consiste em se ferver os agregados a serem ensaiados em uma panela de pressão, medindo-se depois a porcentagem de desgaste dos mesmos após agitação com água em um agitador de peneiras;

- Determinação do desgaste por abrasão *Los Angeles*: esse ensaio, tal como é executado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Texas, compreende pequenas modificações do ensaio padronizado (Método DNER ME-35-64 e ASTM C-131) que visaram adaptá-lo para o caso dos agregados leves. O peso dos agregados a serem ensaiados foi reduzido de modo a se evitar um volume excessivo de materiais dentro da máquina *Los Angeles*. O peso correto é calculado a partir da massa específica aparente do material a ensaiar e da massa específica aparente dos agregados pétreos convencionais, admitida igual a $1,55 \text{ ton/m}^3$;

A experiência brasileira no emprego de agregados de argila em pavimentação rodoviária é bastante limitada, o mesmo ocorrendo no meio acadêmico onde são poucos os trabalhos de pesquisa até hoje desenvolvidos sobre o assunto (BATISTA, 2004).

Merecem destaque os estudos desenvolvidos pelo IPR/DNER, nos anos de 1978 a 1981 (DNER, 1981), sobre a Viabilidade de Implantação da Fábrica de Argila Expandida na Região Amazônica, os trabalhos realizados pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Amazonas (FROTA *et al.*, 2003) e ainda os trabalhos realizados pelo Instituto Militar de Engenharia - IME em seu programa de mestrado (BATISTA, 2004).

Os estudos de engenharia realizados pelo IPR/DNER foram subdivididos em três setores: materiais, indústria e aplicação. O setor de materiais foi responsável pela localização e prospecções de jazidas de argila adequadas para a fabricação de agregados e execução de ensaios tecnológicos para caracterizar as ocorrências nas regiões de interesse do estudo de viabilidade. O setor de indústria foi responsável pela elaboração de anteprojeto de usinas fixas e móveis para a fabricação de agregados de argila, de maneira a atender a demanda de mercado, além de fornecer parâmetros sobre a viabilidade econômica. O setor de aplicação foi responsável pelas informações técnicas do emprego dos agregados de argila na construção civil e em pavimentos rodoviários.

O estudo de viabilidade de implantação das fábricas de agregados de argila

expandida e/ou calcinada na Região Amazônica feito na década de 70 mostrou ser viável a implantação de tais fábricas com unidades fixas em Manaus e Belém (DNER, 1981).

O Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Amazonas realizou pesquisas utilizando Agregados Sintéticos de Argila Calcinada – ASAC como agregado graúdo em misturas tipo Concreto Asfáltico com o intuito de comparar as propriedades de estabilidade e fluência Marshall obtidas, com as mesmas propriedades obtidas nas misturas convencionalmente utilizados no estado do Amazonas. Foram moldadas misturas utilizando ASAC's em varias faixas granulométricas. Os resultados mostraram que as misturas confeccionadas com ASAC são superiores as misturas confeccionadas com seixo (agregado utilizado nas misturas convencionais no estado do Amazonas) de acordo com os parâmetros de estabilidade e fluência Marshall, fato este atribuído à superfície lisa e arredondada do agregado convencional, mostrando assim menor atrito e intertravamento entre os mesmos (FROTA *et al.*, 2003).

BATISTA (2004) caracterizou misturas asfálticas confeccionadas com ASAC através de ensaios mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Modulo Resiliente e Vida de Fadiga, comparando os resultados obtidos para as misturas confeccionadas com ASAC com os resultados obtidos para Concretos Asfálticos (CA's) convencionais obtidos no estudo de PINTO (1991).

Segundo BATISTA (2004), os CA's confeccionados com ASAC apresentaram resistência à tração inferior comparados com os CA's confeccionados com agregados tradicionais do estudo de PINTO (1991). Ainda assim os resultados foram considerados satisfatórios visto que a redução apresentada na resistência à tração dos CA's confeccionados com ASAC não é significativa.

Quanto a Vida de Fadiga, BATISTA (2004) encontrou resultados inferiores para as misturas confeccionadas com ASAC quando comparadas as misturas do estudo de PINTO (1991), mas ainda assim, segundo o autor, os resultados foram considerados satisfatórios.

2.2 APROXIMAÇÕES MECANÍSTICAS PARA MODELAR O COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

As primeiras aproximações mecanísticas utilizadas nos procedimentos de dimensionamento de pavimentos foram baseadas em análises elásticas lineares em múltiplas camadas. Comumente os defeitos no pavimento como trincamento por fadiga e deformação permanente são relacionados às respostas elásticas obtidas através de relações empíricas utilizando o módulo de resiliência e as deformações elásticas no topo do subleito e no fundo do revestimento. No entanto, através dos anos, se tem notado que a resposta estrutural de misturas asfálticas é muito complexa devido a suas não-linearidades para ser capturada satisfatoriamente através de análises elásticas lineares.

SIDES *et al.* (1985) afirmam que as deformações em misturas asfálticas possuem componentes recuperáveis e irrecuperáveis podendo ser dependentes ou não do tempo. A deformação total é então decomposta em quatro componentes conforme mostrado na Figura 2.1 e indicado na equação 2.1:

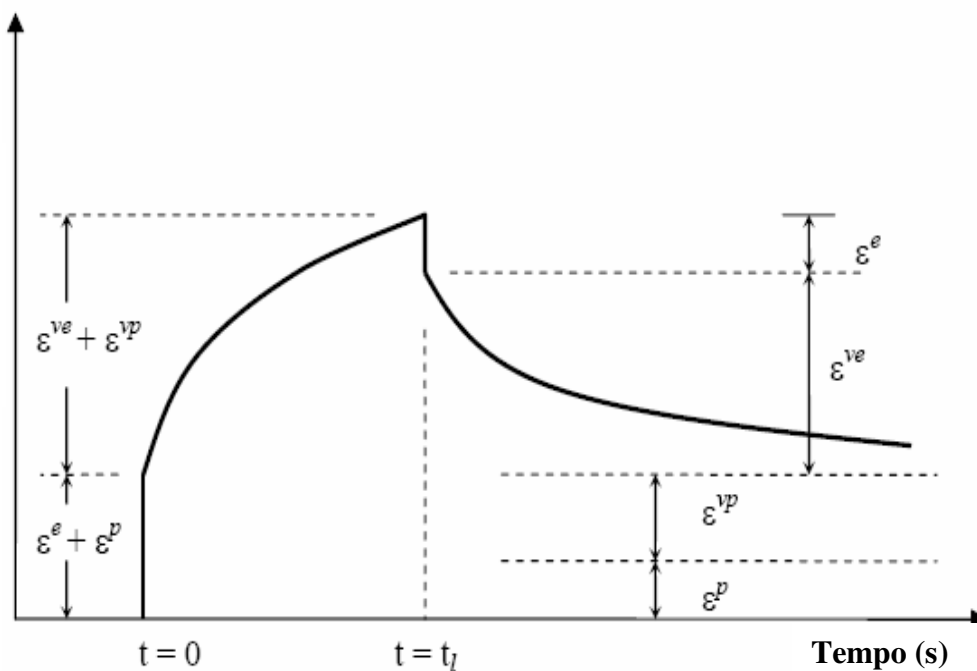


Figura 2. 1: Representação esquemática das deformações nas misturas asfálticas.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p + \boldsymbol{\varepsilon}^{ve} + \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} \quad (2.1)$$

Onde:

$\boldsymbol{\varepsilon}$ é a deformação total;

$\boldsymbol{\varepsilon}^e$ é a deformação elástica (recuperável e independente do tempo);

$\boldsymbol{\varepsilon}^{ve}$ é a deformação viscoelástica (recuperável e dependente do tempo);

$\boldsymbol{\varepsilon}^p$ é a deformação plástica (irrecuperável e independente do tempo);

$\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$ é a deformação viscoplástica (irrecuperável e dependente do tempo).

As componentes viscosas em geral são dependentes da duração do carregamento e da taxa de carregamento e descarregamento. O comportamento das misturas asfálticas pode variar de elástico até viscoelástico linear a baixas temperaturas e altas taxas de carregamento; de viscoelástico não-linear até viscoplástico a plástico a altas temperaturas e baixas taxas de carregamento.

A deformação permanente se deve ao desenvolvimento de deformações viscoplásticas e plásticas nas misturas asfálticas quando solicitadas pelo carregamento imposto pelo tráfego de veículos (TASHMAN, 2003).

Podem-se utilizar duas aproximações para modelar o comportamento estrutural de misturas asfálticas: uma aproximação contínua ou uma micro-mecânica. Na aproximação contínua, as misturas asfálticas são tratadas como um meio homogêneo e contínuo (KIM e LITTLE, 1990; LEE e KIM, 1998). Na aproximação micro-mecânica procura-se modelar as interações microestruturais da mistura como a interação entre os agregados (SOUZA, 2005).

Na aproximação contínua as misturas asfálticas são tratadas como um meio homogêneo, e as interações entre os constituintes da mistura asfáltica são consideradas de forma indireta através de propriedades globais (variáveis internas de estado).

A principal vantagem dos modelos contínuos se deve a sua simplicidade computacional podendo ser implementados em um método de elementos finitos com relativa facilidade (DESSOUKY, 2005). Uma vez que as propriedades do material em análise são obtidas, pode-se implementar simulações estáticas ou dinâmicas para previsão de comportamento estrutural de misturas asfálticas.

SEIBI *et al.* (2001) concluíram através de ensaios de compressão uniaxial e triaxial a altas taxas de carregamento e diferentes temperaturas que a dependência das misturas asfálticas a taxa de carregamento é governada principalmente pela resposta viscoplástica. Para tanto eles utilizaram a superfície de fluência de Drucker-Prager juntamente com a teoria de viscoplasticidade de Perzyna para endurecimento isotrópico e materiais sensíveis à taxa de carregamento para descrever a comportamento tensão \times deformação das misturas asfálticas.

TASHMAN (2003) desenvolveu um modelo viscoplástico microestrutural para as misturas asfálticas. O modelo leva em conta em suas respostas certas características microestruturais como orientação preferencial de partículas, início e evolução de dano, endurecimento provocado por pequenas rotações nas partículas e dilatação do material. O modelo considera ainda a anisotropia modificando o tensor de tensões através de uma função que descreve a distribuição direcional dos agregados. Evolução de dano e endurecimento são assumidos como função da deformação viscoplástica efetiva. O estudo concluiu que uma lei de fluxo não associativa é imprescindível para se modelar corretamente o comportamento quanto à dilatação do material.

Contrastando com a aproximação contínua, tem-se a aproximação micro-mecânica. Os modelos micro-mecânicos consideram a distribuição microestrutural, as propriedades de cada componente das misturas asfálticas e as interações entre os agregados e o ligante asfáltico.

Uma das principais vantagens dos modelos micro-mecânicos é a visualização por

parte do analista das interações dos constituintes do material, o que permite um melhor entendimento do comportamento do mesmo e dos fenômenos de deterioração que ocorrem na microestrutura. A partir deste entendimento, pode-se então, projetar materiais mais adequados para cada tipo de aplicação estrutural (SOUZA, 2004).

Os modelos micro-mecânicos consideram diretamente as características geométricas da microestrutura, tais como: tamanho dos agregados, evolução dos contatos e intertravamento dos mesmos. Também fornecem informações explícitas sobre a influência das mudanças microestruturais no comportamento estrutural do material quando o mesmo está se deformando. No entanto, esta aproximação ainda não é capaz de simular realisticamente a geometria da microestrutura do material, sendo válida para relacionar as propriedades microestruturais com a resposta macroestrutural do material. Entretanto, se faz necessário um longo tempo para processamento computacional, o que dificulta esta aproximação para modelos de previsão de desempenho de pavimentos.

2.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM PLASTICIDADE

Tem-se em plasticidade dois aspectos de importância: (i) o primeiro é a técnica geral utilizada para descrever as relações tensão \times deformação juntamente com leis de endurecimento/amolecimento, com o intuito de descrever o comportamento real do material; (ii) o segundo é a técnica numérica utilizada para solucionar um problema onde se tem a aplicação de cargas ou deslocamentos neste material.

A primeira tarefa então consiste em descrever adequadamente a relação tensão \times deformação do material com o intuito de descrever o seu comportamento linear e não linear. A segunda tarefa se concentra em desenvolver uma técnica numérica para a implementação da relação tensão \times deformação em um método de cálculo, como por exemplo, o método dos elementos finitos. Devido ao comportamento não linear exibido pelas misturas asfálticas, inevitavelmente a solução numérica apresentará dificuldades consideráveis. Contudo, o desenvolvimento dos computadores e as técnicas modernas de elementos finitos propiciam ferramentas poderosas para a solução de problemas não

lineares.

Segundo CHEN e HAN (1988), na plasticidade clássica os modelos apresentam três componentes principais:

- Uma função ou critério de fluência, definindo o limite do comportamento elástico para um estado geral de tensões;
- Uma lei de fluxo, que determina a magnitude dos componentes do tensor incremental de deformação plástica;
- Uma lei de endurecimento, que define o crescimento da superfície de fluência como resultado do desenvolvimento de deformações plásticas.

Cada componente será discutida com brevidade nas seções seguintes dando maior ênfase à superfície de fluência de Drucker-Prager, uma vez que esta será uma das bases deste trabalho (ABDULSHAFI e MAJIDZADEH, 1985; SEIBI *et al.*, 2001; TASHMAN, 2003; OESER e MOLLER, 2004; DESSOUKY, 2005).

2.3.1 Superfície de Fluência de Drucker-Prager

Considere uma função contínua $f(\sigma, \varepsilon, k)$, de tal modo que exista uma região no espaço de tensões que satisfaça a condição $f(\sigma, \varepsilon, k) < 0$, então esta região constitui o limite elástico. Por outro lado, a condição $f(\sigma, \varepsilon, k) = 0$ define a superfície de fluência neste espaço de tensões. A orientação desta superfície é definida pelo limite elástico que delimita seu interior (LUBLINER, 1991). A superfície de fluência pode ser escrita em função das tensões e de parâmetros de endurecimento. A Figura 2.2 mostra a superfície de fluência de Drucker-Prager, bastante conhecida e utilizada para modelar materiais granulares.

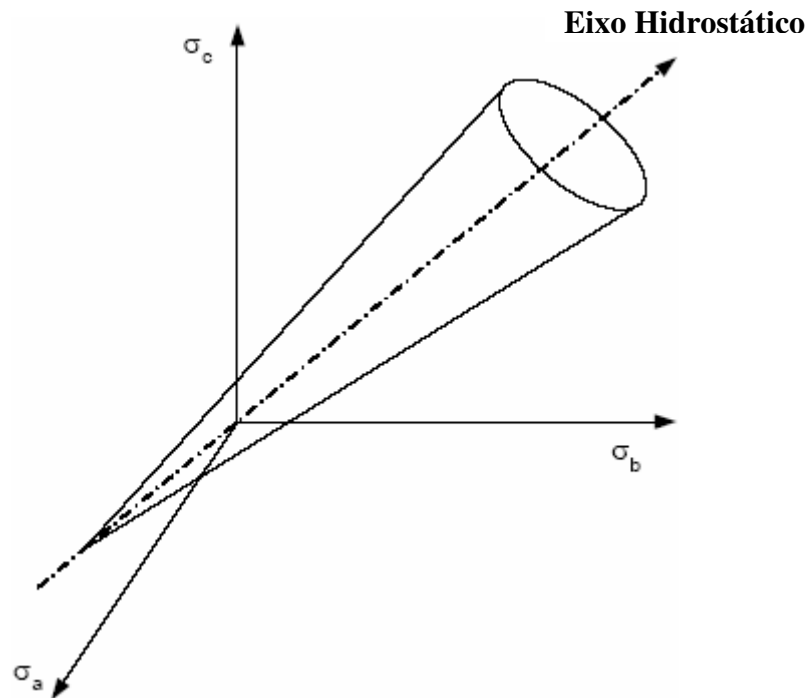


Figura 2. 2: Diagrama tridimensional da superfície de fluência de Drucker-Prager.

A superfície de fluência de Drucker-Prager pode ser expressa conforme mostra a equação 2.2.

$$f = F(J_2, I_1, \alpha) - \kappa \quad (2.2)$$

Onde:

I_1 e J_2 são o primeiro invariante de tensões e o segundo invariante do tensor deviatórico de tensões, respectivamente;

α e κ são parâmetros do material, sendo que o primeiro se refere ao potencial de fricção e o segundo reflete as propriedades de endurecimento do mesmo.

ABDULSHAFI e MAJIDZADEH (1985), SEIBI *et al.* (2001), TASHMAN (2003), OESER e MOLLER (2004) e DESSOUKY (2005), utilizaram a superfície de fluência de Drucker-Prager ou suas versões modificadas para descrever o comportamento viscoplástico de misturas asfálticas.

2.3.2 Leis de Fluxo Associativas e Não Associativas

Experimentalmente, tem-se mostrado que o uso de lei de fluxos associativas superestima o comportamento quanto a dilatação ou expansão de materiais granulares. Vários estudos têm mostrado que leis de fluxo não-associativas modelam de maneira satisfatória as variações de volume nestes materiais (ZEINKIEWICZ *et al.*, 1975; ODA e NAKAYAMA, 1989). Na resposta não-associativa, uma superfície chamada de superfície plástica potencial é associada com o fluxo de deformação. Em geral, a superfície de fluência e a superfície plástica potencial possuem formas similares e são coincidentes, verificando-se a lei de fluxo associativa. Enquanto para a lei de fluxo não-associativa as duas famílias de superfícies cruzam entre si.

2.3.3 Endurecimento e Amolecimento

Quando as tensões aplicadas nos materiais excedem a tensão de fluência ocorrem deformações plásticas. A curva tensão \times deformação resultante desde ponto de tensão em diante até o limite plástico é chamada de “curva de fluxo”. Se o corpo de prova for descarregado após a ocorrência de alguma deformação plástica, e posteriormente recarregado, uma nova e mais elevada tensão de fluência será alcançada. Pode-se dizer que o material endureceu devido à ocorrência de deformações plásticas, em um processo chamado “endurecimento”.

O amolecimento ocorre logo após a fase de endurecimento quando a rotação dos agregados e a translação entre eles é suficiente para causar trinca no ligante e nas interfaces agregados – ligante, provocando assim uma diminuição na capacidade de carga do material.

O endurecimento é um dos fenômenos mais importantes que governam o desenvolvimento de deformações plásticas nas misturas asfálticas (TASHMAN, 2003). Ocorre durante o processo de deformação plástica do material em um nível microscópico devido à formação e mudança de interações entre os seus constituintes nas interfaces agregado – agregado e agregado – ligante.

2.4 MODELO VISCOPLÁSTICO CONSIDERANDO O DESENVOLVIMENTO DE DANO PARA MISTURAS ASFÁLTICAS

2.4.1 Mecanismo de Deformação Permanente

Devido às condições climáticas do estado do Amazonas, o principal problema encontrado nos pavimentos da região é a deformação permanente que se manifesta em forma de depressões ao longo do caminhamento dos pneus. A deformação permanente ocorre geralmente próxima à superfície dos pavimentos, onde predominam tensões de cisalhamento, conforme SOUZA e WEISSMAN (1995).

Segundo TASHMAN (2003), as tensões cisalhantes produzem energia e esta é dissipada de três formas diferentes levando ao aparecimento de deformações permanentes.

1. Energia necessária para superar a resistência à fricção dos agregados unidos pelo ligante. A resistência à fricção é função da mineralogia e da aspereza do agregado, bem como, das propriedades do ligante asfáltico.
2. Energia necessária para superar o intertravamento dos agregados, sendo esta responsável pela dilatação do material. O aumento dos vazios na mistura é responsável por tal comportamento do material. Dentre os fatores que controlam o aumento dos vazios nos materiais granulares estão a pressão confinante, granulometria, angularidade e forma dos agregados. O processo de dilatação das misturas asfálticas é um dos mecanismos mais importantes a ser considerado no desenvolvimento de um modelo constitutivo válido para este material, segundo SOUZA e WEISSMAN (1995).
3. Energia necessária para superar as forças de ligamento entre ligante-ligante (coesão) e os ligamentos na interface agregado-ligante (adesão). A dissipação desta energia ocorre em forma de microtrincas no material, levando a um

amolecimento do mesmo sob cargas aplicadas, acelerando o processo de deformação permanente.

A interação dos fenômenos mencionados se manifesta na forma de endurecimento e amolecimento. O endurecimento ocorre quando a energia aplicada é suficiente para superar a fricção dos agregados ligados com asfalto e o intertravamento dos agregados, levando os mesmos a um deslizamento e rotação entre eles, tornando assim a mistura mais rígida para resistir ao carregamento. Vale ressaltar que tal energia ainda não é suficiente para superar a coesão e adesão da mistura. Por outro lado, o efeito de amolecimento começa a governar a mistura quando a energia aplicada é suficiente para superar a coesão e adesão causando microtrincas no material. Conjuntamente à dilatação, estas microtrincas ocasionam um acréscimo do volume da mistura, aumentando a tensão efetiva aplicada na parte intacta do material.

O modelo constitutivo apresentado nesta secção desenvolvido por TASHMAN (2003) e aplicado por DESSOUKY (2005) tem o objetivo de relacionar as três formas de dissipação de energia acima mencionadas com a deformação permanente desenvolvida no material. Em resumo o modelo leva em consideração:

- A resposta elástica antes da tensão de fluência;
- A tensão cisalhante é a principal causadora de deformação permanente;
- Dependência da dilatação e pressão hidrostática na resposta do material;
- Dependência do caminho das tensões na resposta viscoplástica do material;
- Amolecimento e endurecimento do material;
- Dano na forma de trincas e vazios.

2.4.2 Modelo Viscoplastico com Dano

Vários autores têm relacionado a resposta estrutural de misturas asfálticas sob a aplicação de uma carga a presença de componentes elásticas, plásticas, viscoelásticas e viscoplásticas (ABDULSHAFI e MAJIDZADEH, 1985; SCARPAS *et al.*, 1997; LU e

WRIGHT, 1998; SEIBI *et al.*, 2001; COLLOP *et al.*, 2003). A presença de cada componente é basicamente controlada pela temperatura e velocidade de aplicação de carga ou deslocamento.

No modelo apresentado neste capítulo, desenvolvido por TASHMAN (2003), as respostas das misturas asfálticas serão relacionadas às componentes elásticas recuperáveis e às componentes irrecuperáveis viscoplásticas a altas temperaturas (temperaturas de serviço dos pavimentos da área de estudo) associadas com a deformação permanente. A taxa de deformação total pode então ser dividida em:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} \quad (2.3)$$

Onde:

$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e$ é o tensor da taxa de deformação elástica;

$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}$ é o tensor da taxa de deformação viscoplástica;

A componente elástica pode ser definida de acordo com a lei de Hooke como segue:

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}_{ij} = D_{ijkl} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{kl} \quad (2.4)$$

Onde:

$\dot{\boldsymbol{\sigma}}_{ij}$ é o tensor da taxa de tensão;

D_{ijkl} é o tensor de quarta ordem de rigidez elástica;

Substituindo a equação 2.3 em 2.4 tem-se:

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^{vp}) \quad (2.5)$$

O tensor de rigidez depende do estado de tensões desenvolvido. Pode-se mostrar que para o estado de simetria radial a matriz de elasticidade pode ser definida como:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 1 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Onde:

E é modulo de elasticidade;

ν é o coeficiente de Poisson.

A componente viscoplástica de deformação domina o comportamento do material a elevadas tensões assim como a elevadas temperaturas. Segundo TASHMAN (2003) e DESSOUKY (2005), define-se a taxa de deformação viscoplástica através da seguinte lei de fluxo, equação 2.7:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \Gamma \langle \phi(f) \rangle \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.7)$$

Onde:

$\Gamma \langle \phi(f) \rangle$ especifica a magnitude do vetor $\dot{\epsilon}^{vp}$;

Γ é um parâmetro de viscosidade que pode ser constante ou dependente do tempo;

ϕ é uma função tipicamente tomada como uma função de potência da superfície de fluência f ;

g é a função viscoplástica potencial.

A superfície viscoplástica potencial é uma superfície que contém o atual estado de tensões no caso de se usar uma lei de fluxo associativa $g = f$, sendo f uma função que representa a superfície de fluência do material.

$$g(\sigma_{ij}) = f(\sigma_{ij}) \quad (2.8)$$

$\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$ é o gradiente que representa a direção do incremento de deformação viscoplástica normal à superfície de fluência.

Só ocorrerá deformação viscoplástica quando $\langle \phi(f) \rangle$ for maior que zero, assim como mostra a equação 2.9:

$$\langle \phi(f) \rangle = \begin{cases} 0 & \text{se } \phi(f) \leq 0 \\ \phi(f) = f^N & \text{se } \phi(f) > 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

Onde:

N é determinado experimentalmente.

Entretanto, falta ainda determinar uma função que defina a superfície de fluência (função de fluência f), que é dada pela equação 2.10:

$$f = \bar{F}(\sigma_{ij}) - k = 0 \quad (2.10)$$

A função f , como dito anteriormente, define o limite elástico do material. $\bar{F}(\sigma_{ij})$ é uma função dependente do estado de tensões levando em consideração o efeito do confinamento, da tensão cisalhante e dilatação no comportamento das misturas asfálticas. TASHMAN (2003) e DESSOUKY (2005) utilizaram a superfície de fluência proposta

por Drucker-Prager com endurecimento (*hardening*) em seus trabalhos e a mesma será utilizada nesta dissertação. Alguns trabalhos têm usado a função fluência de Drucker-Prager para descrever o fluxo viscoso nas misturas asfálticas (ABDULSHAFI e MAJIDZADEH, 1985; SEIBI *et al.*, 2001; TASHMAN, 2003; OESER e MOLLER, 2004; DESSOUKY, 2005). A Figura 2.3 mostra o modelo da superfície de fluência de Drucker-Prager no espaço $I_1 - \tau$. Este modelo é dado pela equação 2.11.

$$f = \tau - \alpha I_1 - k \quad (2.11)$$

Onde:

τ é a tensão de cisalhamento deviatória;

I_1 é a tensão hidrostática ou primeiro invariante de tensão;

α e k são propriedades do material.

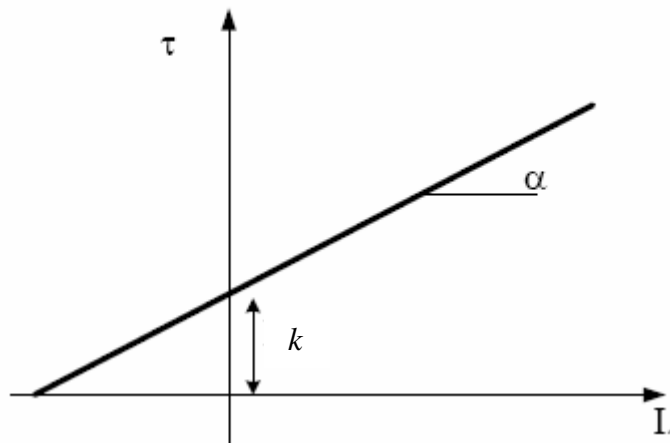


Figura 2. 3: Diagrama esquemático da superfície de fluência para o modelo de Drucker-Prager.

O parâmetro α está relacionado com as propriedades de atrito dos agregados unidos com ligante e o parâmetro k de endurecimento (*hardening*) está relacionado com as propriedades de coesão (ligações ligante-ligante) e adesão (interface agregado-ligante). A tensão cisalhante τ e o primeiro invariante de tensão I_1 são definidos conforme as

equações 2.12 e 2.13 (ABAQUS, 2004):

$$I_1 = \frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad (2.12)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{J_2}}{2} \left[1 + \frac{1}{d} + \left(1 - \frac{1}{d} \right) \frac{J_3}{J_2^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (2.13)$$

Ressalta-se que o parâmetro d visto na equação 2.13 leva em consideração que o material está sendo comprimido ou tracionado. Este parâmetro é obtido através de regressão de dados experimentais obtidos em ensaios de tração. Como tais ensaios não serão realizados nesta dissertação, o parâmetro d será considerado 1, excluindo assim a dependência da tensão cisalhante do terceiro invariante do tensor deviatórico de tensões (J_3).

O segundo invariante do tensor deviatórico de tensões é dado pela equação 2.14:

$$J_2 = \frac{3}{2} S_{ij} S_{ji} \quad (2.14)$$

S_{ij} é o tensor deviatórico de tensões, equação 2.15:

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (2.15)$$

Onde:

δ_{ij} é o delta de Kronecker (sendo: se $i = j \rightarrow 1$; se $i \neq j \rightarrow 0$);

I_1 é o primeiro invariante de tensão;

J_2 é o segundo invariante do tensor deviatórico de tensão.

Estes invariantes contam com o efeito do confinamento, a tensão dominante de cisalhamento que leva ao desenvolvimento de deformações viscoplásticas e o caminho

das tensões, respectivamente.

O comportamento viscoso do material é governado por um importante fator, o endurecimento (*hardening*). Tal fenômeno ocorre durante as deformações plásticas do material a nível microscópico devido a interações agregado-agregado e interface ligante-agregado. É evidente então que quanto maior o número de agregados maior será o contato entre eles e, por conseguinte, maior será a tensão de fluência do material. Quando o nível de tensão se aproxima da tensão de fluência, a superfície de fluência é empurrada para fora causando um aumento de volume na mesma. Esse mecanismo de crescimento pode ser definido como lei de endurecimento (*hardening evolution law*). Pode-se capturar a lei de endurecimento do material (*hardening*) monitorando a evolução dos parâmetros α e k .

2.4.2.1 Dano

Modelos de dano são utilizados para descrever o enfraquecimento do material causado pela formação de vazios e a propagação de trincas que conseqüentemente levarão a falha estrutural do material. Pode-se investigar o crescimento de microtrincas e conseqüentemente o comportamento mecânico de materiais danificados representando o efeito da distribuição de trincas em termos de certas variáveis mecânicas (MURAKAMI, 1983). Este método é chamado de mecânica do dano contínuo (*continuum damage mechanics* – CDM), onde o dano é definido como uma mudança microestrutural que induz alguma deterioração no material.

KACHANOV (1958) introduziu o conceito da tensão efetiva, o qual tem obtido sucesso em descrever o processo de enfraquecimento de materiais em termos de crescimento de microtrincas na abordagem de CDM.

A teoria da tensão efetiva postula que se pode caracterizar um material danificado principalmente pelo decréscimo em sua área efetiva de aplicação de carga, causada pelo desenvolvimento de microtrincas e cavidades (MURAKAMI, 1988). De acordo com esta

teoria, um material danificado sujeito a um estado de tensões, pode ser representado por um material sem danos sujeito a um estado de tensão fictício. O estado de tensões fictício deve ser igual ao estado de tensões aplicado sobre o material danificado ampliado pelo decréscimo na área de carregamento como mostra a equação 2.16. O fator de ampliação é conhecido como parâmetro de dano e é o indicativo do estado de deterioração do material.

$$\sigma_{ij}^e = \frac{1}{1-\xi} \sigma_{ij} \quad (2.16)$$

Onde:

ξ é uma variável interna que conta com o efeito do dano em termos de trincas e vazios. Seu valor varia de 0 (que representa o material intacto) a 1 (que representa o material totalmente danificado).

Seguindo os passos de TASHMAN (2003) e DESSOUKY (2005), substitui-se a equação 2.16 (tensões efetivas) na equação 2.11 (função fluência do modelo de Drucker-Prager) modificando os invariantes mostrados nas equações 2.12 e 2.14, para que os mesmos levem em conta o efeito do dano (equações 2.17 e 2.18). Tem-se então a função fluência do modelo de Drucker-Prager como mostra a equação 2.19:

$$I_1^e = \frac{1}{3(1-\xi)} \sigma_{ii} \quad (2.17)$$

$$J_2^e = \frac{3}{2} \frac{1}{(1-\xi)^2} S_{ij} S_{ji} \quad (2.18)$$

$$f = \tau^e - \alpha I_1^e - k \quad (2.19)$$

Novamente assumindo uma lei de potência para o fluxo viscoso, a equação 2.19 e a equação 2.9 levam a 2.20:

$$\langle \phi(f) \rangle = \begin{cases} 0, & (\tau^e - \alpha I_1^e - k) \leq 0 \\ (\tau^e - \alpha I_1^e - k)^N, & (\tau^e - \alpha I_1^e - k) > 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

O tensor de tensões modificado leva em consideração o desenvolvimento de dano no material, e é utilizado na relação constitutiva (equação 2.7). Vale lembrar que o dano no material influencia tanto o comportamento elástico como o viscoplástico do mesmo.

2.4.3 Função Potencial

A literatura técnica mostra que materiais granulares exibem comportamento não associativo, onde a superfície de fluência não coincide com a superfície potencial. Experimentos mostram que utilizando leis de fluxo associativas obtém-se maior dilatação que a dilatação exibida no experimento (e.g., ZEINKIEWICZ *et al.*, 1975; ODA e NAKAIAMA, 1989). Seguindo os passos de TASHMAN (2003) e DESSOUKY (2005) assume-se que a superfície potencial possui a mesma forma (linear) que a superfície de fluência, no entanto com menor inclinação β , que influenciará a proporção de deformações volumétricas e deviatoricas como mostra a Figura 2.4.

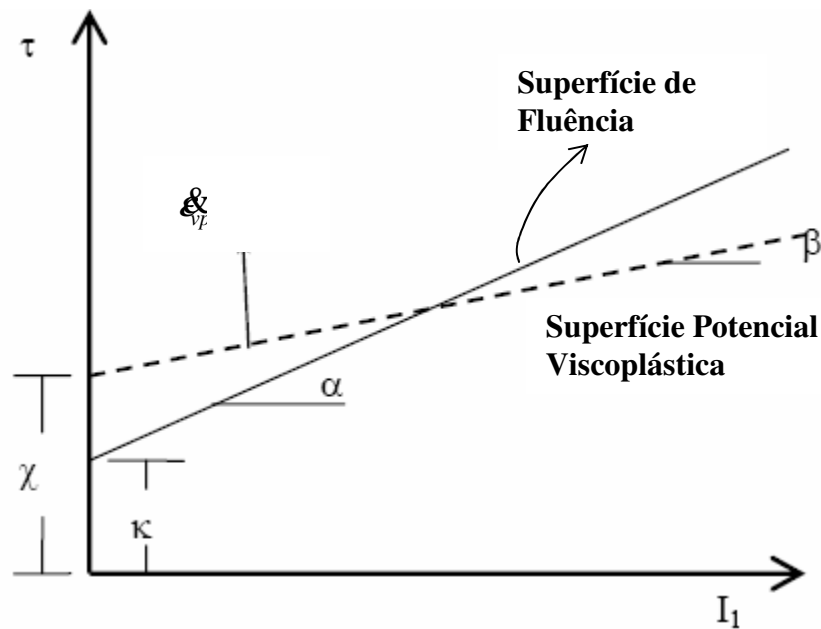


Figura 2. 4: Superfícies potencial e de fluência (DESSOUKY, 2005).

Segundo TASHMAN (2003), para calcular-se a direção do fluxo $\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$ na equação constitutiva (equação 2.7), utilizou-se um estado de carregamento triaxial. O estado de tensões principais é dado pela equação 2.21:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

O segundo invariante do tensor deviatório de tensões modificados pela inserção de dano (equação 2.18) para o estado triaxial de tensões é dado pela equação 2.22:

$$J_2^e = \frac{1}{(1-\xi)^2} (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad (2.22)$$

Substituindo a equação 2.22 na equação 2.13 obtém-se a equação 2.23:

$$\tau^e = \frac{\sqrt{J_2^e}}{1-\xi} \quad (2.23)$$

Pode-se definir então a direção do fluxo (gradiente da superfície potencial) como mostra a equação 2.24:

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial \tau^e}{\partial \sigma_{ij}} - \beta \frac{\partial I_1^e}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.24)$$

Considerando β independente das tensões, tem-se então a derivada dos invariantes com respeito as tensões (equações 2.25 e 2.26):

$$\frac{\partial I_1^e}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{3(1-\xi)} \delta_{ij} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial J_2^e}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{(1-\xi)^2} 3S_{ij} \quad (2.26)$$

Substituindo as equações 2.25 e 2.26 na equação 2.24 obtém-se a direção de fluxo dada pela equação 2.27 obtida seguindo os passos descritos por TASHMAN (2003):

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{3S_{ij}}{2\tau^e (1-\xi)^2} - \frac{\beta}{3(1-\xi)} \delta_{ij} \quad (2.27)$$

Decompondo-se a equação 2.24 os componentes do gradiente $\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$ são expressos como segue:

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_{11}} = \frac{1}{1-\xi} \left(-\frac{\beta}{3} \right) \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_{22}} = \frac{\partial g}{\partial \sigma_{33}} = \frac{1}{1-\xi} \left(-\frac{1}{2} - \frac{\beta}{3} \right) \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_{12}} = \frac{\partial g}{\partial \sigma_{13}} = \frac{\partial g}{\partial \sigma_{23}} = 0 \quad (2.30)$$

2.5 TENSÃO E DEFORMAÇÃO EFETIVA

Para calcular os parâmetros de dano e endurecimento explicados anteriormente, uma expressão para a tensão e a deformação viscoplástica efetiva se faz necessária. CHEN e HAN (1988) mostram que $\bar{F}(\sigma_{ij})$ (equação 2.10) pode ser definida como uma função de potência em função da tensão efetiva σ_{ef} da seguinte forma:

$$\bar{F}(\sigma_{ij}) = \tau^e - \alpha I_1^e = C(\sigma_{ef})^m \quad (2.31)$$

Onde C e m são constantes. Os invariantes da equações 2.17 e 2.18 tornam-se as equações abaixo considerando um estado uniaxial de tensões, onde a tensão efetiva é igual a σ_{11} :

$$I_1^e = \frac{1}{3(1-\xi)} \sigma_{ef} \quad (2.32)$$

$$J_2^e = \frac{1}{6} \frac{1}{(1-\xi)^2} (\sigma_{ef})^2 \quad (2.33)$$

Substituindo as equações 2.32 e 2.33 na equação 2.31, pode-se calcular as constantes C e m :

$$C = \frac{1}{1-\xi} \left(1 - \frac{\alpha}{3}\right) \quad (2.34)$$

$$m = 1 \quad (2.35)$$

Assim a tensão efetiva é:

$$\sigma_{ef} = \frac{\tau^e - \alpha I_1^e}{\left(1 - \frac{\alpha}{3}\right)} \quad (2.36)$$

Seguindo os passos de CHEN e HAN (1988) pode-se encontrar a deformação viscoplástica efetiva através do princípio do trabalho viscoplástico por unidade de volume, assumindo uma função homogênea na forma da equação 2.37. Vale ressaltar que existem outros métodos para encontrar a deformação viscoplástica efetiva.

$$W_{vp}^{\&} = \Gamma \langle \phi(f) \rangle m \bar{F} = \sigma_{ef} \&_{vp} \quad (2.37)$$

Da equação 2.7 tem-se:

$$\Gamma < \phi(f) > = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_y^p \dot{\epsilon}_y^p}}{\sqrt{\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}}} \quad (2.38)$$

Substituindo as equações 2.24, 2.28 a 2.30, 2.34, 2.36 e 2.38 em 2.37 tem-se a taxa de deformação viscoplástica efetiva dada pela equação 2.39:

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \frac{1}{\left(1 + 2 \left(\frac{\frac{1}{2} + \frac{\beta}{3}}{1 - \frac{\beta}{3}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \sqrt{\dot{\epsilon}_y^p \dot{\epsilon}_y^p} \quad (2.39)$$

Vale ressaltar que para o estado triaxial de tensões a equação 2.39 torna-se igual a taxa de deformação viscoplástica $\dot{\epsilon}_1^p$. Pode-se então obter a deformação efetiva viscoplástica através de integração no domínio do tempo.

2.6 PARÂMETROS DO MODELO E LEIS DE EVOLUÇÃO

Nesta seção explicam-se como os parâmetros (endurecimento e dano) do modelo viscoplástico evoluem segundo os trabalhos de TASHMAN (2003) e DESSOUKY (2005).

2.6.1 Parâmetro de Endurecimento (κ)

A evolução do endurecimento da mistura pode ser observada na evolução dos parâmetros α e κ . O parâmetro α evolui como resultado de mudanças na estrutura de agregados associadas com fricção e dilatação. Portanto, uma mudança em α é

manifestada como uma mudança nos parâmetros anisotrópicos. Destaca-se aqui que a anisotropia referida é aquela existente intrinsecamente no material ainda sem dano. Há também uma anisotropia causada pelo dano no material, ainda não considerada em estudos de conhecimento do autor. O parâmetro κ reflete o endurecimento do compósito causado pela deformação do ligante, alterando assim a coesão (ligamentos: ligante-ligante) e a adesão (interfaces: ligante-agregados) combinada com propriedades de atrito dos agregados.

Baseado no trabalho de DAFALIAS (1990), DESSOUKY (2005) propôs a lei de evolução de endurecimento da equação 2.40 que será utilizada para descrever o endurecimento das misturas asfálticas desta dissertação:

$$\kappa = \kappa_0 + \kappa_1 \left(1 - e^{(-\kappa_2 \cdot \varepsilon_{vp})} \right) \quad (2.40)$$

Onde:

κ_0 define a superfície de fluência inicial;

κ_1 e κ_2 são parâmetros que levam em conta o efeito da deformação viscoplástica efetiva no endurecimento do material;

ε_{vp} é a deformação viscoplástica efetiva.

Vale ressaltar que nos trabalhos de TASHMAN (2003) e MASAD *et al.* (2003) os resultados mostram que α muda somente a pequenos níveis de deformação enquanto κ evolui notoriamente em níveis de deformação elevados. Portanto, α é considerado constante nos trabalhos acima citados e assim o será no presente trabalho.

2.6.2 Parâmetro de Dano (ξ)

A interação entre o enfraquecimento das misturas asfálticas e a deformação viscosa possui, por natureza, complexo mecanismo físico. PERZYNA (1966) propôs três mecanismos que dominam o dano em materiais dúcteis: nucleação dos vazios,

crescimento dos vazios e transporte devido à difusão de espaços vazios. Considerações físicas sugerem que a taxa de nucleação dos vazios está diretamente ligada com a energia inelástica e com o primeiro invariante de tensões. Similarmente, a taxa de crescimento dos vazios durante as deformações inelásticas está diretamente ligada com a taxa de deformação inelástica.

Misturas asfálticas usualmente falham devido à nucleação, crescimento e interligação dos vazios após o endurecimento e enrijecimento da microestrutura. Observações experimentais mostram que o acúmulo de microdanos tem uma tendência a formar danos macroscópicos localizados, levando a falha do material.

Neste trabalho, similarmente à análise de Perzyna, o parâmetro de dano ξ é função da pressão confinante e da deformação viscoplástica efetiva:

$$\xi = f(I_1, \varepsilon_{vp}) \quad (2.41)$$

Onde:

ξ é o parâmetro de dano;

I_1 é o primeiro invariante de tensões que leva em conta a pressão confinante;

ε_{vp} é a deformação viscoplástica efetiva.

Espera-se que a pressão confinante minimize a taxa de crescimento de vazios e, por conseguinte, reduza o dano.

O parâmetro ξ é um indicativo da porcentagem danificada do material. O parâmetro é incorporado no modelo através da teoria da tensão efetiva apresentada por KACHANOV (1958). Como explicado anteriormente, este conceito é baseado na consideração de uma configuração não danificada fictícia do corpo de prova, comparando-a com a atual configuração danificada.

DESAI (1998) adotou uma lei de evolução para o material danificado em condições de carregamento monotônico. Seu estudo propõe que a evolução do dano é função do nível máximo de dano em níveis de deformação elevados e da deformação plástica deviatória. Uma forma exponencial é utilizada para modelar a degradação do material quando a tensão atinge a tensão última do material. Neste trabalho adota-se a lei de evolução de dano utilizada por MASAD *et al.* (2003), equação 2.51:

$$\xi = \xi_0 + \frac{U}{\left(1 + T \cdot e^{-G(\bar{\epsilon}_p - M)}\right)^{\frac{1}{r}}} \quad (2.51)$$

Onde:

ξ_0 é uma constante que controla o nível inicial de dano na mistura; U é uma constante que controla o nível máximo de dano na mistura; a constante G controla a taxa de crescimento de dano na mistura; M controla o ponto máximo de dano e T controla onde o crescimento máximo ocorre.

Vale ressaltar que as misturas asfálticas possuem comportamento diferenciado quando solicitadas à tração e à compressão (SOUZA e WEISSMAN, 1995). Quando solicitado à compressão o material tenta resistir ao carregamento aplicado formando uma nova microestrutura onde existem mais contatos entre os agregados, fenômeno conhecido como endurecimento. Ainda em compressão, a mistura começa a enfraquecer quando o deslizamento e a rotação entre os agregados são suficientes para causar falhas de coesão ou adesão na microestrutura da mistura, resultando em microtrincas (MASAD *et al.*, 2003). Em solicitações a tração não se percebe o fenômeno de endurecimento. A abertura das trincas e vazios acontece mesmo antes de ter-se deslizamento excessivo entre as partículas. Em outras palavras, o enfraquecimento das misturas quando solicitadas à tração, ocorre antes e em uma taxa maior do que se verifica quando a mistura é solicitada a compressão.

2.7 ESTUDO PARAMÉTRICO DO MODELO

O estudo paramétrico é realizado com o objetivo de se verificar a influência de alguns parâmetros na resposta tensão \times deformação do modelo proposto por TASHMAN (2003). Ressalta-se que tal estudo também foi conduzido por DESSOUKY (2005).

A Figura 2.5 mostra o efeito do endurecimento inicial da mistura na resposta do modelo.

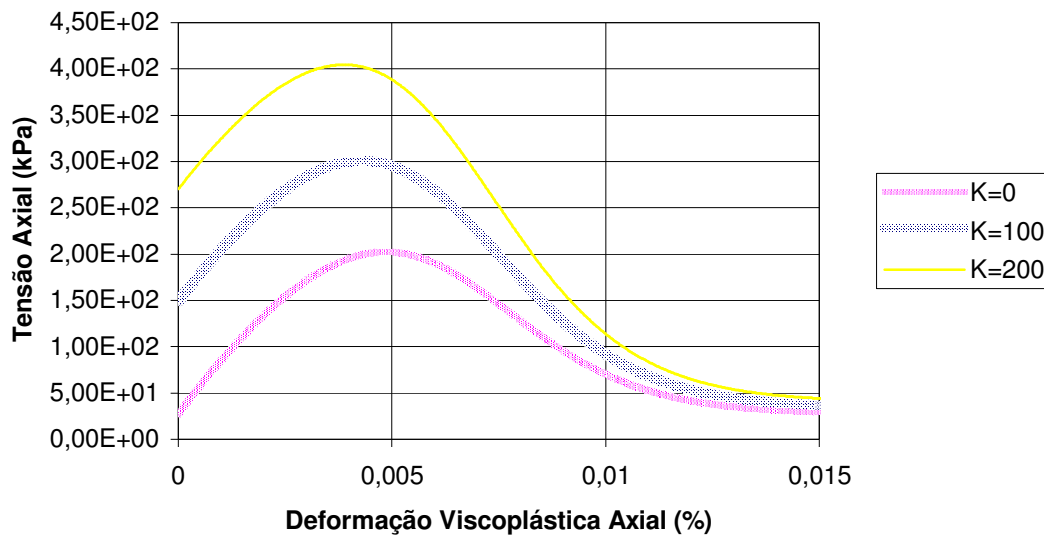


Figura 2. 5: Efeito do parâmetro de endurecimento κ .

O parâmetro de endurecimento κ controla o tamanho da superfície de fluência que cresce a medida que κ evolui. Este é um parâmetro definido como função do histórico de deformações. Durante o carregamento, enquanto o material endurecer, a superfície de fluência continuará a crescer.

Observa-se na Figura 2.5 que o endurecimento, parâmetro κ , influencia tanto na magnitude da tensão de ruptura como no nível de deformação viscoplastica em que a mesma ocorrerá. Quanto maior o valor de κ , maior será a tensão de ruptura do material.

O parâmetro α determina o grau de inclinação da superfície de fluência, refletindo as propriedades friccionais do material, que aumentam com o aumento de α . Mostra-se na Figura 2.6 que um aumento no parâmetro α causará um aumento na tensão de fluência e na tensão última do material.

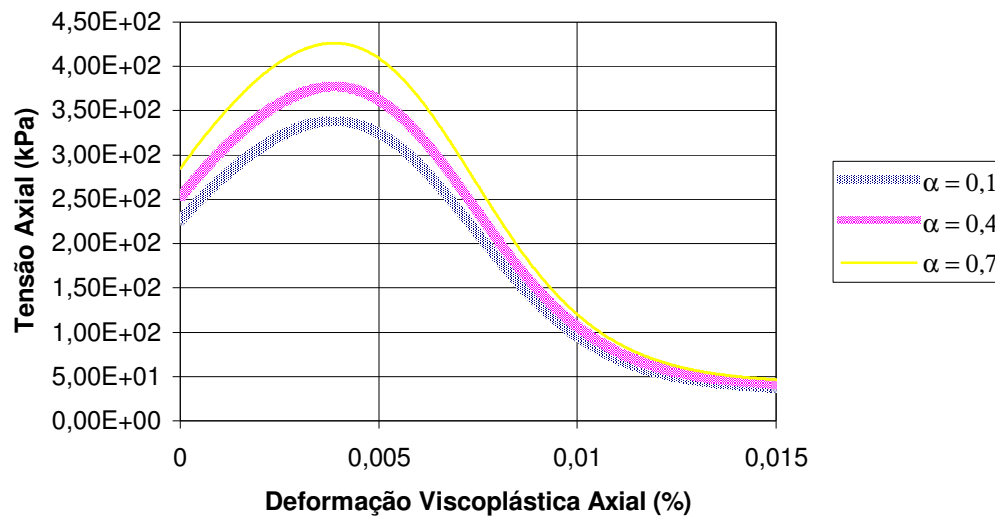


Figura 2. 6: Efeito do parâmetro α .

O parâmetro de dano ξ representa o enfraquecimento do material devido a formação de trincas e vazios associados com o fluxo viscoso. A forma da curva de tensão na fase de enfraquecimento reflete o nível de dano do material. Nota-se na Figura 2.7 que a porcentagem dessa redução depende do nível de dano no qual o material se encontra.

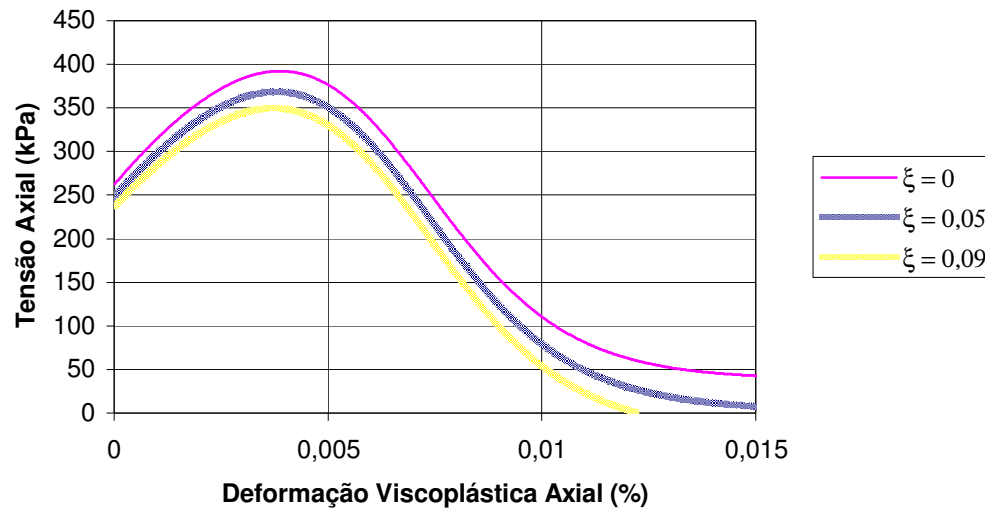


Figura 2. 7: Efeito do parâmetro ξ .

O parâmetro de viscosidade Γ controla a taxa de crescimento da superfície de fluência. Observa-se na Figura 2.8 que uma pequena variação no parâmetro Γ produz diferença significativa na curva tensão \times deformação. O tamanho da superfície de fluência aumenta com a diminuição do parâmetro de viscosidade do material, fazendo assim com que a tensão última do mesmo se eleve.

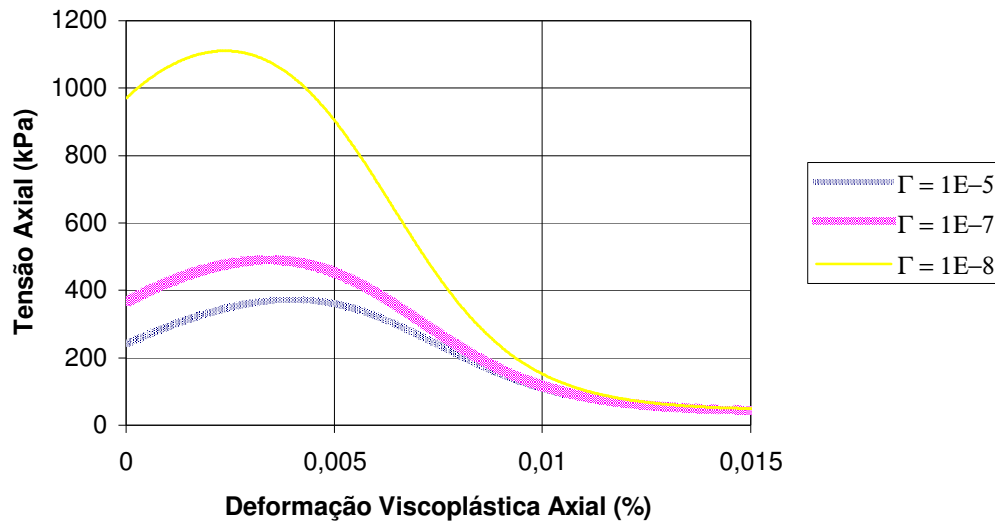


Figura 2. 8: Efeito do parâmetro Γ .

O parâmetro N controla o nível de não linearidade do modelo de Perzyna. Quando $N = 1$ o modelo se reduz a uma formulação linear de fluxo viscoso, enquanto que para $N > 1$ o fluxo viscoso se torna não linear. Por definição N é uma constante que leva em conta a sensibilidade do material à taxa de aplicação de carga ou deslocamento. Em geral, para matérias plásticos o parâmetro N varia de 1 a 10 (KHALEEL *et al.*, 2001). Observa-se na Figura 2.9 que quanto maior for o valor de N , menor será a tensão última do material analisado.

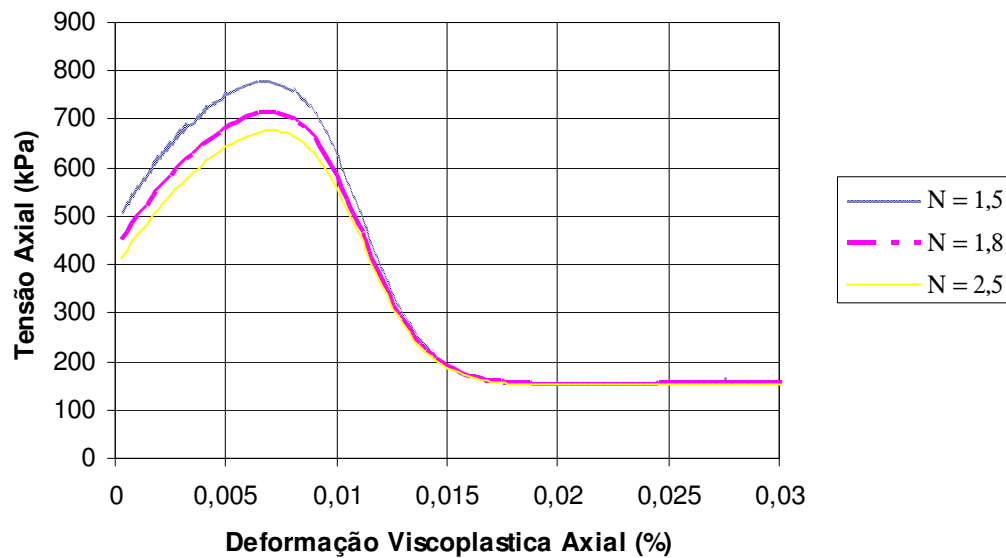


Figura 2. 9: Efeito do parâmetro N .

As misturas asfálticas são materiais dependentes da taxa de aplicação de carga ou deslocamento. O modelo utilizado deve ser então capaz de prever tal dependência. A Figura 2.10 mostra a resposta do modelo quando se utilizam diferentes taxas de deslocamento.

Como já era esperado, a Figura 2.10 mostra que quanto mais rápido se aplica o deslocamento, mais o material tende a resistir. Pode-se observar tal comportamento nos experimentos realizados nas misturas asfálticas confeccionadas para esse trabalho posteriormente.

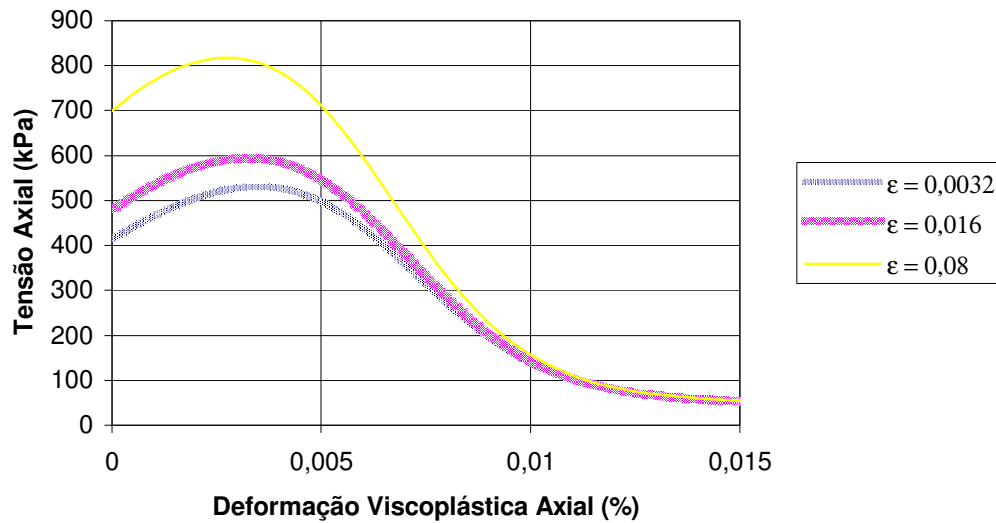


Figura 2. 10: Efeito da taxa de deslocamento.

Na Figura 2.11 pode-se observar a resposta do modelo à aplicação de diferentes pressões confinantes. A pressão confinante deixa o material estável tornando-o capaz de suportar maiores tensões. Comportamento semelhante foi observado nos experimentos realizados nas misturas asfálticas confeccionadas neste trabalho.

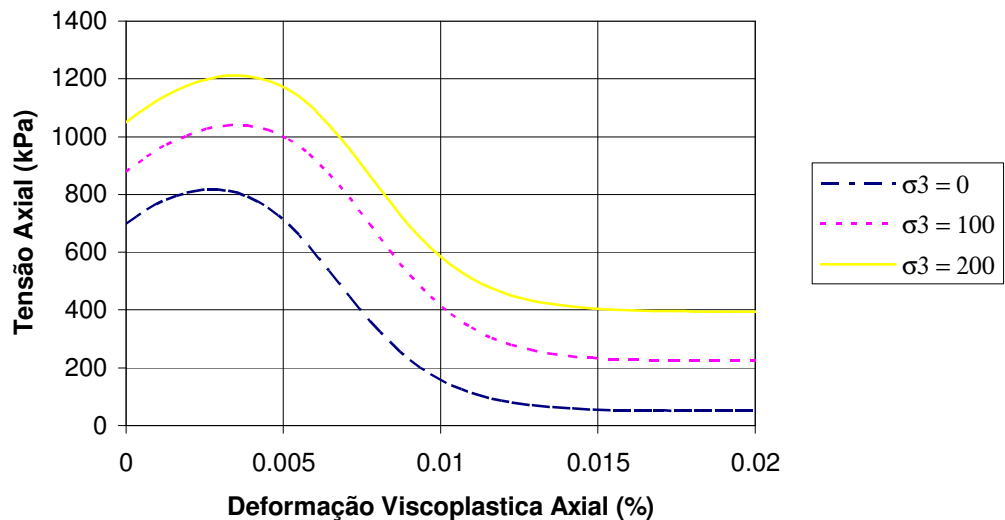


Figura 2. 11: Efeito da pressão confinante.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE UTILIZADO NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para composição das misturas asfálticas foi escolhido o Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP fornecido pela Refinaria Isaac Sabbá (REMAN/Petrobras) ao município de Manaus. Tal ligante é caracterizado conforme análises reológicas, sugerida pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), nas especificações constantes na *Superior Performance Asphalt Pavements (Superpave)*.

Foi realizado ensaio de determinação de ponto de fulgor (DNER ME 148/94), que determina a temperatura máxima a qual o ligante pode ser aquecido sem o risco de lampejo devido a fagulhas ou chama. Sua realização tem como importância informar aos usuários do ligante betuminoso a margem de temperatura de segurança a qual o mesmo poderá ser submetido sem oferecer riscos. Foi obtido resultado de 301°C. A especificação determina um mínimo de 230°C.

O ensaio de viscosidade realizado no CENPES/PETROBRAS verifica se o ligante poderá ser manipulado e bombeado em usina, sendo que para isso, a mesma deve ser de no máximo, 3000cP a 135°C. Utilizou-se viscosímetro *Brookfield*, modelo DVII+, acoplado a um controlador de temperatura *Thermosel*. Foi encontrado um resultado de 382,5cP, portanto, bem abaixo do limite superior.

O envelhecimento do ligante é mensurado através da porcentagem em massa perdida por uma amostra do mesmo após ser retirada da estufa RTFO (*Rolling Thin Film Oven*). A especificação *Superpave* preconiza uma perda máxima de 1% neste ensaio, tendo sido encontrado um valor de 0,37% para o CAP produzido pela REMAN. Ressalta-

se que o ensaio de envelhecimento foi realizado também no CENPES.

Para obtenção dos parâmetros concernentes a minimização dos efeitos de fadiga e deformação permanente no ligante, levou-se em consideração que o comportamento do mesmo depende do carregamento e da temperatura em que ele se encontra. Para tal, foi utilizado o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR, do inglês, *Dynamic Shear Rheometer*), responsável por medir o módulo de cisalhamento complexo (G^*) e a defasagem entre a máxima deformação aplicada e a tensão de cisalhamento máxima, defasagem esta dada pelo ângulo de fase (δ). O reômetro utilizado localiza-se no CENPES onde as amostras de ligante foram enviadas para análise.

O módulo de cisalhamento complexo (G^*) é composto por duas parcelas: uma elástica (G'), recuperável, e outra viscosa (G''), não recuperável. Estas são obtidas segundo as seguintes equações:

$$G' = |G^*|. \cos(\delta) \quad (3.1)$$

$$G'' = |G^*|. \sin(\delta) \quad (3.2)$$

Para materiais perfeitamente elásticos, a deformação resultante do carregamento é obtida instantaneamente, sendo assim o ângulo de fase é igual a 0° . Para fluidos viscosos, dentre eles o ligante asfáltico quando submetido a altas temperaturas, o tempo de resposta é maior, sendo o ângulo de fase próximo a 90° .

O DSR utilizado nos testes foi o modelo CSA100, da *TA Instruments*, sendo as temperaturas de ensaio constantes nas especificações e a taxa de cisalhamento de 10rad/s. Os corpos de prova foram preparados em molde de silicone cilíndrico, tendo estas dimensões de 25mm de diâmetro e 1mm de espessura, sendo testados em *spindles* de placas paralelas de 25mm de diâmetro.

As amostras de ligante asfáltico ensaiadas para obtenção dos parâmetros concernentes a minimização dos efeitos de fadiga foram previamente submetidas ao

RTFO e ao *Pressure Aging Vessel* (PAV). No PAV as amostras são expostas a elevadas temperaturas e pressões. O valor da componente viscosa não recuperável – $G^* \cdot \text{sen}(\delta)$ – não deve exceder 5000kPa para que os efeitos da fadiga sejam minimizados. Os resultados obtidos constam na Tabela 3.1, que apresenta temperatura de 22°C para valores em que $G^* \cdot \text{sen}(\delta)$ é inferior a 5000kPa.

Tabela 3. 1: Resultado do DSR - Amostra envelhecida, RTFO e PAV.

Temperatura (°C)	Após RTFO e PAV		
	G* (kPa)	δ (°)	$G^* \cdot \text{sen}(\delta)$ (MPa)
28	1976	59,4	1,7
25	3187	56,0	2,6
22	5110	52,3	4,0
19	8064	48,4	6,0

Para as deformações ocorridas em uma amostra de ligante asfáltico, quando submetida a um determinado carregamento, tem-se as componentes: elástica (recuperável) e viscosa (não recuperável). Chama-se deformação permanente ao acúmulo das deformações não recuperáveis a altas temperaturas.

A relação $G^*/\text{sen}(\delta)$ é responsável por nortear o limite das deformações permanentes desejáveis para uma amostra ensaiada. Os testes são realizados a temperaturas estipuladas, com amostras não envelhecidas e outras submetidas ao RTFO. As especificações *Superpave* instituem que o valor da relação $G^*/\text{sen}(\delta)$ não pode ser inferior a 1,0kPa para cimentos asfálticos não envelhecidos e 2,2kPa para aqueles que foram previamente envelhecidos. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2: Resultado de ensaio de DSR - Amostra envelhecida no RTFO e não envelhecida.

Temperatura (°C)	Antes do RTFO			Após o RTFO		
	G* (kPa)	δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)	G* (kPa)	δ (°)	G*/sen(δ) (kPa)
52	-	-	-	10,780	83,4	10,85
58	2,524	87,40	2,52	4,649	85,3	4,66
64	1,104	88,30	1,10	2,213	86,8	2,21
70	0,514	88,90	0,51	-	-	-

Analisando-se a Tabela 3.2, pode-se dizer que a temperatura na qual $G^*/\text{sen}(\delta)$ está dentro de ambas as especificações é de 64°C.

Pelas análises realizadas no CENPES, foi possível compor a Tabela 4.3, onde consta a análise resumida do ligante.

Tabela 3. 3: Características do cimento asfáltico de petróleo (CAP).

Característica	Unidade	Especificação	Resultado
Ponto de Fulgor	°C	230 mín	301
Viscosidade a 135°C	cP	3000 máx	382,5
Perda de massa, por envelhecimento, no ensaio RTFO	%	1,0 máx	0,369
Temperatura do ensaio de fadiga	°C	$G^*\text{sen}(\delta) < 5000\text{kPa}$	22,0
Deformações permanentes	Antes do RTFO	$G^*/\text{sen}(\delta) > 1,00\text{kPa}$	64,0
	Após o RTFO	$G^*/\text{sen}(\delta) > 2,20\text{kPa}$	

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA PARA FINS DE CALCINAÇÃO

Escolheram-se os seguintes locais para amostragem da argila investigada: (i) a região de Manaus, (ii) a BR 319 que liga os estados do Amazonas e Porto Velho e (iii) a Província Petrolífera de Urucu, localizada no município de Coari-AM. Estas escolhas deveram-se ao fato de se tratarem de áreas carentes de material pétreo e de grande importância para o desenvolvimento do estado do Amazonas. A cidade de Manaus teve um grande crescimento a partir da implantação da Zona Franca, passando de uma população de 310.000 habitantes (1970) para 1.644.690 habitantes (estimativa IBGE jul/2005) e continua crescendo, juntamente com o setor da construção civil e seu sistema viário, que atualmente suporta uma frota de aproximadamente 300.000 veículos, necessitando constantemente de reformas e ampliações (Figuras 3.1a e 3.1b).

A Rodovia Federal BR 319 tem sido historicamente um dos grandes problemas para o Amazonas, pois se constitui na única via de ligação do estado com o sul do país encontrando-se, normalmente, em precárias condições de tráfego como pode ser constatado nas Figuras 3.2 a 3.6. A província de Urucu, localizada a aproximadamente 650km de Manaus, em plena floresta amazônica, possui uma das maiores e mais importantes bacias de petróleo do Brasil. Para que a sua operação se torne possível existe uma malha viária com extensão próxima a 110km, bastante deteriorada, necessitando assim de soluções para seus problemas de transporte (Figura 3.7).



(a)



(b)

Figura 3. 1: Manaus – Revestimento danificado.



Figura 3. 2: BR 319 / km13 – Revestimento sendo recuperado.



Figura 3. 3: BR 319 / km 23 – Trecho com erosão.



Figura 3. 4: BR 319 / km 150 – Revestimento deteriorado.



Figura 3. 5: BR 319 / km 178 – Ponte de madeira deteriorada.



Figura 3. 6: BR 319 / km 200 – Revestimento trincado.



Figura 3. 7: Província de Urucu - AM – Revestimento comprometido.

3.2.1 Coleta das Amostras

Realizou-se um levantamento das possíveis jazidas nas adjacências das áreas em estudo, visando determinar as áreas potenciais de argila para fins de calcinação, sendo selecionadas quatro amostras para o presente estudo: (i) amostra MAO, coletada na cidade de Manaus, (ii) amostra PUC, coletada em Porto Urucu, (iii) amostra BR 08, coletada na rodovia estadual AM – 354 e (iv) amostra BR 14, coletada na rodovia federal

BR 319. Os pontos aludidos a cada uma foram identificados com auxílio de um GPS “Garmin Navigator”, na Projeção Latitude e Longitude, DATUM SAD69. Tais pontos estão listados na Tabela 3.4.

Tabela 3. 4: Localização geográfica das amostras.

Amostras	Coordenadas		Localização
	Latitude	Longitude	
MAO	S 03,08431°	W 059,86350°	Manaus – Bairro do Puraquequara (Fig. 3.8)
PUC	S 04,85351°	W 065,28214°	Urucu – RUC 08 (Fig. 3.9)
BR 08	S 03,54199°	W 060,41567°	AM-354 km 15 BD (Fig. 3.10)
BR 14	S 04,24335°	W 060,83091°	BR 319 km 183 BD (Fig. 3.11)



Figura 3. 8: Amostra MAO.



Figura 3. 9: Amostra PUC.



Figura 3. 10: Amostra BR 08.



Figura 3. 11: Amostra BR 14.

3.2.2 Verificação da potencialidade à calcinação

A verificação da potencialidade à calcinação das argilas é constatada com a realização dos seguintes ensaios com a amostra em estado natural: granulometria (ABNT/NBR 7181), limite de liquidez (ABNT/NBR 6459) e limite de plasticidade (ABNT/NBR 7180). Com os agregados sintéticos confeccionados foram realizados os ensaios: seleção expedita pelo processo de fervura (DNER ME 223/94), determinação da perda de massa após fervura (DNER ME 225/94) e desgaste por abrasão *Los Angeles* (DNER ME 222/94). O processo de confecção dos agregados sintéticos de argila calcinada consiste em: (i) homogeneização da argila natural (Figuras 3.12 e 3.13); (ii) corte do material com auxílio de telas com fios de nylon com diferentes tamanho de malha (Figura 3.14) e (iii) secagem e calcinação em forno com temperatura aproximada de 900°C.



Figura 3. 12: Argila em processo de homogeneização.



Figura 3. 13: Argila homogeneizada.



Figura 3. 14: Argila sendo cortada através de telas.



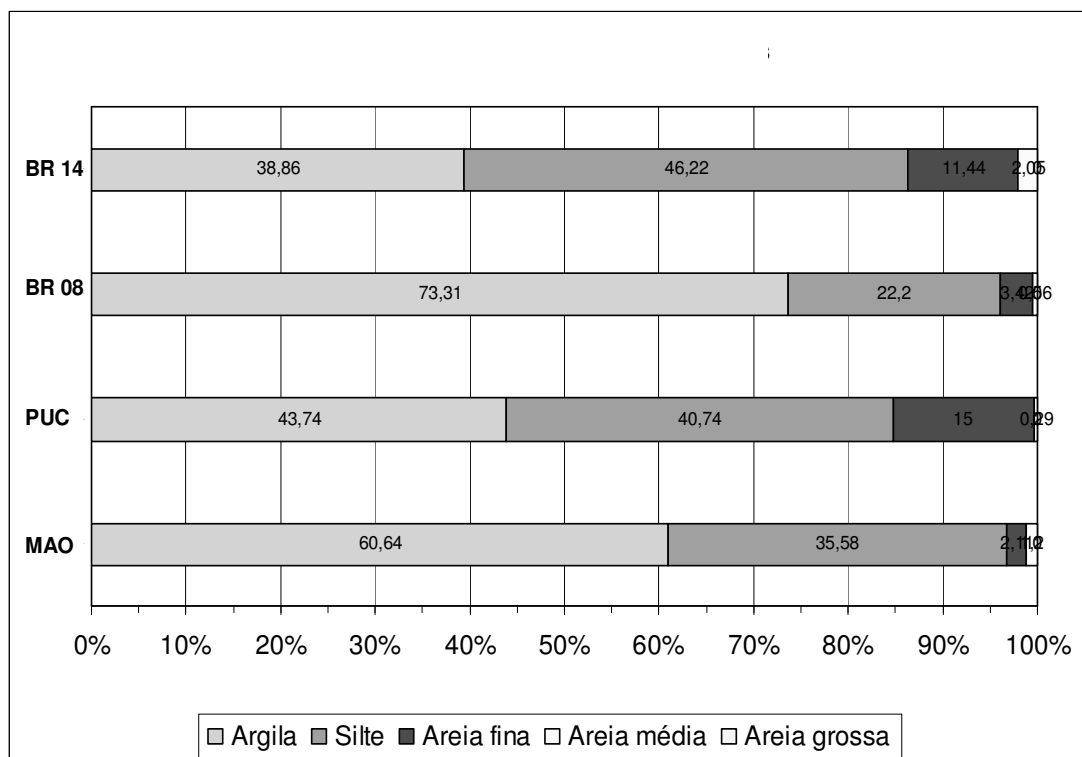
Figura 3. 15: ASAC produzido.

3.2.2.1 Análise Granulométrica

As curvas de distribuição granulométrica das amostras em estado natural foram determinadas segundo a norma específica da ABNT/NBR 7181. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 3.5 e nas Figuras 3.16 e 3.17.

Tabela 3. 5: Resultado das análises granulométricas.

Amostra	% Material		
	Argila	Silte	Areia
MAO	60,64	35,58	3,78
PUC	43,74	40,74	15,52
BR 08	73,30	22,20	4,50
BR 14	38,86	46,22	14,92

**Figura 3. 16:** Resumo das análises granulométricas.

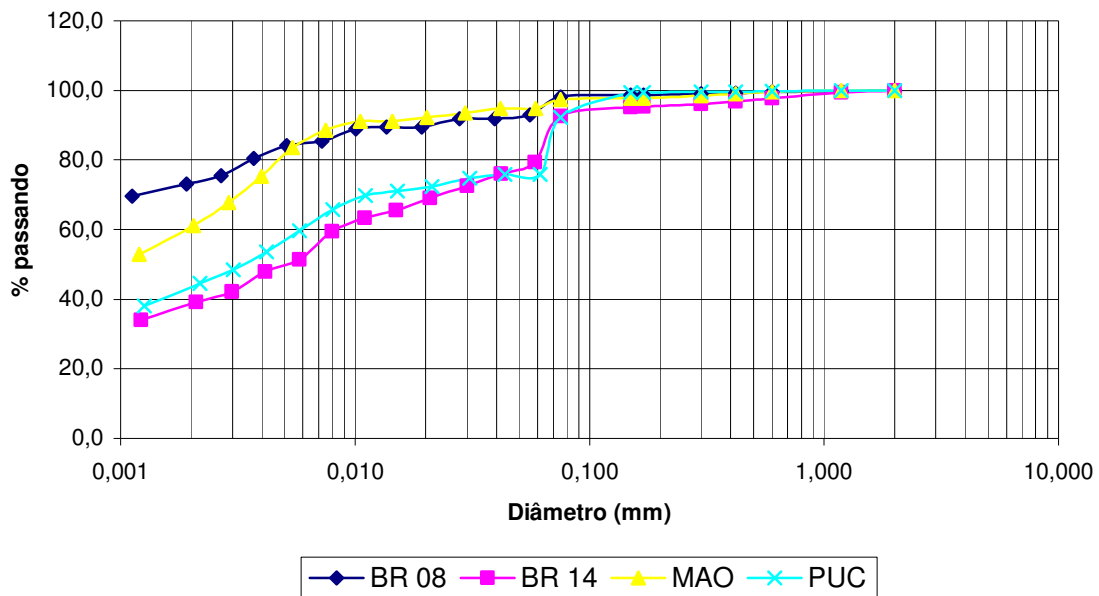


Figura 3. 17: Curvas granulométricas – Amostras de argila natural.

De acordo com a ABNT/NBR 6502 – Rochas e Solos, constituem-se como solos finos a parcela que passa na peneira cuja abertura nominal da malha é igual a 0,075mm.

Na Tabela 3.6, tem-se uma síntese da fração de finos de cada amostra. De acordo com a mesma, percebe-se que todas as amostras atenderam as especificações, podendo, com relação a esse parâmetro, serem utilizadas na confecção de ASAC's.

Tabela 3. 6: Fração de solos finos nas amostras.

Amostra	% passando na peneira 0,075mm	
	Recomendação para uso como ASAC	Resultado (%)
MAO	Mínimo 85%	97,3
PUC		92,1
BR 08		98,2
BR 14		92,6

3.2.2.2 Limites de Atterberg

Realizaram-se segundo a ABNT/NBR 6459 e a ABNT/NBR 7180 os ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), respectivamente. Os resultados estão listados na Tabela 3.7. Analisando-se os resultados obtidos para as amostras, nota-se que todas elas apresentaram um IP maior que 20%, estando aptas a serem utilizadas na confecção de ASAC's com relação a essa especificação.

Tabela 3. 7: Limites de Atterberg.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	
			Recomendação para uso ASAC	Resultado (%)
MAO	56	28	> 20	28
PUC	55	31		24
BR 08	84	36		48
BR 14	57	23		34

3.2.2.3 Seleção expedita pelo Processo de Fervura – Ensaio de Autoclave

Determinou-se a seleção expedita pelo processo de fervura de acordo com o Método de Ensaio DNER ME 223/94, que tem por finalidade verificar possíveis alterações de volume nos ASAC's, pelo processo visual, e de consistência, pelo processo tátil. As amostras apresentaram os resultados constantes na Tabela 3.8.

Observando-se os resultados, nota-se que todas as amostras foram aprovadas, não apresentando variação de volume ou perda de consistência, sendo assim, adequadas para produção de ASAC's.

Tabela 3. 8: Autoclave.

Amostra	Alterações de volume e consistência	
	Especificação para uso ASAC	Resultado
MAO	Não varia	Não variou
PUC		Não variou
BR 08		Não variou
BR 14		Não variou

3.2.2.4 Perda de Massa após Fervura

Verificam-se as alterações na massa do agregado sintético de argila calcinada, através do Método de Ensaio DNER ME 225/94. Segundo este método, o valor máximo da perda de massa para os ASAC's deve ser de 10%. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 3.9. Nota-se que todas as amostras apresentaram uma perda de massa bastante inferior ao valor máximo permitido, logo, satisfazem a especificação citada, estando adequadas para a utilização como ASAC .

Tabela 3. 9: Perda de massa após fervura.

Amostra	Perda de Massa (%)	
	Especificação para uso como ASAC	Resultado (%)
MAO	< 10	0,01
PUC		0,14
BR 08		0,04
BR 14		0,07

3.2.2.5 Abrasão *Los Angeles*

Realizou-se o ensaio de abrasão *Los Angeles* de acordo com o Método de Ensaio DNER ME 222/94 com o objetivo de verificar as condições de desgaste do ASAC. Tal método estabelece como valor máximo para o desgaste um valor de 45%.

Os resultados listados na Tabela 3.10 mostram que os desgastes sofridos pelas amostras em estudo foram inferiores aos 45% especificados, podendo as mesmas serem utilizadas na confecção de ASAC's com relação à esse parâmetro.

Tabela 3. 10: Abrasão Los Angeles.

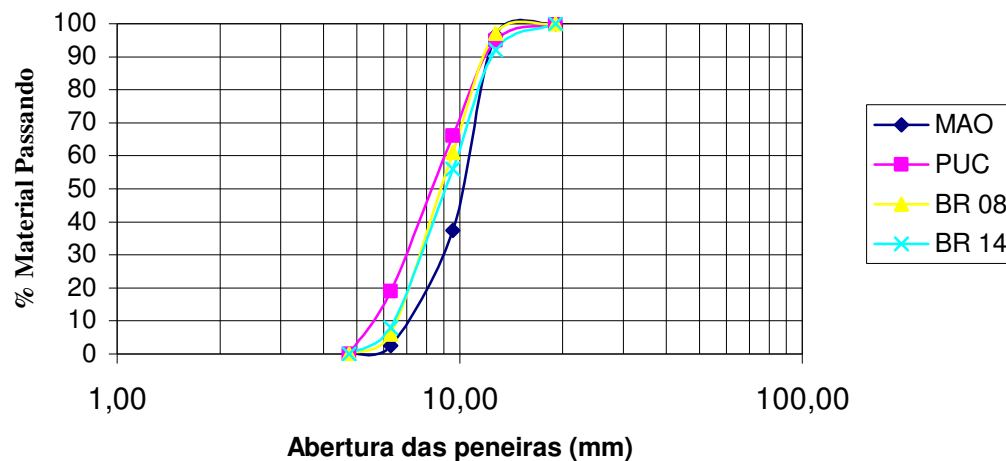
Amostra	Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	
	Especificação para uso como ASAC	Resultado (%)
MAO	< 45	36
PUC		43
BR 08		24
BR 14		44

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ASAC's PARA UTILIZAÇÃO NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para a caracterização dos ASAC's produzidos foram realizados os ensaios de massa específica real, massa específica aparente, absorção e granulometria. Podem-se visualizar os resultados obtidos na Tabela 3.11 e na Figura 3.18.

Tabela 3. 11: Características dos ASAC's.

Características		Método	Amostra			
			MAO	PUC	BR 08	BR 14
Massa Específica Real (g/cm ³)		NBR 9776	2,590	2,593	2,615	2,672
Massa Específica Aparente (kg/dm ³)		NBR 7251	1,676	1,762	1,648	1,660
Absorção (%)		NBR 9937	21,0	18,2	22,4	22,8
Composição Granulométrica - NBR 7217						
Peneira	Abertura	% em massa passando				
¾"	19,050	100,0	100,0	100,0	100,0	
½"	12,700	96,5	95,0	97,0	92,0	
⅜"	9,530	37,5	66,0	61,0	56,0	
¼"	6,300	2,5	19,0	6,0	8,0	
Nº 4	4,750	0,0	0,0	0,0	0,0	

**Figura 3. 18:** Granulometria dos ASAC's.

Observa-se nos resultados acima que os ASAC's produzidos com argila encontrada na cidade de Manaus (argila MAO) é mais grosso que os demais, sendo que estas apresentam granulometrias muito semelhantes. As argilas foram produzidas a partir das mesmas telas de corte. A Figura 3.18 retrata que a argila MAO possui menor

retração, visto que os agregados foram produzidos a partir das mesmas telas de corte, dentre as argilas utilizadas para confecção dos ASAC's.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO SEIXO UTILIZADO NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para o problema da falta de agregados pétreos no município de Manaus, a alternativa comumente adotada, tanto para o concreto de cimento *Portland* como para o concreto asfáltico, é o uso do seixo rolado dragado de rios. Esse material se caracteriza por uma textura superficial lisa e forma arredondada, o que se acredita diminuir o intertravamento interno das partículas na mistura asfáltica, reduzindo a resistência ao cisalhamento desta. A extração desse material implica em grande impacto ambiental.

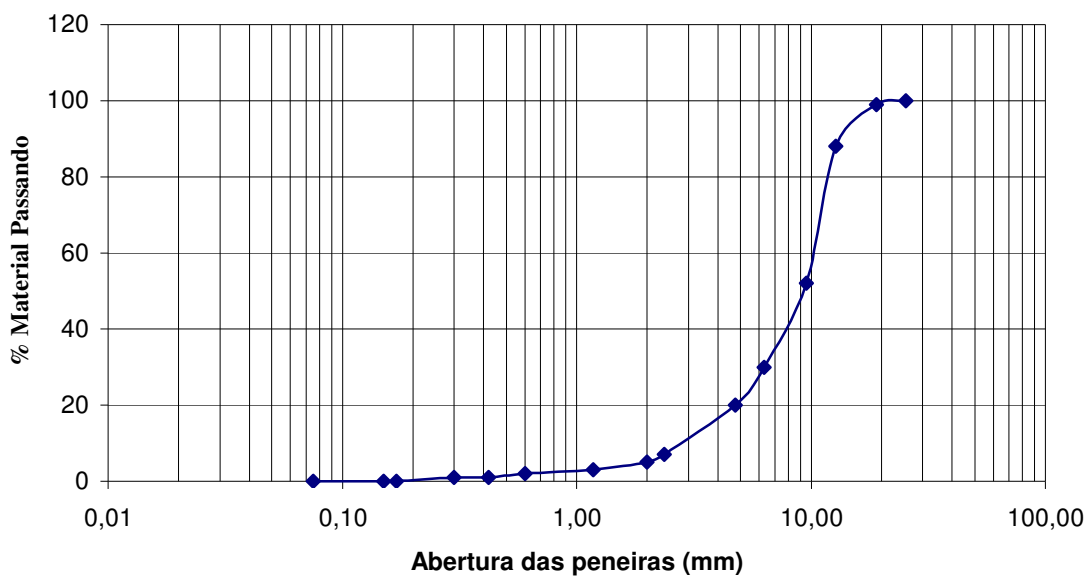
Como caracterização do material, foram observadas a sua granulometria, as massas específicas e aparente, a absorção do material e sua resistência à abrasão *Los Angeles*. Os resultados desses ensaios estão esboçados na Tabela 3.12 e na Figura 3.19.

Tabela 3. 12: Características do seixo rolado.

Características	Método	Material
		Seixo
Massa Específica Real (g/cm ³)	NBR 9776	2,622
Massa Específica Aparente (kg/dm ³)	NBR 7251	1,917
Absorção (%)	NBR 9937	0
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	NBR 6465	35
Composição Granulométrica - NBR 7217		
Peneira	Abertura (mm)	% em massa passando
1"	25,400	100
¾"	19,050	99
½"	12,700	88
⅜"	9,530	52
¼"	6,300	30

Tabela 3.12: Características do seixo rolado (cont.)

Composição Granulométrica - NBR 7217		
Peneira	Abertura (mm)	% em massa passando
Nº 4	4,750	20
Nº 8	2,360	7
Nº 10	2,000	5
Nº 16	1,180	3
Nº 30	0,600	2
Nº 40	0,420	1
Nº 50	0,300	1
Nº 80	0,170	0
Nº 100	0,150	0
Nº 200	0,075	0

**Figura 3. 19:** Curva granulométrica - seixo rolado.

A normalização brasileira vigente (DNER ES 313/97) especifica que o material a ser utilizado como agregado graúdo, para fins de pavimentação, deve apresentar desgaste por Abrasão *Los Angeles* inferior a 40%. No caso do seixo, o valor obtido foi de 35% (Tabela 3.12), atendendo à especificação em questão.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA UTILIZADA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A areia que compõe as misturas asfálticas é de origem residual e correntemente utilizada em revestimentos no município de Manaus. A mesma foi caracterizada, conforme sua composição granulométrica e de acordo com as massas específicas relativa e real. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 3.13 e na Figura 3.20.

Tabela 3. 13: Características da areia.

Características	Método	Material
		Areia
Massa Específica Real (g/cm ³)	NBR 9776	2,625
Massa Específica Aparente (kg/dm ³)	NBR 7251	1,512
Composição Granulométrica - NBR 7217		
Peneira	Abertura (mm)	% em massa passando
Nº 10	2,000	100
Nº 16	1,180	69
Nº 30	0,600	46
Nº 40	0,420	40
Nº 50	0,300	26
Nº 80	0,170	10
Nº 100	0,150	8
Nº 200	0,075	0

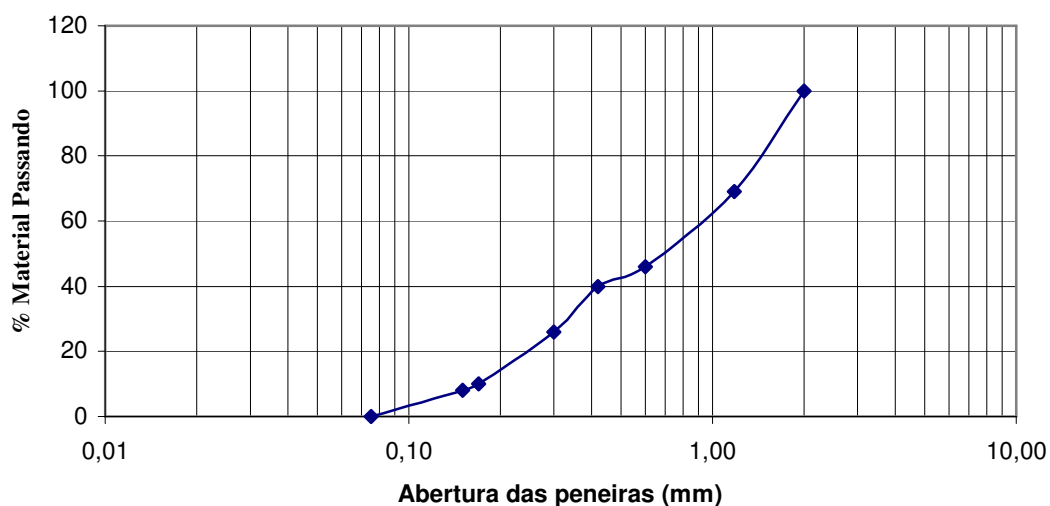


Figura 3. 20: Curva granulométrica - areia.

A norma do DNER ME 038/97 sugere que o agregado miúdo usado nas misturas asfálticas obedeça aos limites constantes na Tabela 3.14. Observando-se os dados da Tabela 3.13, pode-se afirmar que a areia utilizada nas misturas asfálticas em estudo atende às especificações da citada norma.

Tabela 3. 14: Especificação do DNER para composição granulométrica de agregado miúdo em misturas.

Peneira	Abertura (mm)	% passando	
		Especificação	Resultado
3/8"	9,500	100	100
Nº 4	4,750	95-100	100
Nº 8	2,360	80-100	100
Nº 16	1,180	50-85	69
Nº 30	0,600	25-60	46
Nº 50	0,300	10-30	26
Nº 100	0,150	2-10	8

3.6 CARACTERIZAÇÃO DO FILER UTILIZADO NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

O filer, é neste estudo considerado o material que passa na peneira N° 200, ou seja, com diâmetro inferior a 0,075mm. Este tem a finalidade de preencher os vazios existentes entre o esqueleto de material graúdo e miúdo na mistura asfáltica. A diminuição dos vazios reduz a permeabilidade do revestimento asfáltico, contribuindo para um aumento de vida útil do mesmo.

Por ser de uso comum em misturas asfálticas no estado do Amazonas, o cimento *Portland* foi selecionado para cumprir o papel de material de enchimento. Por suas características granulométricas o uso desse material vem a diminuir o volume de vazios da mistura compactada. As principais características do cimento *Portland* utilizado estão na Tabela 3.15 e Figura 3.21.

Tabela 3. 15: Características cimento Portland.

Características	Método	Material
		Cimento
Massa Específica Real (g/cm ³)	NBR 9776	3,150
Composição Granulométrica - NBR 7217		
Peneira	Abertura (mm)	% em massa passando
N° 40	0,420	100
N° 50	0,300	100
N° 80	0,170	100
N° 100	0,150	99
N° 200	0,075	96

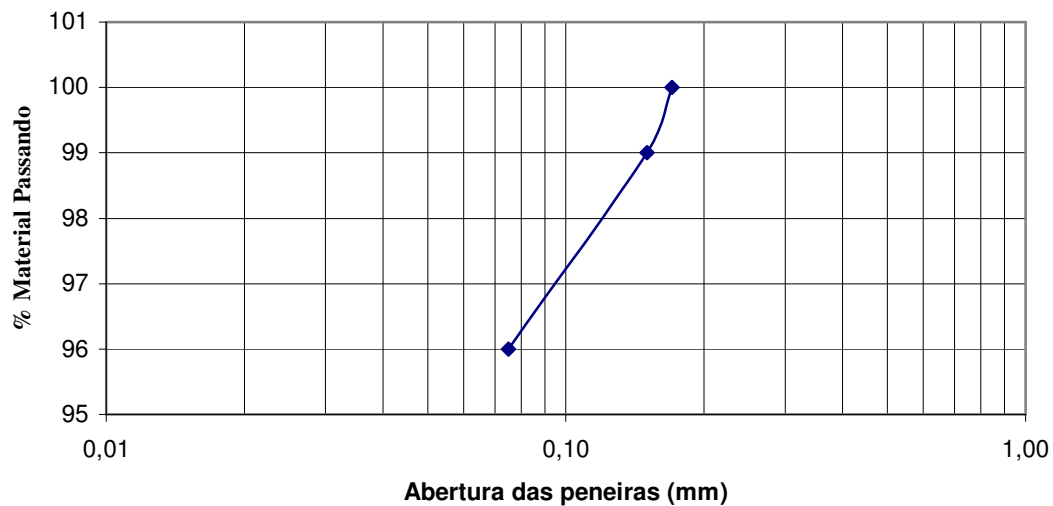


Figura 3. 21: Curva granulométrica - Cimento Portland.

Conforme normalização brasileira DNER ME 367/97, o material a ser utilizado como enchimento deve ser finamente dividido e obedecer à graduação mínima constante na Tabela 3.16. Observa-se que o cimento Portland utilizado está dentro dos limites especificados por norma, podendo ser enquadrado como material de enchimento.

Tabela 3. 16: Especificação do DNER para composição granulométrica de material de enchimento em misturas asfálticas.

Peneira	Abertura (mm)	% em massa passando	
		Especificação	Resultado
Nº 40	0,420	100	100
Nº 80	0,170	95	100
Nº 200	0,075	65	96

CAPÍTULO 4

DOSAGENS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico (CA) são compostas por um esqueleto estrutural formado por agregado graúdo, além de frações de areia, e material de enchimento (ou fíler mineral), que se destina a completar os vazios formados no espaço entre os agregados graúdos e miúdos.

Produziu-se um total de quatro misturas do tipo CA, variando-se a porcentagem e tipo de agregado sintético de argila calcinada e areia, e porcentagens de fíler mineral e ligante. As faixas granulométricas foram balizadas conforme as determinações do SHRP, em suas especificações constantes na *Superpave*. Os corpos de prova foram moldados conforme normalização do DNER.

Buscando-se, ainda, confrontar os dados para os novos materiais com os usualmente empregados, foi estudada a mistura típica do município de Manaus, tratando-se esta de um Concreto Asfáltico confeccionado com seixo como agregado graúdo.

Cada uma das amostras selecionadas na análise de potencial de calcinação de agregado sintético produzido com solo argiloso das proximidades da BR 319, solo argiloso de Manaus e solo argiloso da província petrolífera de Urucu resultou em uma mistura. Cada mistura teve como agregado miúdo areia residual típica do município de Manaus e o cimento *Portland* cumprindo o papel de material de enchimento, excetuando-se a mistura utilizando o ASAC produzido com argila encontrada na província petrolífera de Urucu, que utilizou dois tipos de areia encontradas na própria região.

A escolha da composição percentual (mistura de agregados) levou em consideração o que estabelecem as especificações *Superpave*. Conforme essas especificações, devem-se levar em consideração o diâmetro máximo de agregado, dado pela abertura nominal da peneira em que mais de 10% do agregado mineral for retido.

Para cada valor de diâmetro máximo têm-se um conjunto composto pela linha de densidade máxima da mistura, pontos de controle e uma zona de restrição.

A linha de densidade máxima representa a composição granulométrica onde se obtém o melhor empacotamento de agregados na mistura, obtendo-se, dessa forma, a maior densidade possível. Quanto mais próxima desta reta, mais rija a mistura se torna. Todavia, o acréscimo de rigidez no esqueleto estrutural torna o conjunto mais quebradiço, propenso à formação de trincas.

Desse modo, foram plotados os pontos de controle superiores e inferiores, objetivando que a curva de projeto passe próxima a eles, de modo a se obter um bom empacotamento granular, sem, contudo fornecer fragilidade à mistura.

Por fim, têm-se a zona de restrição, dentro da qual se deve evitar que a curva granulométrica da mistura passe. Essa zona representa uma composição de finos que levariam à misturas com baixo desempenho quanto às deformações permanentes. Contudo, estudos vêm demonstrando uma ineficiência desta zona para previsão deste parâmetro, tendo trazido a valores não condizentes para agregados britados, levando alguns autores a sugerir a eliminação desta como critério de desempenho (COOLEY, 2002).

Por opção, todas as amostras de agregado sintético foram produzidas nas mesmas faixas granulométricas, diferenciando-se apenas pelo nível de retração de cada amostra. Conforme visto no capítulo anterior, o diâmetro máximo de agregado foi de 9,50mm, obtendo-se as faixas de pontos de controle e zona de restrição conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4. 1: Pontos de controle e zona de restrição para diâmetro máximo de 9,50mm.

Peneira	Abertura (mm)	% em massa passando			
		Pontos de Controle		Zona de Restrição	
		Inferior	Superior	Inferior	Superior
1/2"	12,70	-	100	-	-
3/8"	9,53	90	100	-	
Nº 8	2,36	32	67	47	
Nº 16	1,18	-	-	32	38
Nº 30	0,600	-	-	24	28
Nº 50	0,300	-	-	19	
Nº 200	0,075	2	10	-	-

A norma DNER ES 313/97 estabelece as diretrizes de dosagem de misturas asfálticas a serem obedecidas. A Tabela 4.2 esboça os valores básicos a serem utilizados como balizadores durante o processo de dosagem. Ressalta-se que estes valores são correspondentes para a faixa C do DNIT, antigo DNER.

Tabela 4. 2: Parâmetros de dosagem conforme norma DNER ES 313/97.

Marshall – DNER ME 043	
Parâmetro	Especificação
Volume de Vazios	3 a 5%
Relações betume-vazios	75 a 82%

A moldagem dos corpos de prova foi balizada pelo Método Marshall, constante na norma DNER ME 043, com energia de compactação de 75 golpes em cada face dos mesmos, recomendada para pressões de enchimento de pneus de 0,7 a 1,4MPa (Figuras 4.1 a 4.4).



Figura 4. 1: Mistura sendo colocada no molde cilíndrico.



Figura 4. 2: Mistura solta no molde.



Figura 4. 3: Processo de compactação por impacto (75 golpes).



Figura 4. 4: Mistura compactada dimensões 105mm × 62mm.

A faixa de temperatura de mistura do ligante foi determinada de acordo com a norma DNER ES 313/97, segundo a qual o cimento asfáltico deve estar a uma temperatura que lhe confira viscosidade Saybolt-Furol entre 75 e 150 segundos, recomendando-se a faixa de 85 a 95 segundos. Essa viscosidade foi obtida para o CAP-20 produzido pela REMAN na faixa de temperatura entre 160 e 165°C.

Ainda conforme a referida especificação, a temperatura de mistura dos agregados deve ser 10 a 15°C acima daquela estabelecida para o ligante, obtendo-se, assim, uma faixa desejável de mistura para os agregados entre 175° a 180°C. Para compactação, estabelece-se que a temperatura do ligante corresponda à viscosidade de 140 ± 15 segundos, que para o CAP-20 seria uma faixa entre 150 a 155°C.

Estabelecidas as condições de ensaio, foram moldados os corpos de prova correspondentes a cada um dos teores de ligante, preferindo-se dois pontos acima do teor ótimo estimado e dois abaixo, variando-se 1% para cada ponto. Ressalta-se que devido a experiências anteriores do autor com misturas asfálticas confeccionadas com ASAC (FROTA *et al.*, 2003, 2004, 2005), foram moldados apenas um ponto acima e um abaixo do teor ótimo estimado. Ressalta-se ainda que o teor ótimo para as misturas confeccionadas com ASAC foi escolhido de modo que o volume de vazios das misturas com ASAC fosse matematicamente igual ao volume de vazios da mistura padrão confeccionada com seixo (4%).

Para determinação dos índices físicos é necessária a determinação da densidade máxima da mistura em cada ponto da dosagem. Uma das formas de se obter este valor seria de maneira teórica, utilizando as densidades de cada um dos agregados. Todavia, este procedimento não leva em consideração a absorção de ligante por parte do agregado, caso este possua elevada absorção (VASCONCELOS, 2004). No caso dos agregados sintéticos de argila calcinada pode-se observar um alto grau de porosidade em seus grãos, embasado pelo ensaio de absorção de água realizado durante a caracterização do mesmo.

Quando o agregado possui poros superficiais ocorre à absorção de uma fração da película de ligante, que impermeabiliza os poros mais internos do grão, conforme mostra Figura 4.5. O valor calculado teoricamente poderia ser feito considerando-se os valores de densidade real ou de densidade aparente, levando a dois valores distintos de densidade máxima teórica para a mistura.

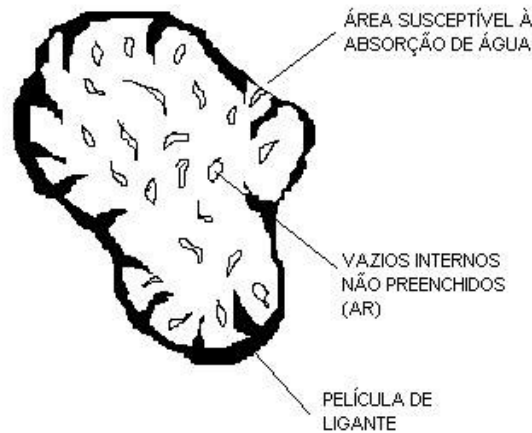


Figura 4. 5: Potencial de absorção de ligante em agregados porosos.

Utilizando-se a densidade real dos agregados de argila calcinada, admitir-se-ia que todos os poros internos do mesmo absorveriam ligante, o que de fato não ocorre, tendo em vista que após compactação, a perda de temperatura por parte do corpo de prova levaria a aumento da viscosidade do asfalto, o que reduz o potencial de absorção do grão. Por outro lado, admitir a densidade aparente no cálculo implicaria em não admitir a influência da absorção do agregado para a determinação dos índices físicos.

Diante desta dificuldade optou-se por obter a densidade máxima por meio de ensaio laboratorial, conforme norma ASTM D2041, conhecida como *Rice Test*. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Amazonas. Segundo este método, procede-se à mistura dos agregados e ligante segundo as condições de temperatura estabelecidas, seguida do resfriamento da mistura sob processo de revolvimento contínuo até que seja atingida a temperatura ambiente (25°C). A seguir, a mistura solta é colocada em recipiente de dimensões apropriadas, sua massa

medida ao ar (Figura 4.6), e misturada com água destilada até que toda esteja totalmente imersa.

Em seguida a mesma é submetida a vácuo aplicado gradualmente, até que se obtenha uma pressão residual dentro do recipiente inferior a 30mmHg, e permanece sob agitação mecânica por pelo menos 15 minutos (Figura 4.7). Finalizado este processo, o vácuo é gradualmente eliminado e o recipiente contendo a mistura e água é pesado. Este processo foi realizado em todas as misturas, para cada ponto de dosagem.



Figura 4. 6: Mistura solta sendo pesada ao ar.



Figura 4. 7: Processo de agitação mecânica e aplicação de vácuo.

4.1 MISTURAS UTILIZANDO AGREGADOS SINTÉTICOS DE SOLOS ARGILOSOS TÍPICOS DA BR 319

4.1.1 Enquadramento das Misturas

A Tabela 4.3 esboça as frações de agregados selecionadas para compor as misturas utilizando as argilas BR 14 e BR 08, e a Tabela 4.4 e a Figura 4.8, as composições de cada peneira nas misturas.

Tabela 4. 3: Composição das misturas com as amostras 08 e 14 colhidas na BR 319.

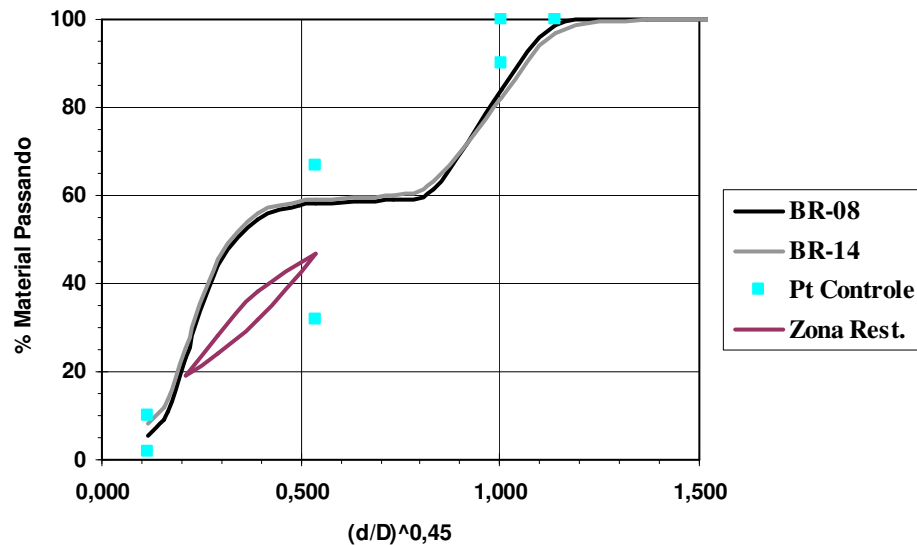
Amostra	Agregados (%)		Cimento (%)
	ASAC (%)	Areia – Manaus (%)	
BR 08	41	55	4
BR 14	40	53	7

Tabela 4. 4: Enquadramento das misturas BR 08 e BR 14 na especificação *Superpave*.

Peneira	Abertura (mm)	% em Massa Passando	
		BR 08	BR 14
2"	50,800	100	100
1½"	38,100	100	100
1"	25,400	100	100
¾"	19,050	100	100
½"	12,500	99	97
⅜"	9,530	84	82
¼"	6,300	61	63
Nº 4	4,750	59	60
Nº 8	2,360	58	59
Nº 10	2,000	58	59

Tabela 4.4: (cont.)

Peneira	Abertura (mm)	% em Massa Passando	
		BR 08	BR 14
Nº 16	1,180	55	56
Nº 30	0,600	44	46
Nº 40	0,420	43	45
Nº 50	0,300	23	25
Nº 80	0,170	11	14
Nº 100	0,150	9	12
Nº 200	0,075	5	8

**Figura 4. 8:** Curvas granulométricas das misturas BR 08 e BR 14 – *Superpave*.

Conforme se pode observar na Figura 4.8, as misturas BR 08 e BR 14 são idênticas em composição granulométrica, variando uma da outra apenas na origem do agregado sintético e na quantidade de material passando na peneira Nº 200.

4.1.2 Determinação dos Teores de Asfalto e Parâmetros Volumétricos

A Tabela 4.5 e a Figura 4.9 demonstram a variação na densidade máxima em relação à variação no teor de ligante. No caso trata-se da densidade máxima medida, e não teórica, dado que a mesma foi determinada em laboratório e não a partir das densidades dos constituintes.

Tabela 4. 5: Variação da densidade máxima em relação ao teor de ligante nas misturas BR 08 e BR 14.

Teor de Ligante (%)	Densidade Máxima Medida	
	BR 08	BR 14
6,0	2,088	2,182
7,0	2,023	2,130
8,0	1,981	2,051

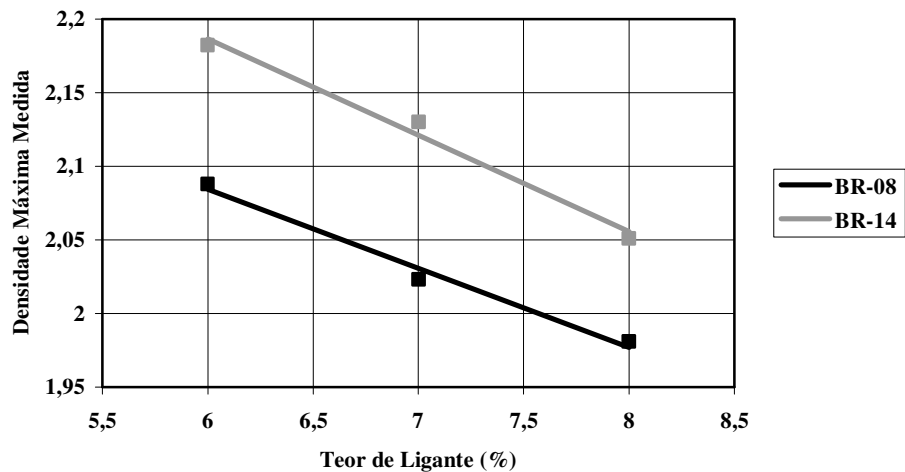


Figura 4. 9: Densidade máxima x teor de ligante das misturas BR 08 e BR 14.

Como observado na Figura 4.9, a mistura BR 14 apresentou maiores densidades máximas, o que já seria previsível tendo em vista deter maiores valores de densidade real e aparente. Contudo, ambas apresentaram potenciais de absorção de ligante idênticos, sendo este fato observado pela inclinação das retas no gráfico. Esta observação também

seria esperada, uma vez que o potencial de absorção de água das duas amostras, apresentado quando estas foram caracterizadas no capítulo anterior, 22,4% e 22,8%, respectivamente, é muito próximo.

Após determinação das densidades máximas das misturas, foram compactados três corpos de prova para cada teor e seus respectivos parâmetros volumétricos calculados. A Tabela 4.6 apresenta os valores de índices físicos obtidos para os teores ótimos de ligante das misturas, e as Figuras 4.10 e 4.11 esboçam as variações destes índices para os pontos de dosagem.

Tabela 4. 6: Teor de asfalto e índices físicos das misturas BR 08 e BR 14.

Mistura	Teor de asfalto (%)	Volume de vazios (%)	RBV (%)
BR 08	7,60	4,0	77,1
BR 14	7,70	4,0	78,3

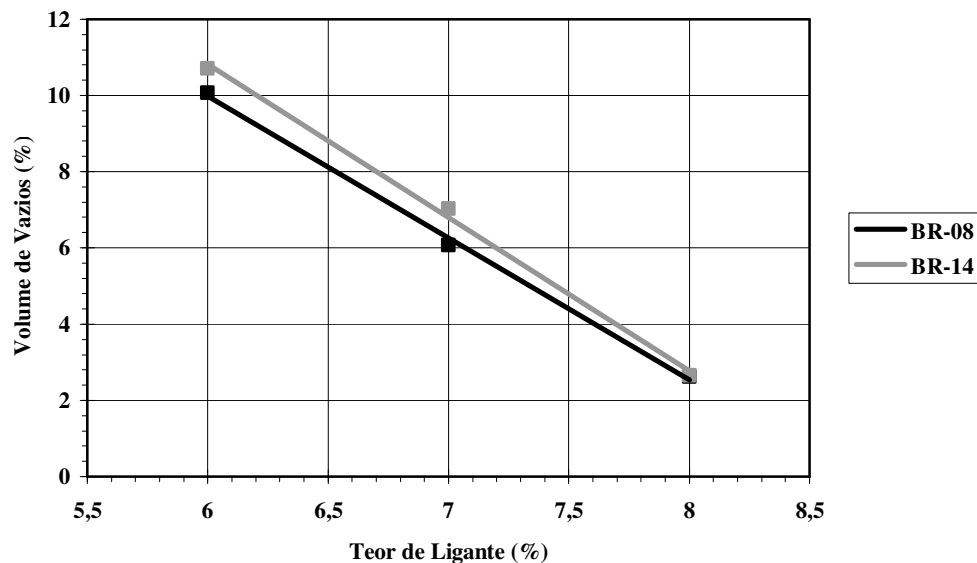


Figura 4. 10: Volume de vazios × teor de ligante das misturas BR 08 e BR 14.

Confrontando os dados da Tabela 4.2 com os da Tabela 4.6 e Figura 4.10, observa-se que as duas misturas se enquadraram dentro do estabelecido pela normalização brasileira para a faixa C no que concerne ao volume de vazios. Os valores obtidos para as duas misturas foram matematicamente iguais, e com teores de ligante bem próximos, o que reduz futuras análises quanto ao desempenho das misturas apenas para o campo da proporção granulométrica entre agregados.

A mistura BR 14 apresentou volume de vazios ligeiramente maior para os mesmos teores de ligante da mistura BR 08. Isso pode dever-se a maior quantidade de fíler na mistura BR 14, aumentando a área superficial de maneira tênue, porém suficiente para que esta variação seja observada pelo gráfico da Figura 4.10.

A análise da Figura 4.11 demonstra relações betume-vazios – RBV aproximadas para as duas misturas, sendo a BR 14 ligeiramente inferior. A relação observada pela reta também se enquadrou naquilo que era esperado, com o RBV diretamente proporcional ao teor de ligante.

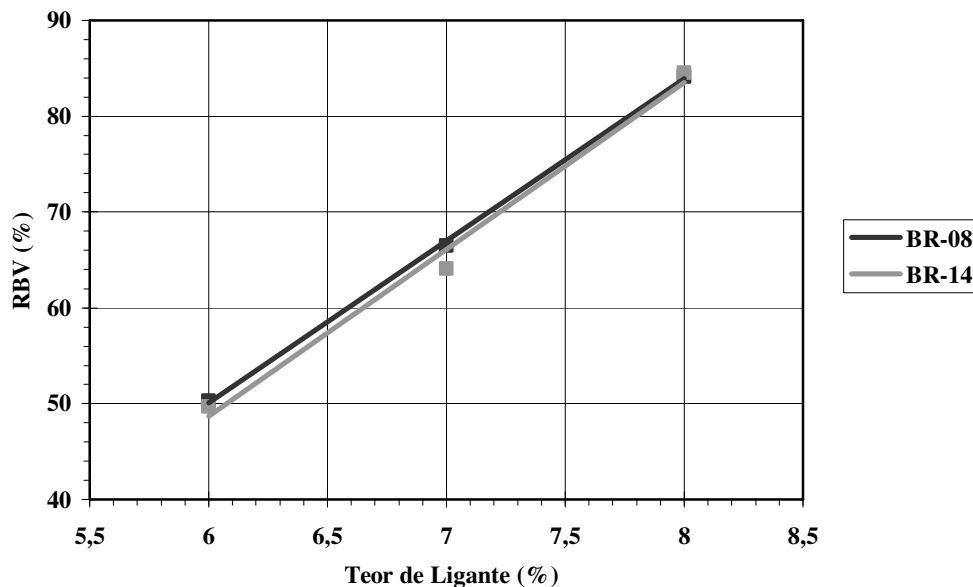


Figura 4. 11: Relação betume-vazios \times teor de ligante das misturas BR 08 e BR 14.

4.2 MISTURAS UTILIZANDO AGREGADO SINTÉTICO DE SOLO ARGILOSO DE MANAUS

4.2.1 Enquadramento das Misturas

O agregado sintético de argila calcinada (ASAC) produzido a partir da amostra de solo argiloso de Manaus compôs apenas uma das misturas asfálticas, bem como a utilização da areia residual do município como agregado miúdo e o cimento *Portland* como fíler.

Conforme opção feita no momento da produção dos agregados, a amostra Manaus deteve uma composição granulométrica diferenciada daquelas utilizadas para as amostras 08 e 14 da BR 319, contudo, com um mesmo diâmetro máximo. A escolha da composição granulométrica da mistura também utilizou os critérios especificados nas especificações *Superpave*, para um conjunto de pontos de controle e zona de restrição para agregados de diâmetro máximo de 9,50mm, constantes na Tabela 4.1.

A Tabela 4.7 esboça as frações de agregados selecionadas, e a Tabela 4.8 e a Figura 4.12, as composições de cada peneira na mistura.

Tabela 4. 7: Composição das misturas com a amostra de solo argiloso de Manaus.

Amostra	Agregados		Cimento (%)
	ASAC (%)	Areia – Manaus (%)	
MAO	41	55	4

Tabela 4. 8: Enquadramento da mistura MAO nas especificações *Superpave*.

Peneira	Abertura (mm)	% em Massa Passando
		MAO
2"	50,800	100
1½"	38,100	100
1"	25,400	100
¾"	19,050	100
½"	12,500	98
⅜"	9,530	74
¼"	6,300	60
Nº 4	4,750	59
Nº 8	2,360	58
Nº 10	2,000	57
Nº 16	1,180	55
Nº 30	0,600	44
Nº 40	0,420	43
Nº 50	0,300	23
Nº 80	0,170	11
Nº 100	0,150	9
Nº 200	0,075	5

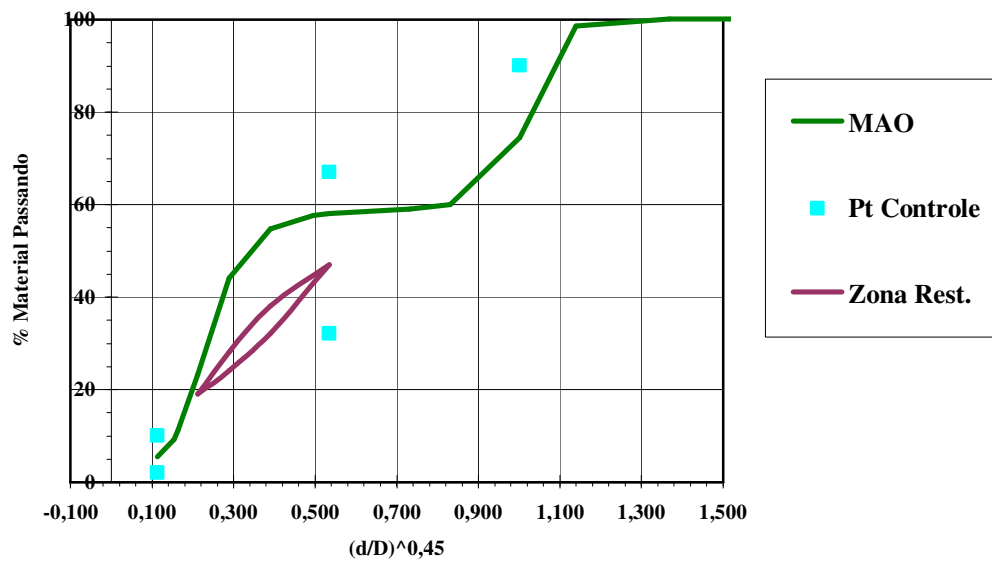


Figura 4. 12: Curva granulométrica da mistura MAO.

Confrontando os dados da Tabela 4.3 com os da Tabela 4.7 é possível observar que, apesar das misturas BR 08 e MAO apresentarem as mesmas proporções de agregados, o diferencial ficou por conta da fração graúda, com a segunda amostra detendo uma maior proporção de grãos entre 12,50 e 9,53mm de diâmetro.

4.2.2 Determinação dos Teores de Asfalto e Índices Físicos

Os parâmetros constantes na Tabela 4.2 também balizaram a dosagem da mistura MAO. As faixas de temperatura de mistura e compactação utilizadas para ligante, agregados e misturas são as mesmas usadas anteriormente. A Tabela 4.9 e a Figura 4.13 demonstram a variação na densidade máxima em relação à variação no teor de ligante.

Tabela 4. 9: Variação da densidade máxima em relação ao teor de ligante na mistura MAO.

Teor de Ligante (%)	Densidade Máxima Medida
6,0	2,071
7,0	2,019
8,0	1,988

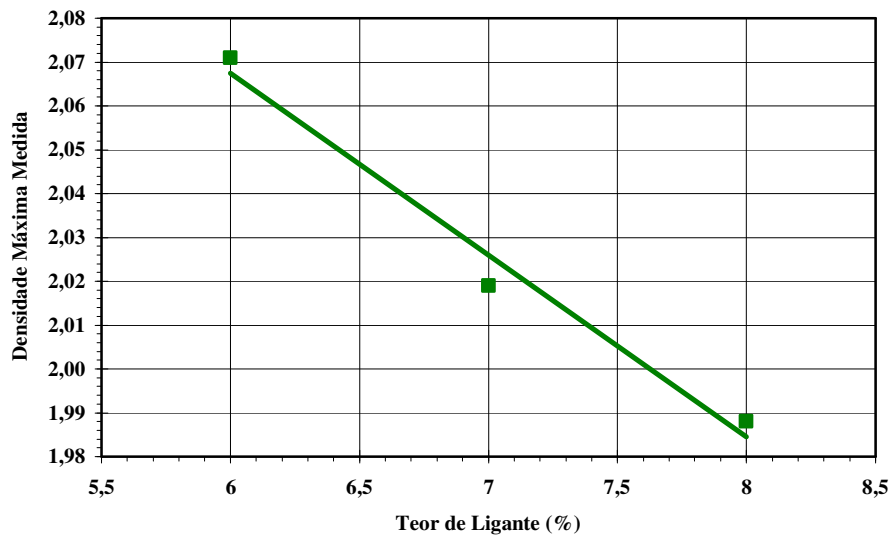


Figura 4. 13: Densidade máxima medida × teor de ligante da mistura MAO.

Os valores obtidos para esta mistura mostraram-se pouco superiores aqueles obtidos para a Mistura BR 08, o que se deve a uma pequena diferença nas densidades. Pode-se notar, ainda, uma menor absorção de ligante por parte desta amostra em relação àquelas obtidas de solos argilosos da BR 319, possibilitando prever-se um menor teor ótimo do mesmo para esta mistura, uma vez que a inclinação da reta de variação da densidade máxima é menor para a Amostra MAO.

Da moldagem de três corpos de prova para cada teor e da análise dos índices físicos, obtiveram-se os índices físicos apresentados na Tabela 4.10. As Figuras 4.14 e 4.15 esboçam a variação destes índices nos pontos de dosagem.

Tabela 4. 10: Teor de asfalto e índices físicos da mistura MAO.

Mistura	Teor de asfalto (%)	Volume de vazios (%)	RBV (%)
MAO	7,2	4,0	76,9

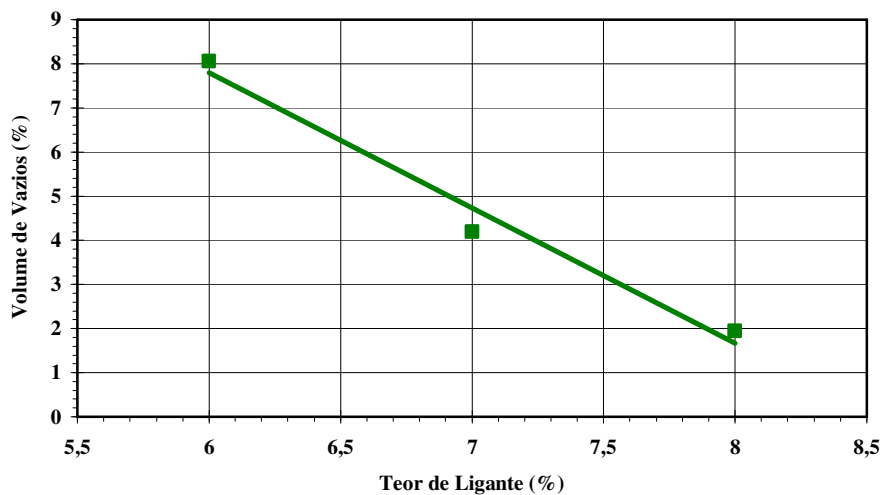


Figura 4. 14: Volume de vazios × teor de ligante da mistura MAO.

Confrontando com os dados obtidos para as Misturas BR 08 e BR 14 foi possível observar que a mistura MAO apresenta menores volume de vazios que aquelas outras, para os mesmos teores de ligante. Teria contribuído para um teor ótimo de ligante mais baixo o menor potencial de absorção por parte da Amostra MAO quando comparada à amostra BR 08. Esta diferença permitiria uma perda menor de cimento asfáltico, deixando uma maior quantidade de ligante livre para preenchimento de vazios na mistura, fato este demonstrado pela menor inclinação da reta de variação do volume de vazios da mistura MAO (Figura 4.14) em relação à mistura BR 08 (Figura 4.10).

A análise gráfica demonstra também um posicionamento inferior da mesma reta em relação à da mistura BR 08, o que poderia ser relacionado à diferença de graduação entre as duas amostras no tocante a fração de diâmetro inferior a 12,50mm e 9,53mm. Uma maior quantidade desta fração na mistura MAO poderia vir a colaborar para uma melhor distribuição dos finos ao longo do esqueleto graúdo, permitindo um melhor empacotamento e, conseqüentemente, menor volume de vazios.

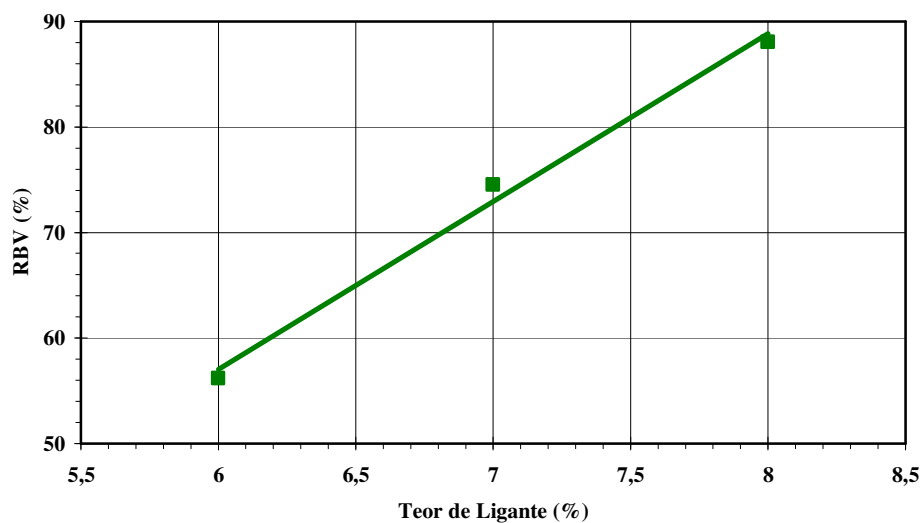


Figura 4. 15: Relação betume-vazios × teor de ligante da mistura MAO.

O RBV obtido para a mistura MAO também se enquadrado dentro do intervalo desejado, sendo próximo aos valores anteriores, muito embora o teor de ligante seja inferior. Este fato pode vir a ser constatado com a análise das retas do gráfico, onde se observa que o gráfico para esta mistura leva a valores mais altos de RBV para menores teores de ligante.

4.3 MISTURAS UTILIZANDO AGREGADO SINTÉTICO DE SOLO ARGILOSO DE URUCU

4.3.1 Enquadramento das Misturas

Para composição da mistura com agregado sintético de argila calcinada produzido com solo argiloso de Urucu (Amostra PUC), utilizou-se como o agregado miúdo uma composição de duas areias típicas da região da Base de Operações Geólogo Pedro de Moura, uma vez que estas areias são comumente empregado nas misturas asfálticas do revestimento do sistema viário do pólo. Como fíler optou-se por usar o cimento *Portland*.

A composição das misturas pode ser analisada pelas Tabelas 4.11 e 4.12, assim como na Figura 4.16.

Tabela 4. 11: Composição das misturas com a amostra de solo argiloso de Urucu.

Amostra	Agregados			Cimento (%)
	ASAC (%)	Areia – Urucu (%)	Areia – Coari (%)	
PUC	41	20	35	4

Mais uma vez optou-se por uma proporção semelhante àquela utilizada para a Mistura BR 08, sendo, contudo, obtida uma curva granulométrica com maior balanço entre frações mais finas e mais grossas (Figura 4.16).

Tabela 4. 12: Enquadramento da mistura PUC nas especificações *Superpave*.

Peneira	Abertura (mm)	% em Massa Passando
		PUC
2"	50,80	100
1½"	38,10	100
1"	25,40	100
¾"	19,05	100
½"	12,500	98
⅜"	9,530	86
¼"	6,300	66
Nº 4	4,750	58
Nº 8	2,360	55
Nº 10	2,000	54
Nº 16	1,180	50
Nº 30	0,600	38
Nº 40	0,420	30
Nº 50	0,300	24
Nº 80	0,170	10
Nº 100	0,150	7
Nº 200	0,075	4

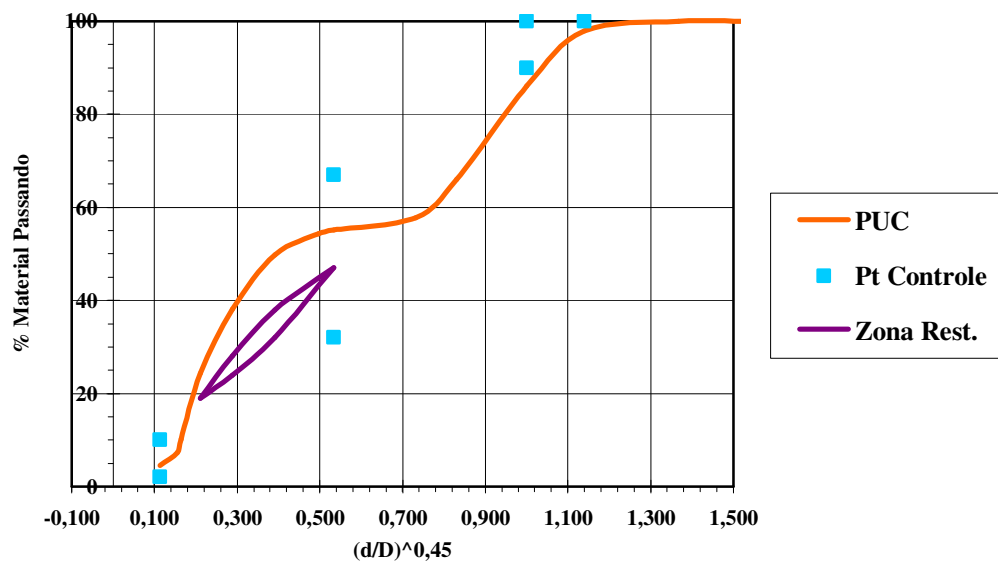


Figura 4. 16: Curva granulométrica da mistura PUC.

Conforme análise da Figura 4.16 é possível observar uma maior uniformidade da mistura PUC em relação às anteriores. Este fato se deve a opção de mistura das duas areias da região, proporcionando atender melhor às frações inferiores. Todavia, a descontinuidade nas frações entre os diâmetros 4,75mm e 2,36mm ainda é observada, muito embora em menor grau do que aquela presente nas misturas anteriores (Figuras 4.8 e 4.12).

4.3.2 Determinação dos Teores de Asfalto e Índices Físicos

Foram obedecidas as condições de dosagem estabelecidas para as misturas anteriores. Todavia, foi observada uma maior sensibilidade da mistura quanto à variação de índices físicos para os teores de ligante, obtendo-se os valores desejados para menores quantidades de asfalto. Por opção, foi utilizada a variação percentual de 0,5% entre cada ponto, ao invés de 1,0% usado anteriormente, de modo a se obter uma melhor visualização da variação da densidade máxima para os pontos de dosagem. Estes valores podem ser visualizados na Tabela 4.13 e na Figura 4.17.

Tabela 4. 13: Variação da densidade máxima em relação ao teor de ligante na mistura PUC.

Teor de Ligante (%)	Densidade Máxima Medida
6,0	2,141
6,5	2,117
7,0	2,076
7,5	2,039

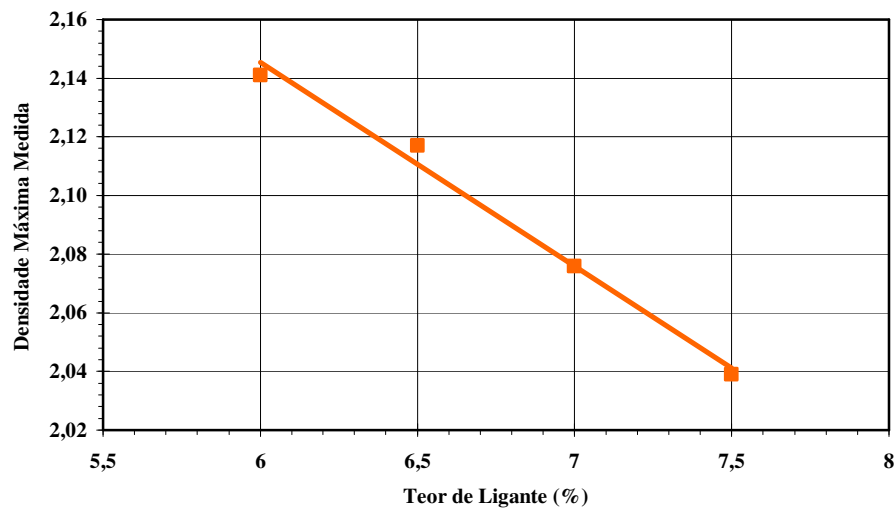


Figura 4. 17: Densidade máxima medida × teor de ligante da mistura PUC.

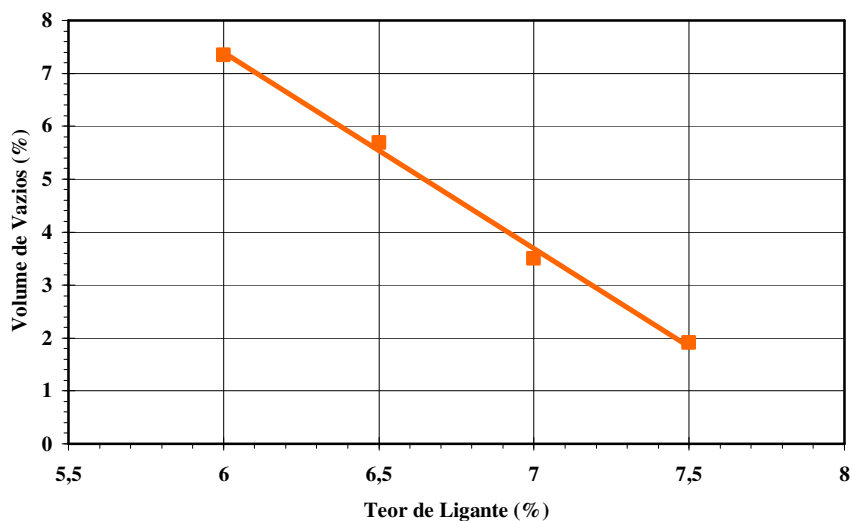
Observa-se, pela Figura 4.17, uma inclinação de reta semelhante às das amostras BR 08 e BR 14, muito embora seu potencial de absorção seja o mais baixo das quatro amostras. Possivelmente por este agregado apresentar uma maior afinidade pelo ligante, levando a uma melhor cobertura dos poros, resultando em um comportamento semelhante ao de amostras com potenciais de absorção superiores.

Da moldagem dos corpos de prova, obtiveram-se os índices físicos para o teor ótimo de ligante conforme indicado na Tabela 4.14.

Tabela 4. 14: Índices físicos da mistura PUC.

Mistura	Teor de asfalto (%)	Volume de vazios (%)	RBV (%)
PUC	6,9	4,1	76,1

Como pode ser observado, o potencial de absorção mais baixo da amostra PUC permitiu que os parâmetros de dosagem estabelecidos pela norma brasileira fossem atingidos para um menor teor de ligante. As Figuras 4.18 e 4.19 esboçam a variação dos índices físicos quando relacionadas ao teor de ligante. A Figura 4.18 corrobora para a afirmação de que o menor potencial de absorção desta amostra permitiu atingir volume de vazios menor para os mesmos teores de ligante.

**Figura 4. 18:** Volume de vazios × teor de ligante da mistura PUC.

A Figura 4.19 demonstra ainda valores de RBV mais altos para os mesmos teores de ligante das misturas anteriores, fato justificado pela maior afinidade ao ligante, obtendo-se volume de vazios mais baixos para teores semelhantes, aumentando-se a relação abordada. O valor obtido foi o mais alto, quando considerado um teor ótimo inferior para esta amostra.

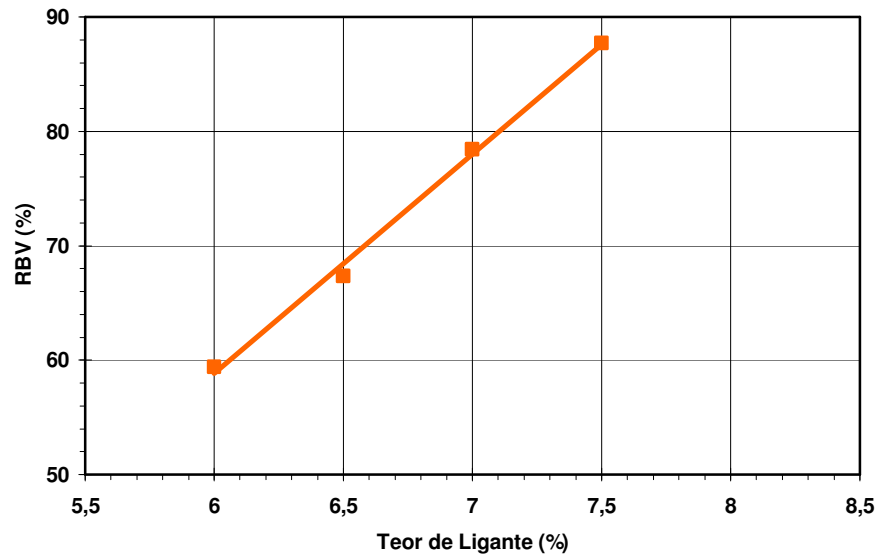


Figura 4. 19: Relação betume-vazios × teor de ligante da mistura PUC.

4.4 MISTURA TIPO CONCRETO ASFÁLTICO PADRÃO

A mistura padrão geralmente utilizada na região Amazônica utiliza como agregado graúdo o seixo rolado. O esqueleto de agregados é enquadrado na faixa C antiga proposta pelo DNER atual DNIT e pode ser visualizada na Tabela 4.15 e Figura 4.20.

Tabela 4. 15: Composição da mistura padrão utilizado.

Amostra	Agregados		Cimento (%)
	Seixo (%)	Areia – Manaus (%)	
SEIXO	50	45	5

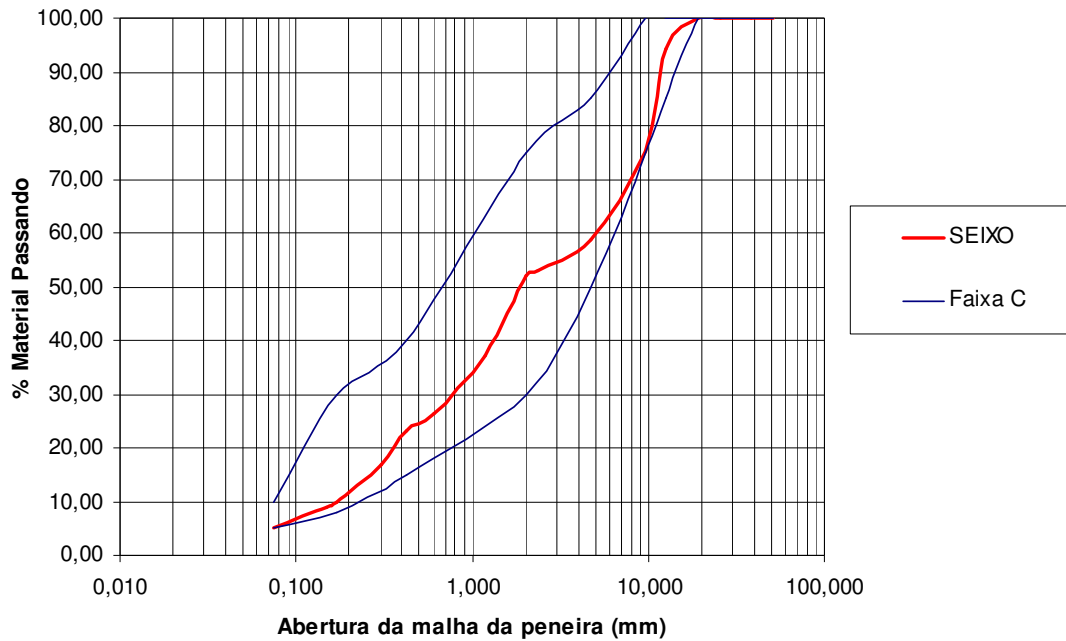


Figura 4. 20: Curva granulométrica da mistura SEIXO.

O teor ótimo utilizado para a mistura padrão é de 5,5% produzindo os índices físicos expostos na Tabela 4.16.

Tabela 4. 16: Teor de asfalto e índices físicos da mistura SEIXO.

Mistura	Teor de asfalto (%)	Volume de vazios (%)	RBV (%)
SEIXO	5,5	4,0	75,9

Nota-se como era esperado que a mistura padrão se enquadra nas normas propostas pelo DNIT.

4.5 DISCUSSÃO QUANTO AOS PARÂMETROS FÍSICOS DAS MISTURAS

Dos pontos abordados anteriormente constatou-se maiores densidades para a Mistura BR 14, coerente com as análises de caracterização dos agregados feitas no capítulo anterior. Todavia, a Mistura PUC apresentou valores de densidade máxima superiores aos da Mistura BR 08, muito embora esta possua maiores densidades individuais de agregados. A hipótese levantada para esta evidência viria do fato da Mistura PUC apresentar menor quantidade de poros que, quando recobertos pelo ligante, levaria a valores de densidade mais altos.

Ensaio de absorção de ligante poderiam corroborar esta hipótese, visto que o ensaio de absorção de água não expõe a afinidade ao ligante apresentada pelo agregado nem tão pouco o fato deste apresentar menores poros permeáveis.

Outra característica das misturas que se mostrou bastante evidente foi o fato da amostra de agregado de Urucu apresentar os menores volumes de vazios para os mesmos teores de ligante das demais. Na outra extremidade deste quesito, a Mistura BR 14 apresentou os maiores volumes de vazios.

A razão poderia se dever ao fato da Mistura PUC ser a que possui a menor quantidade de material de diâmetro inferior a 0,075mm e a BR 14 a que apresenta a maior quantidade. A superfície específica aumenta com o aumento do teor de finos, exigindo uma maior quantidade de ligante para recobrir este material.

A mistura com os agregados de Urucu possui ainda uma menor quantidade de areia, situando esta fração mais próxima do que estabelece a *Superpave*. Esta porção também exigiria menores teores de ligante para recobrir os grãos.

Quanto ao RBV, mais uma vez os comportamentos extremos são observados nas Misturas PUC e BR 14, sendo a primeira à detentora dos maiores valores. O fato é

diretamente afetado pelo fato desta mistura apresentar menores volumes de vazios para os mesmos teores de ligante. A Tabela 4.17 apresenta os resultados dos parâmetros volumétricos para as quatro misturas.

Tabela 4. 17: Parâmetros volumétricos para os teores ótimos das misturas.

Mistura	Teor de asfalto (%)	VAM (%)	VCB (%)	Vv (%)	RBV (%)
BR 08	7,60	17,2	13,2	4,0	77,1
BR 14	7,70	17,9	13,9	4,0	78,3
MAO	7,25	16,7	12,7	4,0	76,9
PUC	6,90	16,5	12,5	4,1	76,1

Observa-se, conforme esperado, que existem menos vazios no agregado mineral na mistura PUC, enquanto que a BR 14 apresenta o maior valor deste índice. Isto demonstra melhor empacotamento dos agregados na primeira, em relação a segunda e as demais.

Para os vazios cheios com betume ocorre exatamente o contrário: os valores maiores pertencem à mistura BR 14 e os menores à PUC. Este fator demonstra a necessidade de uma maior quantidade de ligante para preencher os espaços intergranulares na primeira amostra, levando a maior teor ótimo nesta.

O fato destas duas observações serem constatadas corrobora o fato do RBV da mistura PUC ser superior ao da BR 14, bem como das demais, para os respectivos teores de betume analisados.

CAPÍTULO 5

PROGRAMA EXPERIMENTAL E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Utilizou-se a *Universal Testing Machine* (UTM) (Figura 5.1) do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Amazonas para realizar ensaios triaxiais estáticos nas cinco misturas descritas no Capítulo 4. Para cada dosagem, os corpos de prova foram ensaiados em três taxas de deslocamento quais sejam: 0,08mm/s, 0,016mm/s e 0,0032mm/s e três pressões confinantes, 0kPa, 100kPa e 200kPa, totalizando assim nove combinações para cada mistura.

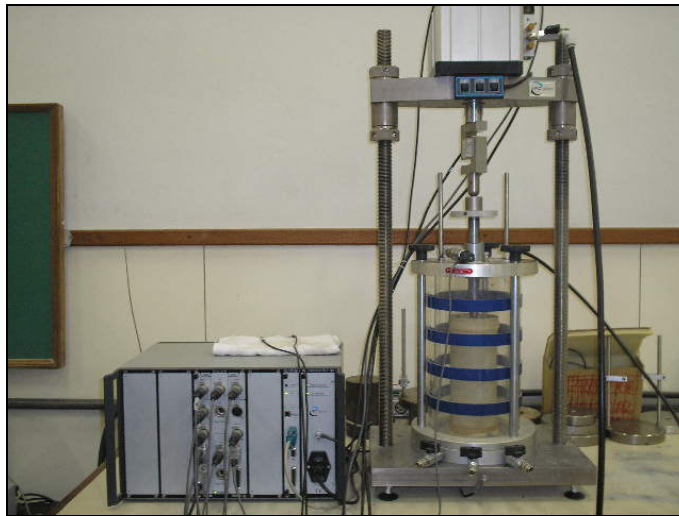


Figura 5. 1: Equipamento utilizado para realização dos ensaios triaxiais.

Foram moldados 36 (trinta e seis) corpos de prova com dimensões de 105mm de diâmetro e 62mm de altura, todos estes possuindo os índices físicos especificados no Capítulo 4. Três corpos de prova foram utilizados em uma combinação de taxa de deslocamento e pressão confinante e três foram utilizados em combinações de taxa de deslocamento e ausência da pressão confinante com o objetivo de se medir o desenvolvimento de deformações radiais no corpo de prova.

O ensaio é realizado em dois passos: primeiramente, aplica-se a pressão confinante e espera-se que a mesma se estabilize, logo em seguida, aplica-se uma taxa de deslocamento constante ao corpo de prova até que o mesmo atinja o nível de deformação desejado (Figuras 5.2 e 5.3).

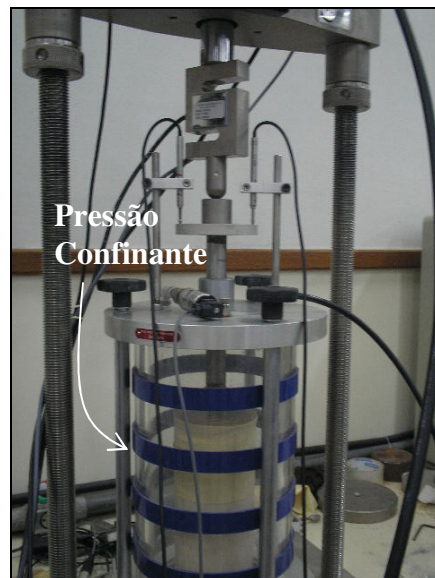


Figura 5. 2: Câmara utilizada nos ensaios.



Figura 5. 3: Pistão usado na aplicação do deslocamento.

Vale ressaltar que nos ensaios triaxiais geralmente realizados a aplicação de deslocamento é cessada quando o corpo de prova atinge a tensão máxima. Nos ensaios realizados para esta pesquisa levou-se adiante o ensaio para que se pudesse regredir os parâmetros de dano de acordo com o modelo descrito no Capítulo 2.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Tem-se nas Figuras de 5.4 a 5.12 os resultados obtidos para as taxas de deslocamento de 0,08mm/s, 0,016mm/s e 0,0032mm/s. Nota-se que as misturas asfálticas comumente utilizadas na região (mistura utilizando seixo) apresentam resultados inferiores às misturas asfálticas utilizando ASAC em sua confecção.

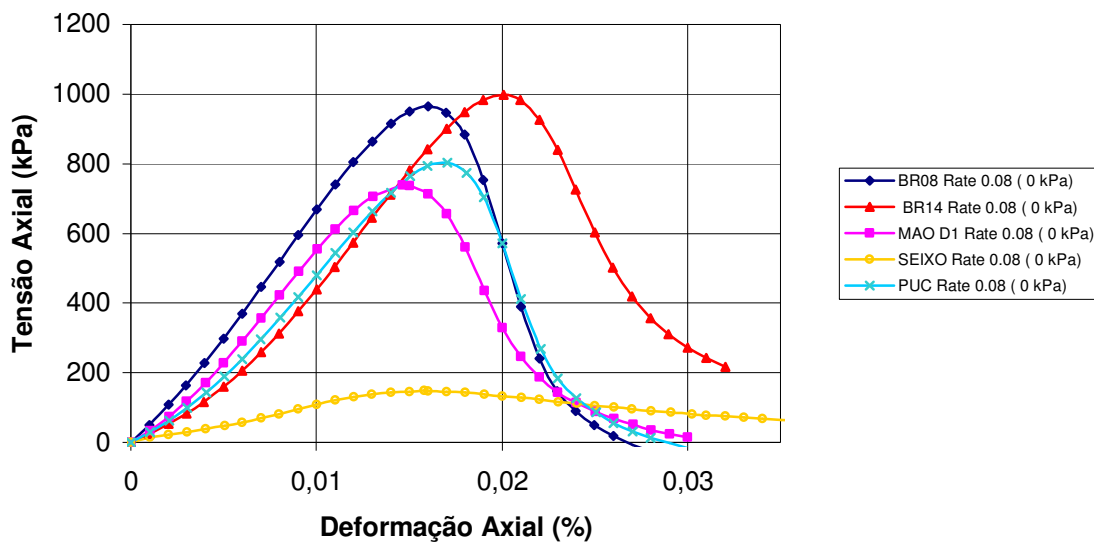


Figura 5. 4: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s sem pressão confinante.

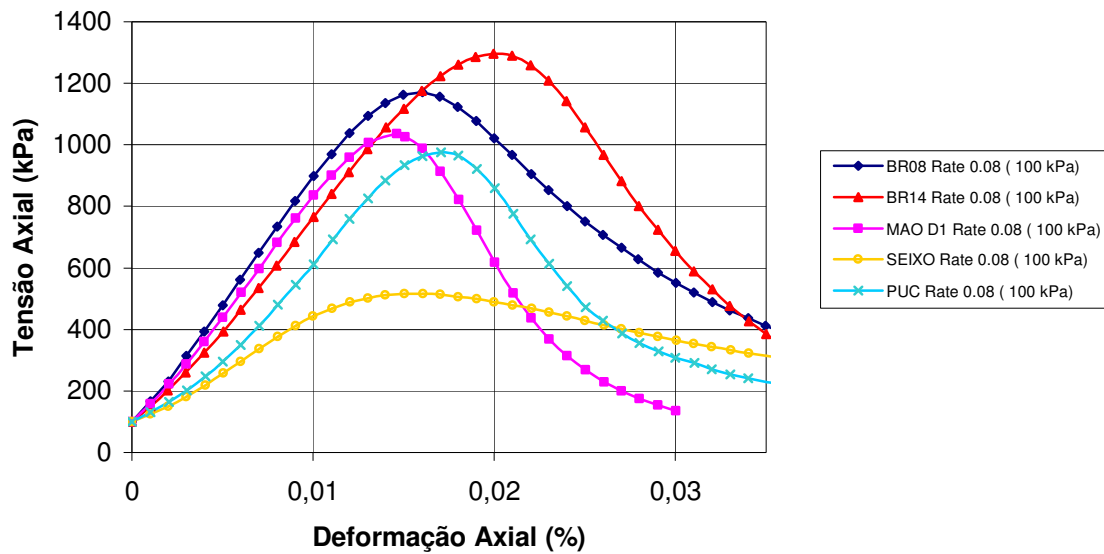


Figura 5. 5: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s e pressão confinante de 100kPa.

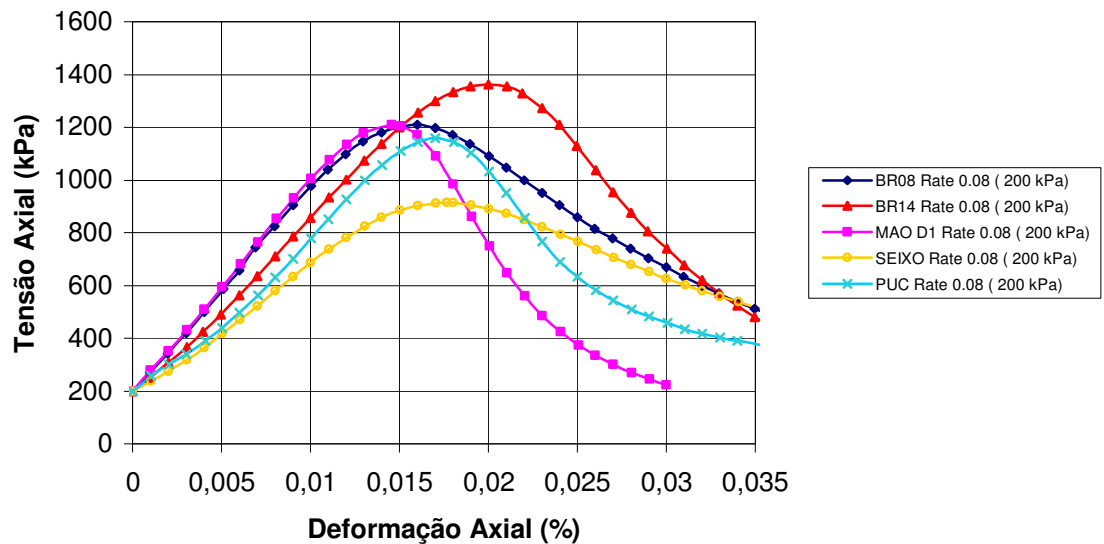


Figura 5. 6: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s e pressão confinante de 200kPa.

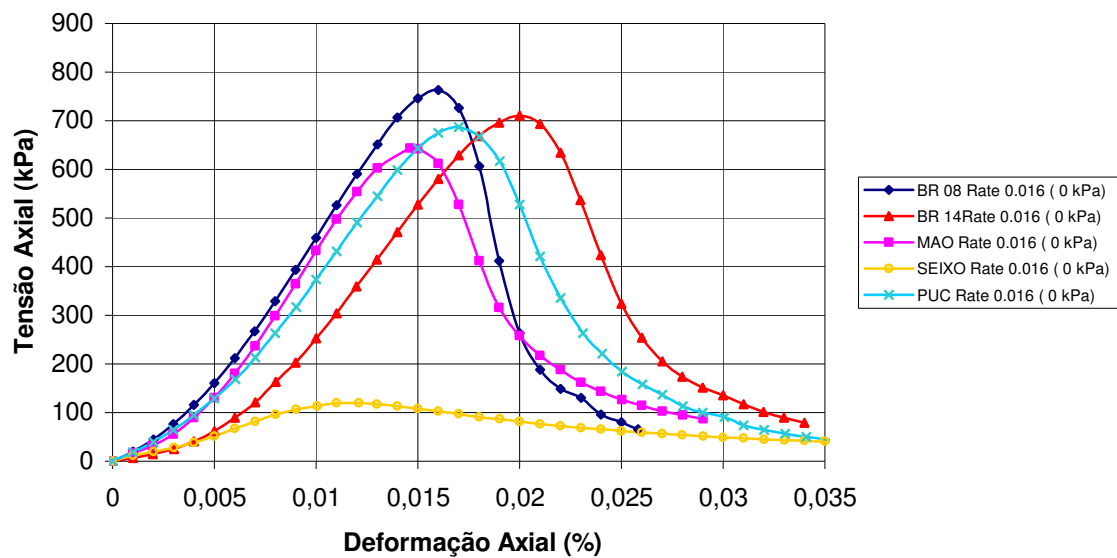


Figura 5. 7: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s sem pressão confinante.

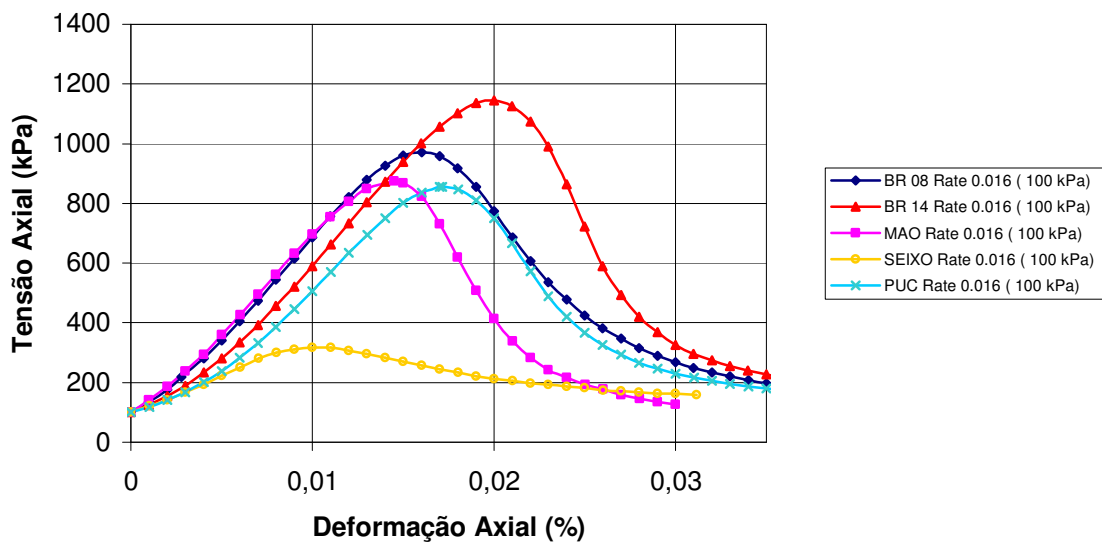


Figura 5. 8: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s e pressão confinante de 100kPa.

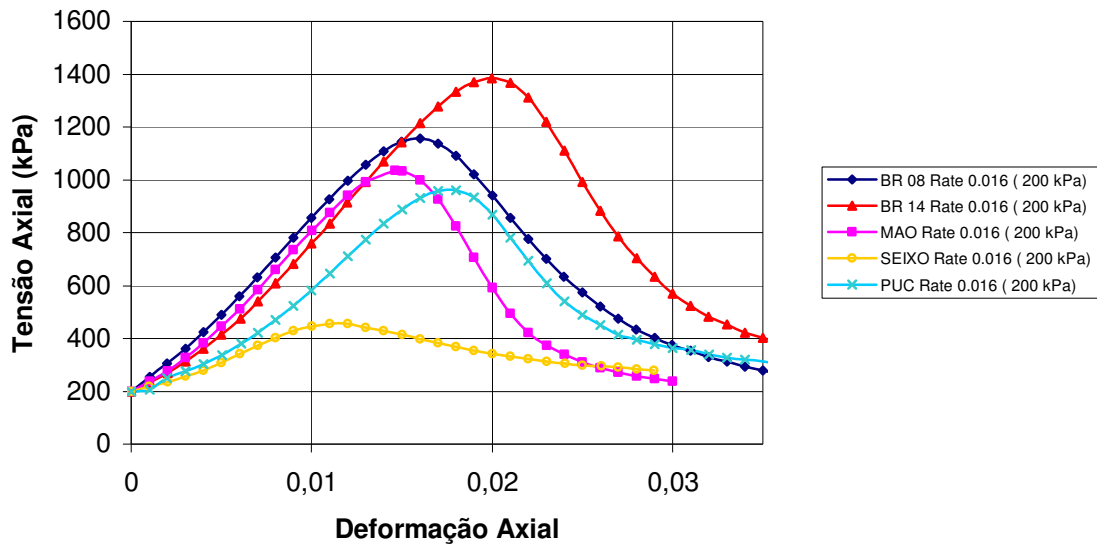


Figura 5. 9: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s e pressão confinante de 200kPa.

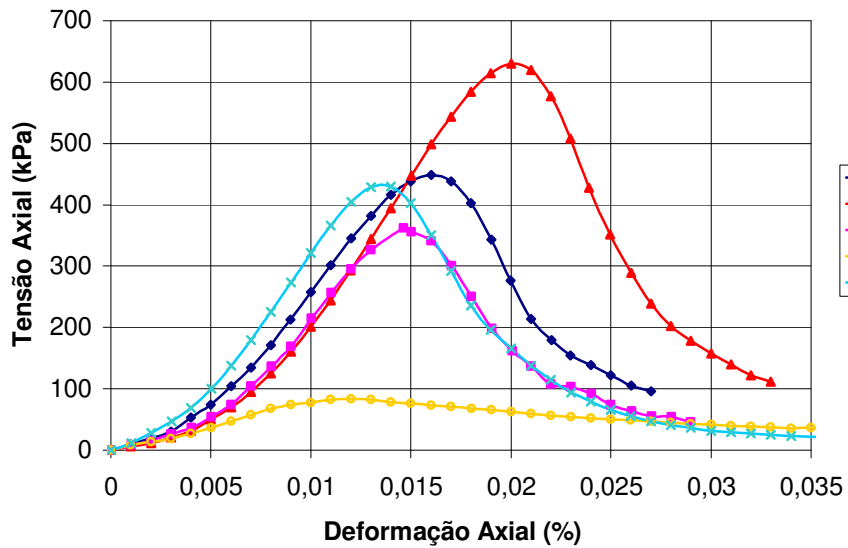


Figura 5. 10: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,0032 mm/s sem pressão confinante.

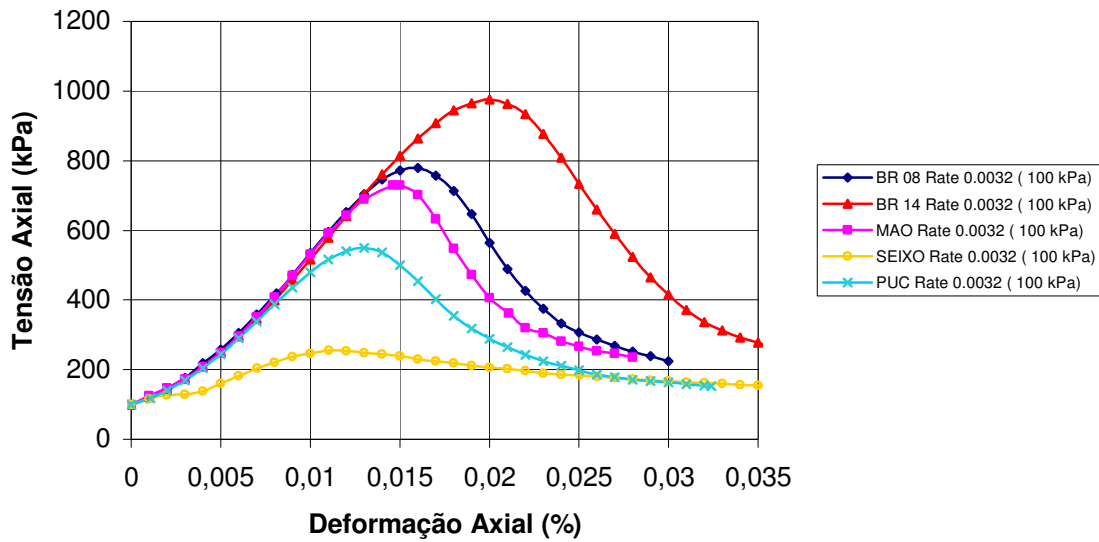


Figura 5. 11: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s e pressão confinante de 100kPa.

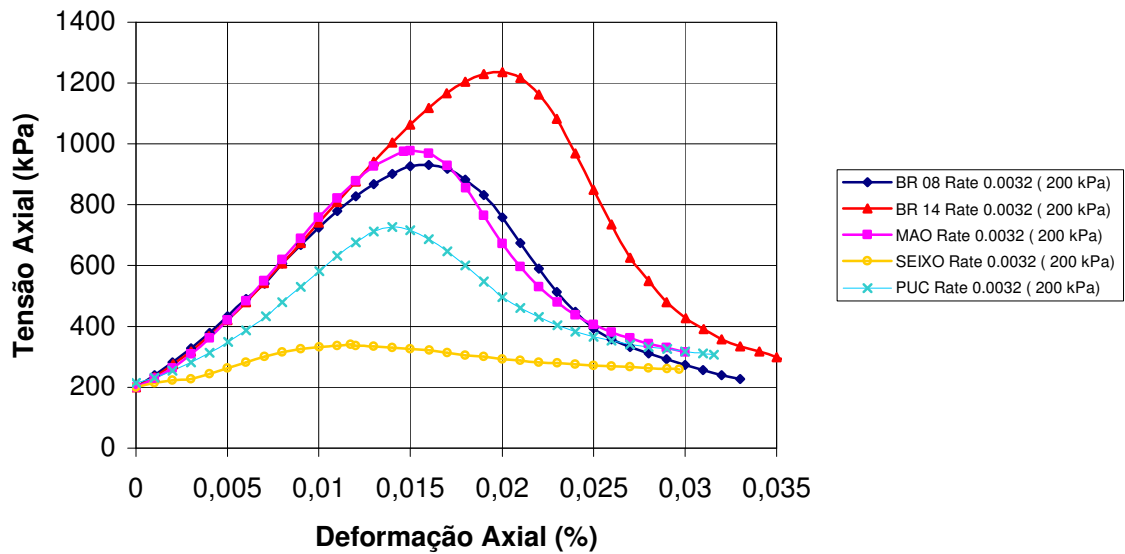


Figura 5. 12: Resultados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s e pressão confinante de 200kPa.

Como já era esperado, nota-se nas figuras apresentadas que as misturas asfálticas

tipo Concreto Asfáltico são dependentes da pressão confinante e da taxa de deslocamento. Quanto maior a pressão confinante, maior será a tensão de ruptura da mistura e quanto maior a taxa de deslocamento ou de aplicação de carga, maior será a tensão de ruptura da mistura.

Nota-se ainda que as misturas confeccionadas com ASAC obtido a partir das argilas encontradas na BR 319 apresentaram os melhores resultados quando comparadas com as demais. As misturas confeccionadas com ASAC obtido a partir das argilas encontradas em Manaus – MAO e das argilas encontradas em Porto Urucu – PUC apresentaram resultados semelhantes quanto à tensão de ruptura quase na totalidade das pressões confinantes e taxas de deslocamento.

Observa-se que a mistura utilizada na cidade de Manaus tendo o seixo como agregado graúdo só produz resultados semelhantes às demais misturas a altas taxas de deslocamento, na ordem de 0,08mm/s e a altas pressões confinantes, na ordem de 200kPa.

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção os resultados mostrados nas Figuras de 5.4 a 5.12 serão analisados tendo em vista o modelo desenvolvido por TASHMAM (2003) explicado no Capítulo 2. A Figura 5.13 mostra uma curva tensão \times deformação esquemática.

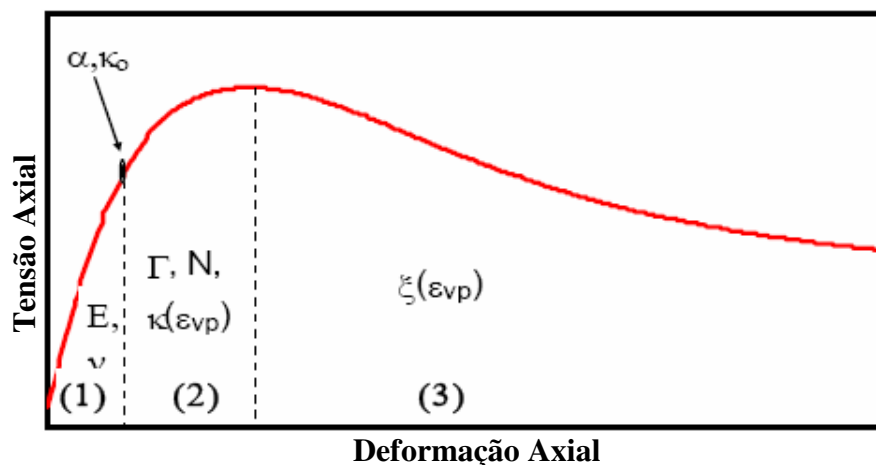


Figura 5. 13: Esquema de uma curva tensão \times deformação (DESSOUKY, 2005).

Como mostra a Figura 5.13, a curva tensão \times deformação é dividida em três regiões distintas:

- (i) a região 1, representada por uma linha reta, mostra a fase elástica do material onde pode-se obter a propriedade elástica do mesmo, ou seja, o módulo de elasticidade; pode-se utilizar o primeiro ponto após a região 1 (interface entre as regiões 1 e 2) para se obter os parâmetros que definem a superfície de fluência inicial α , κ_0 e β ;
- (ii) a região 2 se inicia no primeiro ponto após a região 1 até atingir a tensão de ruptura do material; nesta região assume-se que não ocorre desenvolvimento de dano no material e que a mesma é dominada pelo fenômeno de endurecimento ou *hardening*, os parâmetros do modelo de Perzyna (N e Γ) e da lei de evolução de endurecimento (k_1 e k_2) são obtidos a partir da regressão dos dados desta região;
- (iii) a região 3 tem início logo após a tensão de ruptura do material e se estende até o final do ensaio nesta região. Assume-se que as rotações e deslizamentos entre os agregados são grandes o suficiente para causar trincas de adesão e coesão. Assim sendo, na região 3 não se observa

efeito de endurecimento e sim de amolecimento ou *softening* do material. Os parâmetros da lei de evolução de dano proposta por MASAD (2004) no Capítulo 2 são obtidos a partir da regressão dos dados obtidos na região 3.

5.3.1 Relação entre os parâmetros do modelo e as propriedades do material

Os parâmetros do modelo foram obtidos conforme explicado na Figura 5.13 regredindo os dados experimentais simultaneamente para as taxas de deslocamento de 0,08mm/s e 0,016mm/s e pressões confinantes de 0kPa, 100kPa e 200kPa. Na regressão dos dados utilizou-se a equação analítica desenvolvida a partir do modelo explicado no Capítulo 2 para o caso triaxial de tensões (ver Apêndice A).

O parâmetro Γ está diretamente ligado a taxa de crescimento da superfície de fluência, enquanto o parâmetro N controla a sensibilidade do material a taxa de aplicação de carga ou deslocamento. Tem-se nas Figuras 5.14 e 5.15 os valores obtidos para ambos os parâmetros.

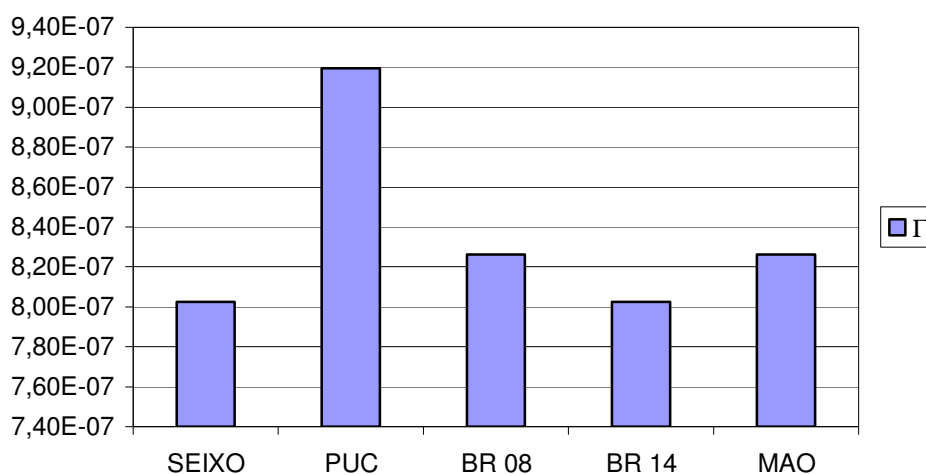


Figura 5. 14: Parâmetro Γ para as misturas confeccionadas.

A Figura 5.14 mostra um menor valor de Γ para a mistura padrão utilizada no

estado do Amazonas, mistura esta confeccionada utilizando seixo rolado dos rios como agregado graúdo. Observa-se ainda um valor de Γ semelhante ao valor encontrado para a mistura com seixo para a mistura produzida com argila nomeada de BR 14. O maior valor de Γ foi obtido para a mistura confeccionada com a argila coletada na província petrolífera de Urucu, possivelmente por possuir o menor teor de ligante tornando-a menos viscosa que as demais. Ressalta-se que menores valores de Γ proporcionam tensões de ruptura superiores e ainda reduzem o desenvolvimento de deformações permanentes no material, como foi mostrado no estudo paramétrico apresentado no Capítulo 2 (ver Figura 2.8).

A Figura 5.15 mostra a mesma tendência da Figura 5.14 diferenciando-se apenas na mistura confeccionada utilizando ASAC produzida com a argila denominada de BR 14. Esta mistura apresenta o segundo maior valor de N . Este parâmetro controla o nível de não linearidade do modelo, especificamente a sensibilidade do material à taxa de aplicação de carga ou deslocamento. Segundo os resultados obtidos, a mistura mais sensível a aplicação de carga ou deslocamento é a mistura confeccionada com seixo rolado, ou seja, a mistura padrão utilizada no estado do Amazonas, possivelmente por grande parte de sua resistência estar centrada no ligante asfáltico visto que a mesma não possui bom atrito e intertravamento entre os seus agregados.

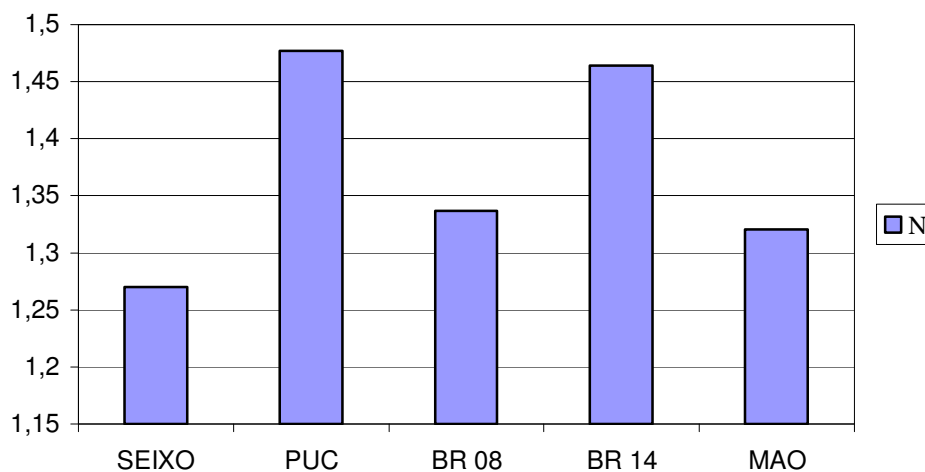


Figura 5. 15: Parâmetro N para as misturas confeccionadas.

Tem-se na Figura 5.16 a superfície de fluência inicial para as misturas. Os parâmetros que definem a superfície de fluência inicial α e κ_0 estão relacionados com as propriedades de atrito e intertravamento da mistura e com o comportamento da mesma quanto a coesão e adesão.

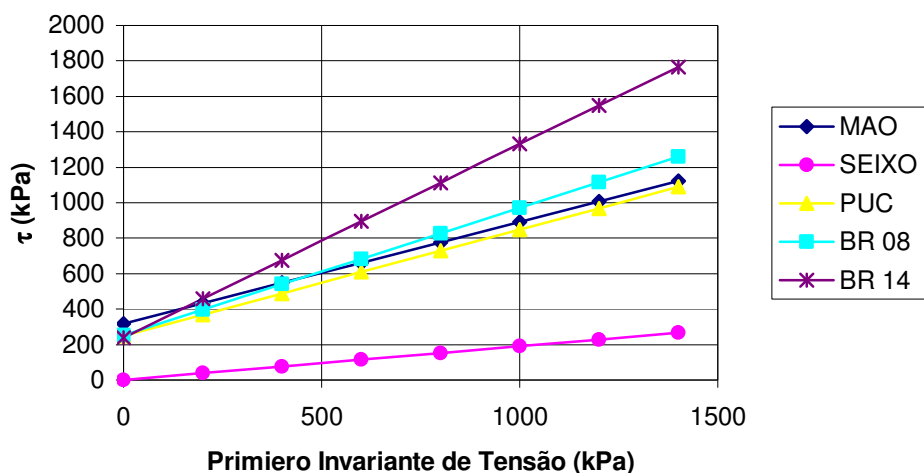


Figura 5. 16: Superfície de fluência inicial.

Nota-se que as misturas confeccionadas com ASAC (BR 08, BR 14, MAO e PUC) possuem aproximadamente o mesmo limite elástico inicial a baixos níveis de tensão. A mistura produzida a partir da argila BR 14 apresenta superfície de fluência superior quando comparada com as demais, denotando assim maior tensão de fluência para estas misturas, possivelmente devido a um maior intertravamento e contato entre os agregados proporcionados pela quebra dos mesmos durante o processo de compactação. Percebe-se ainda que os valores de α e κ_0 são praticamente nulos para a mistura utilizando seixo (ver Apêndice B), resultado já esperado devido a forma arredondada e superfície lisa de tal agregado. As misturas MAO, BR 08 e PUC possuem superfície de fluência inicial semelhantes denotando assim tensões de fluência aproximadas para estas misturas. Ressalta-se que no modelo apresentado no Capítulo 2, a superfície de fluência inicial é o limite entre as fases elásticas (que apresenta deformações recuperáveis) e a fase viscoplástica (onde se desenvolvem deformações permanentes). São desejadas

elevadas superfícies de fluência de forma a se minimizar as deformações permanentes nas misturas asfálticas.

As Figuras de 5.17 a 5.22 mostram a comparação entre os resultados experimentais e os obtidos com o modelo em termos de tensão de fluência para as misturas analisadas.

Observa-se nas figuras que seguem que a tensão de fluência é sensível à taxa de deformação e à pressão confinante. Nota-se ainda que o modelo se enquadra aos dados experimentais satisfatoriamente, tendo em vista a variabilidade de materiais compósitos como as misturas asfálticas.

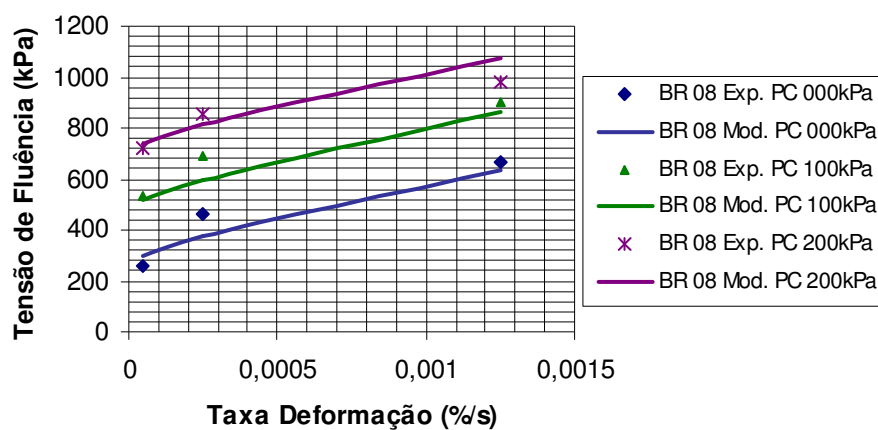


Figura 5. 17: Modelo × experimento ASAC BR 08 / Tensão de fluência.

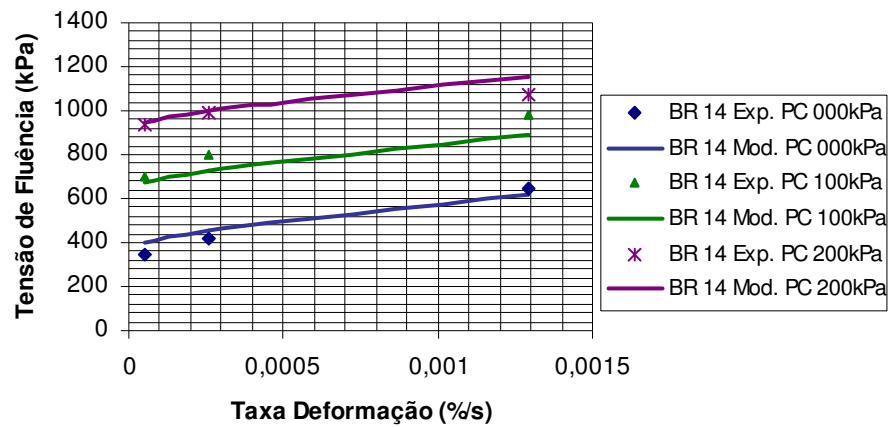


Figura 5. 18: Modelo × experimento ASAC BR 14 – Tensão de fluência.

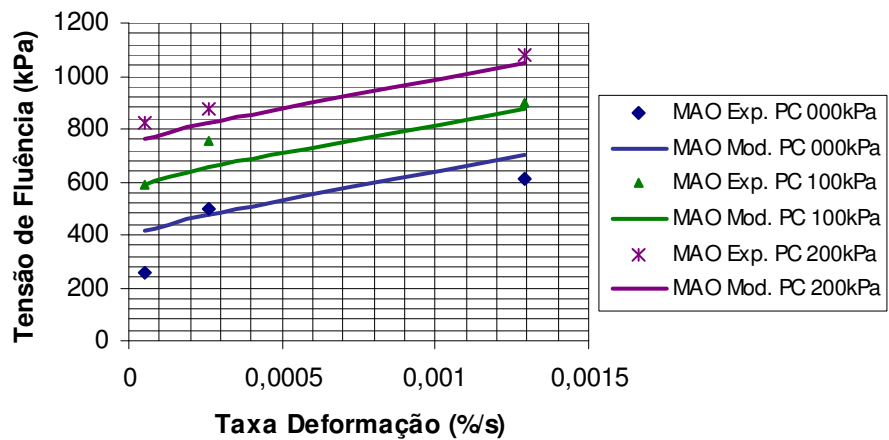


Figura 5. 19: Modelo × experimento ASAC MAO – Tensão de fluência.

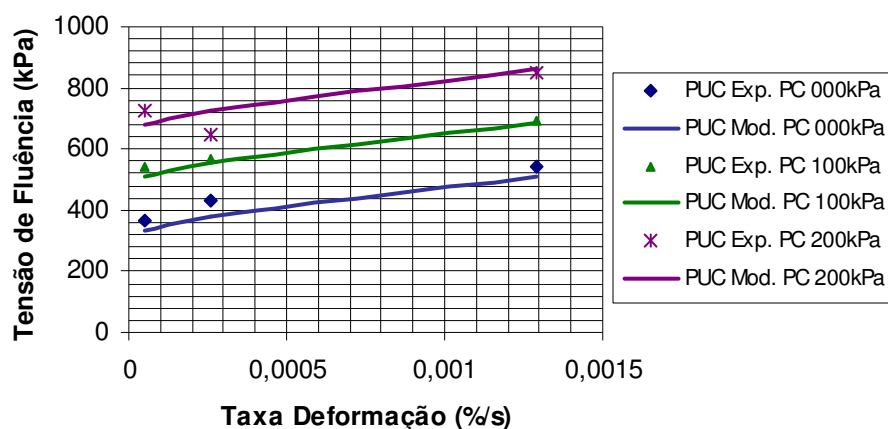


Figura 5. 20: Modelo × experimento ASAC PUC – Tensão de fluência.

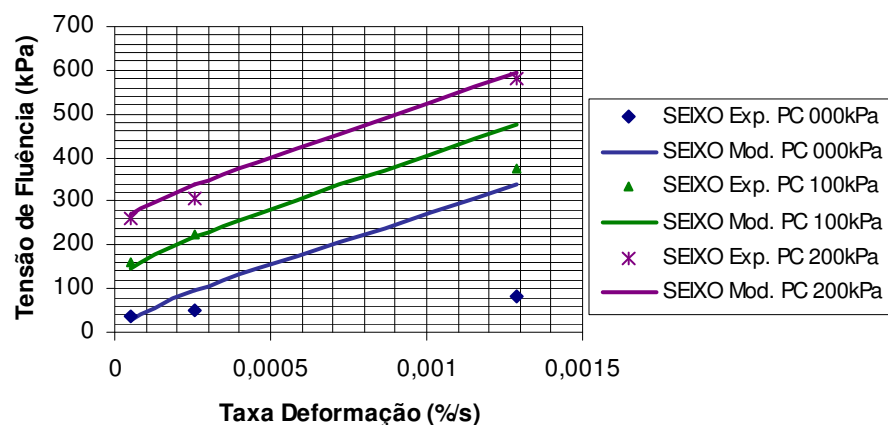


Figura 5. 21: Modelo × experimento ASAC SEIXO – Tensão de fluência.

Na Figura 5.22 tem-se a evolução do parâmetro κ para as misturas confeccionadas. Esta função de evolução é responsável por empurrar a superfície de fluência aumentando seu volume e assim aumentando o limite elástico da mistura asfáltica quando a mesma sofre deformações viscoplásticas (deformações permanentes).

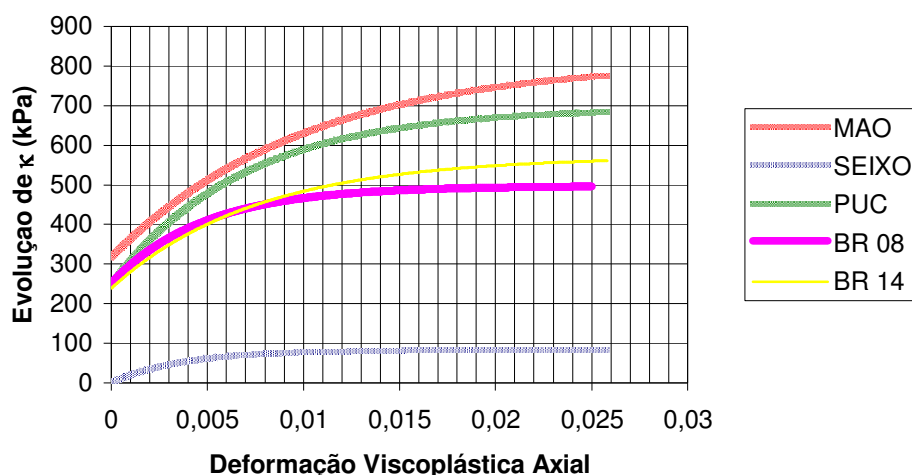


Figura 5. 22: Evolução do parâmetro κ para as misturas.

O nível de endurecimento é menor para a mistura padrão confeccionada utilizando seixo como agregado graúdo, fato este esperado uma vez que este material possui forma arredondada e superfície lisa, dificultando assim uma boa adesão entre ligante agregado e um bom intertravamento entre eles.

A evolução do endurecimento da mistura ocorre através de pequenas rotações e deslizamentos entre os agregados tornando a mistura mais resistente. A partir do momento que estas rotações e deslizamentos são grandes o suficiente para causar microtrincas entre as interfaces ligante-ligante (coesão) e as interfaces ligante-agregado (adesão), o efeito de endurecimento do material cessa e outro mecanismo começa a dominar o comportamento mecânico do material fazendo com que o mesmo inicie uma fase de amolecimento.

A Figura 5.22 mostra que o nível de endurecimento é maior para a mistura confeccionada com ASAC obtido a partir da argila encontrada na província petrolífera de Urucu. Ressalta-se que as misturas confeccionadas com as argilas BR apresentaram praticamente o mesmo nível de endurecimento, enquanto a mistura confeccionada com a argila coletada em Manaus (MAO) apresentou nível de endurecimento semelhante a mistura confeccionada com a argila coletada em Urucu (PUC).

O mecanismo de evolução de dano na mistura começa após o pico de tensão, onde o endurecimento para de evoluir e começa se observar o amolecimento. A Figura 5.23 mostra a evolução do dano para as misturas analisadas.

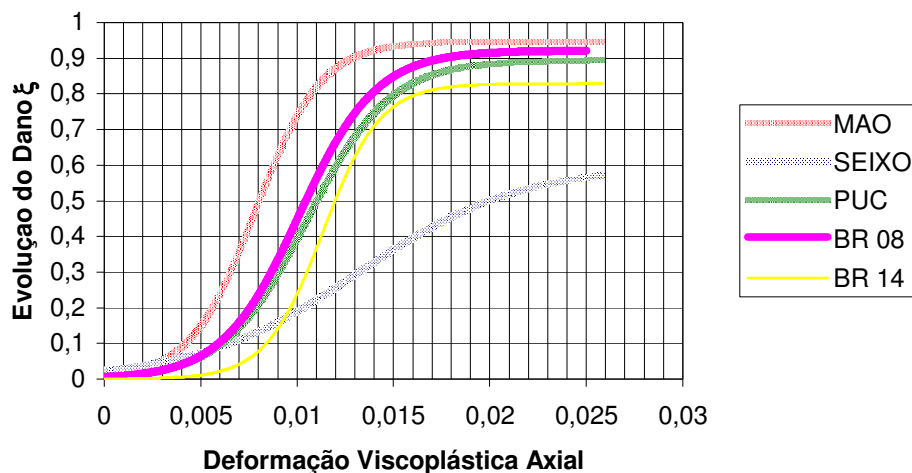


Figura 5. 23: Evolução do dano.

Nota-se na Figura 5.23 que o parâmetro de dano (ξ) alcança valores próximos à unidade, valor este muito alto, correspondente a 100% de vazios no material. No entanto, o parâmetro de dano deve ser interpretado em termos da influência física da mistura quando a mesma sofre deformação. O parâmetro de dano então leva em conta a parte do material que perde capacidade de carga durante o processo de deformação.

Observa-se ainda que a evolução do dano ocorre em uma deformação viscoplástica menor para as misturas confeccionadas com ASAC obtido a partir da argila encontrada em Manaus, levando a mesma a iniciar o processo de amolecimento em um nível de deformação permanente inferior quando comparada com as demais. As outras misturas confeccionadas com ASAC apresentam evolução do parâmetro de dano semelhantes.

Como visto anteriormente, os parâmetros acima comentados foram obtidos conforme mostrado na Figura 5.13, regredindo os dados experimentais obtidos para as taxas de deslocamento de 0,08mm/s e 0,016mm/s e pressões confinantes de 0kPa, 100kPa e 200kPa. Tem-se então nas Figuras de 5.24 a 5.28, com o intuito de validar os parâmetros apresentados acima, a comparação entre a previsão do modelo e os dados experimentais obtidos para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s e pressões confinantes de 0kPa, 100kPa e 200kPa.

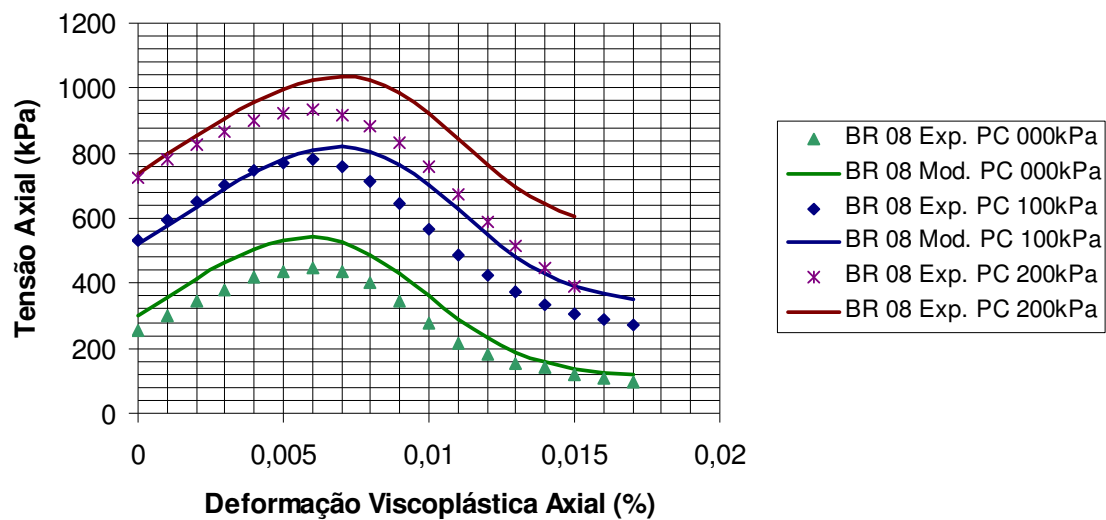


Figura 5. 24: Modelo × experimento para a taxa de 0,0032mm/s – ASAC BR 08.

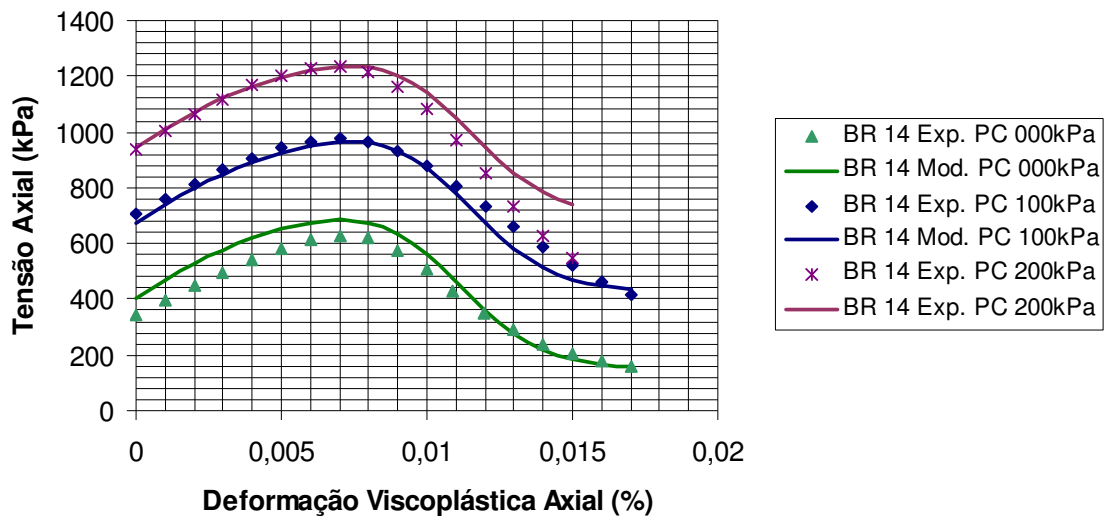


Figura 5. 25: Modelo \times experimento para a taxa de 0,0032mm/s – ASAC BR 14.

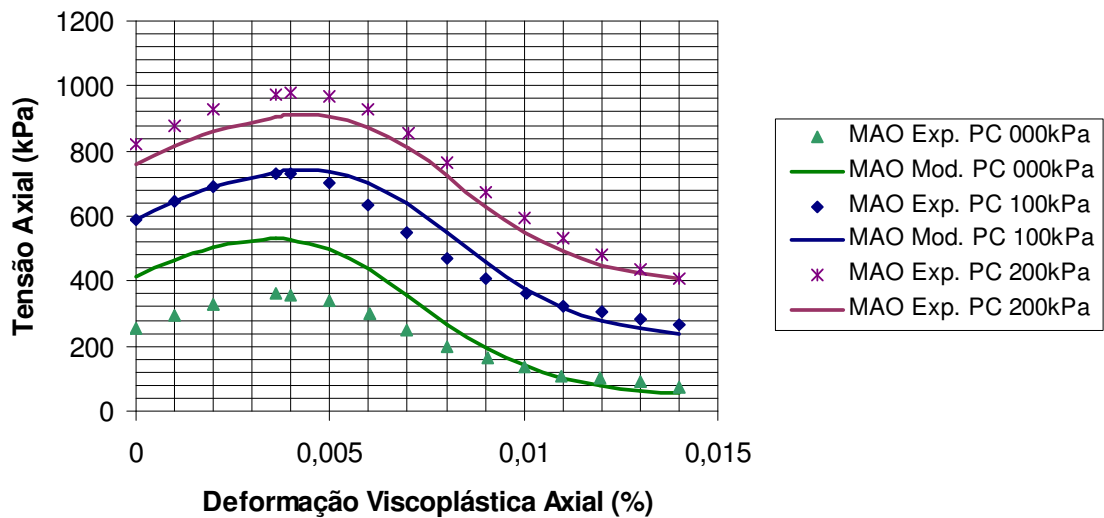


Figura 5. 26: Modelo \times experimento para a taxa de 0,0032mm/s – ASAC MAO.

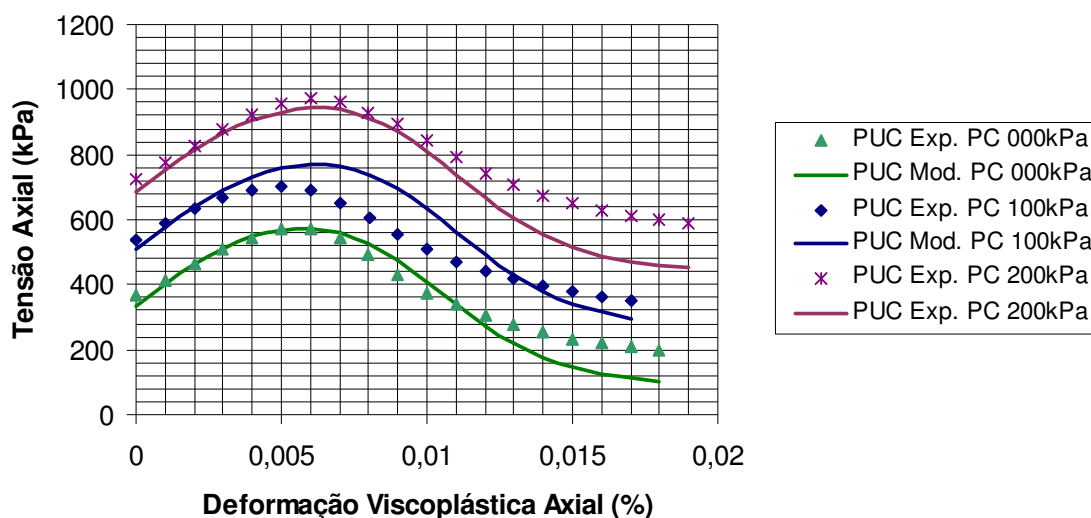


Figura 5. 27: Modelo × experimento para a taxa de 0,0032mm/s – ASAC PUC.

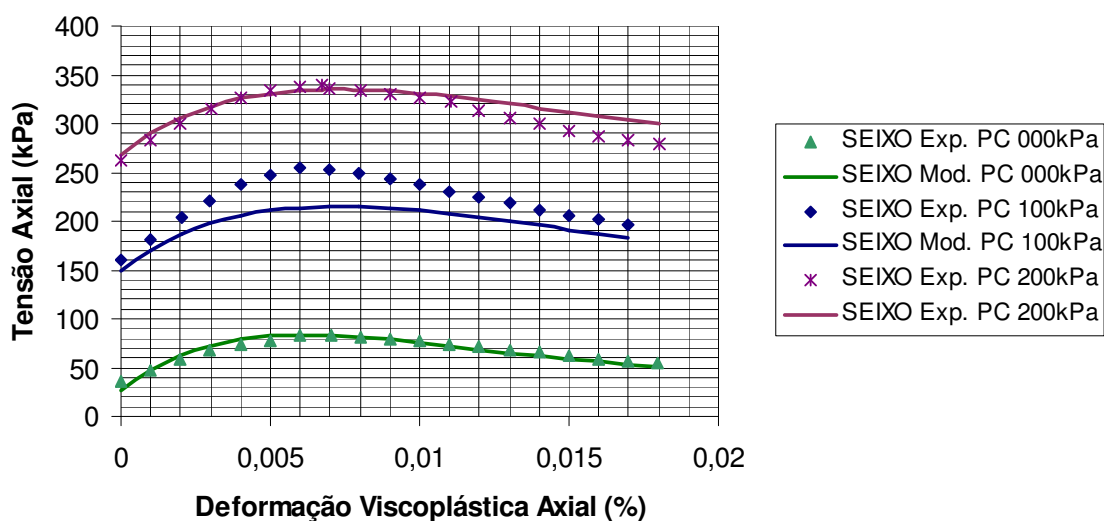


Figura 5. 28: Modelo × experimento para a taxa de 0,0032mm/s – SEIXO.

Visto que as misturas asfálticas são materiais compósitos que exibem considerável variabilidade em ensaios, as Figuras de 5.24 a 5.28 mostram que o modelo utilizado conseguiu prever os resultados experimentais satisfatoriamente.

Na Figura 5.29 tem-se a resposta do modelo para uma aplicação de tensão

constante na direção axial de 500kPa durante 30 segundos.

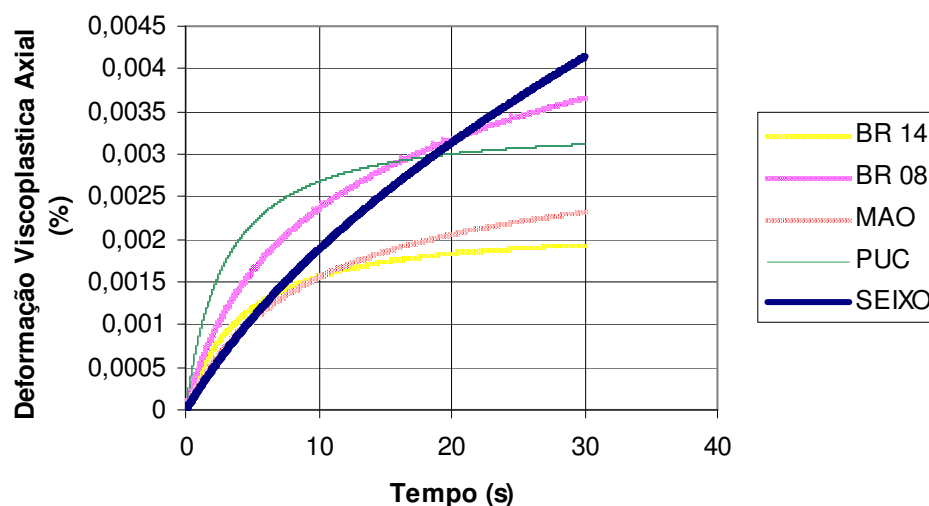


Figura 5. 29: Resposta do modelo à tensão constante.

Como já era esperado, a mistura produzida com ASAC confeccionado a partir da argila BR 14, proporcionou o desenvolvimento de deformações permanentes (viscoplásticas) inferiores às demais misturas, possivelmente por possuir uma superfície de fluência superior e um nível de endurecimento elevado.

Ressalta-se que a mistura confeccionada com ASAC obtido a partir da argila de Manaus (MAO) apresenta desenvolvimento de deformações viscoplásticas ligeiramente superior ao apresentado pela mistura confeccionada com a amostra BR 14, possivelmente pelo fato da mesma possuir um maior valor para o parâmetro de viscosidade Γ .

A mistura confeccionada com a amostra PUC apresentou bons resultados quanto ao potencial de deformação permanente (dificuldade de desenvolver deformações permanentes) visto que inicialmente apresentou as maiores deformações quando comparadas às demais. Como o nível de endurecimento inicial das misturas é praticamente o mesmo, as baixas deformações apresentadas pela mistura confeccionada com a amostra PUC se devem ao fato da mesma possuir a maior evolução de

endurecimento e ainda possuir elevado valor para o parâmetro N .

Ressalta-se que a mistura confeccionada utilizando seixo rolado, mistura padrão utilizada no estado do Amazonas, apresenta o maior potencial de desenvolver deformações permanentes visto que a curva apresentada para esta mistura na Figura 5.29 refere-se a uma tensão 5 vezes menor do que aquela aplicada na obtenção das curvas das misturas asfálticas confeccionadas com ASAC. Ressalta-se ainda que os parâmetros do modelo obtidos através de regressão dos dados experimentais (Apêndice B) possuem ordem de grandeza similar aos encontrados por TASHMAN (2003) e DESSOUKY (2005), excetuando-se os parâmetros referentes ao modelo de dano.

No entanto, as curvas de dano apresentadas nos trabalhos acima citados são mais suaves que as obtidas experimentalmente no presente estudo, possivelmente devido a dimensões diferenciadas nos corpos de prova. A altura de corpo de prova usada no presente estudo é uma grande limitação, dado que uma maior dimensão é importante de modo a se escapar do efeito de borda nas leituras das deflexões. Nos trabalhos de TASHMAN (2003) e DESSOUKY (2005) foram utilizados corpos de prova de dimensões 100mm de diâmetro por 200mm de altura. Esta dimensão também é usada no ensaio de módulo dinâmico normatizado pela ASTM (2003). O mesmo teste seguindo a norma da AASHTO (2003) utiliza corpos de prova de 150mm de altura, havendo ainda discussão internacional sobre o arranjo mais apropriado dos LVDTs. Recomenda-se um estudo para se verificar a influência das dimensões do corpo de prova nos parâmetros obtidos para o modelo.

CAPÍTULO 6

VIABILIDADE ECONÔMICA

Neste capítulo faz-se uma análise inicial da viabilidade econômica da produção de argila calcinada em escala capaz de atender a demanda para a utilização em pavimentação. A produção em larga escala dar-se-ia através de usina para calcinação e utilização de gás natural como combustível para controlar a temperatura na usina.

Escolheu-se a área da província petrolífera de Urucu para se estudar a viabilidade econômica da utilização de argila calcinada nos pavimentos da região. O primeiro passo é verificar a área de afloramentos de argila considerada de bom uso para fins de calcinação. Para este fim percorreu-se a área da província a procura de afloramentos de argila com características visuais e tácteis semelhantes as da argila descrita no Capítulo 4 como argila PUC.

O levantamento dos pontos associados as suas características de campo foi digitalizado e proporcionou a confecção do mapa de ocorrências, com as devidas observações das especificações ambientais e a tabulação desses dados. A digitalização dos dados se concretizou pela transferência das coordenadas do GPS para uma Base Cartográfica de Urucu. Efetivou-se o processamento das informações auxiliado por ferramenta computacional, o ArcView 3.2a.

Na Figura 6.1 mostra-se ao processo de análise espacial dos dados. Para atender às especificações ambientais, definiram-se as áreas de jazidas respeitando-se a margem de proteção de 50m (cinquenta metros) de floresta para os cursos d'água. No tocante às estradas e linhas de gás, fixou-se a margem de 20m.

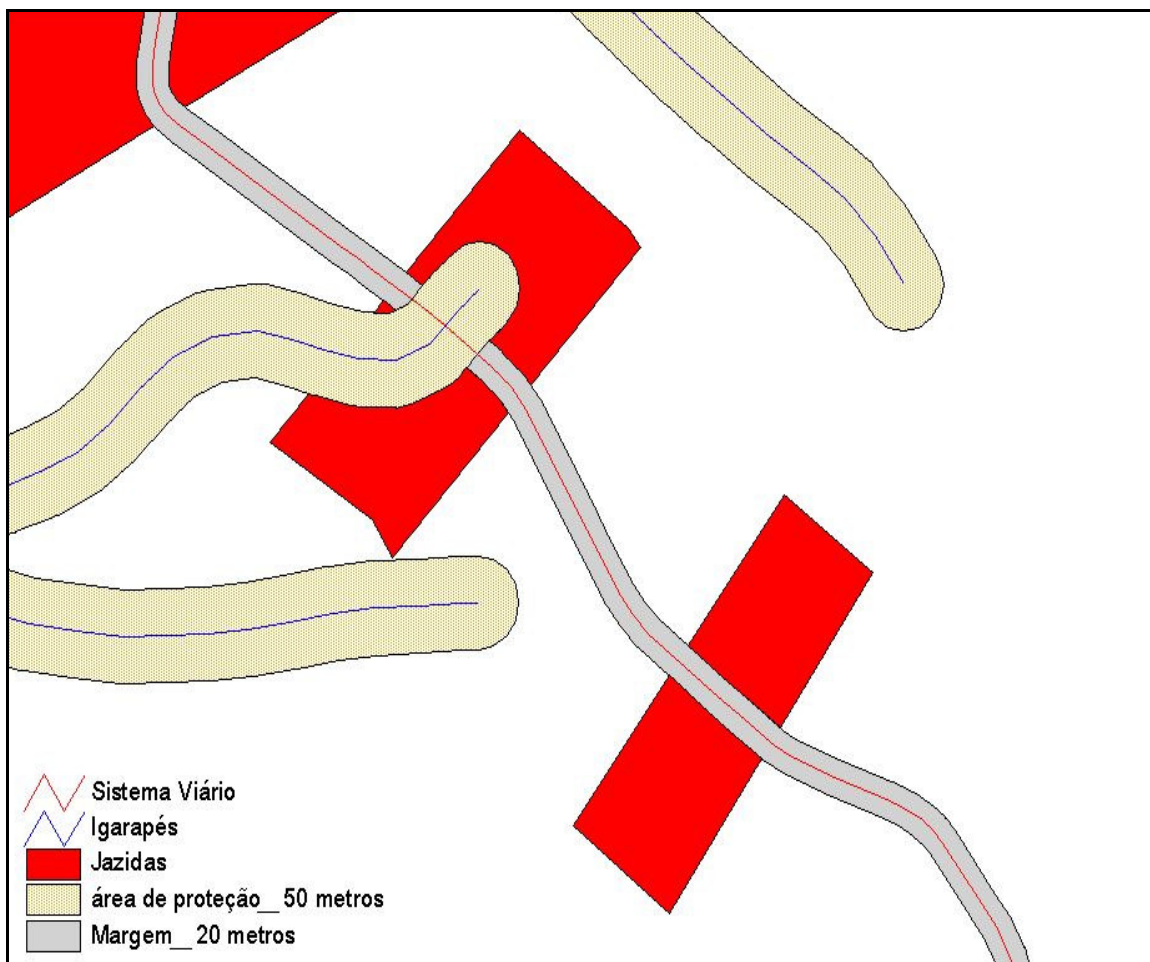


Figura 6. 1: Análise espacial dos dados e delimitação das áreas de exclusão.

De acordo com o levantamento executado, obtiveram-se as áreas de afloramento de argila que estão dispostas na Figura 6.2. Identificaram-se 35 áreas, 15 delas cruzam as vias de acesso e cursos d'água.

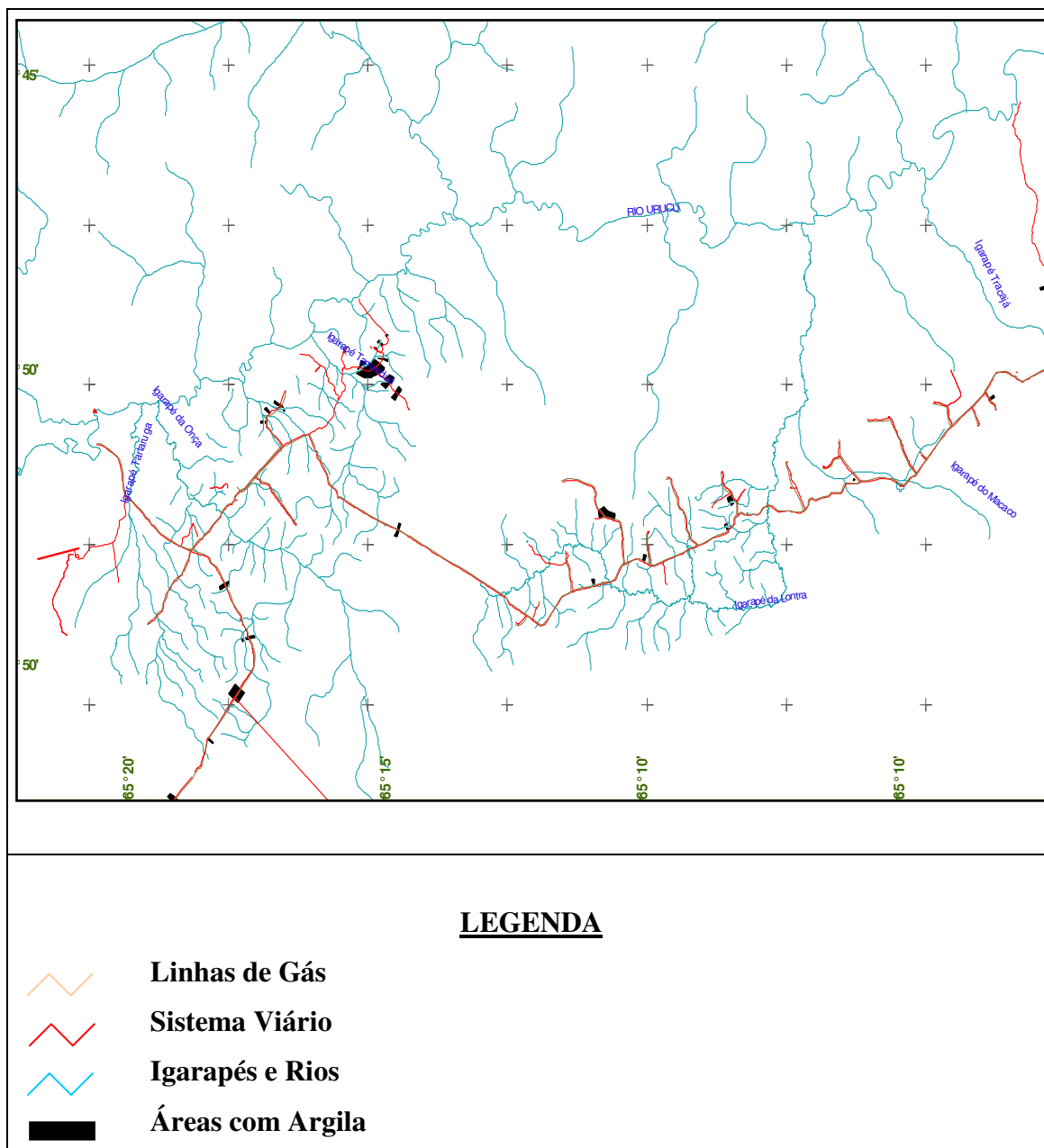
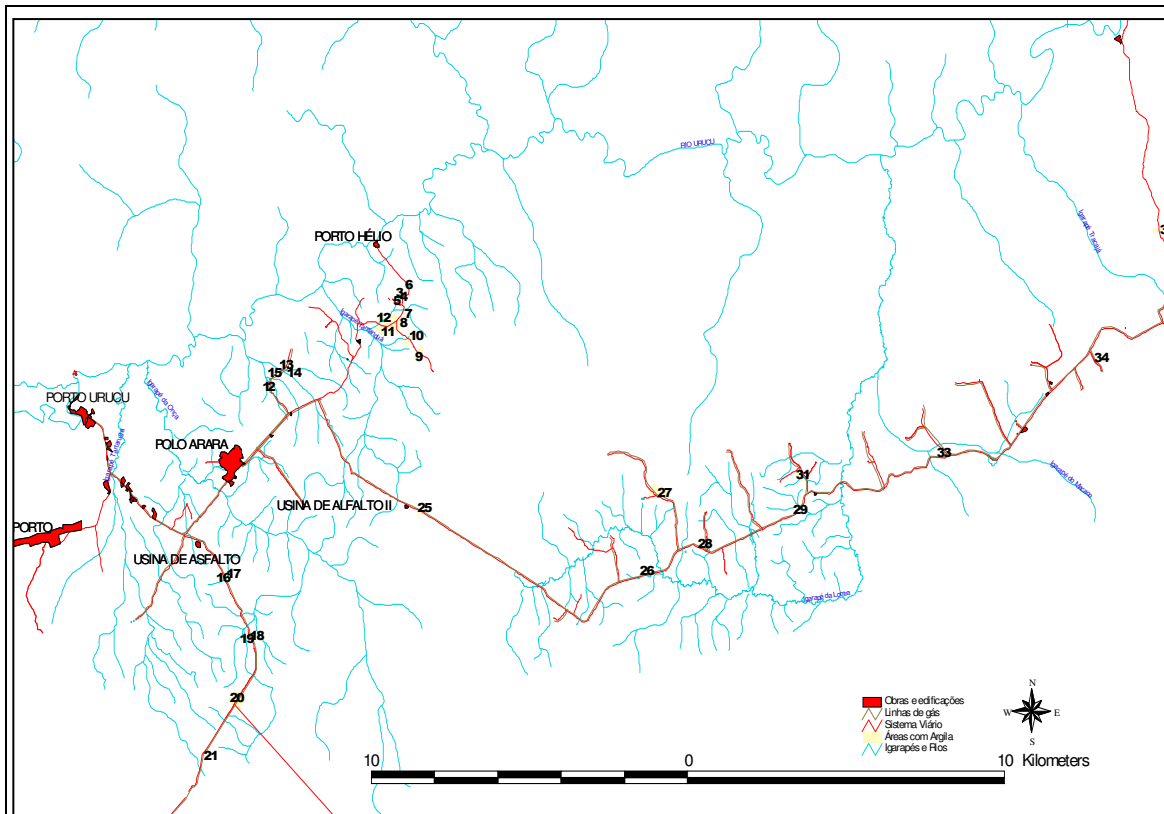


Figura 6. 2: Mapa com afloramentos de argila.

A Figura 6.3 mostra as mesmas áreas apresentadas na Figura 6.2. Contudo, eliminaram-se as superfícies situadas dentro das margens de proteção pertinentes aos cursos d'água, vias de acesso e linhas de gás.



LEGENDA






-  Linhas de Gás
-  Sistema Viário
-  Igarapés e Rios
-  Áreas com Argila
-  Obras e Edificações

Figura 6. 3: Mapa com afloramentos de argila e margens de proteção.

A Tabela 6.1 descreve as dimensões dessas áreas elencadas na Figura 6.3.

Tabela 6. 1: Dimensões das áreas identificadas.

Pontos	Coordenadas		Área		Perímetro (m)
	Latitude	Longitude	m ²	ha	
1	246129,986	9463813,613	3941,175	0,394	252,336
2	246278,231	9463813,613	3416,848	0,342	242,893
3	250336,243	9466349,257	3909,787	0,391	261,050
4	250456,422	9466238,808	3538,364	0,354	304,387
5	250249,798	9466139,275	1895,548	0,190	179,243
6	250624,679	9466536,323	1208,987	0,121	192,286
7	250595,614	9465774,570	12287,225	1,229	810,492
8	250450,557	9465552,823	33412,146	3,341	1184,504
9	250930,287	9464617,949	57930,360	5,793	1379,730
10	250750,596	9465188,529	59998,026	6,000	1763,985
11	249919,551	9465381,513	219150,291	21,915	3791,088
12	249742,593	9465609,699	22836,373	2,284	859,089
13	246745,884	9464398,239	19350,800	1,935	867,810
14	246935,862	9464184,364	942,966	0,094	152,011
15	246337,633	9464184,440	12781,354	1,278	530,566
16	244769,601	9458708,436	35150,981	3,515	1085,637
17	245042,720	9458764,952	254,402	0,025	79,656
18	245725,657	9457085,009	22448,314	2,245	888,263
19	245454,625	9457009,830	2871,715	0,287	228,906
20	245152,899	9455407,703	141775,615	14,178	2593,751
21	244303,788	9453858,984	10580,576	1,058	519,186
22	243077,331	9451945,779	67336,761	6,734	1474,406
23	242427,892	9451540,256	26323,691	2,632	1061,855
24	242064,411	9450076,669	15673,110	1,567	556,753

Tabela 6.1: Dimensões das áreas identificadas (cont.)

Pontos	Coordenadas		Área		Perímetro (m)
	Latitude	Longitude	m ²	ha	
25	251081,405	9460557,839	31115,711	3,112	1112,864
26	258072,900	9458845,263	12350,519	1,235	462,581
27	258562,066	9460972,042	126994,830	12,699	2137,404
28	259901,649	9459576,426	16435,294	1,644	565,449
29	262922,150	9460476,892	5114,683	0,511	325,806
30	262839,866	9460620,970	3281,857	0,328	271,506
31	263013,651	9461430,382	28695,229	2,870	765,211
32	263076,694	9461261,931	3340,704	0,334	290,629
33	267464,243	9462021,700	1967,680	0,197	177,861
34	272418,228	9464583,978	12888,626	1,289	528,399
35	274492,712	9468072,421	38153,987	3,815	1182,388

A análise do conjunto (Figura 6.3 juntamente com a Tabela 6.1) mostra que a maior área identificada (área 11) possui aproximadamente 22 hectares, valor bem representativo para a produção de agregados sintéticos de argila calcinada (ASAC) na região. Observa-se, ainda que somadas todas as áreas obtém-se um valor em torno de 106 hectares.

Uma vez verificada a potencialidade de argila natural na região, deve-se então analisar os custos de produção para tornar esta argila natural em argila calcinada. Entre estes estão custos: extração e transporte da argila em estado natural, produção e armazenamento da argila na usina, pessoal para a operação da usina, custo do gás natural, custo de suporte de vida e por fim custo de recuperação da jazida e replantio.

Tem-se na Tabela 6.2 os custos com extração e transporte da argila em estado natural considerando uma jazida distante da usina 10km.

Tabela 6. 2: Tabela com os custos de extração e transporte de argila em estado natural.

1- EXTRAÇÃO E TRANSPORTE DA ARGILA DE JAZIDA		m ³		R\$		13,26	
Considerando a jazida distante 10Km da usina.							
Jazida =	100m x 100m =>	10.000,00 m ² ==>		25.000,00	m ³		
Considerando consumo de 1,35m ³ de argila natural / m ³ de argila calcinada							
teremos em argila calcinada				18.518,52	m ³		
Serviços:							
Desmatamento, destocamento e limpeza	10.000,00	m ²	x	0,77	=	R\$	7.700,00
Expurgo de jazida(10000m2x0,50m)	5.000,00	m ³	x	5,23	=	R\$	26.150,00
Esc. Carga Transporte até 500m	-	m ³	x	7,48	=	R\$	-
Esc. Carga Transporte de 501m a 1000m	25.000,00	m ³	x	8,47	=	R\$	211.750,00
Esc. Carga Transporte de 1001m a 2000m	-	m ³	x	10,39	=	R\$	-
Esc. Carga Transporte de 2001 a 4000m	-	m ³	x	15,24	=	R\$	-
Transporte de material acima de 4000m	-	m ³ Km	x	0,71	=	R\$	-
Total							R\$ 245.600,00

Como mostra a Tabela 6.2, o custo com extração e transporte de material em estado natural considerando um consumo 1,35m³ de argila natural para 1m³ de argila calcinada é de R\$ 13,26 por m³ de argila.

Na Tabela 6.3 mostram-se os custos com produção e armazenamento da argila na usina de calcinação.

Tabela 6. 3: Custos com armazenamento e produção.

2- PRODUÇÃO E ARMAZENAMENTO DA ARGILA NA USINA		m ³		R\$		25,18	
Considerando usina de calcinação (produção 1800m ³ /mês):							
Construção de 01-Galpão (24m x 60m) =>	150.000,00	Depreciação 3 anos				R\$	4.166,67/mês
01 Pá carregadeira (trab. 10 h / dia) :	300	H	x	137,18	=	R\$	41.154,00/mês
Total							R\$ 45.320,67

Tem-se então um custo com produção e armazenamento considerando uma produção de 1800m³/mês de R\$ 25,18 por m³.

Os custos de pessoal para operar a usina estão dispostos na Tabela 6.4.

Tabela 6. 4: Custos com pessoal para operar a usina.

3-	PESSOAL PARA OPERAÇÃO DE USINA	m ³				R\$	11,77
Considerando usina de calcinação (produção 1800m ³ /mês):							
Encargos sociais: 84,25%							
	01 Encarregado de usina	300	H	x	22,54	=	R\$ 6.762,00
	01 Operador de usina	300	H	x	20,78	=	R\$ 6.234,00
	04 Ajudantes (6,82 h x 4 pess.)	300	H	x	27,28	=	R\$ 8.184,00
Total							R\$ 21.180,00/mês

Considerando um encarregado, um operador e quatro ajudantes o custo com pessoal para operar a usina fica próximo de R\$ 11,77 por m³.

O maior custo da usina é a energia necessária para elevar a temperatura até a temperatura de calcinação, cerca de 900⁰C. O custo necessário com gás natural é mostrado na Tabela 6.5.

Tabela 6. 5: Custo com o gás natural.

4	CUSTO DO GAS NATURAL	m ³				R\$	135,28
	01 Usina de calcinação	300	H	x	811,66	=	R\$ 243.498,00
(consumo gás 970,53m ³ /h):		10h/diax30dias					
970,54m ³ /h x R\$ 0,8363 (custo m ³ gás) = R\$ 811,66/h							
(produção 6m ³ /h):							
6m ³ /h x 10h/dia=100m ³ /dia=1800m ³ /mês							

O custo para a produção de 1m³ de argila calcinada considerando um consumo de gás de 970.53m³/h de gás é de aproximadamente R\$ 135,28 por m³.

Na Tabela 6.6 observam-se os custos com recuperação da jazida e replantio de vegetação.

Tabela 6. 6: Custos com recuperação da jazida utilizada.

6	CUSTOS DE RECUPERAÇÃO DE JAZIDA E REPLANTIO	m ³				R\$	4,75
	Recuperação de jazidas	10.000,00	m ²	x	1,37	=	13.700,00
	Replantio	5.000,00	und	x	14,84	=	74.200,00
Total							R\$ 87.900,00

O custo com recuperação da jazida utilizada é de aproximadamente R\$ 4,75 por m³ de argila calcinada. O custo com suporte de vida, ou seja, despesas com hotel e

passagens para o pessoal necessário para operar a usina mostra-se na Tabela 6.7.

Tabela 6. 7: Custo com suporte de vida.

7	CUSTO DE SUPORTE DE VIDA	m ³	R\$	8,73
	Hotelaria + Alimentação (6p x 2 x 30dias)	360,00	pess. x 25,00 =	R\$ 9.000,00/mês
	Passagens aéreas (6p x 2 x 2pass)	24,00	pass. x 280,00 =	R\$ 6.720,00/mês
	Total			R\$ 15.720,00

A produção de 1m³ de argila calcinada custa em média R\$ 198,00. Ressalta-se que a maior parte deste valor vem do consumo de gás natural na usina, em torno de R\$ 135,00.

Uma vez que nos dias atuais não ocorre demanda para o gás natural produzido na província petrolífera de Urucu, o custo final da argila calcinada por metro cúbico seria de R\$ 64,00 (descontando o custo com o gás natural), considerando todos os custos de produção ficando ainda muito abaixo ao custo de metro cúbico de seixo que é de aproximadamente R\$ 90,00.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Este estudo foi focado na verificação do potencial de desenvolvimento de deformações permanentes pelas misturas asfálticas confeccionadas com agregados alternativos fabricados a partir de argila natural aquecida a altas temperaturas. Para tanto foi apresentado no Capítulo 2 um modelo viscoplástico desenvolvido na Texas A&M University (TASHMAN, 2003; DESSOUKY, 2005) capaz de prever o desenvolvimento de deformações permanentes a altas temperaturas (60⁰C).

Para refletir a fase de amolecimento do material o modelo conta com um parâmetro de dano baseado na teoria da tensão efetiva, refletindo assim o início e crescimento de trincas no material, reduzindo sua capacidade de suporte e aumentando o potencial de desenvolver deformações permanentes.

Seguindo os passos de TASHMAN (2003) foi realizado um estudo paramétrico para se verificar a influência de parâmetros chave na resposta do modelo, mostrando assim sensibilidade à taxa de deslocamento ou aplicação de carga, ao endurecimento, a pressão confinante e ao início e desenvolvimento de trincas capturados pelo parâmetro de dano.

Foram realizados ensaios triaxiais à compressão em cinco misturas tipo Concreto Asfáltico, sendo quatro delas utilizando agregado sintético confeccionado com argila de 03 pontos distintos do estado do Amazonas e uma quinta mistura que é a mistura padrão utilizando seixo dragado dos rios. Os ensaios triaxiais mostraram que o comportamento do agregado miúdo domina o comportamento mecânico das misturas analisadas a altas pressões confinantes, fato este corroborado pelo desempenho mecânico apresentado pela mistura padrão confeccionada com seixo. Em altas pressões confinantes a mistura padrão apresentou resultados semelhantes às mistura com ASAC. Os ensaios triaxiais foram ainda utilizados sistematicamente para determinar parâmetros do modelo que refletem a

fricção dos agregados, a dilatação da estrutura de agregados, a dependência da pressão confinante, a dependência da taxa de deslocamento e o aparecimento e crescimento de trincas.

Os resultados mostram que as misturas asfálticas confeccionadas com ASAC BR 14 e MAO possuem superfícies de fluência elevadas quando comparadas com as demais principalmente porque possuem uma fricção maior entre os agregados, possivelmente devido o ASAC BR 14 ser mais quebradiço que os demais, aumentando assim sua angularidade no processo de compactação (impacto).

A evolução do endurecimento nas misturas asfálticas reflete as propriedades de coesão e adesão do ligante asfáltico. Os resultados mostram que o nível de endurecimento é semelhante para as Misturas BR 14, BR 08 e PUC. A amostra MAO apresentou o maior nível de endurecimento comparada com as demais misturas confeccionadas com ASAC, como já era esperado devido a sua superfície lisa e forma arredondada. A mistura utilizando seixo (mistura padrão) possui nível de endurecimento inferior às misturas confeccionadas com ASAC.

Os deslizamentos e rotações entre as partículas devem ser suficientes para causar trincas nas interfaces entre agregado e ligante a um nível de deformação viscoplástica efetiva inferior para a mistura confeccionada com o ASAC produzido a partir da argila encontrada em Manaus, tornando esta mistura suscetível ao processo de amolecimento a baixos níveis de deformação permanente.

O modelo apresentado no Capítulo 2 foi então utilizado para prever as deformações viscoplásticas para o ensaio triaxial à compressão a uma taxa de deslocamento de 0,0032mm/s e pressões confinantes de 0kPa, 100kPa e 200kPa para cada mistura confeccionada. Visto que as misturas asfálticas apresentam variabilidade nos ensaios pode-se dizer que o modelo conseguiu prever os resultados de maneira satisfatória.

O modelo mostra ainda que todas as misturas confeccionadas com ASAC possuem menor potencial de desenvolver deformações permanentes quando comparadas com a mistura padrão utilizando seixo, mostrando assim o potencial da utilização deste agregado em pavimentação na região analisada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS (2004) *User's and Theory Manuals, versions 6.4*, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket, RI.

ABDULSHAFI, A. e K. MAJIDZADEH (1985) Combo viscoelastic-plastic modeling and rutting of asphaltic mixtures. *Transportation Research Record 968*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 19-31.

ABNT/NBR 7181 (1984) *Solo – Análise granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT/NBR 6459 (1984) *Determinação do limite de liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT/NBR 9776 (1987) *Agregados: Determinação da Massa Específica de Agregados por Meio do Frasco de Chapmam*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT/NBR 7251 (1982) *Agregado em Estado Solto: Determinação da Massa Unitária*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT/NBR 9937 (1987) *Determinação da Absorção e Massa Específica de Agregados Graúdos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT/NBR 6465 (1984) *Agregados: Determinação da Abrasão Los Angeles*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT/NBR 6502 (1995) *Rochas e Solos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

ABNT/NBR 7180 (1984) *Determinação do limite de plasticidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASSHTO (2003) AASHTO TP 62-03 - Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. American Association of State and Highway Transportation Officials.

ASTM (2003) ASTM D3497-79 - Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures. American Society of Testing and Materials.

BATISTA, F. G. S. (2004) Caracterização Física e Mecânica dos Agregados de Argila Calcinada Produzidos com Solos Finos da BR-163/PA. *Instituto Militar de Engenharia*, Rio de Janeiro, Brasil.

CHEN, W. F.; e D. J. HAN (1988) *Plasticity for structural engineers*. Ed. Springer-Verlag, NY.

CNT (2006) *Pesquisa Rodoviária 2006: Relatório Gerencial*. Confederação Nacional do Transporte – CNT, Brasília – DF.

COLLOP, C.; A. T. SCARPAS; C. KASBERGEN e A. DE BONDT (2003) Development and finite element implementation of a stress dependent elasto-viscoplastic constitutive model with damage for asphalt. *Transportation Research Record 1832*, Transportation Research Board, Washington, D.C., p. 96-104.

COOLEY, L. A.; J. ZHANG; P. S. KANDHAL; A. J. HAND e A. E. MARTIN (2002) Significance of Restricted Zone in Superpave Aggregate Gradation Specification. *Transportation Research Circular*, Number E – C043.

DAFALIAS, Y. F. (1990) The plastic spin in viscoplasticity. *International Journal of Solids and Structures*, v. 26, p. 149.

DESSOUKY, S. H. (2005) Multiscale Approach for Modeling Hot Mix Asphalt. *PhD Dissertation, Texas A&M University, College Station, TX.*

DNER (1988) *Agregados – determinação da abrasão Los Angeles: ME 035/98.* Departamento Nacional de Estradas de Rodagens – DNER, Atual Departamento Nacional de Instituto de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT, Rio de Janeiro.

DNER (1994) *Argilas para a fabricação de agregados sintéticos de argila calcinada – Seleção expedita pelo Processo de Fervura: ME 223/94.* Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, atual Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte.

DNER (1994) *Agregado sintético de argila calcinada – Determinação da Perda de Massa após Fervura: ME 225/94.* Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, atual Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte, Rio de Janeiro.

DNER (1994) *Agregado sintético fabricado com argila – Desgaste por Abrasão: ME 222/94.* Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, atual Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte, Rio de Janeiro.

DNER (1994) *Material Betuminoso – Determinação dos Pontos de Fulgor e de Combustão (Vaso Aberto Cleveland:) ME 148/94.* Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, atual Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte, Rio de Janeiro.

DNER (1997) *Agregado Miúdo para Concreto Betuminoso: ME 038/97.* Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, atual Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte, Rio de Janeiro.

DNER (1997) *Material de Enchimento para Misturas Betuminosas: EM 367/97*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, atual Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte, Rio de Janeiro.

DNER (1995) *Misturas Betuminosas a Quente – ensaio Marshall: ME 43*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, atual Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte, Rio de Janeiro.

DNER (1997) *Pavimentação – Concreto Betuminoso: ES 313/97*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, atual Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte, Rio de Janeiro.

DNER/IPR (1981) *Pesquisa de viabilidade de implantação da fábrica de Argila Expandida na Região Amazônica*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens – DNER, Atual Departamento Nacional de Instituto de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR. Divisão de Pesquisas, Rio de Janeiro.

FROTA, C. A.; C. L. SILVA e F. R. G. NUNES (2005) Efeito do Envelhecimento no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Confeccionadas Com Agregados Sintéticos. *36^o Reunião Anual de Pavimentação, RAPV*, CD-ROM, Curitiba, Brasil.

FROTA, C. A.; C. ALENCAR; C. PETRONIO e F. R. G. NUNES (2004) Influência do Tipo de Agregado na Qualidade Técnica de Misturas Asfálticas. *35^a Reunião Anual de Pavimentação, RAPV*, CD-ROM, Rio de Janeiro, Brasil.

FROTA, C. A.; F. R. G. NUNES e C. L. SILVA (2003) Estudo da Substituição do Seixo por Agregados Sintéticos de Argila Calcinada. *12^a Reunião de Pavimentação Urbana, RPU*, CD-ROM, Aracajú, Brasil.

- KACHANOV, L. M. (1958). "On Creep Fracture Time." *Izv. Akad. Nauk USSR Otd. Tekh.* n° 8, p. 26-31.
- KHALEEL, M. A.; H. M. ZBIB e E. A. NYBERG (2001) Constitutive modeling of deformation and damage in superplastic materials. *International Journal of Plasticity*, n° 17, p. 277-296.
- KIM, Y. R. e D. N. LITTLE (1990) One-Dimensional Constitutive Modeling of Asphalt Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 116, n° 4, p. 751-772.
- LEE, H. J. e Y. R. KIM (1998) Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 124, n° 1, p. 32-40.
- LU, Y. e P. J. WRIGHT (1998) Numerical approach of visco-elastoplastic analysis for asphalt mixtures. *Journal of Computers and Structures*, n° 69, p. 139-157.
- LUBLINER, J. (1991) *Plasticity theory*. Macmillan Publishing Company, NY.
- MASAD, E.; D. LITTLE; L. TASHMAN; S. SAADEH; T. AL-ROUSAN e R. SUKHWANI (2003) Evaluation of aggregate characteristics affecting HMA concrete performance. *Research Report ICAR 203-1*, Texas Transportation Institute, College Station, TX.
- MURAKAMI, S. (1988) Mechanical modeling of material damage. *Journal of Applied Mechanics*, ASME, v. 55, n° 2, p. 280-286.
- MURAKAMI, S. (1983) Notation of continuum damage mechanics and its application to anisotropic creep damage theory. *Journal of Engineering Materials and Technology*, n° 105, p. 99-105.

- ODA, M. e H. NAKAYAMA (1989) Yield function for soil with anisotropic fabric. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, v. 15, nº 1, p. 89-105.
- OESER, M. e B. MOLLER (2004) 3D constitutive model for asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 5, nº 3, p. 153-161.
- PERZYNA, P. (1966) Fundamental problems in viscoplasticity. *Advances in Applied Mechanics*, nº 9, p. 253-377.
- PINTO, S. (1991) Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos, *Tese (Doutorado em Geotecnia), COPPE/UFRJ*.
- SCARPAS, A.; R. AL-KHOURY; C. VAN GURP e S. M. ERKENS (1997) Finite element simulation of damage development in asphalt concrete pavements. *Proc., eighth International Conference on Asphalt Pavements*, University of Washington, Seattle, WA, p. 673-692.
- SEIBI, A. C.; M. G. SHARMA; G. A. ALI e W. J. KENIS (2001). Constitutive relations for asphalt concrete under high rates of loading. *Transportation Research Record 1767*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 111-119.
- SHRP (1994) Superior Performance Asphalt Pavements (*Superpave*). The Product of SHRP Asphalt Research Program. *Superpave Series N° 1*.
- SIDES, A.; J. UZAN e M. PERL (1985). A comprehensive visco-elastoplastic characterization of sand-asphalt under compression and tension cyclic loading. *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, nº 13, p. 59-59.

- SOUSA, J. B.; e S. WEISSMAN (1995) Modeling permanent deformation of asphalt concrete mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 63, p. 225-257.
- SOUZA, F. V. (2005) Modelo Multiescala para a Previsão da Evolução do Dano em Compósitos Viscoelásticos. Dissertação de Mestrado, *Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes*, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- TASHMAN, L. (2003) Microstructure viscoplastic continuum model for permanent deformation in asphalt pavements. *PhD Dissertation, Texas A&M University, College Station, TX*.
- THD (1969) *A Recommended Synthetic Coarse Aggregate Classification System*. Texas Highway Department – THD , Texas/USA.
- VASCONCELOS, K. L. (2004) Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias . Dissertação de Mestrado, *Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes*, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- ZEINKIEWICZ, O.; C. HUMPHESON e R. LEWIS (1975) Associated and non-associated visco-plasticity in soils mechanics. *Journal of Geotechnique*, v. 25, nº 5, p. 671-689.

APÊNDICE A

DEDUÇÃO DO MODELO PARA O ESTADO TRIAXIAL DE TENSÕES (EQUAÇÃO UTILIZADA NA REGRESSÃO)

MODELO VISCOPLÁSTICO DE DANO CONTÍNUO

Estado Triaxial de Tensões

```
> sigma:=Matrix([[sigma1,0,0],[0,sigma3,0],[0,0,sigma3]]);
```

$$\sigma := \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

Modificar o estado de tensões para considerar o desenvolvimento de dano

```
> sigme:=(1/(1-xi))*sigma;
```

$$\text{sigme} := \begin{bmatrix} \frac{\sigma_1}{1-\xi} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_3}{1-\xi} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_3}{1-\xi} \end{bmatrix}$$

Calcular o primeiro invariante de tensão

```
> IME:=sigme[1,1]+sigme[2,2]+sigme[3,3];
```

```
IME:=IME/3;
```

$$IME := \frac{\sigma_1}{1-\xi} + \frac{2 \sigma_3}{1-\xi}$$

$$IME := \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} + \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)}$$

Calcular o tensor deviatórico de tensões

```
> SMED:=Matrix(3):
```

```
for i from 1 by 1 to 3 do
```

```
  for j from 1 by 1 to 3 do
```

```
    if (i=j)then
```

```
      SMED[i,j]:=sigme[i,j]-IME;
```

```
    else
```

```
      SMED[i,j]:=sigme[i,j];
```

```
    end if;
```

```
  end do;
```

```
end do;
```

```
SMED;
```

$$\begin{bmatrix} \frac{2\sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2\sigma_3}{3(1-\xi)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \end{bmatrix}$$

Calcular o segundo invariante do tensor deviatórico de tensões

```
> JME [2] := 0;
for i from 1 by 1 to 3 do
  for j from 1 by 1 to 3 do
    JME [2] := JME [2] + (SMED [i, j] * SMED [j, i]);
  end do;
end do;
JME [2] := (3/2) * JME [2];
```

$$JME_2 := \frac{3 \left(\frac{2\sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2\sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2$$

Calcular a superfície de fluência

```
> tauME := (JME [2]) ^ 0.5;
YME := tauME - (alpha * IME) - K;
```

$$\tau_{ME} := \left(\frac{3 \left(\frac{2\sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2\sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5}$$

$$YME := \left(\frac{3 \left(\frac{2\sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2\sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5} - \alpha \left(\frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} + \frac{2\sigma_3}{3(1-\xi)} \right) - K$$

Derivar a tensão cisalhante com respeito as tensões principais

```
> dtauME := Matrix (3) :
dtauME [1, 1] := diff (tauME, sigma1) :
dtauME [2, 2] := diff (tauME, sigma [2, 2]) :
dtauME [3, 3] := diff (tauME, sigma [3, 3]) :
dtauME;
```

$$\left[\begin{array}{l} 0.5 \left(\frac{2 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} - \frac{2 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} \right) \\ \left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5}, 0, 0 \\ 0, \frac{0.5 \left(-\frac{2 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} + \frac{2 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} \right)}{\left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5}}, 0 \\ 0, 0, \frac{0.5 \left(-\frac{2 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} + \frac{2 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} \right)}{\left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5}} \end{array} \right]$$

Derivar o primeiro invariante de tensão com respeito as tensões principais

> dIME := Matrix(3) :

dIME[1,1] := diff(IME, sigma[1,1]) :

dIME[2,2] := diff(IME, sigma[2,2]) :

dIME[3,3] := diff(IME, sigma[3,3]) :

dIME;

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3(1-\xi)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3(1-\xi)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3(1-\xi)} \end{bmatrix}$$

Calcular a superfície potencial

> dGME := dtauME - (beta*dIME) ;

$$dGME := \begin{bmatrix} 0.5 \left(\frac{2 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} - \frac{2 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} \right) - \frac{\beta}{3(1-\xi)}, 0, 0 \\ \left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5} \\ 0, \frac{0.5 \left(\frac{2 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} + \frac{2 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} \right) - \frac{2 \beta}{3(1-\xi)}, 0 \\ \left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5} \\ 0, 0, \frac{0.5 \left(\frac{2 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} + \frac{2 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} \right) - \frac{2 \beta}{3(1-\xi)}}{\left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5}} \end{bmatrix}$$

Calcular o modelo de Perzyna

> Tepsilon := Gamma * (YME^N) * dGME;

Tepsilon :=

$$\begin{bmatrix} \Gamma \left(\left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5} \right. \\ \left. - \alpha \left(\frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} + \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right) - K \right)^N \\ \left. \frac{0.5 \left(\frac{2 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} - \frac{2 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} \right) - \frac{\beta}{3(1-\xi)}, 0, 0}{\left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5}} \right] \end{bmatrix}$$

$$\left[\begin{array}{l}
 0, \Gamma \left(\left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5} \right. \\
 \left. - \alpha \left(\frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} + \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right) - K \right)^N \\
 \left. \left(\frac{0.5 \left(-\frac{2 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} + \frac{2 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} \right)}{\left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5}} - \frac{2 \beta}{3(1-\xi)} \right), 0 \right] \\
 \left[\begin{array}{l}
 0, 0, \Gamma \left(\left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5} \right. \\
 \left. - \alpha \left(\frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} + \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right) - K \right)^N \\
 \left. \left(\frac{0.5 \left(-\frac{2 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} + \frac{2 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} \right)}{\left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5}} - \frac{2 \beta}{3(1-\xi)} \right) \right]
 \end{array} \right.$$

Calcular a tensão axial

> te:=Tep[1]=(Tepsilon[1,1]);
axial:=isolate(te,sigma1);

$$te := Tep_1 = \Gamma \left(\left(\frac{3 \left(\frac{2 \sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2 \sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5} \right)$$

$$\begin{aligned}
& \left. -\alpha \left(\frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} + \frac{2\sigma_3}{3(1-\xi)} \right) - K \right)^N \\
& \left(0.5 \left(\frac{2 \left(\frac{2\sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2\sigma_3}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} - \frac{2 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)}{1-\xi} \right) \right. \\
& \left. \frac{\beta}{3(1-\xi)} \right) \\
& \left(\frac{3 \left(\frac{2\sigma_1}{3(1-\xi)} - \frac{2\sigma_3}{3(1-\xi)} \right)^2}{2} + 3 \left(\frac{\sigma_3}{3(1-\xi)} - \frac{\sigma_1}{3(1-\xi)} \right)^2 \right)^{0.5} \\
& \left(\frac{\ln \left(\frac{3. \text{ Tep}_1(-1. + \xi)}{\Gamma(\beta + 3.)} \right)}{N} \right) \left(\frac{\ln \left(\frac{3. \text{ Tep}_1(-1. + \xi)}{\Gamma(\beta + 3.)} \right)}{N} \right) \\
\text{axial} := \sigma_1 = & - \frac{1. \left(-3. K \xi - 3. e \left(\frac{\ln \left(\frac{3. \text{ Tep}_1(-1. + \xi)}{\Gamma(\beta + 3.)} \right)}{N} \right) \right) \xi + 3. e \left(\frac{\ln \left(\frac{3. \text{ Tep}_1(-1. + \xi)}{\Gamma(\beta + 3.)} \right)}{N} \right) - 3. \sigma_3 + 2. \alpha}{3. + \alpha}
\end{aligned}$$

APÊNDICE B

PLANILHAS DO EXCEL USADAS NA REGRESSÃO DOS DADOS

Mistura Confeccionada com Amostra BR 14

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	8,02E-07	xi0	0
N	1,4642343	U	0,828655024
Parâmetros Superfície de Fluência		T	2142,968329
alpha	1,0916306	G	675,8569996
k0	238,79537	M1	-0,00039467
Endurecimento		M2	-99,5630252
k1	332,87718	soma erros 1475512,596	
k2	133,23973		
Dilatação			
B1	0,7545831		
B2	0,8070249		
B3	338,71548		

Taxa Defor.	0,0012903						
P. C.	0						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
644,12831	0,0129955	0	238,7953685	0,000504588	-0,05244185	615,4568	822,054
711,8773	0,0139731	0,000977597	279,4490908	0,000976416	0,175047427	691,975	396,1026
781,64327	0,0150115	0,002016071	317,2102277	0,001967563	0,346904136	761,4283	408,6434
842,02141	0,0159856	0,002990097	348,1809524	0,00379198	0,46146888	816,2571	663,802
901,28355	0,0170068	0,004011364	376,6138422	0,007527623	0,547184256	863,2566	1446,046
948,55632	0,0179976	0,00500211	400,7357759	0,014578653	0,606309011	897,7385	2582,455
983,96703	0,0189789	0,005983442	421,6866269	0,027837305	0,648240014	918,449	4292,607
998,03022	0,0200899	0,007094481	442,3244901	0,056848033	0,681591486	918,7489	6285,534
982,67553	0,0209817	0,007986201	456,8148154	0,098285235	0,700619752	892,7037	8094,928
925,62439	0,0220271	0,009031656	471,74972	0,177594551	0,716711797	820,8789	10971,62
840,678	0,0230159	0,010020455	484,0839446	0,287813641	0,727490177	708,1085	17574,66
725,31266	0,0239839	0,010988474	494,6828029	0,419181113	0,735064072	569,8263	24176,02
602,24031	0,0250242	0,012028734	504,6473727	0,558543343	0,740860579	424,8032	31483,94
501,52273	0,0259755	0,012980032	512,626506	0,660677896	0,74464059	321,4025	32443,29
418,34984	0,0270205	0,014025	520,3009057	0,736274532	0,74760432	247,1141	29321,68
357,10286	0,028001	0,015005519	526,5923917	0,778317237	0,749576492	206,9736	22538,8
310,35287	0,0289776	0,015982143	532,0928181	0,801852689	0,750986592	185,1741	15669,73
271,09484	0,0299938	0,016998377	537,1050321	0,814948657	0,752033969	173,5711	9510,87

209171,9

Mistura Confeccionada com Amostra BR 14

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,02E-07
N	1,4642343

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	1,0916306
k0	238,79537

Endurecimento

k1	332,87718
k2	133,23973

Dilatação

B1	0,7545831
B2	0,8070249
B3	338,71548

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,828655024
T	2142,968329
G	675,8569996
M1	-0,00039467
M2	-99,5630252

soma erros 1475512,596

Taxa Deform.	0,0012903						
P. C.	100						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
985,16508	0,0129947	0	238,7953685	0,000386505	-0,05244185	887,1557	9605,83
1056,775	0,0140314	0,001036791	281,7447716	0,00077852	0,186551269	968,0657	7869,332
1118,0553	0,0150117	0,002017018	317,2423128	0,001508703	0,347034801	1033,527	7144,986
1174,7703	0,0159985	0,00300389	348,5912844	0,002934418	0,462835026	1089,469	7276,33
1224,1441	0,0170154	0,004020746	376,8575216	0,005813977	0,547842282	1137,111	7574,753
1261,6039	0,0179971	0,005002431	400,7430805	0,011213963	0,606325118	1173,071	7838,091
1285,815	0,0189708	0,005976175	421,5413418	0,021386271	0,647977951	1197,155	7860,673
1296,3942	0,0199603	0,00696564	440,0848486	0,04074036	0,67833559	1205,521	8257,958
1288,8429	0,0209744	0,007979741	456,715902	0,077118009	0,700501535	1189,122	9944,337
1257,8344	0,0219927	0,008998055	471,3013672	0,140530101	0,716278318	1135,585	14944,89
1208,609	0,0229971	0,010002431	483,8733533	0,237868942	0,727324274	1037,536	29266
1141,4754	0,0239713	0,010976661	494,5615311	0,362540765	0,734985817	905,3848	55738,8
1056,4116	0,0250118	0,01201718	504,5441124	0,506392969	0,740806772	753,1201	91985,75
967,81566	0,0260279	0,013033225	513,0435093	0,627649472	0,744818122	627,9871	115483,5
881,77551	0,0270071	0,01401248	520,2151362	0,711158371	0,747574662	544,4206	113808,3
801,31292	0,0279749	0,014980227	526,4402164	0,763102702	0,749533417	493,8911	94508,15
724,01792	0,0290201	0,016025446	532,3205222	0,794960673	0,751038958	463,7704	67728,76
655,01573	0,0299759	0,016981199	537,025827	0,810645238	0,752019094	449,4713	42248,53

699084,9

Mistura Confeccionada com Amostra BR 14

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	8,02E-07	xi0	0
N	1,4642343	U	0,828655024
Parâmetros Superfície de Fluência		T	2142,968329
alpha	1,0916306	G	675,8569996
k0	238,79537	M1	-0,00039467
Endurecimento		M2	-99,5630252
k1	332,87718	soma erros 1475512,596	
k2	133,23973		
Dilatação			
B1	0,7545831		
B2	0,8070249		
B3	338,71548		

Taxa Defor.	0,0012903						
P. C.	200						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
1073,30301	0,0130112	0	238,7953685	0,000387	-0,052442	1158,763	7303,334
1137,82262	0,0140067	0,00099557	280,1478947	0,000757	0,178564	1236,692	9775,077
1200,88636	0,0150074	0,00199622	316,5363969	0,001488	0,344154	1303,85	10601,58
1254,9936	0,0160282	0,00301708	348,9829127	0,002961	0,464135	1361,758	11398,69
1299,54742	0,0170181	0,0040069	376,4977101	0,00576	0,54687	1408,138	11791,84
1333,79392	0,0180187	0,00500755	400,8596978	0,011252	0,606582	1444,837	12330,58
1354,66809	0,0189992	0,00598801	421,7779579	0,021554	0,648405	1468,969	13064,7
1363,33168	0,0199844	0,00697323	440,2179354	0,04094	0,678531	1477,112	12945,86
1354,08722	0,021032	0,00802085	457,3439024	0,079084	0,701249	1459,37	11084,42
1327,75042	0,0218949	0,00888374	469,7609324	0,131743	0,714766	1415,418	7685,647
1273,00051	0,0230131	0,01000197	483,867964	0,237816	0,72732	1309,198	1310,25
1209,42635	0,0239836	0,01097241	494,5178791	0,361955	0,734958	1177,615	1011,945
1129,38768	0,0249698	0,01195862	504,0182999	0,498565	0,740531	1032,928	9304,401
1038,2742	0,0260263	0,01301511	512,9018013	0,625779	0,744758	901,4927	18709,18
953,647897	0,0270186	0,01400739	520,1802225	0,710811	0,747563	816,3696	18845,33
875,297445	0,0280061	0,01499491	526,5286192	0,763699	0,749558	764,9262	12181,81
805,833039	0,0289742	0,01596305	531,9920241	0,793571	0,750963	736,6685	4783,74
738,608065	0,0300246	0,01701346	537,1744544	0,811025	0,752047	720,7406	319,2465
							174447,6

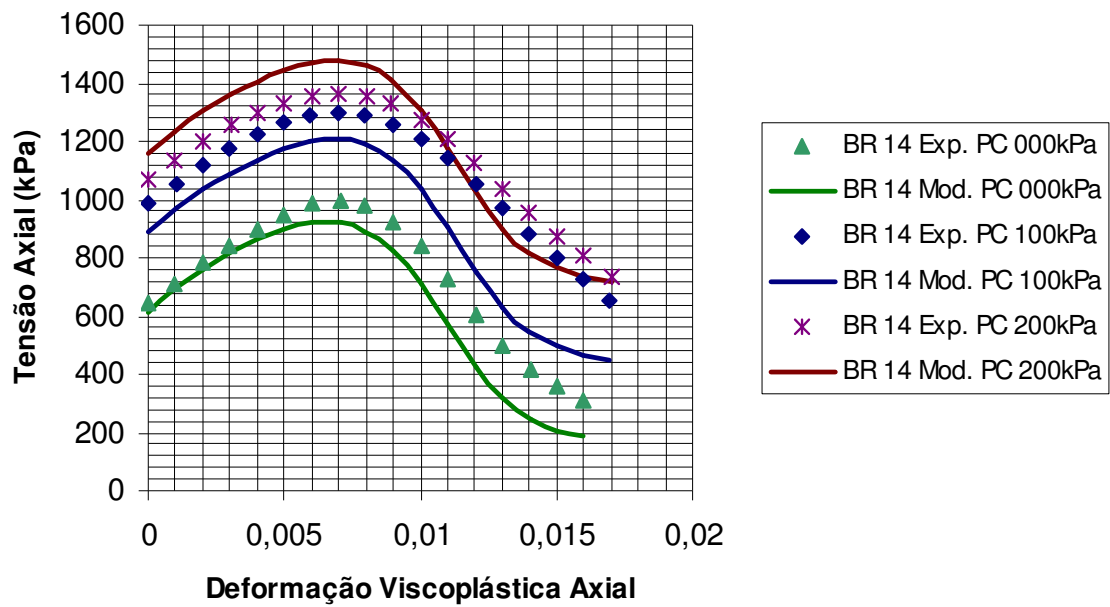


Figura B. 1: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s – BR 14

Mistura Confeccionada com Amostra BR 14

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,02E-07
N	1,4642343

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	1,0916306
k0	238,79537

Endurecimento

k1	332,87718
k2	133,23973

Dilatação

B1	0,7545831
B2	0,8070249
B3	338,71548

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,828655024
T	2142,968329
G	675,8569996
M1	-0,00039467
M2	-99,5630252

soma erros 1475512,596

Taxa Defor.	0,00025806						
P. C.	0						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
414,81396	0,01299837	0	238,795368	0,000505	-0,052442	455,2428	1634,488
471,31759	0,01400033	0,00100196	280,39616	0,000993	0,17981	524,7676	2856,905
527,17609	0,01500261	0,00200425	316,809057	0,001952	0,345268	584,8914	3331,061
580,66662	0,01599265	0,00299428	348,305498	0,003803	0,461884	635,7485	3034,01
628,38308	0,01699869	0,00400033	376,326789	0,007472	0,546407	679,0009	2562,159
668,04154	0,01799918	0,00500082	400,706315	0,014566	0,606244	713,0119	2022,337
696,59676	0,01899493	0,00599657	421,94873	0,028077	0,648712	735,947	1548,44
710,03336	0,02000556	0,00700719	440,811309	0,053803	0,679401	743,6977	1133,288
693,19313	0,02100049	0,00800212	457,058235	0,099221	0,70091	728,7543	1264,601
634,39815	0,02200507	0,0090067	471,416904	0,175252	0,71639	681,8211	2248,939
537,34993	0,02300131	0,01000294	483,87932	0,285594	0,727329	599,0641	3808,643
424,34143	0,02400817	0,0110098	494,901296	0,422167	0,735205	488,5754	4126,009
324,16764	0,02500114	0,01200278	504,415174	0,55534	0,740739	377,7465	2870,692
254,59448	0,02600114	0,01300278	512,805179	0,662727	0,744717	287,7044	1096,264
205,43573	0,02700719	0,01400882	520,190062	0,735373	0,747566	226,9218	461,6498
173,86741	0,02800147	0,0150031	526,577884	0,77824	0,749572	191,3919	307,1069
151,47803	0,02900098	0,01600261	532,20063	0,802209	0,751011	171,932	418,3641
135,38799	0,02999346	0,0169951	537,089928	0,814919	0,752031	162,0406	710,3614

35435,32

Mistura Confeccionada com Amostra BR 14

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,02E-07
N	1,4642343

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	1,0916306
k0	238,79537

Endurecimento

k1	332,87718
k2	133,23973

Dilatação

B1	0,7545831
B2	0,8070249
B3	338,71548

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,828655024
T	2142,968329
G	675,8569996
M1	-0,00039467
M2	-99,5630252

soma erros 1475512,596

Taxa Defor.	0,0002581
P. C.	100

Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
803,795821	0,0130033	0	238,795368	0,000387	-0,05244	726,9098	5911,458
871,841426	0,01401	0,0010067	280,581283	0,000763	0,180738	796,8181	5628,492
939,669514	0,0149985	0,0019952	316,502903	0,001487	0,344017	856,29	6952,14
1001,83105	0,0159974	0,0029941	348,299773	0,002915	0,461865	907,9672	8810,414
1057,34844	0,0169961	0,0039928	376,130134	0,005706	0,545874	951,6068	11181,3
1102,51897	0,0179962	0,0049929	400,52677	0,011143	0,605848	987,0253	13338,78
1135,56789	0,01901	0,0060067	422,151351	0,021821	0,649076	1013,016	15019,04
1145,36479	0,0200117	0,0070084	440,831966	0,041874	0,679431	1025,478	14372,8
1125,24327	0,0210025	0,0079992	457,013249	0,078042	0,700856	1018,765	11337,7
1074,40125	0,0220044	0,0090011	471,34274	0,140774	0,716318	983,9161	8187,569
989,823147	0,0229897	0,0099864	483,685277	0,236032	0,727176	914,7838	5630,896
863,759945	0,0240021	0,0109989	494,789173	0,365602	0,735133	810,7186	2813,387
722,578106	0,0250064	0,0120031	504,418239	0,50452	0,740741	694,6781	778,4089
589,623584	0,0259906	0,0129874	512,684097	0,622892	0,744665	594,6207	24,9715
493,635753	0,0270049	0,0140016	520,140777	0,710418	0,747549	520,6368	729,0586
421,224987	0,028	0,0149967	526,539482	0,763772	0,749562	475,8383	2982,619
369,582108	0,0290049	0,0160016	532,195515	0,794437	0,75101	450,4723	6543,229

120242,3

Mistura Confeccionada com Amostra BR 14

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	8,02E-07	xi0	0
N	1,4642343	U	0,828655024
Parâmetros Superfície de Fluência		T	2142,968329
alpha	1,0916306	G	675,8569996
k0	238,79537	M1	-0,00039467
Endurecimento		M2	-99,5630252
k1	332,87718	soma erros 1475512,596	
k2	133,23973		
Dilatação			
B1	0,7545831		
B2	0,8070249		
B3	338,71548		

Taxa Defor.	P. C.	Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
0,000258	200	990,4601	0,013006	0	238,795368	0,000387	-0,05244	998,5166	64,90763
		1068,1419	0,014006	0,00100016	280,326344	0,00076	0,17946	1068	0,020056
		1141,8912	0,015	0,00199433	316,471938	0,001486	0,34389	1127,846	197,2681
		1214,3304	0,01601	0,00300389	348,591284	0,002934	0,462835	1180,041	1175,756
		1278,4199	0,017004	0,00399806	376,267652	0,005726	0,546247	1223,423	3024,663
		1332,3726	0,017999	0,00499352	400,539945	0,011148	0,605877	1258,65	5435,025
		1369,3715	0,019003	0,00599708	421,958984	0,021683	0,64873	1284,431	7214,882
		1384,4617	0,019996	0,00698979	440,507567	0,041377	0,678957	1297,006	7648,478
		1366,1087	0,020998	0,0079919	456,901936	0,077695	0,700724	1290,51	5715,175
		1311,6616	0,022007	0,0090013	471,344708	0,140786	0,71632	1255,515	3152,415
		1219,7287	0,022994	0,00998849	483,710146	0,236275	0,727195	1186,204	1123,936
		1110,1721	0,024001	0,01099562	494,756113	0,365156	0,735111	1082,693	755,1231
		990,69121	0,024997	0,01199076	504,307407	0,50287	0,740683	967,6753	529,7321
		882,69054	0,025995	0,01298963	512,701942	0,623129	0,744673	866,0267	277,6831
		785,45322	0,026995	0,01398882	520,052643	0,709536	0,747518	792,9868	56,75422
		702,06158	0,028009	0,0150034	526,579681	0,764042	0,749573	747,2201	2039,291
		631,81485	0,029	0,01599433	532,157022	0,794274	0,751001	722,2118	8171,615
		570,87932	0,029997	0,01699092	537,070689	0,810761	0,752028	708,9792	19071,58

65654,3

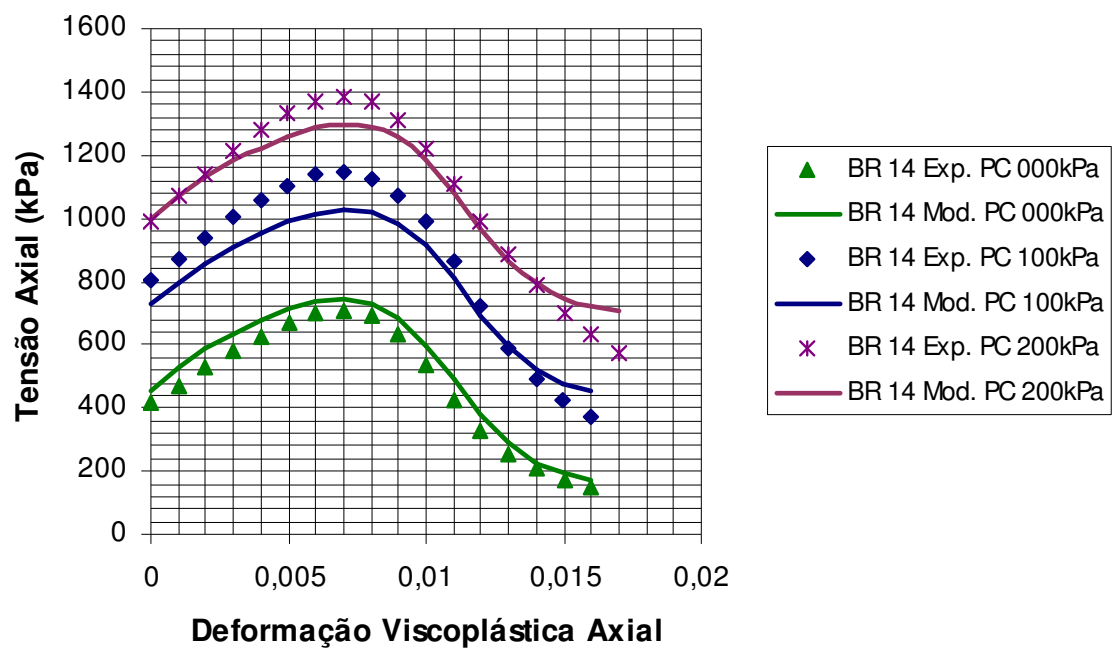


Figura B. 2: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s – BR 14

Mistura Confeccionada com Amostra BR 14

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,02E-07
N	1,4642343

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	1,0916306
k0	238,79537

Endurecimento

k1	332,87718
k2	133,23973

Dilatação

B1	0,7545831
B2	0,8070249
B3	338,71548

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,828655024
T	2142,968329
G	675,8569996
M1	-0,00039467
M2	-99,5630252

soma erros 1475512,596

Taxa Defor.	5,161E-05						
P. C.	0						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
344,22736	0,0130038	0	238,795368	0,000505	-0,05244	401,8677	3322,406
394,5602	0,0139993	0,00099557	280,147895	0,000988	0,178564	468,0784	5404,923
447,41919	0,0150099	0,00200608	316,871096	0,001954	0,345521	526,4181	6240,828
498,42188	0,0160025	0,00299869	348,436568	0,003814	0,46232	575,7429	5978,534
543,69499	0,0169998	0,00399606	376,215678	0,007451	0,546106	617,6036	5462,485
584,18891	0,018001	0,00499721	400,624097	0,014531	0,606063	651,3777	4514,335
614,7574	0,0189964	0,00599261	421,869755	0,028005	0,64857	675,0215	3631,766
630,16523	0,0200099	0,00700608	440,791883	0,053765	0,679373	685,0034	3007,221
619,87769	0,0210005	0,00799672	456,975615	0,098903	0,700812	674,507	2984,363
576,5647	0,0219979	0,00899409	471,248308	0,174078	0,716227	635,436	3465,826
508,2472	0,0229901	0,00998637	483,685277	0,283502	0,727176	563,4258	3044,676
427,60418	0,0239128	0,01090903	493,863543	0,408059	0,734532	473,0988	2069,76
351,22373	0,0249599	0,01195616	503,996094	0,549538	0,740519	365,4619	202,7246
288,63334	0,026008	0,01300427	512,816876	0,662861	0,744722	277,0531	134,1025
239,38562	0,0270003	0,01399655	520,105815	0,734685	0,747537	220,4479	358,6387
202,09389	0,028	0,01499622	526,53652	0,778019	0,749561	186,3492	247,8939
178,6194	0,0290011	0,01599737	532,173053	0,802118	0,751005	167,6972	119,2941
157,0556	0,0300036	0,01699984	537,111752	0,814962	0,752035	158,1598	1,219307

50191

Mistura Confeccionada com Amostra BR 14

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,02E-07
N	1,4642343

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	1,0916306
k0	238,79537

Endurecimento

k1	332,87718
k2	133,23973

Dilatação

B1	0,7545831
B2	0,8070249
B3	338,71548

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,828655024
T	2142,968329
G	675,8569996
M1	-0,00039467
M2	-99,5630252

soma erros 1475512,596

Taxa Defor.	5,161E-05						
P. C.	100						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
703,390921	0,0129997	0	238,795368	0,000387	-0,05244	673,5241	892,0258
761,46537	0,0139974	0,00099772	280,231381	0,000758	0,178983	739,9314	463,7109
813,947418	0,0149995	0,00199984	316,659207	0,001491	0,344656	797,9393	256,2596
863,846457	0,0160016	0,00300196	348,533846	0,002931	0,462644	848,0335	250,0485
907,620428	0,016999	0,00399935	376,301297	0,005731	0,546338	890,4526	294,7343
944,173096	0,0179987	0,00499902	400,665403	0,011188	0,606154	925,3305	355,0444
965,388375	0,0189998	0,00600016	422,02042	0,021727	0,648841	951,3571	196,8771
976,382848	0,0199995	0,00699984	440,683045	0,041645	0,679214	965,4779	118,9181
963,281184	0,0210016	0,00800196	457,055691	0,078175	0,700907	962,1815	1,209222
932,900548	0,0220033	0,00900359	471,375346	0,140967	0,71635	933,3566	0,207975
875,854359	0,0230002	0,01000049	483,850635	0,237646	0,727306	872,1481	13,73644
807,875493	0,0240016	0,01100196	494,820994	0,366031	0,735153	779,948	779,9427
733,017665	0,0249995	0,01199984	504,388814	0,504082	0,740726	674,894	3378,358
659,107764	0,0259998	0,01300016	512,784667	0,624228	0,744708	580,84	6125,849
589,120577	0,027	0,01400033	520,131742	0,710328	0,747546	512,542	5864,276
523,168569	0,028002	0,01500228	526,572953	0,763997	0,749571	469,8597	2841,837
464,971768	0,0290021	0,01600245	532,199749	0,794455	0,751011	445,8662	365,0243
414,441189	0,0299987	0,01699902	537,108001	0,810856	0,752035	433,3045	355,8255

22553,88

Mistura Confeccionada com Amostra BR 14

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,02E-07
N	1,4642343

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	1,0916306
k0	238,79537

Endurecimento

k1	332,87718
k2	133,23973

Dilatação

B1	0,7545831
B2	0,8070249
B3	338,71548

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,828655024
T	2142,968329
G	675,8569996
M1	-0,00039467
M2	-99,5630252

soma erros 1475512,596

Taxa Deform.	5,161E-05
P. C.	200

Sigma 11	Epsilon 11	Deform. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
940,81566	0,0130013	0	238,795368	0,000387	-0,05244	945,1309	18,62164
1004,1785	0,0140026	0,0010013	280,370959	0,00076	0,179684	1011,761	57,50019
1063,3936	0,0150003	0,001999	316,631328	0,00149	0,344542	1069,502	37,31138
1118,4031	0,0160007	0,0029993	348,456135	0,002925	0,462385	1119,52	1,246447
1166,0578	0,0169903	0,003989	376,032181	0,005691	0,545608	1161,658	19,35768
1204,9191	0,0179997	0,0049984	400,650352	0,011184	0,606121	1196,917	64,03368
1229,1005	0,0189897	0,0059884	421,784898	0,021559	0,648417	1222,718	40,73239
1235,1909	0,0199995	0,0069982	440,654416	0,041601	0,679172	1237,074	3,545404
1216,5216	0,021	0,0079987	457,005756	0,078018	0,700848	1233,836	299,7827
1163,0076	0,0220013	0,009	471,327374	0,140684	0,716304	1205,122	1773,654
1081,3412	0,02299	0,0099887	483,712441	0,236297	0,727197	1144,676	4011,346
969,00382	0,0240003	0,010999	494,790872	0,365625	0,735134	1051,857	6864,658
849,47106	0,0250102	0,0120089	504,469589	0,505284	0,740768	945,5695	9234,9
734,1292	0,0259997	0,0129984	512,770523	0,62404	0,744702	852,595	14034,14
625,7281	0,0270002	0,0139989	520,12162	0,710227	0,747542	784,2293	25122,62
548,79645	0,0280015	0,0150002	526,560212	0,763912	0,749567	741,5343	37147,87

98731,32

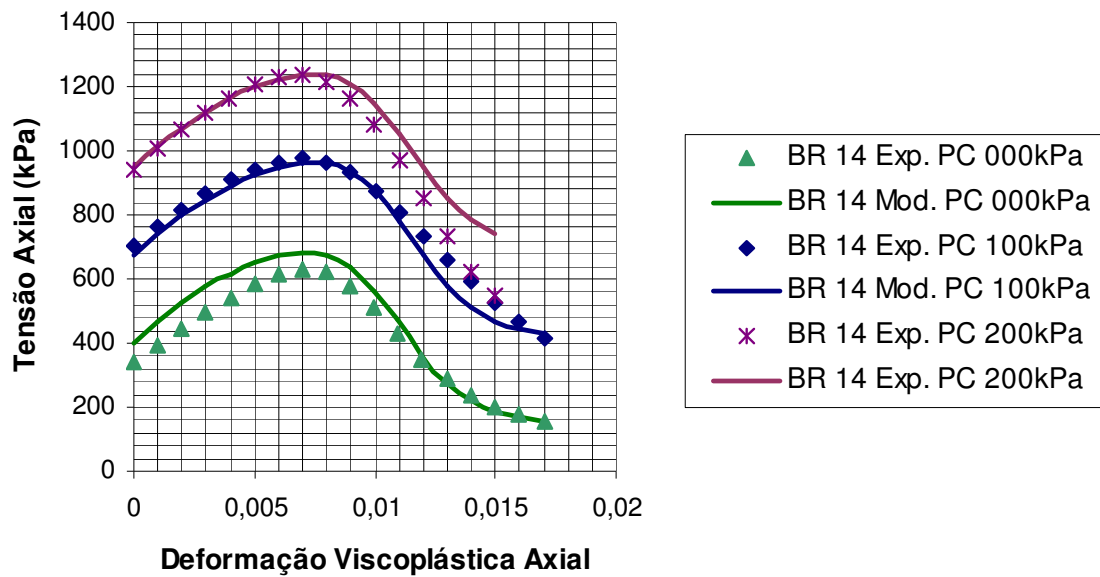


Figura B. 3: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s – BR 14

Mistura Confeccionada com Amostra BR 08

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,50E-07
N	1,2981993

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,8430629
k0	196,30027

Endurecimento

k1	36588,88
k2	1,1478331

Dilatação

B1	0,8820338
B2	0,9539218
B3	426,07102

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,921370478
T	162,3016782
G	503,3993063
M1	-0,00124928
M2	-26,0867345

soma erros 2507365,114

Taxa Defor.	0,00125
P. C.	0

Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
669,31945	0,0100274	0	196,3002668	0,010525537	-0,07188799	639,1937	907,5594
740,56601	0,0110252	0,000997819	238,1826213	0,017264966	0,258477051	723,5596	289,2172
804,90518	0,0120012	0,001973832	279,1032756	0,027887663	0,470624272	792,7728	147,1955
863,59139	0,0130115	0,002984112	321,4124005	0,045462714	0,614528889	847,4818	259,5182
914,66947	0,0140084	0,003980997	363,112471	0,07275308	0,707102348	880,3742	1176,164
949,73042	0,0150125	0,004985047	405,0640572	0,114649401	0,767988288	886,4419	4005,442
964,06797	0,0160201	0,005992679	447,1167515	0,175934464	0,807795918	858,6498	11113
946,75193	0,0169978	0,006970405	487,8748538	0,256646687	0,833088968	795,4438	22894,15
883,82661	0,0179991	0,007971651	529,5660579	0,359261627	0,850086373	697,0304	34892,84
753,06826	0,0189969	0,00896947	571,0669316	0,473271924	0,861150507	578,1185	30607,44
571,8881	0,0199983	0,009970872	612,6690484	0,586144595	0,868403698	457,1733	13159,48
390,16661	0,0209969	0,01096947	654,1070957	0,684549335	0,873127077	351,726	1477,677
239,83795	0,0220299	0,012002492	696,9236432	0,764197331	0,876298359	267,288	753,5058
147,69745	0,0229841	0,012956698	736,4283463	0,817381814	0,87821436	211,6943	4095,602
90,156904	0,0239889	0,013961526	777,9821293	0,855723423	0,879544571	172,3623	6757,719
48,951112	0,0249894	0,014961994	819,3079635	0,88054712	0,880408488	147,7552	9762,254
18,523512	0,0259939	0,015966511	860,7533644	0,896309218	0,880974405	133,1948	13149,5

155448,3

Mistura Confeccionada com Amostra BR 08

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,50E-07
N	1,2981993

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,8430629
k0	196,30027

Endurecimento

k1	36588,88
k2	1,1478331

Dilatação

B1	0,8820338
B2	0,9539218
B3	426,07102

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,921370478
T	162,3016782
G	503,3993063
M1	-0,00124928
M2	-26,0867345

soma erros 2507365,114

Taxa Deform.	0,00125						
P. C.	100						
Sigma 11	Epsilon 11	Deform. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
899,11998	0,0100266	0	196,3002668	0,005642137	-0,07188799	861,0158	1451,928
970,31339	0,011011	0,000984326	237,6165751	0,009224402	0,254881834	948,0771	494,4539
1037,0514	0,0120141	0,001987461	279,6743672	0,015184485	0,473006378	1025,711	128,597
1093,5192	0,0130313	0,003004702	322,2741727	0,025062977	0,616865398	1091,408	4,457311
1135,6507	0,0139734	0,003946708	361,6789655	0,039615775	0,704527962	1138,503	8,13436
1161,9999	0,0149843	0,00495768	403,9212616	0,064072875	0,766650727	1170,571	73,46305
1171,0219	0,0160345	0,006007837	447,748981	0,103685411	0,808273826	1177,227	38,50184
1156,5372	0,0169812	0,006954545	487,2140882	0,156254225	0,832757114	1153,171	11,33313
1124,1446	0,0179812	0,007954545	528,8541931	0,232677159	0,849852682	1091,368	1074,316
1076,9954	0,018989	0,008962382	570,7722998	0,331176518	0,861087344	992,0284	7219,382
1021,9612	0,0200031	0,009976489	612,9022553	0,445189223	0,868436278	865,8123	24382,47
967,42141	0,0209922	0,010965517	653,943148	0,558361043	0,873112063	736,4003	53370,76
904,18342	0,0220502	0,012023511	697,794299	0,6668475	0,876349493	611,9852	85379,78
853,40319	0,0229969	0,012970219	736,9878387	0,744849527	0,878236301	523,3506	108934,7
801,722	0,024	0,013973354	778,47097	0,806079179	0,879557083	454,6469	120461,2
751,12097	0,0250094	0,014982759	820,1651849	0,848370175	0,880422805	407,9736	117750,1
707,49778	0,0259937	0,015967085	860,7770226	0,875473365	0,880974663	378,8693	107996,7
665,49608	0,0270047	0,016978056	902,4404878	0,893220448	0,881345341	360,8265	92823,54
628,02391	0,0279497	0,017923041	941,3408311	0,903672028	0,88157353	351,3299	76559,55
585,12247	0,0290171	0,018990439	985,2296288	0,910945897	0,881741727	346,2111	57078,63
551,28629	0,0300238	0,019997179	1026,575059	0,915062073	0,881843608	344,8992	42595,64
519,95773	0,0310125	0,020985893	1067,133748	0,917525174	0,881908999	345,7119	30361,61
489,06791	0,0320171	0,021990439	1108,294726	0,919047562	0,881952459	347,8909	19930,96
461,89317	0,0329848	0,02295815	1147,90159	0,919941941	0,881979949	350,8086	12339,78

928199,2

Mistura Confeccionada com Amostra BR 08

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	8,50E-07	xi0	0
N	1,2981993	U	0,921370478
Parâmetros Superfície de Fluência		T	162,3016782
alpha	0,8430629	G	503,3993063
k0	196,30027	M1	-0,00124928
Endurecimento		M2	-26,0867345
k1	36588,88	soma erros 2507365,114	
k2	1,1478331		
Dilatação			
B1	0,8820338		
B2	0,9539218		
B3	426,07102		

Taxa Defor.	0,00125						
P. C.	200						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
977,16811	0,0100341	0	196,300267	0,005642	-0,071888	1078,274	10222,43
1039,37043	0,0109705	0,00093643	235,60743	0,009007	0,241953	1161,337	14875,84
1098,70548	0,0119767	0,00194264	277,796045	0,014851	0,465119	1239,76	19896,42
1146,47261	0,0129504	0,00291628	318,573183	0,024	0,606685	1303,527	24665,99
1181,55952	0,014	0,00396589	362,480962	0,039984	0,705973	1356,562	30626,03
1200,02371	0,0150109	0,00497674	404,717355	0,064647	0,767584	1388,215	35416,06
1208,50191	0,016	0,00596589	445,99942	0,101758	0,806944	1394,842	34722,5
1198,21931	0,0169984	0,00696434	487,622211	0,156895	0,832962	1370,01	29512,18
1171,87014	0,0180031	0,00796899	529,455409	0,233944	0,85005	1307,452	18382,38
1137,2776	0,0189721	0,00893798	569,758109	0,328576	0,860868	1212,066	5593,326
1090,98118	0,0200264	0,00999225	613,55656	0,447015	0,868527	1081,002	99,58473
1047,53966	0,0210248	0,0109907	654,987432	0,561146	0,873207	950,4593	9424,593
997,96813	0,0220233	0,01198915	696,370848	0,663649	0,876266	832,8981	27248,1
950,602665	0,0230171	0,01298295	737,514415	0,745762	0,878257	739,5786	44531,16
905,121931	0,0239891	0,01395504	777,713989	0,805146	0,879538	672,9443	53906,45
857,236156	0,0249829	0,01494884	818,76482	0,847214	0,880399	626,4932	53242,31
815,592859	0,0259814	0,01594729	859,960646	0,875037	0,880966	596,5863	47963,88
777,353201	0,0269814	0,01694729	901,173145	0,892795	0,881336	578,4978	39543,49
740,316064	0,0279767	0,01794264	942,14701	0,903842	0,881577	568,4481	29538,59
701,882372	0,0290078	0,01897364	984,539457	0,910858	0,88174	563,5158	19145,29
668,140117	0,0300171	0,01998295	1025,99086	0,915017	0,881842	562,1588	11232,05
632,682447	0,0309597	0,02092558	1064,66097	0,917407	0,881906	562,8767	4872,846

564661,5

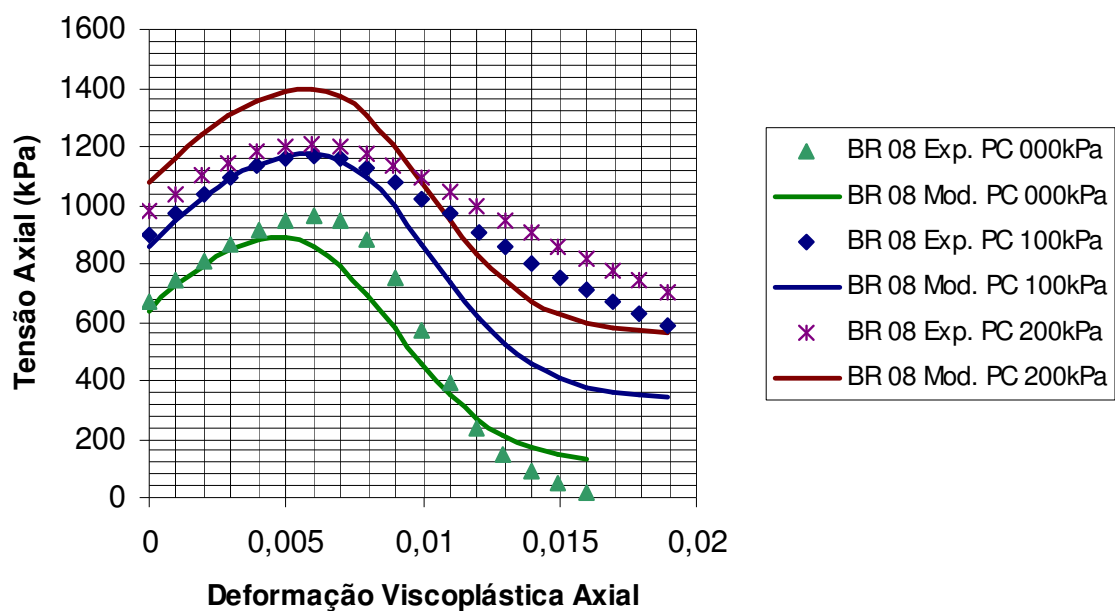


Figura B. 4: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s – BR 08

Mistura Confeccionada com Amostra BR 08

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	8,50E-07	xi0	0
N	1,2981993	U	0,921370478
Parâmetros Superfície de Fluência		T	162,3016782
alpha	0,8430629	G	503,3993063
k0	196,30027	M1	-0,00124928
Endurecimento		M2	-26,0867345
k1	36588,88	soma erros 2507365,114	
k2	1,1478331		
Dilatação			
B1	0,8820338		
B2	0,9539218		
B3	426,07102		

Taxa Defor.	0,00025						
P. C.	0						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
459,37642	0,0100099	0	196,300267	0,010526	-0,071888	376,9744	6790,094
526,24299	0,0109995	0,00098962	237,83877	0,017195	0,256296	440,2606	7392,971
590,94922	0,0120031	0,00199324	279,916485	0,028153	0,474012	498,6723	8515,024
651,09378	0,0130068	0,00299686	321,945754	0,045741	0,615977	549,0879	10405,2
706,16379	0,014	0,00399009	363,492801	0,073061	0,707779	587,8672	13994,07
746,59097	0,015	0,00499009	405,274836	0,114905	0,768233	611,0707	18365,74
763,21986	0,016005	0,00599513	447,218802	0,17611	0,807873	612,6456	22672,62
726,83651	0,0169978	0,00698789	488,603457	0,25828	0,833452	587,982	19280,59
606,975	0,0180104	0,00800047	530,765419	0,362447	0,850476	535,2469	5144,919
411,94298	0,0190038	0,00899387	572,081068	0,476098	0,861366	462,6674	2572,969
263,32727	0,0200009	0,00999104	613,506309	0,588306	0,86852	381,2727	13911,13
188,6573	0,0210064	0,01099654	655,229757	0,686939	0,873229	303,7919	13255,97
148,853	0,0219987	0,01198884	696,357973	0,763299	0,876265	240,5366	8405,879
129,7684	0,0230253	0,01301541	738,857605	0,820077	0,878309	191,8456	3853,577
95,427973	0,0240024	0,01399245	779,260301	0,856666	0,879577	159,9994	4169,469
80,138784	0,0250024	0,01499245	820,565377	0,881141	0,880429	138,9905	3463,527
66,23997	0,0258305	0,0158206	854,736085	0,894455	0,880906	128,1793	3836,476
							166030,2

Mistura Confeccionada com Amostra BR 08

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,50E-07
N	1,2981993

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,8430629
k0	196,30027

Endurecimento

k1	36588,88
k2	1,1478331

Dilatação

B1	0,8820338
B2	0,9539218
B3	426,07102

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,921370478
T	162,3016782
G	503,3993063
M1	-0,00124928
M2	-26,0867345

soma erros 2507365,114

Taxa Defor.	0,00025						
P. C.	100						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
686,74349	0,009994	0	196,3002668	0,005642	-0,07189	596,5011	8143,686
756,118912	0,011002	0,00100786	238,6038928	0,009333	0,261139	662,9687	8676,963
820,66077	0,012003	0,00200943	280,5950794	0,015351	0,476818	724,7697	9195,094
877,951664	0,012997	0,00300314	322,2089844	0,025044	0,616689	780,7151	9454,944
925,390047	0,014	0,00400629	364,1698422	0,040769	0,708977	829,8576	9126,441
959,512956	0,015005	0,00501101	406,1480682	0,065692	0,769243	868,5226	8279,236
971,902749	0,016009	0,00601572	448,0779107	0,104051	0,808521	891,8514	6408,223
958,566265	0,017002	0,00700786	489,435386	0,159768	0,833864	893,9068	4180,85
918,006843	0,018006	0,00801258	531,269233	0,237795	0,850639	869,0814	2393,697
856,094958	0,018997	0,00900314	572,4666676	0,335542	0,861448	816,0838	1600,892
773,94909	0,019995	0,01000157	613,9436923	0,448095	0,868581	738,8965	1228,684
685,984654	0,021006	0,01101258	655,8948542	0,563559	0,873289	648,6993	1390,197
606,808628	0,021998	0,01200472	697,0158003	0,665101	0,876304	562,7833	1938,228
536,571791	0,023006	0,01301258	738,740505	0,747872	0,878304	488,9424	2268,56
477,592672	0,024005	0,01401101	780,0270843	0,807977	0,879596	433,3859	1954,236
424,238085	0,025002	0,01500786	821,2014685	0,849215	0,88044	394,5675	880,3414
382,132566	0,026	0,01600629	862,3935993	0,876326	0,880992	369,1827	167,6998
347,852698	0,026998	0,01700472	903,5385498	0,893584	0,881353	353,7358	34,61037
315,520593	0,027995	0,01800157	944,5716901	0,904345	0,881589	345,1997	880,8474
288,525058	0,029001	0,01900708	985,9132596	0,911032	0,881744	341,2573	2780,687
268,385003	0,030014	0,02002013	1027,516908	0,915134	0,881845	340,3826	5183,655
249,663748	0,030999	0,02100487	1067,911921	0,917562	0,88191	341,4529	8425,255

94593,03

Mistura Confeccionada com Amostra BR 08

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,50E-07
N	1,2981993

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,8430629
k0	196,30027

Endurecimento

k1	36588,88
k2	1,1478331

Dilatação

B1	0,8820338
B2	0,9539218
B3	426,07102

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,921370478
T	162,3016782
G	503,3993063
M1	-0,00124928
M2	-26,0867345

soma erros 2507365,114

Taxa Defor.	0,00025						
P. C.	200						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
854,722357	0,0100032	0	196,300267	0,005642	-0,07189	813,7595	1677,96
926,916842	0,0109953	0,00099211	237,943265	0,00926	0,256959	879,2188	2275,099
995,192323	0,0120032	0,002	280,199783	0,015279	0,475186	941,469	2886,192
1057,16477	0,0130016	0,00299842	322,011355	0,024986	0,616155	997,7228	3533,345
1107,20964	0,0140016	0,00399842	363,840976	0,040615	0,708396	1046,766	3653,382
1143,13942	0,0149984	0,00499527	405,490883	0,06521	0,768484	1085,279	3347,829
1156,31647	0,0159968	0,00599369	447,158951	0,103032	0,807828	1108,804	2257,404
1137,57174	0,017	0,00699685	488,976432	0,159037	0,833637	1111,279	691,3207
1090,41267	0,0180032	0,008	530,74579	0,236679	0,85047	1086,833	12,81718
1021,23993	0,0190032	0,009	572,335956	0,335204	0,86142	1033,552	151,5924
940,574657	0,02	0,00999685	613,747438	0,447547	0,868554	956,5597	255,5219
856,754159	0,0210047	0,01100158	655,438622	0,562347	0,873248	866,9498	103,9505
776,00361	0,0220016	0,01199842	696,755071	0,664514	0,876288	780,5532	20,69904
700,076738	0,0230016	0,01299842	738,154796	0,746867	0,878282	707,1171	49,56721
632,403136	0,0239931	0,01398991	779,155017	0,806917	0,879574	651,637	369,94
574,112407	0,0250008	0,01499763	820,779265	0,848872	0,880433	612,1496	1446,825
520,834446	0,0259998	0,01599669	861,99769	0,876119	0,880988	586,6324	4329,365
474,801269	0,0269901	0,01698691	902,80508	0,893342	0,881348	571,2012	9292,956
433,859957	0,0280022	0,01799905	944,468073	0,904324	0,881588	562,473	16541,3
403,38045	0,0290003	0,01899716	985,505851	0,910981	0,881743	558,5373	24073,66

76970,73

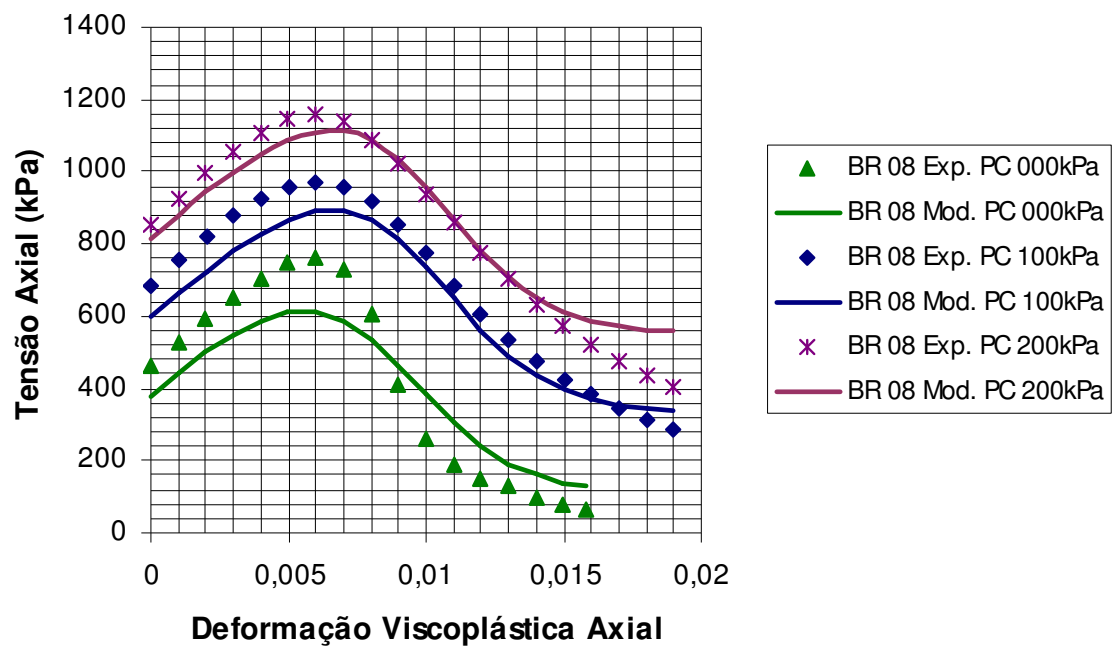


Figura B. 5: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s – BR 08

Mistura Confeccionada com Amostra BR 08

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	8,50E-07	xi0	0
N	1,2981993	U	0,921370478
Parâmetros Superfície de Fluência		T	162,3016782
alpha	0,8430629	G	503,3993063
k0	196,30027	M1	-0,00124928
Endurecimento		M2	-26,0867345
k1	36588,88	soma erros 2507365,114	
k2	1,1478331		
Dilatação			
B1	0,8820338		
B2	0,9539218		
B3	426,07102		

Taxa Defor.	0,00005						
P. C.	0						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
257,24793	0,01	0	196,3002668	0,010526	-0,07189	301,073	1920,639
301,20728	0,0110006	0,00100063	238,3006091	0,017289	0,259224	359,065	3347,518
345,3582	0,0120068	0,00200679	280,4844219	0,02834	0,476362	413,8963	4697,466
381,74526	0,0130021	0,00300205	322,1633247	0,045855	0,616566	462,7894	6568,15
416,43915	0,0140104	0,00401043	364,3427998	0,073752	0,709282	503,8621	7642,771
437,84846	0,0150021	0,00500205	405,774233	0,115512	0,768812	531,6161	8792,376
448,08781	0,0160014	0,00600142	447,4814069	0,176562	0,808072	541,464	8719,12
437,69769	0,0170016	0,00700158	489,1736738	0,259563	0,833735	527,994	8153,425
403,1348	0,0179992	0,00799921	530,7129193	0,362307	0,850459	489,4155	7444,36
343,72312	0,0190025	0,00900253	572,441021	0,477101	0,861443	429,5392	7364,394
276,3795	0,01999	0,00999005	613,4651907	0,5882	0,868515	360,046	7000,076
214,11044	0,0209899	0,01098989	654,953912	0,686353	0,873204	291,0858	5925,208
179,29296	0,0220104	0,01201043	697,2523077	0,764717	0,876318	231,4041	2715,576
154,26373	0,0229913	0,01299131	737,8605493	0,818978	0,87827	187,8085	1125,25
139,04004	0,0240005	0,01400047	779,5918015	0,856909	0,879586	156,4958	304,7029
121,58681	0,0250062	0,01500616	821,1312708	0,881406	0,880439	136,4063	219,6184
105,72788	0,026024	0,01602401	863,1243844	0,897005	0,881	124,3935	348,4074
96,430279	0,0269976	0,01699763	903,2466769	0,906291	0,881351	118,3602	480,921

82769,98

Mistura Confeccionada com Amostra BR 08

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	8,50E-07	xi0	0
N	1,2981993	U	0,921370478
Parâmetros Superfície de Fluência		T	162,3016782
alpha	0,8430629	G	503,3993063
k0	196,30027	M1	-0,00124928
Endurecimento		M2	-26,0867345
k1	36588,88	soma erros 2507365,114	
k2	1,1478331		
Dilatação			
B1	0,8820338		
B2	0,9539218		
B3	426,07102		

Taxa Defor.	0,00005						
P. C.	100						
Sigma 11	Epsilon 11	Deform. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
534,266857	0,0100016	0	196,300267	0,005642	-0,07189	519,9353	205,3928
594,607927	0,0110016	0,001	238,274101	0,009297	0,259056	579,4159	230,7974
653,049434	0,0119984	0,0019968	280,067392	0,015255	0,474638	636,504	273,7509
704,710851	0,013	0,0029984	322,01125	0,024986	0,616155	690,5639	200,1349
745,846198	0,0140016	0,004	363,906915	0,040645	0,708513	739,5182	40,04407
772,312772	0,015	0,0049984	405,622507	0,065306	0,768636	780,3396	64,42959
778,719623	0,0160032	0,0060016	447,487996	0,103396	0,808077	808,9796	915,6655
757,358509	0,0170016	0,007	489,107857	0,159246	0,833702	819,5371	3866,18
712,805928	0,0179984	0,0079968	530,614308	0,2364	0,850427	806,5346	8785,069
646,949083	0,019	0,0089984	572,270291	0,335035	0,861407	766,7588	14354,36
564,533791	0,0200016	0,01	613,878412	0,447913	0,868572	703,227	19235,79
489,299017	0,0210016	0,011	655,37321	0,562173	0,873242	626,0439	18699,16
425,558015	0,0220047	0,0120032	696,951287	0,664956	0,8763	548,0791	15011,42
374,429266	0,0230016	0,013	738,220057	0,746979	0,878284	480,7284	11299,51
333,256843	0,0239953	0,0139937	779,311054	0,807107	0,879578	428,6134	9092,864
306,695106	0,0250047	0,0150032	821,007363	0,849057	0,880437	391,0956	7123,444
287,266923	0,026	0,0159984	862,069129	0,876156	0,880989	366,7883	6323,652
269,190803	0,0269997	0,0169981	903,266197	0,893495	0,881351	351,8589	6834,007
252,105866	0,0279998	0,0179983	944,435516	0,904318	0,881588	343,6032	8371,761
238,485128	0,0290002	0,0189986	985,564092	0,910988	0,881743	339,8537	10275,6
224,775405	0,0300057	0,0200041	1026,85945	0,915084	0,881844	339,0701	13063,29

154266,3

Mistura Confeccionada com Amostra BR 08

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	8,50E-07	xi0	0
N	1,2981993	U	0,921370478
Parâmetros Superfície de Fluência		T	162,3016782
alpha	0,8430629	G	503,3993063
k0	196,30027	M1	-0,00124928
Endurecimento		M2	-26,0867345
k1	36588,88	soma erros 2507365,114	
k2	1,1478331		
Dilatação			
B1	0,8820338		
B2	0,9539218		
B3	426,07102		

Taxa Defor.	5,161E-05						
P. C.	200						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
723,3955	0,0099984	0	196,300267	0,005642	-0,07189	737,9659	212,2957
778,46056	0,0109984	0,001	238,274101	0,009297	0,259056	797,5118	362,9517
826,83204	0,012	0,0020016	280,265254	0,015291	0,475457	854,9089	788,3102
867,73998	0,0130016	0,0030031	322,208162	0,025044	0,616687	908,9727	1700,138
902,10018	0,014	0,0040016	363,972236	0,040676	0,708628	957,7558	3097,551
925,37074	0,015	0,0050016	405,753721	0,065402	0,768788	998,5949	5361,774
931,50941	0,016	0,0060016	447,487275	0,103395	0,808076	1027,071	9132,098
917,58711	0,0169984	0,007	489,107857	0,159246	0,833702	1037,546	14390,22
881,92181	0,018	0,0080016	530,810812	0,236818	0,850491	1024,305	20273,01
831,07114	0,0189969	0,0089984	572,271009	0,335037	0,861407	984,5169	23545,59
758,54173	0,02	0,0100016	613,943284	0,448094	0,868581	920,733	26306,01
673,53354	0,021	0,0110016	655,438009	0,562345	0,873248	843,4176	28860,59
590,15302	0,0219984	0,012	696,820407	0,664662	0,876292	765,721	30824,13
512,91487	0,0229984	0,013	738,220057	0,746979	0,878284	698,0778	34285,32
448,29638	0,0239953	0,0139969	779,443063	0,807268	0,879582	645,7856	39002,01
393,30177	0,025	0,0150016	820,941435	0,849004	0,880436	608,4388	46283,92
							284425,9

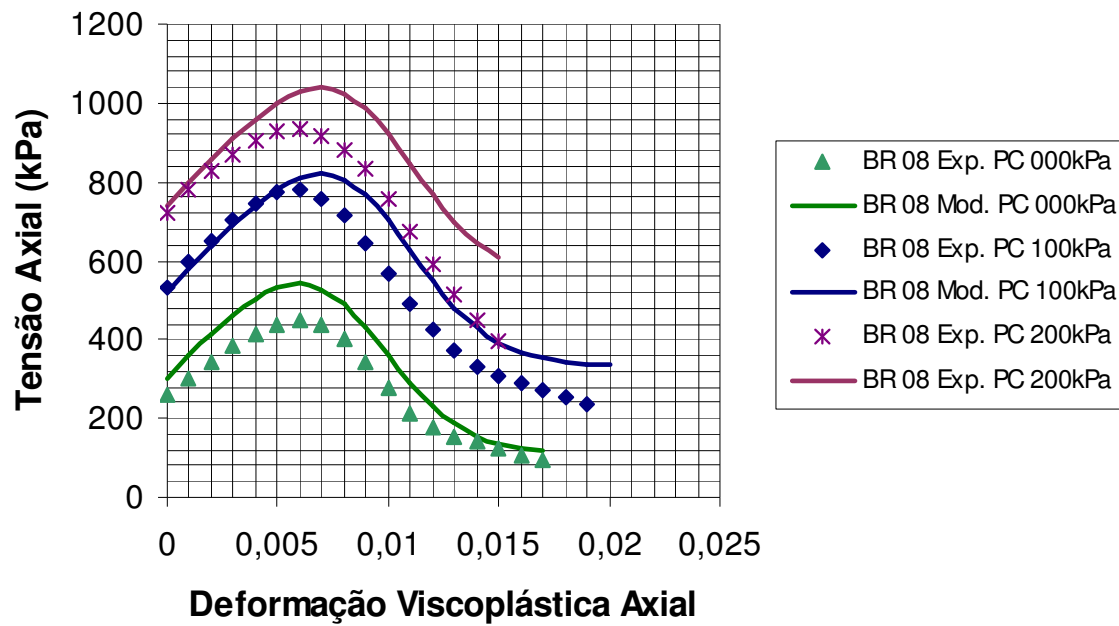


Figura B. 6: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s – BR 08

Mistura Confeccionada com Amostra MAO

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	8,26E-07	xi0	0
N	1,3203376	U	0,946804176
Parâmetros Superfície de Fluência		T	101,8805257
alpha	0,5763064	G	588,518922
k0	316,58819	M1	-0,0010789
Endurecimento		M2	-26,0042287
k1	498,18219	soma erros 667700,1419	
k2	99,213344		
Dilatação			
B1	0,6356388		
B2	0,6501736		
B3	604,57155		

Taxa Defor.	Epsilon 11		Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
0,0012903	0							
612,81581	0,011036		0	316,5881945	0,017216969	-0,01453483	698,8359	7399,458
665,8639	0,0120367	0,001000775		363,6764496	0,030581327	0,280609892	767,5003	10329,95
705,60764	0,0130419	0,002005891		406,4897975	0,053849634	0,442282525	808,4019	10566,66
738,39208	0,0146453	0,003609302		466,5363044	0,127019352	0,562295018	803,3285	4216,733
737,14259	0,0150122	0,003976279		478,9871194	0,15270125	0,576888634	787,5538	2541,291
712,33953	0,0160057	0,004969767		510,5055151	0,242890866	0,603416495	714,3967	4,232125
655,2748	0,0170065	0,005970543		539,2646761	0,36302125	0,618043739	600,1761	3035,862
560,4796	0,0180076	0,006971628		565,3131913	0,500378004	0,626032782	464,0915	9290,67
435,72273	0,0190616	0,008025581		590,0805183	0,639813915	0,630559376	327,5886	11692,98
328,4055	0,0200228	0,008986822		610,5186527	0,744042912	0,632798083	228,8421	9912,877
246,09403	0,0210212	0,009985271		629,7818798	0,822290259	0,634085445	157,1916	7903,645
188,3508	0,0220245	0,010988527		647,3082403	0,873514906	0,634791866	111,6119	5888,854
143,02084	0,0230017	0,011965736		662,7818455	0,904123396	0,635169702	84,96633	3370,327
113,68206	0,024022	0,012986047		677,4142959	0,922905154	0,635385663	68,94598	2001,317
87,554121	0,025047	0,014011008		690,6952995	0,933578931	0,635502589	60,09678	753,9055
67,300363	0,026054	0,015017984		702,4919987	0,939446326	0,635564708	55,46807	140,0033
51,148523	0,0270705	0,016034574		713,2639527	0,942744956	0,635598735	53,09935	3,805725
35,628223	0,0280487	0,017012713		722,6517116	0,944517234	0,635616629	52,04226	269,4205
24,129507	0,0290569	0,01802093		731,4203452	0,94553934	0,635626756	51,6415	756,9099
14,478446	0,0300212	0,018985271		739,0252983	0,946086697	0,635632085	51,61236	1378,927

91457,83

Mistura Confeccionada com Amostra MAO

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	8,26E-07	xi0	0
N	1,3203376	U	0,946804176
Parâmetros Superfície de Fluência		T	101,8805257
alpha	0,5763064	G	588,518922
k0	316,58819	M1	-0,0010789
Endurecimento		M2	-26,0042287
k1	498,18219	soma erros 667700,1419	
k2	99,213344		
Dilatação			
B1	0,6356388		
B2	0,6501736		
B3	604,57155		

Taxa Defor.	0,0012903						
P. C.	100						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
900,97752	0,0110246	0	316,5881945	0,009202948	-0,01453483	877,82	536,2722
959,77249	0,0120169	0,000992308	363,2973312	0,016376307	0,278787764	953,1687	43,60971
1006,8611	0,0130569	0,002032308	407,5584352	0,029766952	0,445345993	1008,461	2,560583
1035,3372	0,0146369	0,003612308	466,6401227	0,071963058	0,562428159	1040,539	27,05926
1026,3709	0,0150769	0,004052308	481,510422	0,091184499	0,579527949	1035,85	89,84776
988,72938	0,0160385	0,005013846	511,8332199	0,149611121	0,604263838	999,6047	118,2735
913,98526	0,0170138	0,005989231	539,7750214	0,236627754	0,618241415	921,9141	62,86626
820,90548	0,01806	0,007035385	566,8861567	0,361170608	0,626396007	795,9497	622,791
722,20734	0,0190215	0,007996923	589,4407513	0,492928246	0,630470603	658,9655	3999,527
618,75597	0,0200138	0,008989231	610,5674654	0,625578221	0,632802217	523,4123	9090,417
518,45859	0,0210554	0,010030769	630,6150361	0,740745587	0,634127591	409,938	11776,72
436,14712	0,0220508	0,011026154	647,9322232	0,819850459	0,634810915	334,9318	10244,53
368,84181	0,0230354	0,012010769	663,4593934	0,871228107	0,635182301	287,6824	6586,847
314,9595	0,0240062	0,012981538	677,3528484	0,902583983	0,635384972	259,4999	3075,77
267,90424	0,0250523	0,014027692	690,9005148	0,922388986	0,635503956	242,0593	667,9596
							46945,06

Mistura Confeccionada com Amostra MAO

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	8,26E-07	xi0	0
N	1,3203376	U	0,946804176
Parâmetros Superfície de Fluência		T	101,8805257
alpha	0,5763064	G	588,518922
k0	316,58819	M1	-0,0010789
Endurecimento		M2	-26,0042287
k1	498,18219	soma erros 667700,1419	
k2	99,213344		
Dilatação			
B1	0,6356388		
B2	0,6501736		
B3	604,57155		

Taxa Defor.	0,0012903						
P. C.	200						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
1077,3246	0,0110625	0	316,588195	0,009203	-0,014535	1049,154	793,5806
1135,2717	0,0120641	0,00100156	363,711684	0,016464	0,280779	1125,103	103,4108
1178,3474	0,0130031	0,00194063	403,837478	0,02825	0,434501	1175,924	5,873016
1209,7514	0,0145688	0,00350625	462,957638	0,067921	0,55758	1212,009	5,096211
1205,2157	0,0150641	0,00400156	479,828361	0,088753	0,57778	1208,078	8,191899
1171,8565	0,0160016	0,00493906	509,577208	0,14415	0,602813	1175,15	10,84532
1091,3408	0,0170641	0,00600156	540,111265	0,237918	0,618371	1091,999	0,432962
985,11364	0,0180125	0,00695	564,777337	0,350014	0,625906	978,8361	39,40778
860,24802	0,0190547	0,00799219	589,334859	0,49227	0,630456	830,9817	856,5163
750,08824	0,0200578	0,00899531	610,690642	0,626337	0,632813	693,9837	3147,72
648,32016	0,0210578	0,00999531	629,966077	0,737362	0,634095	584,5373	4068,247
559,58329	0,0220609	0,01099844	647,472815	0,818047	0,634797	507,9467	2666,332
484,78726	0,0230141	0,01195156	662,567962	0,868769	0,635166	461,2492	554,0409
423,07311	0,0240656	0,01300313	677,646837	0,903116	0,635388	430,3606	53,10676
372,85892	0,0250594	0,01399688	690,521205	0,921954	0,635501	413,7718	1673,867

13986,67

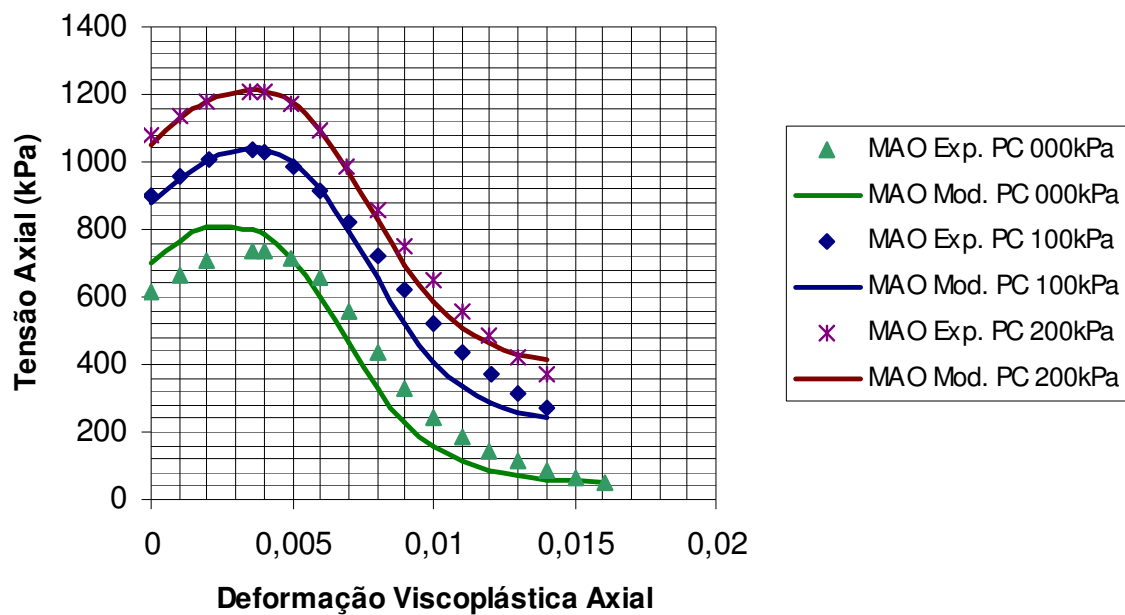


Figura B. 7: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s – MAO

Mistura Confeccionada com Amostra MAO

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,26E-07
N	1,3203376

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,5763064
k0	316,58819

Endurecimento

k1	498,18219
k2	99,213344

Dilatação

B1	0,6356388
B2	0,6501736
B3	604,57155

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,946804176
T	101,8805257
G	588,518922
M1	-0,0010789
M2	-26,0042287

soma erros 667700,1419

Taxa Defor.	0,0002581
-------------	-----------

P. C.	0
-------	---

Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
496,725005	0,0110051	0	316,588195	0,017217	-0,014535	477,8347	356,8426
554,034438	0,0119998	0,0009947	363,404656	0,030476	0,279304	533,9467	403,5172
601,985715	0,0130034	0,0019983	406,181632	0,053623	0,441391	574,0417	780,8688
643,799565	0,014622	0,0036168	466,796023	0,127507	0,562628	592,4684	2634,89
642,742879	0,0150123	0,0040072	480,014488	0,155044	0,577975	585,9416	3226,383
612,338762	0,016012	0,0050069	511,622982	0,246853	0,604131	546,0682	4391,794
527,779201	0,0170106	0,0060055	540,217225	0,367631	0,618411	473,9152	2901,332
411,829283	0,0180072	0,007002	566,064368	0,504596	0,626208	380,4484	984,7596
316,129414	0,0190005	0,0079953	589,405069	0,636109	0,630466	284,8896	975,9264
257,833742	0,0200062	0,0090011	610,807595	0,745378	0,632822	202,8778	3020,151
217,100059	0,0210022	0,009997	629,997757	0,823037	0,634096	143,4697	5421,433
187,846555	0,0220125	0,0110073	647,620198	0,874259	0,634801	103,7987	7064,038
161,227966	0,0230143	0,0120092	663,435684	0,905154	0,635182	79,71679	6644,072
143,510254	0,0240014	0,0129963	677,553433	0,923045	0,635387	65,80699	6037,798
126,552614	0,0250215	0,0140164	690,761108	0,93362	0,635503	57,73328	4736,101
113,846434	0,0260167	0,0150115	702,420036	0,939419	0,635564	53,5046	3641,137
102,319293	0,0270028	0,0159977	712,891557	0,942656	0,635598	51,35629	2597,228
94,5270094	0,0280095	0,0170044	722,575349	0,944506	0,635617	50,34688	1951,884
87,0016781	0,0290118	0,0180067	731,302568	0,945529	0,635627	49,99764	1369,299

59139,45

Mistura Confeccionada com Amostra MAO

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,26E-07
N	1,3203376

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,5763064
k0	316,58819

Endurecimento

k1	498,18219
k2	99,213344

Dilatação

B1	0,6356388
B2	0,6501736
B3	604,57155

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,946804176
T	101,8805257
G	588,518922
M1	-0,0010789
M2	-26,0042287

soma erros 667700,1419

Taxa Defor.	0,0002581						
P. C.	100						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
755,693766	0,0110031	0	316,588195	0,009203	-0,01453	653,642	10414,57
807,143846	0,0120109	0,0010078	363,990746	0,016524	0,282115	714,8365	8520,651
848,123471	0,0130047	0,00200156	406,314308	0,02925	0,441776	762,2903	7367,337
875,198102	0,0145195	0,00351638	463,311066	0,068298	0,558057	804,6591	4975,75
868,022528	0,0150062	0,00400312	479,880118	0,088827	0,577834	808,3596	3559,669
823,951943	0,0160047	0,00500156	511,463731	0,148703	0,60403	795,991	781,8156
731,584033	0,0170062	0,00600312	540,153707	0,238082	0,618387	751,6045	400,8175
619,368973	0,0180078	0,00700468	566,129878	0,357143	0,626223	674,5103	3040,566
508,166106	0,0190125	0,00800936	589,718624	0,494658	0,630509	574,7738	4436,58
414,02593	0,0200062	0,00900312	610,848665	0,627311	0,632826	473,3818	3523,123
339,569767	0,0210078	0,01000468	630,137754	0,73826	0,634104	386,3755	2190,773
282,359205	0,0220172	0,01101404	647,731597	0,819065	0,634805	322,0923	1578,722
243,020842	0,0230062	0,01200312	663,344521	0,870914	0,63518	280,4687	1402,34
215,79914	0,0240078	0,01300468	677,667993	0,903155	0,635388	254,467	1495,203
193,197192	0,0250203	0,01401716	690,771018	0,922241	0,635503	239,1106	2108,045
177,016927	0,0260125	0,01500936	702,395889	0,932946	0,635564	230,6265	2873,986
157,861875	0,0270047	0,01600156	712,930935	0,939025	0,635598	225,9834	4640,549
145,986213	0,0280156	0,01701248	722,649585	0,942497	0,635617	223,5286	6012,825
135,981687	0,0290125	0,01800936	731,324614	0,944404	0,635627	222,3765	7464,061
126,213217	0,0300062	0,01900312	739,159312	0,945465	0,635632	221,9208	9159,943

85947,32

Mistura Confeccionada com Amostra MAO

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,26E-07
N	1,3203376

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,5763064
k0	316,58819

Endurecimento

k1	498,18219
k2	99,213344

Dilatação

B1	0,6356388
B2	0,6501736
B3	604,57155

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,946804176
T	101,8805257
G	588,518922
M1	-0,0010789
M2	-26,0042287

soma erros 667700,1419

Taxa Defor.	0,0002581						
P. C.	200						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
876,35289	0,0110126	0	316,588195	0,009203	-0,01453	824,976	2639,582
939,7738	0,0120047	0,00099213	363,289192	0,016375	0,278749	885,3162	2965,629
991,6997	0,0130047	0,00199213	405,93182	0,029093	0,440667	933,2391	3417,642
1034,7531	0,0146331	0,00362047	466,922012	0,072283	0,562789	977,2555	3305,977
1033,0736	0,0150142	0,00400157	479,828769	0,088754	0,57778	979,6911	2849,69
999,73298	0,016	0,0049874	511,037374	0,147661	0,603758	967,7116	1025,371
925,71927	0,0170094	0,00599685	539,982831	0,237425	0,618321	923,3224	5,744881
823,42345	0,0180047	0,00699213	565,819993	0,355501	0,626151	846,9832	555,0627
705,84711	0,0190047	0,00799213	589,333483	0,492261	0,630456	747,9031	1768,706
590,36435	0,0200236	0,00901102	611,008504	0,628295	0,632839	643,9517	2871,607
494,27765	0,0210079	0,00999528	629,9654	0,737358	0,634095	558,4225	4114,566
421,94722	0,0220047	0,01099213	647,368023	0,817633	0,634794	494,5718	5274,327
374,25919	0,023011	0,01199843	663,27397	0,870721	0,635179	451,9583	6037,149
338,90039	0,024011	0,01299843	677,582884	0,903001	0,635388	425,9249	7573,268
311,32028	0,0250016	0,01398898	690,423799	0,921841	0,635501	410,7648	9889,216
287,97309	0,026011	0,01499843	702,273906	0,932858	0,635564	402,0294	13008,83
270,35054	0,0270052	0,0159926	712,840347	0,938984	0,635598	397,3477	16128,27
257,2155	0,0280046	0,01699197	722,461922	0,942445	0,635616	394,8971	18956,22
246,34462	0,0290035	0,01799087	731,171361	0,944378	0,635627	393,7243	21720,77
237,04702	0,0300009	0,01898835	739,048404	0,945454	0,635632	393,2583	24401,97

102386,9

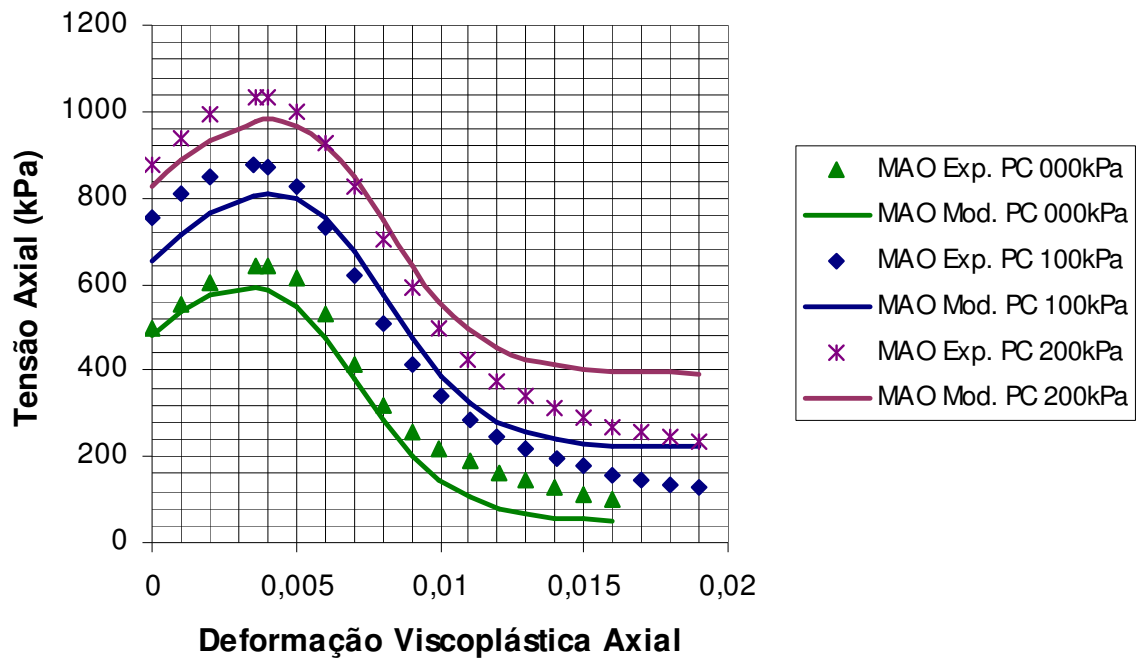


Figura B. 8: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s – MAO

Mistura Confeccionada com Amostra MAO

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,26E-07
N	1,3203376

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,5763064
k0	316,58819

Endurecimento

k1	498,18219
k2	99,213344

Dilatação

B1	0,6356388
B2	0,6501736
B3	604,57155

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,946804176
T	101,8805257
G	588,518922
M1	-0,0010789
M2	-26,0042287

soma erros 667700,1419

Taxa Defor.	5,16E-05
P. C.	0

Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
256,89076	0,011019	0	316,588195	0,017217	-0,01453	412,5206	24220,64
295,2058	0,012017	0,0009983	363,564337	0,030538	0,280072	465,1887	28894,19
326,84581	0,013003	0,0019843	405,613312	0,053207	0,439739	504,388	31521,24
362,23674	0,014634	0,0036154	466,747216	0,127415	0,562565	530,2339	28223,04
355,70754	0,015026	0,0040072	480,016733	0,155049	0,577978	526,8301	29282,94
341,51706	0,016005	0,0049866	511,014279	0,244688	0,603743	498,2803	24574,71
300,5053	0,01703	0,0060118	540,389888	0,36847	0,618477	437,4779	18761,5
250,21078	0,018018	0,0069992	565,994995	0,504206	0,626192	357,2077	11448,35
197,7003	0,019057	0,0080388	590,375809	0,64143	0,6306	267,6174	4888,398
161,65188	0,020063	0,0090447	611,687241	0,749413	0,632896	192,7082	964,4979
136,89207	0,021011	0,0099929	629,922288	0,822777	0,634093	139,8042	8,480462
107,45441	0,022	0,0109813	647,187944	0,873226	0,634788	102,4559	24,98541
103,0979	0,023003	0,0119844	663,06353	0,90457	0,635175	78,86901	587,0395
91,565818	0,024021	0,0130024	677,636409	0,923128	0,635388	64,85163	713,6477
74,018659	0,025002	0,013983	690,35028	0,933362	0,6355	57,23285	281,7634

204395,4

Mistura Confeccionada com Amostra MAO

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	8,26E-07
N	1,3203376

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,5763064
k0	316,58819

Endurecimento

k1	498,18219
k2	99,213344

Dilatação

B1	0,6356388
B2	0,6501736
B3	604,57155

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,946804176
T	101,8805257
G	588,518922
M1	-0,0010789
M2	-26,0042287

soma erros 667700,1419

Taxa Deform.	5,161E-05
P. C.	200

Sigma 11	Epsilon 11	Deform. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
820,939317	0,011	0	316,5881945	0,009203	-0,01453	758,723	3870,869
878,456379	0,012	0,001	363,6417548	0,016449	0,280443	815,0367	4022,052
926,37923	0,013	0,002	406,2510825	0,029224	0,441593	861,1856	4250,213
974,010412	0,0146283	0,0036283	467,1936478	0,072593	0,563135	908,0436	4351,626
976,914753	0,015	0,004	479,7764336	0,088679	0,577725	912,1831	4190,188
969,38077	0,0160031	0,0050031	511,5115601	0,14882	0,60406	906,9103	3902,556
927,600289	0,0170031	0,0060031	540,1545098	0,238085	0,618387	873,0202	2978,989
853,860942	0,0180079	0,0070079	566,2086527	0,357561	0,626241	808,4729	2060,077
765,255079	0,019	0,008	589,5095276	0,493356	0,63048	722,6203	1817,724
671,50668	0,0200031	0,0090031	610,8492616	0,627315	0,632826	630,4417	1686,332
594,834566	0,0210031	0,0100031	630,1097151	0,738113	0,634102	550,1454	1997,119
529,726671	0,022	0,011	647,4987476	0,818149	0,634798	490,1124	1569,29
479,610115	0,0230016	0,0120016	663,321303	0,870851	0,63518	449,6359	898,4518
438,641614	0,024	0,013	677,6043163	0,90304	0,635388	424,5534	198,4773
407,185754	0,0250016	0,0140016	690,5791264	0,922021	0,635502	409,7071	6,357223

37800,32

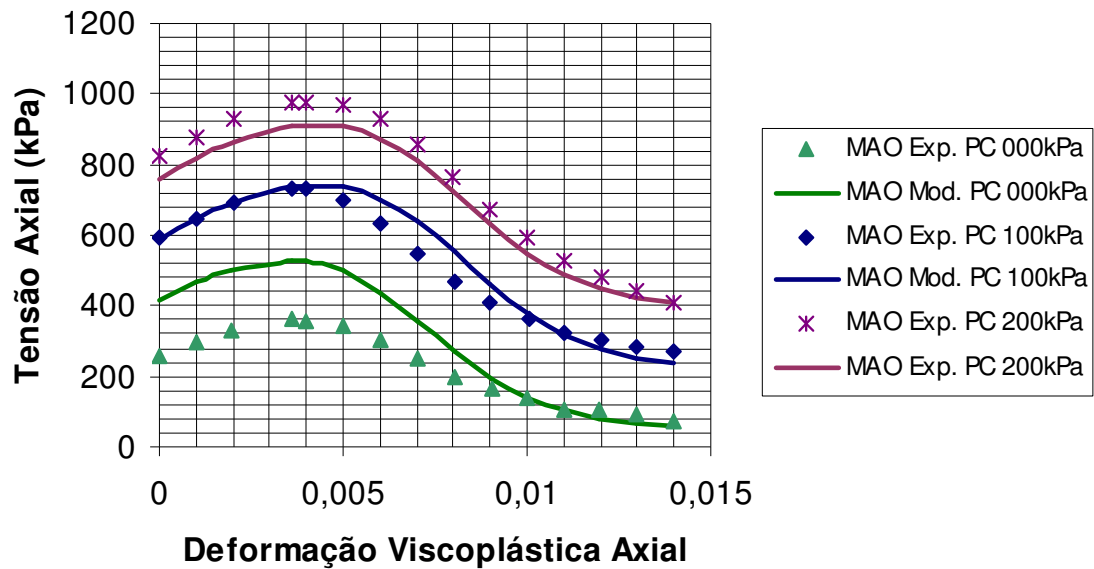


Figura B. 9: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s – MAO

Mistura Confeccionada com Amostra PUC

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	9,20E-07
N	1,4769836

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,6000377
k0	249,05106

Endurecimento

k1	445,6528
k2	143,98325

Dilatação

B1	0,7467983
B2	0,0027346
B3	426,0707

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,894186097
T	137,6762914
G	467,4791401
M1	-0,00063429
M2	-13,195698

soma erros 703074,9282

Taxa Deform.	0,0012903
--------------	-----------

P. C.	0
-------	---

Sigma 11	Epsilon 11	Deform. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
543,15737	0,0110113	0	249,0510596	0,008652107	0,74406368	510,5491	1063,3
602,79646	0,0120011	0,000989839	308,2471035	0,01366523	0,745004636	580,3205	505,1689
663,9631	0,0130126	0,00200129	360,6213885	0,021725592	0,745632596	638,5614	645,2466
717,51543	0,0140094	0,002998065	405,2867046	0,034128869	0,746035949	682,7378	1209,486
764,86359	0,0150471	0,004035806	445,4550508	0,054147674	0,746308356	713,4281	2645,611
793,93419	0,016	0,00498871	477,4102406	0,081757518	0,74647183	725,6901	4657,251
803,82007	0,0170374	0,006026129	507,5598348	0,125616412	0,746588447	718,4719	7284,305
773,89177	0,0181019	0,007090645	534,1537651	0,189455827	0,746664949	685,3707	7835,971
703,92435	0,0190124	0,008001129	553,879762	0,260670581	0,746707811	635,4476	4689,065
571,83619	0,0200211	0,009009839	572,9167798	0,355314011	0,746739406	559,9012	142,4437
411,77738	0,0210253	0,010014032	589,3118087	0,458930031	0,746759889	471,7814	3600,478
267,55525	0,0220685	0,011057258	604,0108608	0,565092981	0,746773655	379,1164	12445,9
183,51847	0,0230105	0,011999194	615,5132898	0,650344737	0,746781786	304,2251	14570,08
126,66508	0,024021	0,013009677	626,2359981	0,724751916	0,746787546	239,0307	12626,04
85,790506	0,0250708	0,014059516	635,8412982	0,782239848	0,746791406	188,9872	10649,56
55,622443	0,0260034	0,014992097	643,2374551	0,818446336	0,746793651	157,7068	10421,22
31,431142	0,027044	0,016032742	650,3990267	0,846051747	0,746795298	134,0549	10531,63

105522,8

Mistura Confeccionada com Amostra PUC

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	9,20E-07
N	1,4769836

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,6000377
k0	249,05106

Endurecimento

k1	445,6528
k2	143,98325

Dilatação

B1	0,7467983
B2	0,0027346
B3	426,0707

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,894186097
T	137,6762914
G	467,4791401
M1	-0,00063429
M2	-13,195698

soma erros 703074,9282

Taxa Defor.	0,0012903						
P. C.	100						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
693,14169	0,0110823	0	249,0510596	0,00644801	0,74406368	686,9946	37,78645
760,01196	0,0120145	0,000932258	305,029808	0,009930906	0,744960088	754,0541	35,49651
825,77612	0,0130323	0,00195	358,1450745	0,015873977	0,745606842	815,1432	113,0594
884,4475	0,0140032	0,002920968	402,0560899	0,024740511	0,746010493	861,7232	516,3931
933,18233	0,0150516	0,003969355	443,0588131	0,039693719	0,746294287	898,4158	1208,711
962,93143	0,0160339	0,004951613	476,2465019	0,061242218	0,74646663	918,2818	1993,587
975,67468	0,0170452	0,005962903	505,8483989	0,094351959	0,746582718	921,3113	2955,375
964,77414	0,0180145	0,006932258	530,4503378	0,139973735	0,746655643	904,4973	3633,299
921,64159	0,0190435	0,00796129	553,0696587	0,206478403	0,746706263	862,7338	3470,123
859,36636	0,020021	0,00893871	571,6631021	0,287606077	0,746737595	800,1854	3502,385
775,24554	0,0210581	0,009975806	588,7301447	0,388983239	0,74675926	714,4248	3699,165
693,44819	0,0220081	0,010925806	602,2779824	0,487817644	0,746772238	627,3737	4365,839
612,90898	0,0230435	0,01196129	615,0799314	0,59085556	0,746781518	535,3922	6008,853
540,10273	0,0240205	0,012938226	625,5279761	0,674777199	0,746787215	460,4774	6340,195
473,02359	0,0250352	0,013952903	634,9307593	0,743702373	0,746791088	399,3307	5430,635
428,76391	0,0260084	0,014926129	642,7462854	0,792450136	0,746793519	356,4383	5230,996
386,46065	0,0270466	0,015964355	649,96062	0,828704692	0,746795211	324,8141	3800,293
354,99985	0,0280116	0,016929355	655,7648521	0,851340734	0,746796235	305,2514	2474,904
328,81011	0,0290568	0,017974516	661,2050209	0,867404907	0,74679696	291,5214	1390,447
308,44883	0,0300013	0,018919032	665,4644849	0,876778501	0,746797387	283,6291	616,0212
291,20694	0,0310531	0,019970806	669,5734574	0,883458558	0,746797699	278,1246	171,1486
270,8642	0,032005	0,020922742	672,7922731	0,887281947	0,746797883	275,0746	17,72776

57012,44

Mistura Confeccionada com Amostra PUC

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	9,20E-07
N	1,4769836

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,6000377
k0	249,05106

Endurecimento

k1	445,6528
k2	143,98325

Dilatação

B1	0,7467983
B2	0,0027346
B3	426,0707

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,894186097
T	137,6762914
G	467,4791401
M1	-0,00063429
M2	-13,195698

soma erros 703074,9282

Taxa Defor.	0,00129						
P. C.	200						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
851,412644	0,011019	0	249,05106	0,006448	0,744064	862,0005	112,1028
925,247156	0,012029	0,00100969	309,350287	0,010293	0,74502	934,1472	79,21008
997,761737	0,013065	0,00204523	362,728518	0,016583	0,745654	995,2276	6,421815
1057,79631	0,014036	0,00301616	406,03958	0,025834	0,746042	1040,663	293,5535
1111,10887	0,015073	0,00405331	446,082485	0,041209	0,746312	1075,7	1253,759
1144,85607	0,01604	0,005021	478,418202	0,063119	0,746476	1094,097	2576,529
1158,11346	0,017002	0,00598223	506,373186	0,095117	0,746584	1096,181	3835,622
1144,69046	0,018048	0,00702827	532,705407	0,145355	0,746661	1076,677	4625,814
1104,13598	0,019025	0,00800582	553,974761	0,209802	0,746708	1035,36	4730,149
1032,46551	0,020034	0,00901438	572,996352	0,294551	0,74674	969,5127	3963,054
950,875796	0,021001	0,00998174	588,820715	0,389593	0,746759	888,9004	3840,945
854,986837	0,022059	0,01103926	603,775491	0,499544	0,746773	791,9443	3974,358
766,037397	0,023025	0,01200565	615,586922	0,594998	0,746782	706,6942	3521,616
689,600102	0,024038	0,01301842	626,322099	0,680925	0,746788	630,0113	3550,826
632,709636	0,025008	0,01398901	635,240738	0,745803	0,746791	572,481	3627,494
580,736775	0,02605	0,01503086	643,523874	0,796781	0,746794	527,6517	2818,027
543,731771	0,02703	0,01601018	650,254852	0,829993	0,746795	498,7022	2027,665
509,486508	0,028063	0,01704313	656,397566	0,853459	0,746796	478,4374	964,0488
482,95196	0,029011	0,01799208	661,289649	0,867617	0,746797	466,347	275,7232
457,33815	0,030065	0,0190454	665,991663	0,877759	0,746797	457,8187	0,230918
434,896868	0,031033	0,02001325	669,726555	0,883667	0,746798	452,9617	326,3381
417,599359	0,032008	0,02098901	673,000362	0,887491	0,746798	449,9176	1044,468

47447,96

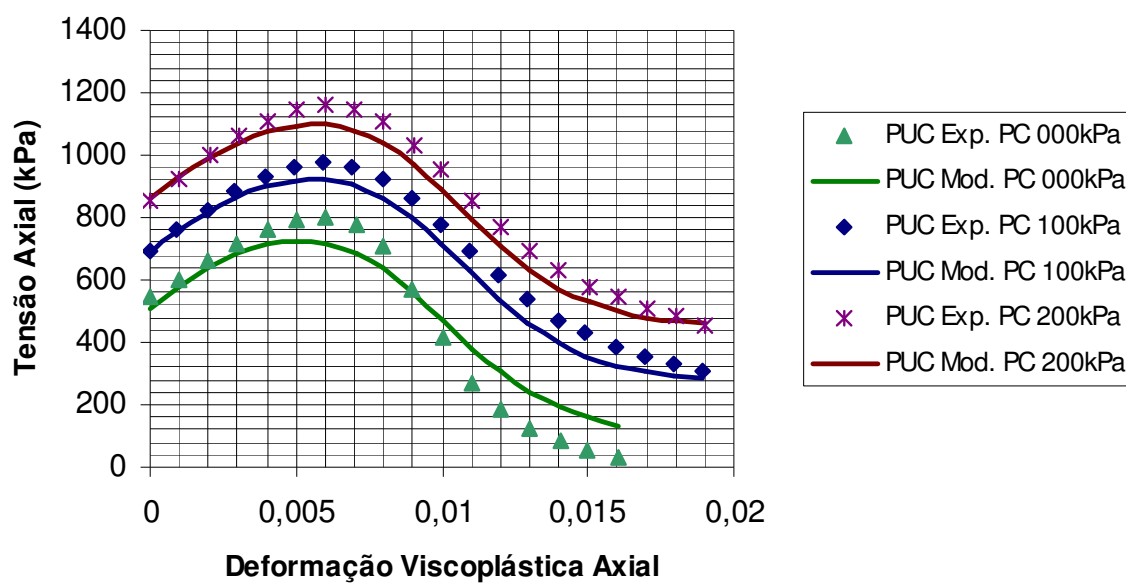


Figura B. 10: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,08mm/s – PUC

Mistura Confeccionada com Amostra PUC

Parâmetros do Modelo de Perzyna		Modelo de Dano	
Gamma	9,20E-07	xi0	0
N	1,4769836	U	0,894186097
Parâmetros Superfície de Fluência		T	137,6762914
alpha	0,6000377	G	467,4791401
k0	249,05106	M1	-0,00063429
Endurecimento		M2	-13,195698
k1	445,6528	soma erros 703074,9282	
k2	143,98325		
Dilatação			
B1	0,7467983		
B2	0,0027346		
B3	426,0707		

Taxa Defor.	0,0002581						
P. C.	0						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
431,809909	0,0110169	0	249,05106	0,008652	0,744064	376,5371	3055,083
490,184678	0,012019	0,0010021	308,928394	0,013743	0,745014	448,207	1762,124
545,312766	0,013004	0,0019871	359,93895	0,021586	0,745626	506,6825	1492,294
598,067945	0,0140052	0,0029882	404,877214	0,033978	0,746033	553,9738	1944,295
642,794787	0,0150105	0,0039936	443,93426	0,053152	0,746299	588,3511	2964,114
674,557147	0,0160116	0,0049947	477,597139	0,081965	0,746473	607,8171	4454,231
686,263493	0,0170066	0,0059897	506,575492	0,123789	0,746585	610,0957	5801,528
667,130687	0,0180032	0,0069863	531,723748	0,182276	0,746659	592,7226	5536,561
617,671625	0,0190254	0,0080085	554,02984	0,26131	0,746708	553,0758	4172,622
527,807627	0,0200137	0,0089968	572,687565	0,354008	0,746739	495,588	1038,105
421,013178	0,0210061	0,0099892	588,934479	0,456338	0,746759	425,0508	16,30239
336,075435	0,0220122	0,0109953	603,198573	0,559049	0,746773	349,9495	192,4885
263,557146	0,0231056	0,0120887	616,527618	0,657697	0,746782	275,2273	136,1927
221,436796	0,0240514	0,0130345	626,47988	0,726337	0,746788	222,1576	0,519496
184,522012	0,0250386	0,0140217	635,520257	0,780499	0,746791	179,7968	22,32783
157,394237	0,0260417	0,0150248	643,479217	0,819499	0,746794	149,0935	68,90239
137,400017	0,0270005	0,0159836	650,08427	0,844994	0,746795	128,9861	70,79442

32728,48

Mistura Confeccionada com Amostra PUC

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	9,20E-07
N	1,4769836

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,6000377
k0	249,05106

Endurecimento

k1	445,6528
k2	143,98325

Dilatação

B1	0,7467983
B2	0,0027346
B3	426,0707

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,894186097
T	137,6762914
G	467,4791401
M1	-0,00063429
M2	-13,195698

soma erros 703074,9282

Taxa Defor.	0,0002581
-------------	-----------

P. C.	100
-------	-----

Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
569,620712	0,0110048	0	249,05106	0,006448	0,744064	552,4826	293,7156
634,115607	0,0120048	0,001	308,812098	0,010247	0,745012	624,8197	86,41313
695,019006	0,0130113	0,00200644	360,869067	0,016291	0,745635	685,819	84,63991
751,268045	0,014	0,00299517	405,166023	0,025589	0,746035	734,528	280,2277
800,832158	0,0150129	0,00400805	444,456999	0,040386	0,746303	772,4975	802,8504
836,794071	0,0160113	0,00500644	477,964294	0,062721	0,746474	796,8576	1594,922
854,699639	0,0170032	0,00599839	506,810887	0,095761	0,746586	806,1115	2360,81
855,548695	0,017161	0,0061562	511,032052	0,102254	0,7466	806,0353	2451,578
847,034652	0,0180113	0,00700644	532,195415	0,144117	0,74666	797,5075	2452,943
811,326096	0,0190064	0,00800161	553,88952	0,209487	0,746708	768,8309	1805,839
750,070468	0,02	0,00899517	572,659272	0,29278	0,746739	719,8355	914,1556
666,444004	0,021	0,00999517	589,025177	0,390974	0,74676	653,4504	168,8334
571,841606	0,0220016	0,01099678	603,217665	0,495161	0,746773	577,5893	33,03645
487,786288	0,0230016	0,01199678	615,485759	0,594172	0,746782	502,4359	214,6125
420,306721	0,0240097	0,01300483	626,188203	0,679892	0,746788	435,779	239,3928
366,108022	0,0250113	0,01400644	635,389753	0,746809	0,746791	382,9922	285,0768
325,628933	0,0260032	0,01499839	643,284066	0,795456	0,746794	344,3001	348,6142
292,740677	0,027013	0,01600821	650,242273	0,829938	0,746795	316,7693	577,3735
265,693235	0,0280008	0,01699597	656,136573	0,852593	0,746796	298,6873	1088,607
247,367466	0,0290024	0,01799758	661,316102	0,867684	0,746797	286,7065	1547,558
230,098381	0,0300137	0,01900886	665,840209	0,877481	0,746797	279,0195	2393,276
216,067328	0,0310143	0,0200095	669,713078	0,883649	0,746798	274,2801	3388,732

23413,21

Mistura Confeccionada com Amostra PUC

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	9,20E-07
N	1,4769836

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,6000377
k0	249,05106

Endurecimento

k1	445,6528
k2	143,98325

Dilatação

B1	0,7467983
B2	0,0027346
B3	426,0707

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,894186097
T	137,6762914
G	467,4791401
M1	-0,00063429
M2	-13,195698

soma erros 703074,9282

Taxa Defor.	0,000258
P. C.	200

Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
645,30335	0,011005	0	249,0510596	0,006448	0,744064	727,4885	6754,393
709,237151	0,012002	0,00099678	308,6331128	0,010232	0,74501	799,6118	8167,57
772,355264	0,013003	0,00199839	360,4818325	0,016231	0,745631	860,3826	7748,811
833,950761	0,014	0,00299517	405,1660231	0,025589	0,746035	909,5339	5712,815
887,234902	0,015003	0,00399839	444,1086275	0,040212	0,7463	947,2015	3595,998
931,688612	0,016003	0,00499839	477,7128848	0,062502	0,746473	971,724	1602,835
958,188555	0,017003	0,00599839	506,8108868	0,095761	0,746586	981,1174	525,73
959,985538	0,018002	0,00699678	531,9691854	0,143572	0,74666	972,6906	161,4182
934,30499	0,019	0,00799517	553,7588643	0,209004	0,746708	944,0894	95,73455
868,466684	0,02	0,00899517	572,6592716	0,29278	0,746739	894,8413	695,6229
780,23406	0,021005	0,01	589,0986583	0,391471	0,74676	828,1052	2291,647
692,637919	0,022008	0,01100322	603,3024727	0,495826	0,746773	752,0986	3535,578
609,105382	0,023011	0,01200644	615,5958856	0,595072	0,746782	676,7489	4575,64
539,731196	0,024008	0,01300322	626,1723158	0,679769	0,746788	610,8812	5062,317
489,284658	0,02501	0,01400483	635,3759994	0,746716	0,746791	558,0716	4731,645
450,05011	0,026013	0,01500805	643,355549	0,795852	0,746794	518,9902	4752,738
415,587331	0,027011	0,01600612	650,22887	0,82988	0,746795	491,8218	5811,694
394,18296	0,028008	0,01700274	656,174111	0,852719	0,746796	473,5934	6306,021
378,144822	0,029009	0,01800435	661,3485988	0,867765	0,746797	461,6482	6972,82
363,081801	0,030006	0,01900081	665,8067285	0,877419	0,746797	454,0734	8279,476
356,24486	0,031022	0,02001755	669,7420328	0,883688	0,746798	449,2564	8651,153
338,834884	0,032011	0,0210058	673,0527434	0,887543	0,746798	446,3916	11568,44

107600,1

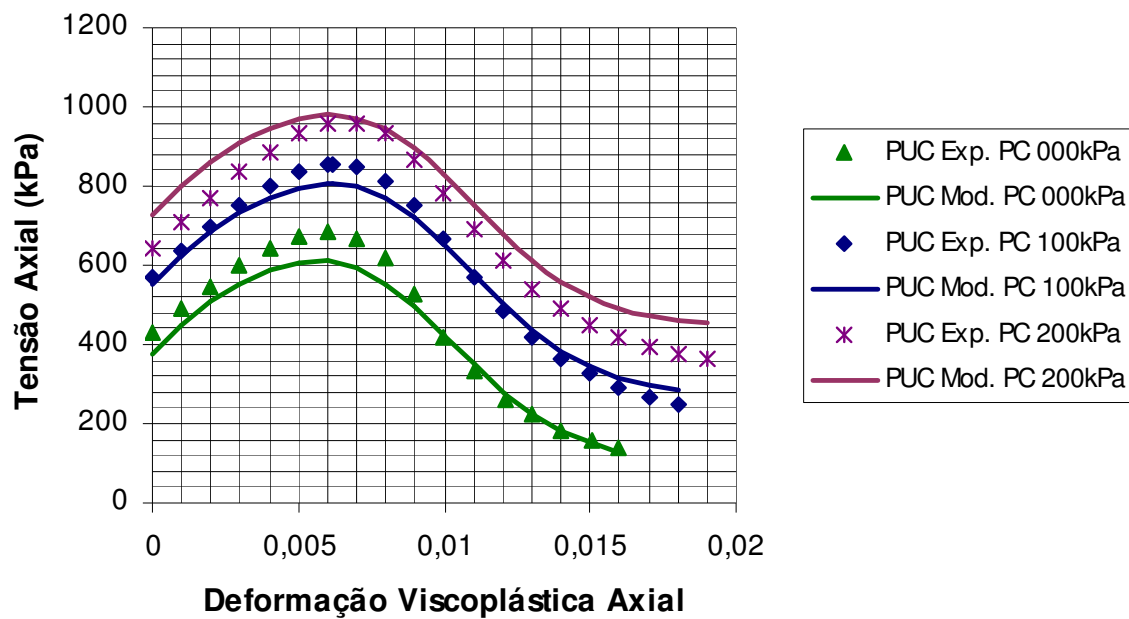


Figura B. 11: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,016mm/s – PUC

Mistura Confeccionada com Amostra PUC

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	9,20E-07
N	1,4769836

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,6000377
k0	249,05106

Endurecimento

k1	445,6528
k2	143,98325

Dilatação

B1	0,7467983
B2	0,0027346
B3	426,0707

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,894186097
T	137,6762914
G	467,4791401
M1	-0,00063429
M2	-13,195698

soma erros 703074,9282

Taxa Deform.	5,161E-05						
P. C.	0						
Sigma 11	Epsilon 11	Deform. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
366,06553	0,0110034	0	249,05106	0,008652	0,744064	331,4656	1197,155
413,81412	0,0120071	0,0010037	309,01816	0,013753	0,745015	403,6165	103,9906
461,67641	0,0130034	0,002	360,559315	0,021713	0,745632	463,2687	2,535348
506,93592	0,0140047	0,0030013	405,421097	0,034178	0,746037	511,339	19,38675
545,84049	0,0150065	0,0040031	444,277245	0,053374	0,746301	546,8667	1,053191
570,06392	0,0160079	0,0050045	477,904209	0,082308	0,746474	568,3008	3,108576
570,7795	0,0169995	0,0059961	506,749718	0,12411	0,746586	573,4016	6,875404
543,978	0,0180102	0,0070068	532,203206	0,183668	0,74666	559,5801	243,4258
491,14249	0,0190023	0,0079989	553,833969	0,260476	0,746708	525,9583	1212,139
432,46493	0,0200055	0,0090021	572,780947	0,354539	0,746739	473,2724	1665,254
376,41363	0,0210003	0,0099969	589,052051	0,457144	0,74676	408,045	1000,543
337,3484	0,0219998	0,0109965	603,213347	0,559159	0,746773	338,279	0,866081
306,46352	0,0230058	0,0120024	615,550062	0,650612	0,746782	272,8128	1132,37
278,63376	0,0240016	0,0129982	626,123012	0,724016	0,746787	218,6811	3594,318
255,90081	0,0250016	0,0139982	635,31955	0,779404	0,746791	177,0281	6220,897
234,51004	0,0260016	0,0149982	643,282853	0,818645	0,746794	147,1548	7630,945
220,45674	0,0270081	0,0160047	650,219637	0,845451	0,746795	126,6282	8803,79
206,96329	0,0280002	0,0169968	656,141014	0,862904	0,746796	113,273	8777,862
196,50643	0,0289997	0,0179963	661,309879	0,874321	0,746797	104,6081	8445,304

50061,82

Mistura Confeccionada com Amostra PUC

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	9,20E-07
N	1,4769836

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,6000377
k0	249,05106

Endurecimento

k1	445,6528
k2	143,98325

Dilatação

B1	0,7467983
B2	0,0027346
B3	426,0707

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,894186097
T	137,6762914
G	467,4791401
M1	-0,00063429
M2	-13,195698

soma erros 703074,9282

Taxa Defor.	5,161E-05						
P. C.	100						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
540,13115	0,0110016	0	249,0510596	0,006448	0,744064	507,2429	1081,638
587,56459	0,012	0,0009984	308,7218893	0,010239	0,745011	579,7486	61,08975
632,51266	0,0130032	0,0020016	360,6374088	0,016255	0,745633	641,0401	72,71785
668,55985	0,0139995	0,0029979	405,2794159	0,02562	0,746036	690,8354	496,1997
692,84508	0,0150032	0,0040016	444,2252766	0,04027	0,746301	729,5813	1349,548
702,64568	0,0160042	0,0050026	477,8443067	0,062616	0,746474	755,7282	2817,759
688,43171	0,0170003	0,0059987	506,8193166	0,095774	0,746586	767,4542	6244,554
652,5971	0,0180036	0,0070019	532,0902477	0,143863	0,74666	762,3172	12038,51
605,88542	0,0190138	0,0080122	554,103562	0,21028	0,746708	737,6089	17351,09
555,23125	0,0200016	0,009	572,7441328	0,293224	0,746739	693,9762	19250,17
507,6149	0,0209998	0,0099982	589,0715023	0,391287	0,74676	633,321	15802,02
470,88426	0,0220067	0,011005	603,3263141	0,496014	0,746773	562,4479	8383,892
441,99782	0,0230024	0,0120008	615,5317379	0,594548	0,746782	492,0755	2507,773
416,89319	0,0240002	0,0129985	626,1261045	0,679412	0,746787	429,3627	155,4887
395,80892	0,0250019	0,0140003	635,3374936	0,746457	0,746791	378,6886	293,1065
377,18654	0,0260042	0,0150026	643,3152092	0,795629	0,746794	340,97	1311,635
364,54709	0,0270052	0,0160036	650,2125522	0,829809	0,746795	314,524	2502,307
351,14882	0,028008	0,0170063	656,1940422	0,852785	0,746796	296,693	2965,431
338,31534	0,0290023	0,0180006	661,3308317	0,86772	0,746797	285,1382	2827,803
331,31032	0,0300018	0,0190002	665,8040538	0,877414	0,746797	277,7167	2872,28
157,81862	0,0309998	0,0199982	669,6724334	0,883594	0,746798	273,0797	13285,11
153,44851	0,0320021	0,0210005	673,0361835	0,887527	0,746798	270,225	13636,74

127306,9

Mistura Confeccionada com Amostra PUC

Parâmetros do Modelo de Perzyna

Gamma	9,20E-07
N	1,4769836

Parâmetros Superfície de Fluência

alpha	0,6000377
k0	249,05106

Endurecimento

k1	445,6528
k2	143,98325

Dilatação

B1	0,7467983
B2	0,0027346
B3	426,0707

Modelo de Dano

xi0	0
U	0,894186097
T	137,6762914
G	467,4791401
M1	-0,00063429
M2	-13,195698

soma erros 703074,9282

Taxa Defor.	5,16E-05						
P. C.	200						
Sigma 11	Epsilon 11	Defor. Efet.	Endurecime.	Dano	Dilatacao	Modelo	Erro^2
725,98222	0,008	0	249,05106	0,006448	0,744064	682,2488	1912,614
776,55482	0,009003	0,0010033	308,992745	0,010262	0,745015	755,0798	461,1762
826,96304	0,010008	0,0020081	360,950235	0,016303	0,745636	816,4069	111,4318
877,09814	0,011005	0,0030049	405,570494	0,025702	0,746038	866,1514	119,8305
921,66926	0,012	0,004	444,166723	0,040241	0,746301	904,5342	293,6096
957,23074	0,013008	0,0050081	478,016991	0,062767	0,746475	930,8408	696,4305
971,11967	0,014002	0,0060016	506,89842	0,095891	0,746586	942,4711	820,7389
959,88049	0,015002	0,0070016	532,082707	0,143845	0,74666	937,3278	508,6244
930,73945	0,016	0,008	553,856868	0,209366	0,746708	913,0344	313,4685
892,03757	0,017	0,009	572,744133	0,293224	0,746739	868,9821	531,5545
846,14158	0,018002	0,0100016	589,12338	0,391638	0,74676	808,0981	1447,307
792,11343	0,019003	0,0110033	603,302886	0,49583	0,746773	737,5821	2973,663
742,61482	0,020002	0,0120016	615,54102	0,594623	0,746782	667,0261	5713,652
706,13383	0,021002	0,0130016	626,156579	0,679647	0,746788	604,1923	10392,08
675,97566	0,02201	0,0140098	635,418056	0,747	0,746791	553,2804	15054,12
649,0036	0,023002	0,0150016	643,308021	0,795589	0,746794	516,0066	17688,19
627,75496	0,024008	0,0160081	650,241745	0,829936	0,746795	489,4312	19133,45
612,14938	0,025	0,017	656,158921	0,852668	0,746796	471,7897	19700,84
598,88334	0,026003	0,0180033	661,343336	0,867752	0,746797	460,1201	19255,24
587,02992	0,027003	0,0190033	665,816907	0,877438	0,746797	452,7045	18043,31
577,73356	0,028	0,0199997	669,677697	0,883601	0,746798	448,0803	16809,98

151981,3

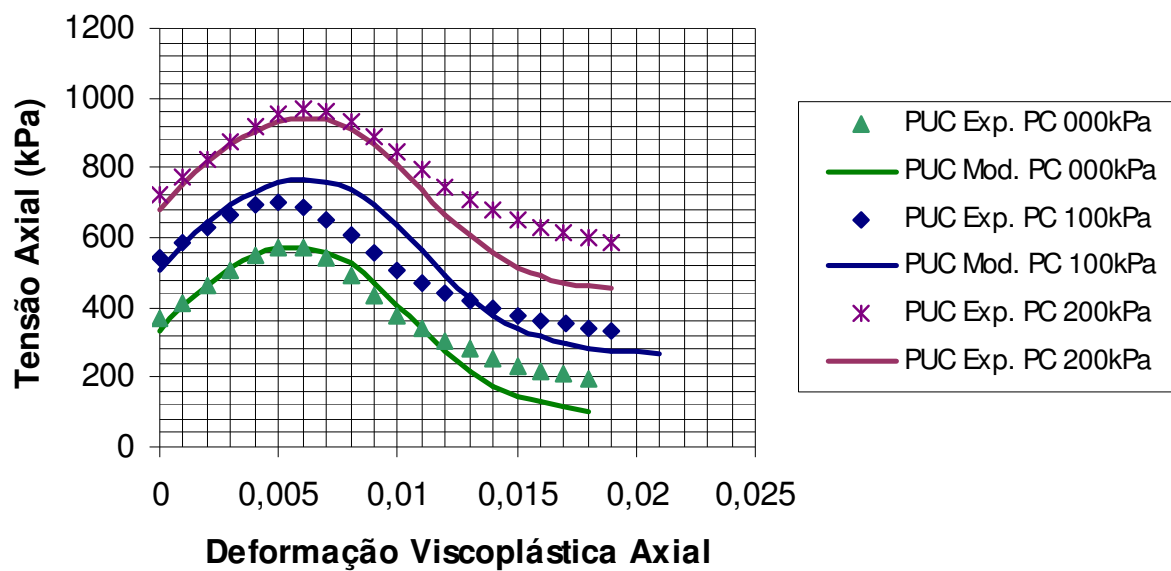


Figura B. 12: Regressão de dados para a taxa de deslocamento de 0,0032mm/s – PUC