



**COPPE/UFRJ**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FRATURA DE MISTURAS  
ASFÁLTICAS ATRAVÉS DE ENSAIO DE TRAÇÃO EM DISCO CIRCULAR COM  
FENDA**

Fábio Hirsch

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Rio de Janeiro  
Setembro de 2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FRATURA DE MISTURAS  
ASFÁLTICAS ATRAVÉS DE ENSAIO DE TRAÇÃO EM DISCO CIRCULAR COM  
FENDA

Fábio Hirsch

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.

---

Prof. Jacques de Medina, Emérito, L.D.

---

Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.

---

Eng<sup>a</sup> Sandra Oda, D.Sc.

---

Eng<sup>a</sup> Leni Figueiredo Mathias Leite, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2009

Hirsch, Fábio

Avaliação das propriedades de fratura de misturas asfálticas através de ensaio de tração em disco circular com fenda/ Fábio Hirsch. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XVI, 136 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 130-136.

1. Mecânica dos Pavimentos. 2. Fratura. 3. Misturas asfálticas. I. Motta, Laura Maria Goretti. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de viver, por todas as bênçãos e por ter sempre iluminado o meu caminho.

Desejo externar os mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho de mestrado. Assim, mesmo correndo o risco de esquecer alguém, julgo importante particularizar alguns agradecimentos.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, e ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, COPPE, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À Professora Laura Maria Goretti da Motta, orientadora deste trabalho, pelas sábias lições que me foram passadas, pelas conversas amigas e tranquilizadoras, pelas dúvidas sanadas, pela disponibilidade para me atender sempre que necessário e, principalmente pela competência na orientação desta pesquisa. Agradeço, ainda, à professora Laura pela sugestão do tema deste trabalho, pela primordial ajuda na obtenção e seleção dos materiais desta pesquisa, pelo acompanhamento dos ensaios e procedimentos, enfim, por todo o seu envolvimento nas diversas etapas desta pesquisa. Obrigado professora pelo encorajamento nos momentos mais difíceis. Sinto-me um privilegiado por ter tido a oportunidade de conviver e aprender com a senhora, para mim é um grande orgulho ter sido seu aluno. O profissionalismo e a paixão pelo trabalho e pela pesquisa são suas marcas registradas e, servem de exemplo e motivação para novos engenheiros que enveredam por essa área. Muito obrigado!

Na pessoa da minha orientadora agradeço a todos os demais mestres desta Instituição, aos quais sempre serei grato pelo conhecimento adquirido. Faço, também, um agradecimento especial ao professor Dr. Romildo Dias Toledo pela atenção e pelo apoio durante a fase de realização dos ensaios, tendo aberto as portas do Laboratório de Estruturas da COPPE.

À Professora D.Sc. Leni Figueiredo Mathias Leite pelo relevante apoio prestado ao laboratório, bem como importante apoio prestado na realização deste trabalho, que de maneira sempre competente cooperou diversas vezes com idéias, quero agradecer pelo tema extremamente novo proposto deste trabalho.

À Engenheira e pesquisadora Sandra Oda do Laboratório de Misturas Asfálticas da COPPE pela amizade e simpatia, características essenciais de sua personalidade. Agradeço por toda a sua ajuda e dedicação desprendida neste trabalho. Agradeço profundamente por todo o companheirismo dedicado nas horas de pesquisa, nas tarefas de laboratório, bem como auxílio em toda a parte de revisão deste trabalho, onde não mediu esforços para o desenvolvimento por completo deste trabalho.

Ao Engenheiro Álvaro do laboratório de ensaios dinâmicos da COPPE pela ajuda no estudo de projeto e desenvolvimento dos equipamentos utilizados nesta dissertação. Agradeço a esse querido amigo, todo o seu empenho no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho, tendo auxiliado no desenvolvimento de gabaritos, moldes e garra para a realização dos ensaios. Quero enfatizar, sem o seu apoio este trabalho não teria seguido adiante, obrigado!

A todos os colegas de laboratório, em especial ao Marcos Bororó por todo o apoio na preparação das amostras, sempre disponível para realizar os cortes nos corpos-de-prova, aos Técnicos Washington, Rodrigo e Roberto por toda ajuda na parte experimental de moldagens e preparação das amostras.

Ao Engenheiro M.Sc. Marcos Fritzen do Laboratório de Pavimentação da COPPE e ao Engenheiro M.Sc. Luis Alberto H. Nascimento do CENPES/Petrobras por terem repassado além de seus conhecimentos de laboratório, também experiências de campo, com a execução da restauração das ruas da Cidade Universitária/Projeto Fundação.

Também, agradeço a todos aqueles que contribuíram para minha formação acadêmica, em especial ao professor Dr. Luciano Pivoto Specht, pela amizade, companheirismo e ensinamento nos primeiros passos de pesquisa.

Aos colegas de trabalho da Concessionária Concepa, especialmente aos Engenheiros M.Sc. Thiago Vitorello e Daniel Victorino, pelo apoio na fase de finalização deste trabalho, bem como apoio no início da carreira profissional. Além de agradecer aos Técnicos Cristiano e Jorge pelos ensinamentos durante esta caminhada.

Ao CNPq, pela oportunidade e financiamento desta pesquisa.

Ao CENPES/Petrobras pelo incentivo no desenvolvimento deste trabalho, tendo disponibilizado amostras para a realização dos primeiros testes, bem como tendo incentivado e financiado esta pesquisa.

Ao incentivo recebido pelos amigos João e Ederli, os quais por dois anos foram minha família no Rio, dividindo assim, apartamento, conquistas e discussões.

Aos meus colegas de mestrado, em especial aos amigos Mauricio, Graziella, Simão, Rafael, Mario e Harley.

À banca avaliadora, que tive o prazer de conhecer durante a pesquisa e que, sempre estiveram prontamente disponíveis para sanar as dúvidas surgidas.

Agradeço à minha família. Aos meus pais, Valmir e Inês, pelo amor e educação, por compartilharem comigo momentos de alegria e me darem força nos momentos de dificuldade e serem meu exemplo de vida, tendo sempre demonstrado os maiores valores de uma pessoa: humildade e honestidade. À minha irmã, Andressa, pelo carinho, amor e emoção sempre demonstrada com sorriso estampado em seu rosto.

Por fim, agradeço imensamente à minha namorada Carine, amor da minha vida, pessoa com quem dividirei o resto dos meus dias, companheira inseparável, minha melhor amiga, sempre me auxiliando e motivando nas horas difíceis. Agradeço por ter superado junto comigo, esta fase difícil, onde por dois anos nos mantivemos mais distantes fisicamente, todavia sempre esteve presente comigo, em todas as horas. Meu amor, obrigado por tudo!

Resumo da Dissertação apresentada a COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FRATURA DE MISTURAS  
ASFÁLTICAS ATRAVÉS DE ENSAIO DE TRAÇÃO EM DISCO CIRCULAR COM  
FENDA

Fábio Hirsch

Setembro/2009

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Programa: Engenharia Civil

O objetivo principal desta dissertação foi a implantação nos laboratórios do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, do ensaio de tração de disco circular com fenda (“*disk-shaped compact tension fracture test*”), para estudo das propriedades de fratura de misturas asfálticas. Adotada a norma ASTM D 7313/07. Misturas asfálticas de duas granulometrias – 19,1 mm e 12,7 mm, de diâmetro máximo – e quatro ligantes asfálticos (Flex 65/90, Asfalto-Borracha, PG 70-16 e PG 64-16). As dosagens foram feitas segundo a metodologia SUPERPAVE com uso de compactador giratório. Os ensaios foram realizados a duas temperaturas: 10°C e 25°C. Verificou-se que a granulometria, o tipo de ligante e a temperatura apresentam influência relevante na energia de fratura. Comparando-se duas misturas de ligantes convencionais tem-se que a 25°C a energia de fratura é maior para a de diâmetro máximo de agregado de 19,1 mm; e a 10°C a energia de fratura é maior para a de 12,7 mm. As duas misturas de ligantes modificados (Flex 65/90 e Asfalto-Borracha) apresentam valores a 25°C muito inferiores aos obtidos a 10°C, sendo que a 25°C a mistura com Flex 65/90 apresentou valores duas vezes maiores do que o Asfalto-Borracha; entretanto, a 10°C pouca diferença foi percebida entre as duas misturas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DETERMINE THE FRACTURE PROPERTIES OF ASPHALT MIXTURES  
THROUGH TENSILE TEST IN CIRCULAR DISK WITH CRACK

Fábio Hirsch

September/2009

Advisor: Laura Maria Goretti da Motta

Department: Civil Engineering

The main purpose of this dissertation was the implementation in the Laboratories of Civil Engineering, Graduate School – COPPE/UFRJ – of the tensile test of circular disk with crack (“disk-shaped compact tension fracture test”) to study the fracture properties of asphaltic mixtures. Adopted ASTM D 4313/07 specification. Aggregates of two different maximum size – 19,1 mm and 12,7 mm, four asphalt binders (Flex 65/90, Asphalt-Rubber, PG 70-16 and PG 64-16). Mix design according to SUPERPAVE methodology using gyratory compacting machine. Results show that the grain size (max. diam.), the binder type and temperature have outstanding influence on fracture energy. When comparing the two mixtures of conventional binders, it is observed that fracture energy at 25°C is greater for the 19,1 mm – diameter mix; but for 10°C the 12,7 mm – diameter mix shows greater fracture energy. As for the two modified binder mixtures (Flex 65/90 and Asphalt-Rubber) both present fracture energy values at 25°C much smaller than those at 10°C; in particular, the Flex 65/90 had values twice as greater than the Asphalt-Rubber mix; yet at 10°C little difference existed.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Os três modos básicos de fratura (WAGONER, 2006).....	8
Figura 2.2:	Gráfico das energias associadas com o aumento do comprimento da trinca central numa placa (GRIFFITH, 1920 apud EFFTING, 2004).....	12
Figura 2.3:	Modelo de uma placa com uma trinca central (EFFTING, 2004).....	13
Figura 2.4:	Gráfico do comprimento da trinca em relação à taxa de liberação de energia elástica (Effting, 2004).....	15
Figura 2.5:	Representação da distribuição das tensões na ponta da trinca (Effting, 2004)..	16
Figura 2.6:	Variação do parâmetro KIC com o mecanismo de fratura (Effting, 2004).....	17
Figura 2.7:	Representação da distribuição das deformações na ponta da trinca (Effting, 2004).....	18
Figura 2.8:	Curva-R esquemática (GRIFFITH, 1920).....	19
Figura 2.9:	Gráfico do comprimento da trinca em relação à taxa de liberação de energia elástica (GRIFFITH, 1920 apud EFFTING, 2004).....	19
Figura 2.10:	Representação de um caminho de integração (RICE, 1968 apud Effting, 2004).....	20
Figura 2.11:	Modelo desenvolvido por Rodrigues (1991) para previsão da evolução do trincamento em corpo-de-prova cilíndrico com pré-trinca.....	27
Figura 2.12:	Modos de arranjo dos ensaios de fadiga em vigotas de concreto asfáltico visando reproduzir o modo de propagação de trincas cisalhante (II) e de flexão (I) – Vilchez (2002).....	29
Figura 2.13:	Exemplo de extração de corpos-de-prova cilíndricos em campo (Marasteanu et al., 2007).....	32
Figura 2.14:	Falha na região dos furos de carregamento evidenciadas nos primeiros ensaios.....	33
Figura 2.15:	Relação $a/w$ a ser satisfeita.....	34
Figura 2.16:	Dimensões dos corpos-de-prova Disk –Shaped Compact (DC(T)) (mm) e configuração da carga (Marasteanu et al., 2007).....	34
Figura 2.17:	Detalhe do entalhe (único) no ponto médio da viga SE (B).....	36
Figura 2.18:	Exemplo de corpo-de-prova em forma de viga (Marasteanu et al., 2007).....	37
Figura 2.19:	Geometria típica de uma viga SE(B) (Marasteanu et al., 2007).....	38
Figura 2.20:	Esquema do ensaio em corpo-de-prova semicircular (SCB)	42

(Marasteanu et al., 2007).....	
Figura 2.21: Esquema da configuração do ensaio SCB (Marasteanu et al., 2007)	45
Figura 2.22: Várias geometrias de amostras desenvolvidas e testadas (100, 150, 300 e 450 mm de diâmetro) (WAGONER, 2006).....	46
Figura 2.23: Outras configurações de amostras testadas (WAGONER, 2006).....	47
Figura 2.24: Dimensões e configuração do corpo-de-prova em forma de disco circular para ensaio de fratura de concreto asfáltico (ASTM D 7313/07).....	48
Figura 2.25: Configuração de carregamento desenvolvida por Wagoner et al (2004).....	50
Figura 2.26: Configuração de carregamento desenvolvida nesta pesquisa.....	51
Figura 3.1: Curva granulométrica da mistura de 19,1 mm deste estudo.....	55
Figura 3.2: Curva granulométrica da mistura de 12,7 mm deste estudo.....	56
Figura 3.3: Determinação do teor de ligante de projeto Flex 65/90.....	57
Figura 3.4: Determinação do teor de ligante de projeto da mistura com Asfalto-Borracha.....	58
Figura 3.5: Determinação do teor de ligante de projeto PG 70-16.....	59
Figura 3.6: Determinação do teor de ligante de projeto PG 64-16.....	60
Figura 3.7: Preparação de corpos-de-prova em laboratório.....	63
Figura 3.8: Compactador giratório utilizado na moldagem dos corpos-de-prova no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ.....	63
Figura 3.9: Amostras em forma de disco preparadas para a realização do ensaio no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ desta pesquisa.....	65
Figura 4.1: Execução do faceamento nos corpos-de-prova.....	68
Figura 4.2: Etapas de preparação dos furos de carregamento nos corpos-de-prova no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ – procedimentos, equipamentos e processos desenvolvidos nesta pesquisa.....	70
Figura 4.3: Preparação do gabarito para execução dos furos nos corpos-de-prova, na oficina mecânica do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.....	72
Figura 4.4: Preparação do corpo-de-prova para execução da trinca inicial no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, procedimentos desenvolvidos nesta pesquisa	73
Figura 4.5: Execução do faceamento do corpo-de-prova no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.....	74
Figura 4.6: Detalhes das placas fixadas na amostra para acoplamento do <i>clip-on-gage</i> .....	74
Figura 4.7: Acoplamento do <i>clip-on-gage</i> no corpo-de-prova.....	75

Figura 4.8:	Configuração de carregamento desenvolvida nesta pesquisa – corpo-de-prova, garras, <i>clip-on-gage</i> .....	75
Figura 4.9:	Equipamento utilizado na realização dos ensaios de fratura no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ.....	76
Figura 4.10:	<i>Clip-on-gage</i> utilizado para a realização dos ensaios de fratura no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ.....	77
Figura 4.11:	Projeto (vistas) da garra de acoplamento à prensa de ensaio.....	78
Figura 4.12:	Projeto (cortes) da garra de acoplamento à prensa de ensaio de fratura.....	79
Figura 4.13:	Projeto (perspectivas) da garra de acoplamento à prensa de ensaio e descrição de cada peça.....	80
Figura 4.14:	Garras fabricadas para fixação do corpo-de-prova na prensa de ensaio.....	81
Figura 4.15:	Câmara de condicionamento das amostras para a realização do ensaio a 10°C	82
Figura 4.16:	Corpo-de-prova com Termopar para controle da temperatura dentro da sala de condicionamento.....	83
Figura 4.17:	Caixa térmica utilizada para o condicionamento das amostras da câmara até a prensa de realização dos ensaios.....	84
Figura 4.18:	Exemplo de corpo-de-prova pintado antes e após a realização do ensaio.....	85
Figura 4.19:	Exemplo de gráfico para o cálculo da área abaixo da curva.....	86
Figura 4.20:	Nomenclatura e dimensões da configuração (Fonte: Wagoner, 2005).....	87
Figura 5.1:	Fotos do início e propagação da trinca: Flex 65-90, 19,1 mm.....	91
Figura 5.2:	Fotos do início e propagação da trinca: Flex 65-90, 19,1 mm.....	92
Figura 5.3:	Fotos do início e propagação da trinca: PG 70-16, 19,1 mm.....	93
Figura 5.4:	Fotos do início e propagação da trinca: PG 70-16, 19,1 mm.....	94
Figura 5.5:	Fotos do início e propagação da trinca: PG 70-16, 12,7 mm.....	95
Figura 5.6:	Fotos do início e propagação da trinca: PG 70-16, 12,7 mm.....	96
Figura 5.7:	Fotos do início e propagação da trinca: PG 64-16, 19,1 mm.....	97
Figura 5.8:	Fotos do início e propagação da trinca: PG 64-16, 19,1 mm.....	98
Figura 5.9:	Fotos do início e propagação da trinca: PG 64-16, 12,7 mm.....	99
Figura 5.10:	Fotos do início e propagação da trinca: PG 64-16, 12,7 mm.....	100
Figura 5.11:	Tela principal do software Trapezium X.....	101
Figura 5.12:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 44/07: Flex 65/90 – 19,1 mm.....	102
Figura 5.13:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a	103

	25°C do Lote 45/07: PG 70-16 – 19,1 mm.....	
Figura 5.14:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 241/07: PG 70-16 – 12,7 mm.....	103
Figura 5.15:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 259/07: PG 64-16 – 19,1 mm.....	104
Figura 5.16:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 247/07: PG 64-16 – 12,7 mm.....	104
Figura 5.17:	Resultados da energia de fratura para as misturas ensaiadas neste estudo a 25°C.....	106
Figura 5.18:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 44/08: Flex 65/90 – 19,1 mm.....	108
Figura 5.19:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 296/08: Asfalto-Borracha – 19,1 mm.....	108
Figura 5.20:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 45/08: PG 70-16 – 19,1 mm. ....	109
Figura 5.21:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 241/08: PG 70-16 – 12,7 mm.....	109
Figura 5.22:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 259/08: PG 64-16 – 19,1 mm.....	110
Figura 5.23:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 247/08: PG 64-16 – 12,7 mm.....	110
Figura 5.24:	Resultados da energia de fratura para as misturas de laboratório ensaiadas a 25°C.....	112
Figura 5.25:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 10°C do Lote 44/08: Flex 65/90 – 19,1 mm.....	113
Figura 5.26:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 10°C do Lote 296/08: Asfalto-Borracha – 19,1 mm.....	114
Figura 5.27:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 10°C do Lote 45/08: PG 70-16 – 19,1 mm.....	114
Figura 5.28:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 10°C do Lote 241/08: PG 70-16 – 12,7 mm.....	115
Figura 5.29:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a	115

	10°C do Lote 259/08: PG 64-16 – 19,1 mm.....	
Figura 5.30:	Curva Força <i>versus</i> Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 10°C do Lote 247/08: PG 64-16 – 12,7 mm.....	116
Figura 5.31:	Resultados da energia de fratura para as misturas de laboratório ensaiadas a 10°C.....	117
Figura 5.32:	Resultados de fratura para as misturas de laboratório ensaiadas a 25° C e a 10°C.....	119
Figura 5.33:	Resultados da média da Força de Pico (kN) para as misturas de laboratório ensaiadas a 25° C e a 10°C.....	121
Figura 5.34:	Exemplos de corpos-de-prova nos quais houve desvio da trinca durante o ensaio de fratura.....	123
Figura 5.35:	Resultados de resistência a tração para as misturas estudadas.....	125
Figura 5.36:	Correlação entre a Resistência a tração e a Energia de Fratura para as misturas estudadas.....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparação entre diferentes geometrias de corpos-de-prova para ensaio de fratura .....	32
Tabela 3.1: Características dos ligantes asfálticos utilizados neste estudo .....	53
Tabela 3.2: Granulometria dos materiais pétreos utilizados no presente estudo.....	54
Tabela 3.3: Granulometria de trabalho da mistura de 19,1 mm deste estudo. ....	55
Tabela 3.4: Granulometria de trabalho da mistura de 12,7 mm deste estudo. ....	55
Tabela 3.5: Resumo das dosagens Superpave - Agregados Sepetiba (Fonte: CENPES). .....	61
Tabela 3.6: Resumo das características dos primeiros corpos-de-prova moldados no CENPES e utilizados neste estudo. ....	62
Tabela 3.7: Resumo das características médias dos corpos-de-prova moldados no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ. ....	64
Tabela 3.8: Resumo das características dos corpos-de-prova em forma de disco moldados no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ.....	66
Tabela 4.1: Dimensões recomendadas para a configuração de corpo-de-prova na forma de disco circular com fenda. ....	87
Tabela 5.1: Resultados dos ensaios de fratura de misturas asfálticas deste estudo, realizados a 25°C. ....	105
Tabela 5.2: Resultados dos ensaios de fratura em misturas asfálticas moldados em laboratório e realizados a temperatura de 25°C. ....	112
Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de fratura em misturas asfálticas moldados em laboratório e realizados a temperatura de 10°C. ....	117
Tabela 5.4: Resultados da força de pico dos ensaios de tração realizados a temperatura de 25°C nas misturas moldadas em laboratório.....	120
Tabela 5.5: Resultados da força de pico dos ensaios de tração realizados a temperatura de 10°C nas misturas moldadas em laboratório.....	120
Tabela 5.6: Resultados da Resistência a tração das misturas produzidas em laboratório. .....	124
Tabela 5.7: Resultados da Resistência a tração e Energia de fratura das misturas produzidas em laboratório. ....	126

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 MECÂNICA DA FRATURA .....</b>	<b>7</b>
2.1.1 Modos de Ruptura .....	8
<b>2.2. MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA .....</b>	<b>9</b>
2.2.1. Conceitos dos fatores KI e KIC .....	10
2.2.2. Enfoque da Energia G .....	12
2.2.3. Efeito da Plasticidade .....	15
<b>2.3. MECÂNICA DA FRATURA ELÁSTICA NÃO-LINEAR OU ELASTO- PLÁSTICA .....</b>	<b>17</b>
2.3.1. Metodologia da Curva-R .....	18
2.3.2. Enfoque da Integral J .....	20
<b>2.4. MECÂNICA DA FRATURA APLICADA A MISTURAS ASFÁLTICAS.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5. DISCUSSÃO SOBRE A GEOMETRIA DOS CORPOS-DE-PROVA PARA MISTURAS ASFÁLTICAS.....</b>	<b>30</b>
2.5.1 Noções Gerais e Evolutivas da Geometria .....	30
2.5.2. Geometria Viga com um único entalhe - Single Edge Notched Beam SE(B) .....	36
2.5.3. Geometria Cilíndrica .....	41
2.5.3.1. Geometria Semicircular ( <i>Semi Circular Bending - SCB</i> ).....	41
2.5.3.2. Geometria Disco Circular com Fenda - <i>Disk-Shaped Compact (DC(T))</i> .....	46
<b>3 MATERIAIS UTILIZADOS.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1 MATERIAIS .....</b>	<b>52</b>
3.1.1 Ligantes asfálticos .....	53
3.1.2 Agregados.....	54
3.1.3 Misturas asfálticas .....	56
<b>4 MÉTODO DE ENSAIO DE TRAÇÃO .....</b>	<b>67</b>

<b>4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO EM DISCO CIRCULAR COM FENDA (<i>DISK-SHAPED COMPACT</i>) .....</b>	<b>67</b>
4.1.1 Preparação dos Corpos-de-Prova.....	67
4.1.2 Equipamento e Execução do Ensaio de Fratura .....	76
4.1.3 Interpretação da Energia de Fratura.....	85
<b>4.2 ROTEIRO BÁSICO PARA A REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO EM DISCO CIRCULAR COM FENDA (<i>DISK-SHAPED COMPACT</i>).....</b>	<b>88</b>
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>90</b>
<b>5.1 RESULTADOS DOS PRIMEIROS TESTES.....</b>	<b>90</b>
5.1.1 Resultados dos primeiros testes realizados a temperatura de 25°C .....	90
<b>5.2 RESULTADOS DAS AMOSTRAS PRODUZIDAS NO LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA COPPE/UFRJ .....</b>	<b>107</b>
5.2.1 Resultados dos ensaios realizados a temperatura de 25°C .....	107
5.2.2 Resultados dos ensaios realizados a temperatura de 10°C .....	113
5.2.3 Comparativo dos ensaios realizados a temperatura de 25°C e 10°C com as amostras preparadas em laboratório nesta pesquisa .....	118
<b>5.3 CORRELAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS ENSAIADAS A 25°C E RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO .....</b>	<b>124</b>
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>128</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>130</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Materiais asfálticos têm sido empregados na construção da camada de revestimento de pavimentos nos Estados Unidos desde 1876 (ROBERTS *et al.*, 1998), sendo que a primeira aplicação foi feita em Washington, na Avenida Pennsylvania que passa em frente à Casa Branca (PREGO, 2001). No Brasil, a produção de asfalto teve início em 1944, na Refinaria Ipiranga, com petróleo importado da Venezuela. Antes disso, o asfalto utilizado na construção de pavimentos era importado de Trinidad (SENÇO, 1997). A primeira rodovia construída com asfalto no Brasil data de 1938. O Brasil possui atualmente uma rede de estradas com 211.678 km pavimentados, para os seus 8,5 milhões de km<sup>2</sup> sendo a maior parte com revestimentos asfálticos.

Os revestimentos de concreto asfáltico possuem mecanismos de degradação bastante complexos, tais como fadiga, deformação permanente, envelhecimento, etc. Tais fenômenos são condicionados pelas seguintes variáveis: tráfego, ambiente em que está inserido o pavimento, processos construtivos, planos de manutenção e materiais envolvidos.

Observa-se neste país, de modo geral, que os trincamentos das camadas asfálticas sob a ação dinâmica das rodas dos veículos é a causa principal da queda do desempenho ou nível de serventia dos pavimentos. Não se pode, no entanto, desconsiderar outros defeitos como o afundamento de trilha de roda, mesmo que adstrito ao revestimento asfáltico. Vale lembrar que o afundamento de trilha de roda é bastante visível em vias urbanas, nos pontos de paradas de ônibus, onde as cargas estáticas horizontais são muito elevadas.

A vida útil de um pavimento e sua posterior reabilitação por meio de tratamentos para recuperação funcional e estrutural depende de recursos financeiros expressivos e estes são afetados significativamente pelo nível de deterioração que se encontram. Muitas das decisões são tomadas em função do tipo, extensão, intensidade e pela porcentagem de área trincada na camada de revestimento (PINTO, 1991 e RODRIGUES, 1991).

Nos últimos anos, a comunidade de pesquisa em materiais para pavimentação focalizou muita atenção nas misturas asfálticas havendo o desenvolvimento de novos ensaios e métodos de análise. Estes podem ser usados para estudar os mecanismos de iniciação e propagação de trincas, ou seja, para ensejar conhecimento nos mecanismos de desenvolvimento do trincamento em pavimentos asfálticos de forma a poder minimizá-los nos próximos projetos.

Podem ser detectados vários tipos de trincas em camadas superficiais de pavimentos, que podem ser decorrentes de diferentes causas, relacionadas com as propriedades dos materiais; devido à falta de flexibilidade ou elasticidade no componente asfáltico do revestimento, que não consegue suportar (“responder”) as solicitações do tráfego pesado sem trincar, aos efeitos climáticos e à aplicação de cargas repetidas na estrutura do pavimento três principais tipos surgem: trincas por fadiga, trincas térmicas devido às baixas temperaturas, e trincas por reflexão devido a propagação de trincas existentes através do recapeamento (HUANG, 1993).

O trincamento é caracterizado por duas fases distintas. O início do trincamento é um evento que ocorre em certo instante no tempo, podendo ser definido pelo aparecimento das primeiras trincas na superfície, para efeito da mensuração em campo. Na fase seguinte, de progressão, o trincamento se estende sobre a superfície e as trincas individuais se alargam e se unem (RODRIGUES, 1991), permitindo a infiltração de água. Sob cargas do tráfego, a água e os finos são bombeados para fora, resultando em deterioração progressiva da camada asfáltica. Além disso, a água que infiltra nas trincas e nas fissuras enfraquece as camadas inferiores (base e sub-base), acarretando outros tipos de degradação da estrutura do pavimento.

As especificações recentes nos EUA de concreto asfáltico (*Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA)*, AASHTO R35, 2004) e de projeto de pavimentos (NCHRP, 2004) consideram os tipos de trincas do ponto de vista mecanístico-empírico e empregam conceitos da mecânica dos pavimentos para determinar as propriedades de engenharia (tensão/deformação). O mesmo ocorre no método de dimensionamento proposto no Brasil por Franco (2007).

A dosagem tradicional do concreto asfáltico é de natureza empírica, de modo que os vários fatores influentes não se explicitam num arcabouço lógico. No nosso meio, os estudos de fadiga de misturas asfálticas - Preussler (1983) e Pinto (1991) – afirmam perspectivas de racionalização desta questão. Os modelos matemáticos de estruturas de pavimentos pelo método dos elementos finitos, constituíram a ferramenta de análise adotada.

A desvantagem da concepção tradicional de dosagem do concreto asfáltico é que a maioria dos ensaios determina apenas propriedades volumétricas, não permitindo prever a evolução das trincas ao longo do tempo, e não leva em consideração: efeitos das cargas do tráfego, envelhecimento da camada asfáltica e a estrutura do pavimento em relação ao comportamento térmico.

Os ensaios de previsão de fadiga de misturas asfálticas foram introduzidos no Brasil em 1980, tendo sido escolhido o método de compressão diametral para executá-los por tensão controlada pela facilidade de execução dos corpos-de-prova e do ensaio (PREUSSLER, 1983) e tiveram um grande incremento com os estudos de Pinto (1991). Franco (2007) revalidou a expressão proposta por Pinto (1991) para previsão de vida de fadiga de misturas asfálticas convencionais. Hoje vários laboratórios de universidades brasileiras realizam este tipo de ensaio; resta ainda aperfeiçoar o fator de ajuste campo – laboratório aplicável a este tipo de ensaio.

Cada vez mais se verifica que o início e a propagação de trincas em materiais asfálticos podem ser modelados, de forma mais próxima da real, utilizando ferramentas computacionais e conceitos da mecânica da fratura. A modelagem computacional através do método de elementos finitos analisa a iniciação e propagação da fratura (trinca) incorporando ao estudo um modelo de zona coesiva. Vários estudos deste tipo são referenciados em pesquisas internacionais, como, por exemplo, em Paulino *et al* (2004) e Song *et al* (2004). No Brasil podem ser citados os estudos de Rodrigues (1991), Braz (1997) e Soares *et al* (2006).

Segundo Bazant e Planas (1998) são de opinião de que o ensaio laboratorial com vistas a mecânica da fratura deve realizar-se num corpo-de-prova com trinca prévia artificialmente esculpida.

Vários tipos de ensaios existem para a avaliação das propriedades de fratura de concretos asfálticos. É o caso de vigotas sujeitas a flexão. Citam-se Marasteanu *et al* (2002), Mobasher *et al* (1997) e Hossain *et al* (1999). A configuração da viga é simples e versátil da investigação das fraturas.

A variação das espessuras das camadas de um revestimento do tipo concreto asfáltico pode ser de 30 a 100 mm de espessura por camada, sendo que um pavimento pode ter mais de um tipo de camada asfáltica dependendo do volume de tráfego da rodovia, o que cria um desafio para determinadas geometrias de corpos-de-prova. Ademais, a extração de vigotas de pavimentos asfálticos existentes (*in loco*) não é prática, podendo causar danos excessivos ou até mesmo ruptura do pavimento, pelo fato da espessura da camada ser insuficiente. Além disso, a sua obtenção a partir de amostras extraídas de campo não apresenta semelhança com a configuração das amostras produzidas em laboratório através dos métodos usuais de compactação empregados pela Metodologia Marshall ou SUPERPAVE.

Um ensaio prático de fratura para concretos asfálticos deve ser capaz de testar tanto corpos-de-prova extraídos de campo quanto os moldados em laboratório. Embora a geometria em forma de vigota de diversas dimensões seja amplamente utilizada em materiais metálicos e de concreto de cimento Portland, a sua aplicação em misturas asfálticas é ainda restrita, devido aos métodos de preparação dos corpos-de-prova. Além disso, a comparação das propriedades das misturas a partir de diferentes configurações de corpos-de-prova se torna difícil, ou seja, a partir de amostras de laboratório (cilíndricas) e vigotas extraídas de campo.

Na prática das dosagens de concreto asfáltico, a forma cilíndrica é a mais utilizada pela facilidade de obtenção de corpos-de-prova mais homogêneos e de fácil manipulação para ensaios físicos de volumetria e mecânicos.

Pesquisas recentes foram realizadas com o objetivo de se definir uma geometria de corpo-de-prova que fosse facilmente extraída de campo e, também moldada em laboratório. Foram obtidas duas possíveis geometrias em forma a partir da forma cilíndrica, uma na semicircular e outra discoidal. No entanto, a geometria semicircular apresentou área muito pequena para a propagação da trinca restringindo o processo de

fratura. A geometria no formato de disco com chanfro e pré-trinca, denominada nos Estados Unidos de *Disk-Shaped*, foi considerada a mais adequada para ensaios de fratura por tração direta em misturas asfálticas.

Esta pesquisa faz parte de um projeto CTPETRO de estudo de Adesão – Coesão de misturas asfálticas que tem, também, utilizado pesquisas da Engenharia Química e na Metalurgia da COPPE para entender melhor o comportamento entre os agregados e o filme de ligante asfáltico em torno destes.

Neste contexto o objetivo geral deste trabalho é o seguinte: avaliar as características de fratura de misturas asfálticas por meio de um novo ensaio de tração direta, que será nesta dissertação apresentado e implantado no país. Esta nova forma de ensaio em misturas asfálticas para a avaliação das propriedades de fratura, faz-se com o uso do corpo-de-prova em forma de disco compacto - *Disk-Shaped Compact* – baseada na norma ASTM D7313 de 2007 (*Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt – Aggregate Mixtures Using the Disk-shaped Compact Tension Geometry*).

A pesquisa se concentrou na preparação dos corpos-de-prova, o que exigiu a busca de procedimentos adequados para as furações necessárias, a retirada de uma seção do disco e a abertura da pré-trinca. Estes passos não estão suficientemente detalhados na norma americana. Foi necessário proceder à adaptação de uma prensa universal do Laboratório de Estruturas da COPPE para a realização dos ensaios.

A realização dos ensaios com vários tipos de misturas asfálticas permitiu propor um procedimento de aquisição de dados e de análise que mostra a viabilidade desse novo método de análise de desempenho de misturas asfálticas ao trincamento por tração direta.

Esta dissertação se divide em seis capítulos, incluindo este de introdução, a saber:

- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica e descrição das pesquisas que resultaram na nova proposição de ensaio de fratura em misturas asfálticas;

- Capítulo 3 – Materiais empregados para compor as misturas asfálticas utilizadas nos primeiros testes com o novo método de ensaio;
- Capítulo 4 – Método de ensaio – descreve-se a técnica desenvolvida de preparação do corpo-de-prova, os procedimentos de ensaio propriamente dito e a aquisição dos dados;
- Capítulo 5 – Análise dos resultados – faz-se uma breve análise dos resultados dos primeiros ensaios realizados segundo este novo padrão de fratura. Ressaltam-se as diferenças de comportamento dos materiais empregados. Naturalmente a principal contribuição desta pesquisa é a própria implantação do ensaio. As análises dos resultados obtidos poderão, certamente, ser aperfeiçoadas comparando-se estes dados com os ensaios tradicionais de fadiga das mesmas misturas, o que não chegou a ser feito;
- Capítulo 6 – Conclusões e sugestões de pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MECÂNICA DA FRATURA

A teoria da mecânica da fratura foi desenvolvida no início do século XX, para estudar falhas em materiais frágeis (quebradiços), mas avanços na mecânica computacional levaram a teorias de falhas que consideram materiais tais como metais dúcteis, cerâmicos, concreto de cimento e também concreto asfáltico (RODRIGUES, 1991).

Segundo Effting (2004), a Mecânica da Fratura estuda a resistência dos materiais sólidos que contenham falhas ou trincas pré-existentes, sob a ação de cargas aplicadas externamente. Uma trinca pode ser entendida como um entalhe cujo raio de curvatura é próximo a zero. O estudo das tensões, no que se refere às trincas, é de grande importância na determinação da carga estática máxima e da vida de fadiga dos componentes. A presença de trincas pode debilitar significativamente a estrutura e reduzir sua vida útil. Assume-se que as tensões na ponta da trinca são infinitas e caracterizadas por um fator de intensidade de tensão  $K_I$  (para o modo I de fratura). Quando o fator  $K_I$  alcança um valor crítico (conhecido como  $K_{IC}$ ), ocorre uma falha catastrófica (fratura rápida) nos materiais frágeis. Este valor de  $K_{IC}$  é chamado de “tenacidade à fratura” do material e é uma propriedade ou característica do material, independente da geometria ou das cargas aplicadas, mas que depende da temperatura (EFFTING, 2004).

O fator de intensidade de tensão  $K$  tem sido usado para descrever os parâmetros de falha em metais (BAZANT e PLANAS, 1998; ASTM E399, 2002), concreto de cimento Portland (RILEM, 1991) e também em concreto asfáltico (MAJIDZADEH *et al.*, 1971; RAMSAMOOJ, 1991; RODRIGUES, 1991; BRAZ, 1997; KIM e EL HUSSEIN, 1997; MARASTEANU *et al.*, 2002).

Na década de 1920, Griffith foi o primeiro a descrever a fratura frágil, utilizando as considerações do balanço de energia numa placa com trinca central. Irwin, em 1957, definiu o fator de intensidade de tensão para caracterizar trincas que utilizam uma

análise de Westergaard (1939) para derivar expressões para as tensões e deslocamentos ao redor da ponta da trinca. Técnicas analíticas foram desenvolvidas para uma variedade de configurações de trinca comuns (RICE, 1968). Estas soluções analíticas normalmente são limitadas a geometrias e condições de carregamento relativamente simples, e necessitam de um bom conhecimento em matemática avançada. No entanto, procedimentos experimentais são essenciais na determinação do valor crítico de  $K_{Ic}$ , mas é muito caro e demorado para se determinar  $K_{Ic}$  para uma dada faixa de tamanhos de trincas e profundidades (EFFTING, 2004).

O estudo da Mecânica da Fratura subdivide-se em Linear Elástico (MFLE) e o Elasto-plástico ou Não-Linear (MFNL), sendo que este último é de alta complexidade matemática, fora de nossos propósitos.

### 2.1.1 Modos de Ruptura

A Figura 2.1 apresenta os três tipos de fratura ou modos de ruptura em que os materiais sólidos podem estar sujeitos: abertura, cisalhamento e rasgamento. Dado um sólido infinito de comportamento puramente elástico e que neste sólido haja a inserção de uma trinca de tamanho arbitrário, pode-se encontrar os estados de tensões na ponta da trinca para cada um dos três tipos de carregamento (RODRIGUES, 1991; MEDINA e MOTTA, 2005; WAGONER, 2006).

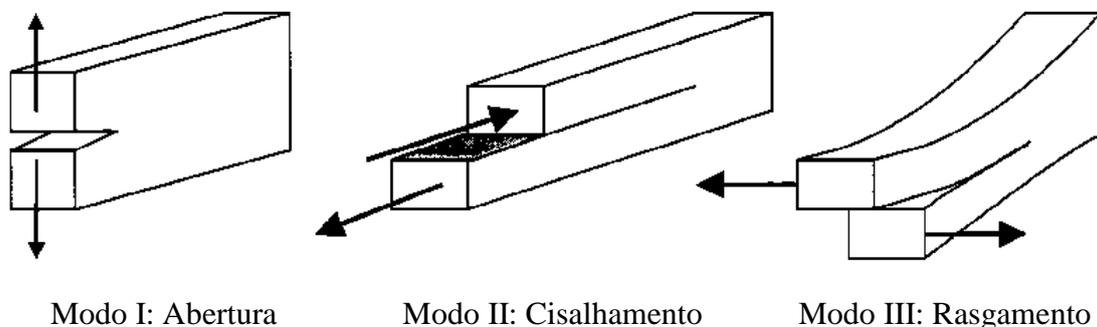


Figura 2.1: Os três modos básicos de fratura (WAGONER, 2006).

O modo I acontece quando a tensão é aplicada por tração direta na região trincada. Os outros modos de abertura envolvem a forma de corte da trinca. O tipo de abertura tem efeito na tensão necessária para romper um material. Ruiz *et al.* (2001 *apud* Wagoner, 2006) sugerem que a tensão crítica necessária para romper um concreto de cimento Portland no Modo II de abertura é significativamente maior do que no Modo I, devido ao intertravamento dos agregados ao longo do plano da trinca.

Para um plano cujo ângulo de abertura  $\theta = 0$ , a tensão para a qual a trinca se propaga nos modos I, II e III são dados por:

$$\tau_{\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}, \tau_{r\theta} = 0 \quad \text{para o modo I} \quad (2.1)$$

$$\tau_{\theta} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}}, \sigma_r = 0 \quad \text{para o modo II} \quad (2.2)$$

$$\tau_{\theta} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}}, \tau_{rz} = 0 \quad \text{para o modo III} \quad (2.3)$$

Onde:

$K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$  são os fatores de intensidade de tensão na “raiz” (ou ponta) da trinca.

## 2.2. MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA

A Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) pode ser desenvolvida em função da energia e pela intensidade de tensão. Embora sejam abordagens diferentes da formação de trincas, as soluções são iguais. O método da energia é atribuído a Griffith na década de 1920, que aplicou a Primeira Lei da Termodinâmica para a formação de uma nova superfície.

A MFLE pode ser aplicada unicamente nos casos em que o carregamento guarda uma relação linear com a deformação, com uma pequena zona plástica na frente da trinca, isto implica que a MFLE pode ser somente usada para representar a propagação da trinca. A análise do campo de tensões na ponta da trinca pela MFLE permite a obtenção

da tenacidade à fratura  $K_{IC}$  e o comportamento de propagação da trinca por fadiga baseada na variação do fator de intensidade de tensão,  $K$ . A vantagem é o fato de que o comportamento de trincas longas em grandes estruturas de engenharia pode ter o seu comportamento estudado em laboratório, utilizando pequenos corpos-de-prova. Esta correspondência é obtida devido à similaridade de termos das expressões em ambos os casos, pois a MFLE prediz que ambas as trincas terão quase que idênticos campos de tensões-deformações (BRAZ, 1999).

### 2.2.1. Conceitos dos fatores $K_I$ e $K_{IC}$

As tensões em um ponto à frente da raiz da trinca, para o Modo I de ruptura, em duas dimensões, têm a seguinte forma:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.4)$$

Onde:

$i$  e  $j$  variam de 1 a 2 (direções  $x$ ,  $y$ ).

Sendo:

$\sigma_{ij}$  = tensor das tensões ou componente das tensões;

$K_I$  = fator de intensidade de tensão para o Modo I.

$\pi = 3,1415$

$r$  = distância do ponto considerado à raiz da trinca.

$f_{ij}(\theta)$  = função relativa à geometria e forma de carregamento do corpo sólido.

$\theta$  = ângulo que define a posição do ponto considerado, relativamente a um sistema de coordenadas polares posicionado na raiz da trinca.

O Fator de Intensidade de Tensão  $K_I$  é definido como o fator que descreve a amplificação da tensão local à frente da raiz da trinca, ou seja, o fator que associa as tensões à frente da trinca com a singularidade. Quando  $K_I$  ultrapassa um determinado valor, a trinca se propaga. Esse valor limite, conhecido como Tenacidade à Fratura do

material,  $K_{IC}$ , é uma propriedade mecânica do material. A tenacidade à fratura,  $K_{IC}$  pode ser medida ou expressa em  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

Para uma trinca de tamanho crítico,  $a_c$ , a tenacidade  $K_{IC}$  é a medida em termos do fator de intensidade da tensão de ruptura:

$$K_{IC} = \sigma_R \sqrt{\pi \cdot a_c} \cdot f\left(\frac{a_c}{W}\right) \quad (2.5)$$

Onde:  $f\left(\frac{a_c}{W}\right)$  é um parâmetro de forma e de carregamento (equivalente a  $f_{ij}(\theta)$  na equação 2.4),  $\sigma_R$  é a tensão de ruptura aplicada externamente e  $K_{IC}$  é o fator crítico da intensidade de tensão no modo I.

Os fatores de intensidade de tensão são funções do carregamento e da geometria. Se os fatores de intensidade de tensão para dois casos são iguais, as duas trincas terão uma correspondência de comportamento muito similar. Se uma das trincas se propaga, a outra irá também ocorrer do mesmo modo se estiver sujeita ao mesmo campo de tensão na ponta da trinca (EFFTING, 2004). Por exemplo, para o modo I supõe-se que a trinca se propaga quando  $K_I = K_{IC}$ , sendo  $K_{IC}$  a tenacidade à fratura ou a resistência à fratura do material. Desta maneira, qualquer trinca em qualquer corpo irá se propagar quando esta igualdade for satisfeita.

Griffith desenvolveu um modo de análise que correlaciona a tensão nominal aplicada com o comprimento da trinca quando há condições energéticas favoráveis ao crescimento desta trinca. A idéia de Griffith é que, se uma tensão é aplicada e ultrapassa uma determinada tensão crítica, a trinca irá se propagar. Em termos do balanço energético, a propagação ocorrerá se a perda de energia potencial elástica devido à trinca for suficiente para prover toda a energia requerida para o crescimento da trinca, o que pode ser obtido por um balanço entre a energia de deformação elástica e a de superfície gerada (EFFTING, 2004).

Em um corpo frágil carregado e com um crescimento gradual da trinca, as alterações energéticas são provenientes apenas das novas superfícies geradas pela separação da

microestrutura e da energia potencial do corpo. A energia de superfície  $U_s$  é representada pela energia absorvida pelo crescimento da trinca, sendo que a energia de deformação elástica é liberada ao longo da trinca nas regiões adjacentes à nova superfície fraturada. Como a energia de superfície  $U_s$  tem um valor constante por unidade de área ela se apresenta de forma linear com o crescimento da trinca, enquanto a energia elástica liberada no crescimento da trinca é uma parábola negativa, como pode ser observado na Figura 2.2. A energia total  $U_t$  é a somatória da energia de superfície  $U_s$  e a energia de deformação  $U_a$  (EFFTING, 2004).

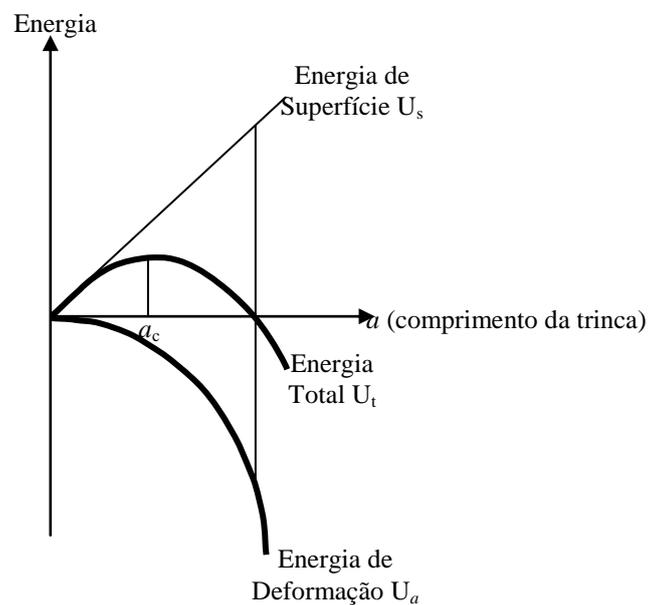


Figura 2.2: Gráfico das energias associadas com o aumento do comprimento da trinca central numa placa (GRIFFITH, 1920 apud EFFTING, 2004).

### 2.2.2. Enfoque da Energia G

Considerando-se um corpo delgado (em forma de chapa) com espessura  $t$  e com uma trinca central de tamanho  $2a$  (Figura 2.3), submetida a uma tensão constante, têm-se as seguintes equações relativas às energias da chapa deformada:

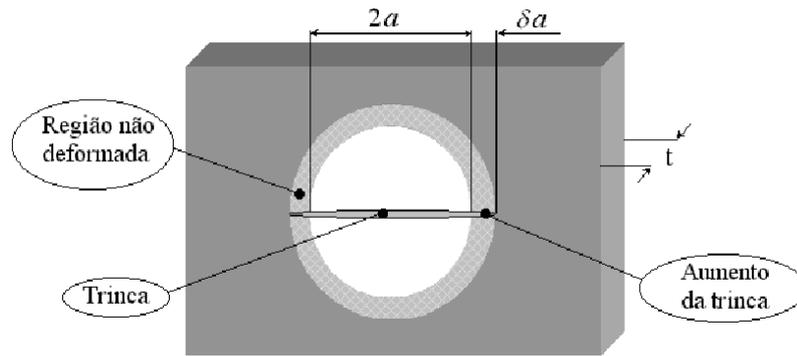


Figura 2.3: Modelo de uma placa com uma trinca central (EFFTING, 2004).

- Energia de superfície por unidade de área,  $U_s$ :

$$U_s = 2 (2 a t T) = 4 a t T \quad (2.6)$$

- Energia potencial liberada devido a trinca,  $U_a$  :

$$U_a = -\pi a^2 t \sigma^2 / E \quad (2.7)$$

- Energia total,  $U_t$  :

$$U_t = U_o + U_a + U_s \quad (2.8)$$

Onde:

$U_o$  é a energia potencial elástica da placa sem a trinca central.

A partir das Figuras 2.2 e 2.3 pode-se observar que a condição crítica para se propagar a trinca é o ponto máximo da curva de energia total  $U_t$ , onde  $dU/da = 0$ , ou seja:

$$\frac{d(U_s + U_o + U_a)}{da} = 0 \quad (2.9)$$

como  $U_o$  é constante, ou seja,  $dU_o/da = 0$ , então:

$$\frac{d}{da} (-\pi a^2 t \sigma^2 / E + 4 a t T) = 0 \quad (2.10)$$

$$\text{obtendo-se: } \sigma = \sqrt{\frac{2TE}{\pi a}} \quad (2.11)$$

como  $T = \gamma$ , onde  $\gamma$  é a energia de superfície, então a equação torna-se:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi a}} \quad (2.12)$$

Assim, a propagação da trinca ocorre quando a energia de deformação elástica for maior que a energia específica de superfície, o que pode ser definido por:

$$\pi a^2 t \frac{\sigma^2}{E} > \gamma \quad \text{ou seja} \quad \sigma = \sqrt{\frac{2TE}{\pi a}} \quad (2.13)$$

Dessa forma, a propagação da trinca ocorrerá se a perda de energia potencial elástica é suficiente para prover toda a energia requerida para o crescimento da trinca, ou seja:

$$\frac{dU}{da} = \frac{dW}{da} \quad \text{ou} \quad G = R \quad (2.14)$$

Onde:

$G = dU/da =$  razão de liberação da energia elástica.

$R = dW/da =$  resistência à propagação da trinca.

$W =$  trabalho das forças externas na placa.

Assumindo-se que a energia necessária para produzir uma trinca é a mesma para cada incremento, isto é,  $R$  é constante, o critério de propagação da trinca pode ser reescrito como  $G = G_{IC}$ , onde  $G_{IC}$  é a taxa de liberação de energia elástica crítica,  $R$  é a resistência à propagação da trinca ( $dW/da$ ) e  $G$  é a razão de liberação de energia de deformação ( $dU/da$ ).

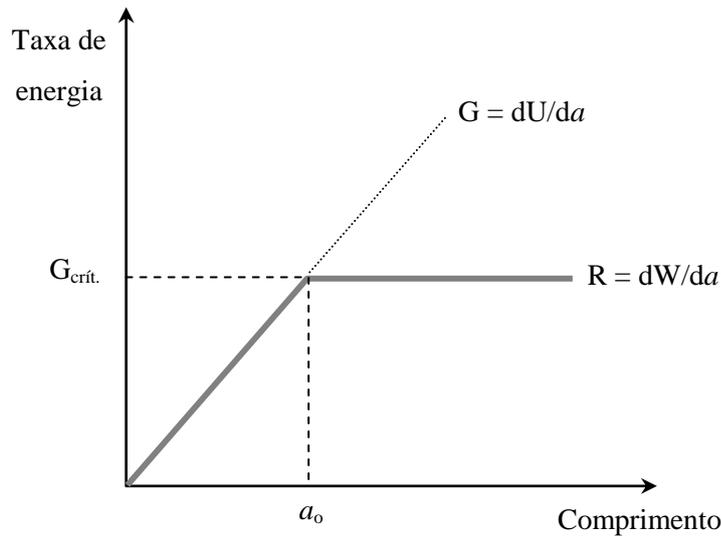


Figura 2.4: Gráfico do comprimento da trinca em relação à taxa de liberação de energia elástica (EFFTING, 2004).

### 2.2.3. Efeito da Plasticidade

Nos materiais reais, as tensões teoricamente previstas são muito elevadas nas vizinhanças da ponta ou raiz da trinca e excedem a tensão de escoamento ( $\sigma_{yy} = \sigma_o = \sigma_y$ ). No entanto, pode-se determinar o tamanho desta região plástica, tomando-se como base a análise de tensões elásticas, onde a distribuição de tensões elásticas  $\sigma_{yy}$  em torno da trinca na direção  $y$  é dada por:

$$\sigma_{yy} = K_I / (2\pi r)^{1/2} \quad (2.15)$$

Assumindo esta tensão limitada pelo valor da tensão de escoamento  $\sigma_o$  tem-se:

$$r_l = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_o^2} \quad \text{ou} \quad r_l = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_o} \right)^2 \quad (2.16)$$

$$\text{e} \quad r_p \cong \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_o} \right)^2 \quad (2.17)$$

Na Figura 2.5 é mostrada a representação do campo de tensões na raiz da trinca, sendo que  $r_1$  é o raio onde as tensões se igualam com a tensão de escoamento  $\sigma_o$  e  $r_p$  é o raio da região de deformação plástica.

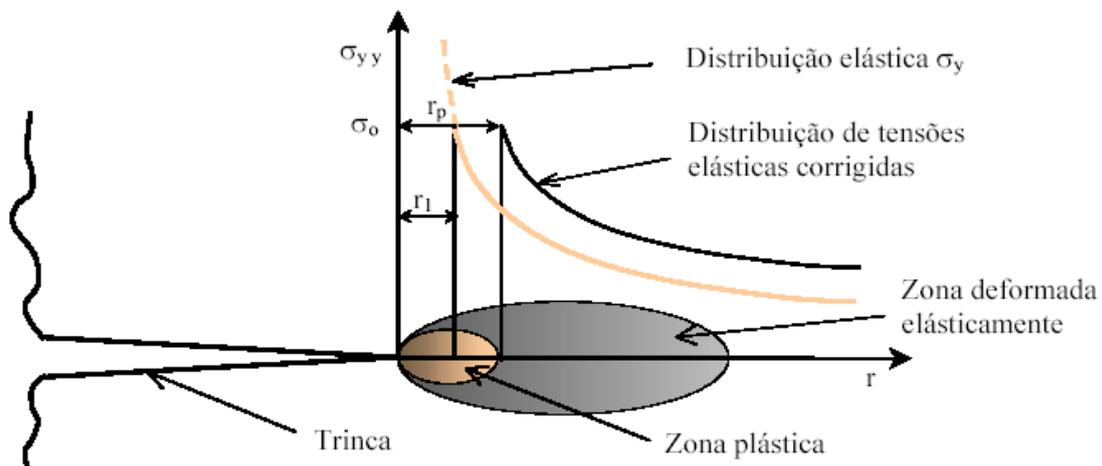


Figura 2.5: Representação da distribuição das tensões na ponta da trinca (EFFTING, 2004).

Na resolução de problemas reais, o parâmetro de comparação é o fator de intensidade de tensão  $K_I$ . Atualmente pode-se determinar  $K_I$  de várias maneiras como, por exemplo, através de soluções teóricas obtidas da Teoria da Elasticidade, por métodos numéricos, estimativa, comparação ou ainda por métodos experimentais.

Para se evitar um grande campo de tensões plásticas na ponta da trinca, o que invalida os ensaios de obtenção do parâmetro  $K_I$  em laboratório, as normas prevêm a confecção de corpos-de-prova de acordo com o tipo de material a ser ensaiado.

De modo geral, quanto menor o limite de escoamento  $\sigma_o$  maior será o parâmetro  $K_I$ . Portanto, em projetos onde se aplique a mecânica da fratura deverá ser analisada a capacidade de resistência de falha por fratura com a perda da resistência ao escoamento do componente. Na Figura 2.6, pode-se observar como o crescimento do parâmetro  $K_{IC}$  muda as características do mecanismo de falha, passando de uma fratura frágil para uma fratura dúctil.

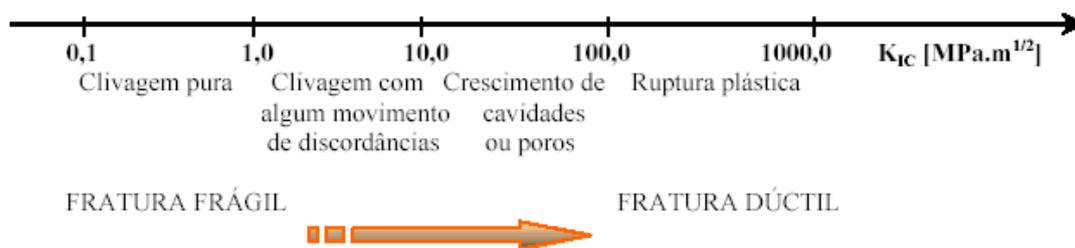


Figura 2.6: Variação do parâmetro K<sub>IC</sub> com o mecanismo de fratura (EFFTING, 2004).

### 2.3. MECÂNICA DA FRATURA ELÁSTICA NÃO-LINEAR OU ELASTO-PLÁSTICA

Segundo Effting (2004), quando comparados os modelos elástico-lineares com os não-lineares pode-se verificar que os modelos não-lineares fornecem dados mais próximos aos reais no que diz respeito ao comportamento da mecânica da fratura de estruturas trincadas, construídas de materiais de alta dureza e baixa resistência.

Geralmente, em parte ou em todo o componente, o material é solicitado acima da temperatura de transição dúctil-frágil, onde a resposta à fratura é essencialmente dúctil e o material é capaz de considerável deformação plástica (Figura 2.7). As teorias elasto-plásticas ou a mecânica da fratura não-linear (MFNL) são mais apropriadas para análise da fratura destes componentes estruturais que a mecânica da fratura linear elástica (MFLE). Na MFNL a força motriz da trinca é freqüentemente descrita em termos da energia de ruptura ou da integral J.

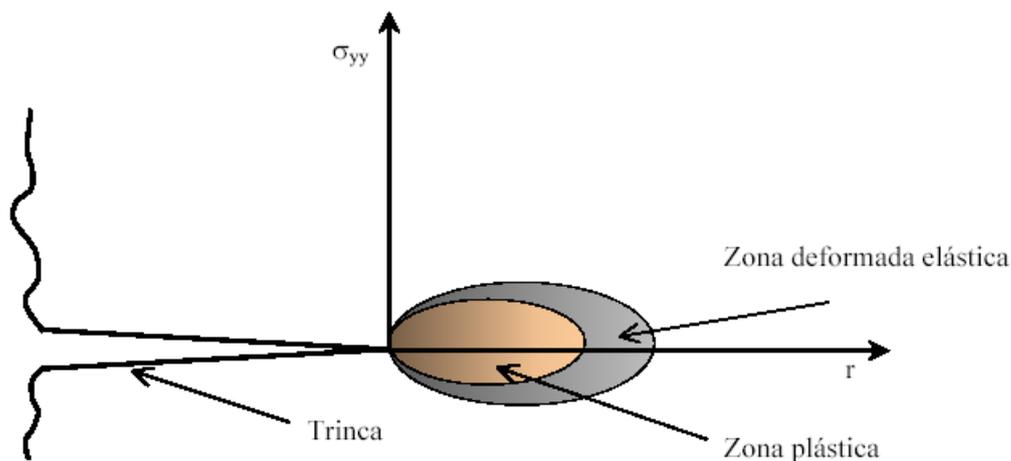


Figura 2.7: Representação da distribuição das deformações na ponta da trinca (EFFTING, 2004).

### 2.3.1. Metodologia da Curva-R

A resistência à fratura  $R$  em função do crescimento da trinca é designada como sendo a “curva de resistência” à propagação da trinca ou “Curva-R” e pode ser descrita através de duas abordagens comentadas a seguir.

A primeira abordagem leva em conta o Fator de Intensidade de Tensão  $K_I$ . Muitos materiais, onde o desenvolvimento da fratura é predominantemente elástico linear, exibem a curva-R. A norma ASTM E561 descreve o procedimento para determinar  $K_I$  versus o crescimento da trinca. Porém a ASTM E399 (1990) não determina a espessura mínima requerida, podendo-se assim aplicar às placas planas finas (apropriadas somente quando a zona plástica é pequena comparada às dimensões do corpo-de-prova, CP). A forma da curva-R depende dos mecanismos de fratura que relaciona o estado de tensão ao tipo da trinca (GRIFFITH, 1920).

Na Figura 2.8 está ilustrada uma curva-R típica num material predominantemente elástico linear, onde o  $K_{IC}$  ocorre no ponto de tangência entre a força motriz e a curva-R. É possível definir a intensidade de tensão  $K_{IC}$  onde a força motriz principal é tangente a curva-R. Este ponto de instabilidade não é uma propriedade do material, porém, como ponto de tangência depende da forma da curva da força motriz, este é

governado pela geometria de fratura do corpo. Assim, o valor de  $K_{IC}$  é obtido em CP de laboratório que não são transferíveis para uma estrutura.

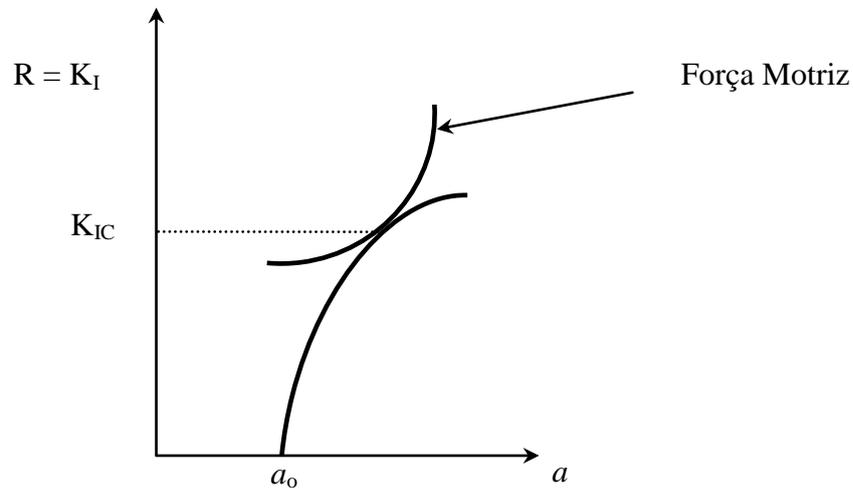


Figura 2.8: Curva-R esquemática (GRIFFITH, 1920).

A segunda abordagem pode ser obtida pelo método da energia como se pode observar na Figura 2.9, onde  $R$  é a resistência ao crescimento da trinca ( $dW/da$ ) e  $G$  é a taxa de liberação de energia de deformação ( $dU/da$ ).

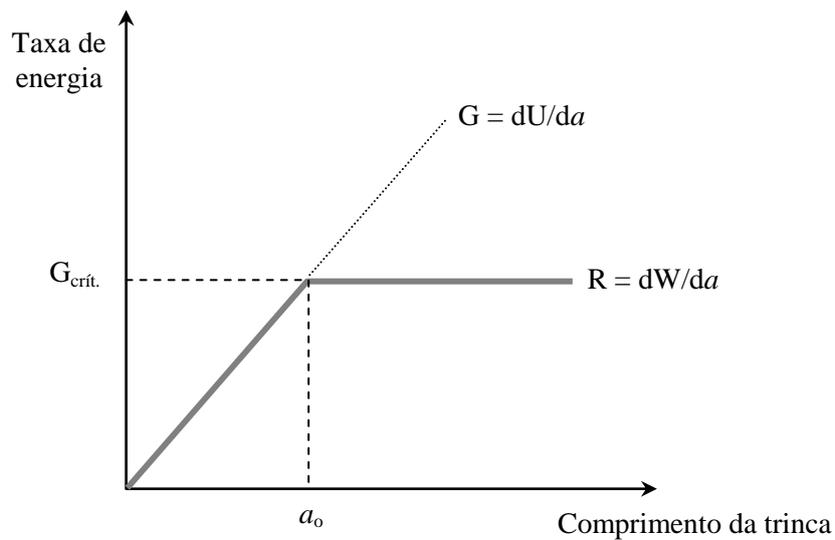


Figura 2.9: Gráfico do comprimento da trinca em relação à taxa de liberação de energia elástica (GRIFFITH, 1920 *apud* EFFTING, 2004).

### 2.3.2. Enfoque da Integral J

A integral de linha que independe do caminho de integração em torno da trinca (Figura 2.10), chamada de integral J ou simplesmente J, foi proposta pelo pesquisador RICE em 1968 (EFFTING, 2004). Esta integral descreve o campo tensão-deformação na raiz de uma trinca submetida a um carregamento elasto-plástico.

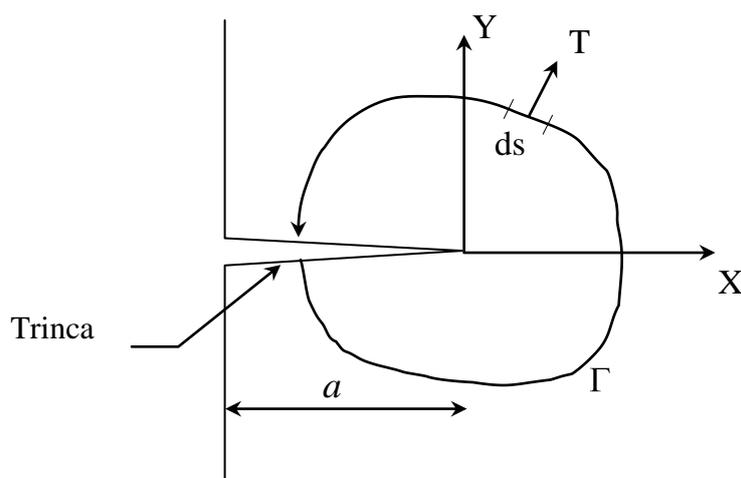


Figura 2.10: Representação de um caminho de integração (EFFTING, 2004).

Esta integral pode ser tomada em um ponto distante da raiz da trinca e as deformações sobre a raiz da trinca podem ser deduzidas admitindo-se uma extensão do mecanismo de fratura associado com a fratura por fadiga elástica linear com o comportamento elasto-plástico.

$$J = \int_r \left[ W \cdot dy - \bar{T} \left( \frac{d\bar{u}}{dx} \right) \right] ds \quad (2.18)$$

Onde:

$W$  - densidade de energia de deformação;

$T$  - vetor de tração perpendicular ao caminho de integração;

$u$  - vetor deslocamento;

$r$  - caminho de integração;

$s$  - comprimento de arco anti-horário em torno de  $\Gamma$ .

A integral J constitui um parâmetro apropriado da mecânica da fratura que descreve adequadamente o campo de tensão e de deformação na raiz da trinca. Devido à impossibilidade de se avaliar analiticamente esta integral, a forma usual de se obter esta avaliação é pelos métodos aproximados de engenharia, tradicionalmente baseado no método dos elementos finitos (MEF). Através do MEF, a integral J pode ser calculada para qualquer geometria de trinca e condição de carregamento. Entretanto, também é prática o uso de modelos simplificados para cálculos rotineiros de engenharia. Estes modelos estabelecem um método de estimar a integral J representando estatisticamente as incertezas dos carregamentos, tamanho de trinca, e propriedades do material, e em métodos de confiabilidade (EFFTING, 2004).

As fórmulas usadas nestes modelos consistem de equações fechadas da integral J em função do carregamento, tamanho de trinca e propriedades dos materiais de uma estrutura. A maior razão para o uso destes modelos está no fato de não serem tão trabalhosos e consumirem menos tempo que no caso da análise não-linear pelo MEF. No entanto, devido a várias aproximações e/ou limitações dos métodos usados para estimar a integral J, torna-se necessário avaliar a precisão de tais modelos através de métodos mais precisos baseados em análises por MEF.

Pode-se relacionar o parâmetro J com o fator de intensidade de tensão “ $K_I$ ” pela equação (2.19). Esta relação vale para o material elástico linear:

$$J = \frac{K_I^2}{E'} = G \quad (2.19)$$

Para o estado plano de tensão tem-se:

$$E' = E \quad (2.20)$$

Já para o estado plano de deformação,  $E'$  é definido pela equação:

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2}, \text{ onde } E \text{ é o módulo de Young} \quad (2.21)$$

## 2.4. MECÂNICA DA FRATURA APLICADA A MISTURAS ASFÁLTICAS

A mecânica da fratura tem sido usada em pesquisas para avaliar o potencial de trincamento de pavimentos asfálticos desde meados da década de 1970. No entanto, essas pesquisas levaram mais de duas décadas para incorporar conceitos de mecânica de fratura na caracterização de misturas asfálticas. Majidzadeh *et al.* (1971) relatam o primeiro estudo empregando conceitos de mecânica de fratura para prever a vida de fadiga de pavimento de concreto asfáltico. O objetivo foi obter a taxa de crescimento da trinca pelo fator de intensidade de tensão  $K$  usando a Lei de Paris (Paris e Ergodan, 1963). A Lei de Paris é definida pela equação 2.22:

$$\frac{dc}{dN} = AK^n \quad (2.22)$$

Onde:  $A$  e  $n$  são constantes do material

$K$  é o fator de intensidade de tensão

A partir da Lei de Paris, a vida de fadiga pode ser apresentada como:

$$N_f = \int_{c_o}^{c_f} \frac{1}{AK^n} dc \quad (2.23)$$

Onde:

$N_f$  é o número de ciclo para a falha;

$c_o$  é a falha inicial;

$c_f$  é o comprimento final da trinca.

Muitos estudos ao longo dos anos seguintes investigaram a tenacidade à fratura de misturas asfálticas utilizando mecânica da fratura linear elástica (MFLE). Ramsamooj *et al.* (1991) testaram 46 diferentes misturas com temperaturas variando entre 16 e 35°C. Uma das suas principais conclusões foi que a vida de fadiga de algumas misturas asfálticas pode ser prevista a partir de testes simples de fratura. Kim *et al.* (1997) investigaram a tenacidade à fratura de misturas asfálticas a temperaturas de -5°C a -30°C em 5 etapas. As misturas foram preparadas com CAP 85-100 e dois tipos de

agregados: granito e calcário. Os resultados mostraram que a tenacidade aumentou em temperaturas de -5 a -15°C, mas que diminuiu para temperaturas inferiores a -30°C. Além disso, os resultados mostraram que as misturas com granito apresentaram maior resistência à fratura do que as misturas com calcário.

Diversos pesquisadores realizaram experimentos para determinar as propriedades de misturas asfálticas que a fadiga sob a ação de cargas repetidas. Os testes de laboratório incluíam ensaios em viga simplesmente apoiada (ensaio de flexão em três pontos), realizados de forma cíclica (carregamento e descarregamento) e o comprimento da trinca foi medido indiretamente usando o método da compliância. O método da compliância usa o inverso da inclinação no diagrama de tensão-deformação. O fator de intensidade de tensão pode ser determinado experimentalmente usando o comprimento da trinca, a geometria da viga e a compliância. Foram usadas vigas de diversos tamanhos e diferentes temperaturas.

A abordagem da compliância para determinar o comprimento da trinca tem sido usada por vários pesquisadores tais como Mobasher *et al.* (1997) que usaram ensaios de fratura para observar as diferenças nas propriedades de fratura de misturas asfálticas com e sem borracha. A abordagem da compliância serviu para determinar o fator de intensidade de tensão e o deslocamento crítico da abertura da trinca. Os dois parâmetros foram úteis para comparar a resistência à fratura dos materiais. Além disso, a curva-R foi calculada para cada mistura. A curva-R foi definida como o aumento na tenacidade à fratura como uma função do comprimento da trinca devido a efeitos não-lineares. Os testes foram realizados em vigas simplesmente apoiadas de mesmas dimensões e ensaiados em duas temperaturas diferentes. Verificaram diferenças no comportamento da tenacidade à fratura de misturas com ligante convencional e com asfalto-borracha. Os resultados mostraram que a mistura com asfalto-borracha apresenta módulo elástico menor, porém maior tenacidade do que a mistura com cimento asfáltico convencional.

Hossain *et al.* (1999) também investigaram o efeito do teor de borracha na energia de fratura. Usando três teores de borracha (19, 22, 24%), três teores de ligante asfáltico (6, 7,5, 9%), e duas temperaturas (5, 25°C), encontraram valores mais elevados de energia de fratura a partir de teores mais elevados de ligante asfáltico, independentemente do teor de borracha.

Outras pesquisas com asfaltos modificados mostram a melhoria no desempenho dessas misturas com a adição de modificadores do ligante (HOSSAIN *et al.*, 1999; BHURKE *et al.*, 1997). Hossain *et al.* (1999) estudaram a seleção do teor ótimo de borracha moída para ligantes modificados. Um dos parâmetros selecionados foi a energia de fratura determinada em um ensaio de viga com um “entalhe” prévio. O ensaio de fratura foi realizado seguindo um procedimento definido pela “*International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures*” (RILEM, 1991). Os procedimentos de ensaios foram normatizados para determinar a energia de fratura comparada a de concreto de cimento Portland. Os ensaios foram realizados em duas temperaturas intermediárias. As misturas asfálticas com asfalto modificado com borracha apresentaram aumento de aproximadamente 50% na energia de fratura em comparação com misturas asfálticas convencionais.

Bhurke *et al.* (1997) usaram um microscópio eletrônico de varredura (*environmental scanning electron microscope*, ESEM) para observar diferenças no desenvolvimento da trinca de diferentes misturas asfálticas modificadas por polímeros. O principal objetivo da pesquisa foi comparar diferentes tipos de polímeros (SBS, SEBS, SBR e Elvaloy) para determinar a tenacidade à fratura e os efeitos que os polímeros exercem no início e propagação das trincas. A tenacidade à fratura foi determinada usando o enfoque da integral J. Um objetivo secundário foi desenvolver um procedimento de ensaio padrão para determinar a tenacidade à fratura de mistura asfáltica. O procedimento de ensaio usou uma viga de dimensões 50 mm x 50 mm x 200 mm e um vão livre de 175 mm com um único entalhe. Os ensaios foram realizados sob uma taxa de deformação constante de 1,27 mm/min.

A morfologia de fratura de misturas asfálticas foi avaliada usando o ESEM. Cada polímero mostrou um efeito diferente na propagação da trinca. Os elastômeros (SBS, SEBS e SBR) permitiram maiores deformações e aberturas de trinca, aumentando a coesão. Os polímeros SBS e o SEBS apresentaram desempenhos muito parecidos enquanto o polímero SBR diminuiu a rigidez do ligante e permitiu maior deformação antes da ruptura. O polímero Elvaloy, que é um plastômero, e apresenta morfologia diferente dos elastômeros, aumentou a rigidez e o pico de carga, no entanto, os deslocamentos diminuíram e a integral J não mostrou nenhuma melhoria quando comparada com os elastômeros.

Ainda que em muitas pesquisas prevaleça até o presente o ensaio de viga com um entalhe - *Single edge notched beam* - SE (B) para determinar as propriedades de fratura, também podem ser usadas outras geometrias de corpos-de-prova e de carga. Um dos ensaios empregados é o de tração direta.

Jacobs *et al.* (1996) usaram o ensaio de tração direta em uma amostra com dois entalhes para avaliar a propagação de trincas. Os corpos-de-prova consistiam de vigas retangulares com dimensões de 50 mm x 50 mm x 150 mm, com entalhe feito no ponto médio da amostra. A profundidade do entalhe variou com a temperatura, sendo que entalhes mais profundo foram feitos para ensaios em temperaturas mais baixas. O ensaio foi realizado com controle de deslocamento a frequências de 2, 4 e 16 Hz. Os parâmetros medidos durante o ensaio foram: carga, deslocamento e abertura da trinca usando um *clip*. A propagação da trinca foi modelada usando a Lei de Paris. Afirmam que o crescimento da trinca é um processo descontínuo, mas que o modelo pode ser único, de crescimento contínuo da trinca. A melhor correlação foi obtida para misturas compostas por agregados miúdos. A partir de dados experimentais por regressão linear foram determinadas as constantes A e n, da Lei de Paris, pela seguinte expressão:

$$\log A = a_A + b_{An} \quad (2.24)$$

A constante n pode ser estimada pela inclinação da curva de compliância e corrigida por um fator que depende da rigidez da mistura e do ligante asfáltico. Para esta estimativa, a constante A pode ser determinada a partir da resistência à tração direta da mistura, da energia de fratura e da rigidez da mistura.

Uma lei de crescimento da trinca foi desenvolvida na Universidade da Flórida (ZHANG *et al.*, 2001; ROQUE *et al.*, 1999) utilizando a energia dissipada como o fator limitante. A energia dissipada pode ser calculada usando a densidade de energia de fratura. A energia de fratura é a combinação da energia dissipada, que trinca a amostra e a energia de tração, que a deforma.

No Brasil, Rodrigues (1991) estudou os mecanismos que levam à origem e propagação de trincas em revestimentos asfálticos. Desenvolveu um modelo numérico para análise de ensaio de compressão diametral de misturas asfálticas com pré-trinca no centro do

corpo-de-prova obtendo a expressão matemática do  $K_I$  que foi comparado com as expressões de Paris e com os parâmetros das curvas de fadiga usuais expressas por  $N = k \Delta\sigma^n$ . Com esta modelagem possibilitou empregar ensaios de fadiga mais simples para determinar parâmetros da mecânica de fratura de misturas asfálticas, definidos pela Lei de Paris. Determinou também fatores de calibração, a partir de análises em trechos experimentais. Na Figura 2.11 está mostrado o esquema modelado por Rodrigues (1991).

Os fatores de Intensidade de tensões  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$  dependem das cargas e do corpo solicitado, sendo uma função  $f(\theta)$  que depende da geometria do problema. Para distâncias radiais muito pequenas, as tensões de tração crescem muito e há plastificação do ponto. Dois modelos matemáticos da mecânica da fratura foram usados por Rodrigues (1991) para obter o fator de intensidade de tensões:

- Jayawickrama e Lytton(1987): viga elástica apoiada sobre base e subleito representados pelo coeficiente de mola(k) e,
- Folias (1970): espalhamento horizontal da trinca passante ao longo da superfície do pavimento.

Rodrigues (1991) transformou algumas figuras destes autores em expressões matemáticas gerando toda uma família de expressões que permitiu chegar a aplicações na previsão de surgimento da primeira trinca e depois prever seu espriamento num revestimento de um pavimento asfáltico.

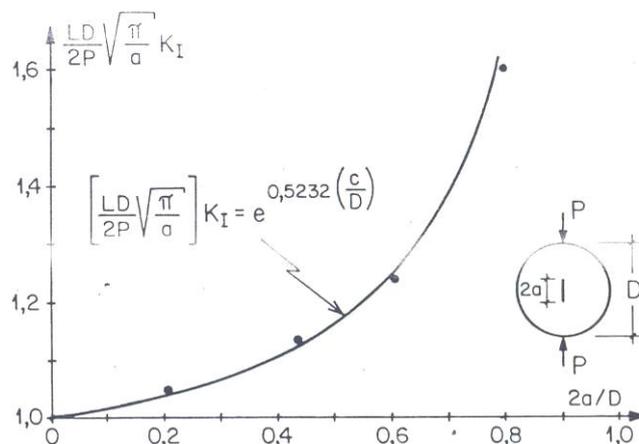


Figura 2.11: Modelo desenvolvido por Rodrigues (1991) para previsão da evolução do trincamento em corpo-de-prova cilíndrico com pré-trinca.

Braz (1997) testou as proposições de Rodrigues (1991) utilizando tomografia dos corpos-de-prova de misturas asfálticas submetidos a carregamentos repetidos e mostrando o cálculo direto do crescimento da trinca ao longo do ensaio. A tomografia permitiu ver que em muitos casos a trinca sofre desvios ao encontrar um agregado maior e até pode ser interrompido o seu crescimento, levando a surgir outra trinca em outra posição que será então a responsável pela fratura geral da amostra. Obteve para algumas misturas asfálticas expressões de  $dc/dN$  em função de  $\Delta K$ , fator de intensidade de tensões I.

As expressões seguintes foram obtidas por Braz (1997) para indicar as correlações entre os parâmetros da lei de Paris e os índices dos ensaios tradicionais de fadiga por compressão diametral, atualizadas em relação às de Rodrigues (1991):

$$n = -13,7521 + 6,0024 \sigma_t - 0,6871 \sigma_t^2 + 0,02505 \sigma_t^3$$

$$\ln(A) = -1,4224 - 4,27134 n$$

$$n = -0,333 - 0,5390 \log(A)$$

Onde:

$n$  = expoente da curva de fadiga tradicional

$\sigma_t$  = resistência à tração da mistura asfáltica;

$\ln(A)$  = parâmetros da expressão de Paris.

Vilchez (2002) desenvolveu pesquisas com geossintéticos para uso como elemento antirreflexão de trincas. Ensaiou vigas de misturas asfálticas superpostas com trinca para obter os parâmetros da mecânica da fratura pertinentes ao comportamento da presença da geogrelha entre as camadas asfálticas. Desenvolveu modelos numéricos e experimentais. Na Figura 2.12 mostram-se alguns dos arranjos utilizados nos ensaios de viga de misturas asfálticas desta pesquisa. Foram variadas também as larguras da pré-trinca.

Loureiro (2003) estudou a evolução do dano por fadiga em ensaios de corpos-de-prova de compressão diametral de concreto asfáltico.

Monteiro (2003) também utilizou a mecânica da fratura para interpretar os ensaios de fadiga de concreto asfáltico.

Souza (2005) fez estudos de modelos viscoelásticos aplicáveis á concreto asfáltico, utilizando a teoria da mecânica da fratura.

O mecanismo de crescimento de trincas por fadiga pode ser explicado nos termos clássicos do balanço de energia de deformação requerida para algumas distorções estruturais irreversíveis. A velocidade com que uma determinada trinca pode se propagar e o caminho seguido dependem do balanço de energia na sua extremidade. Quando ocorre uma grande deformação plástica, a trinca pode se tornar arredondada e não se propagar ou se propagar lentamente. Por outro lado, quando a energia elástica liberada excede a energia requerida para criar novas superfícies, a trinca se propaga instantaneamente ao longo do caminho que requer a mínima quantidade de energia para que estas superfícies sejam formadas.

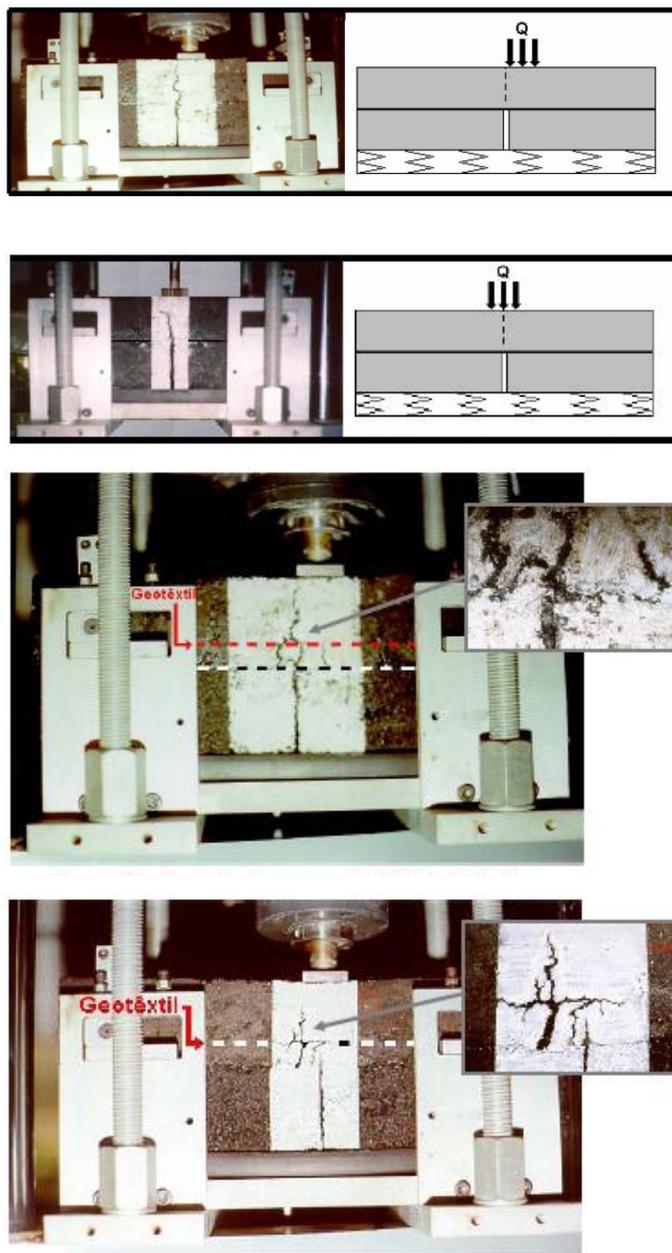


Figura 2.12: Modos de arranjo dos ensaios de fadiga em vigotas de concreto asfáltico visando reproduzir o modo de propagação de trincas cisalhante (II) e de flexão (I) – Vilchez (2002).

## 2.5. DISCUSSÃO SOBRE A GEOMETRIA DOS CORPOS-DE-PROVA PARA MISTURAS ASFÁLTICAS

### 2.5.1 Noções Gerais e Evolutivas da Geometria

Muitos tipos de geometria de corpos-de-prova foram utilizados nos últimos anos para pesquisar a fratura de vários materiais e também de misturas asfálticas. A geometria dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de fratura em misturas asfálticas é influenciada por dois fatores principais: dificuldade de preparação da amostra e compatibilidade com os atuais equipamentos utilizados para moldagem e ensaios mecânicos em geral.

Na literatura, são identificadas diferentes geometrias de corpos-de-prova para estudos de fratura em misturas asfálticas, sendo que a geometria mais recomendada segundo Wagoner (2006) é a forma de discos cilíndricos, que podem ser produzidos em laboratório ou obtidos da extração de camadas de revestimentos asfálticos em campo.

Wagoner *et al* (2004) avaliaram algumas configurações de corpos-de-prova apresentados no método da ASTM E399 (*Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials*), que descreve várias configurações de corpos-de-prova para a determinação da fratura para materiais metálicos. Escolheram um corpo-de-prova compacto em forma de um quadrado (*Compact Tension Test*) visando determinar as propriedades de fratura em misturas asfálticas. Entretanto, esta configuração apresentou grande dificuldade na fabricação dos corpos-de-prova tanto a partir de amostras extraídas de campo como de laboratório, não apresentando semelhança com a configuração das amostras produzidas pelos métodos usuais de compactação.

A especificação ASTM E399 foi usada como ponto de partida no desenvolvimento de uma configuração de corpo-de-prova para o ensaio de fratura em concretos asfálticos. No entanto, as primeiras pesquisas para aplicação de conceitos de mecânica da fratura em misturas asfálticas foram realizadas em corpos-de-prova em forma de viga com um único entalhe (*Single Edge Notched Beam, SE(B)*) antes mesmo da aprovação da norma ASTM E399, em 1970. Essa geometria apresentou alguns problemas, como por

exemplo, o início da trinca, antes da aplicação da carga, devido ao seu tamanho e peso próprio (MARASTEANU *et al.*, 2007).

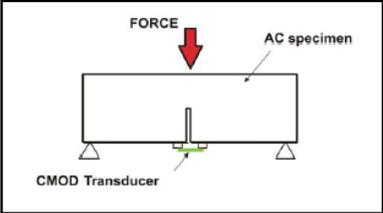
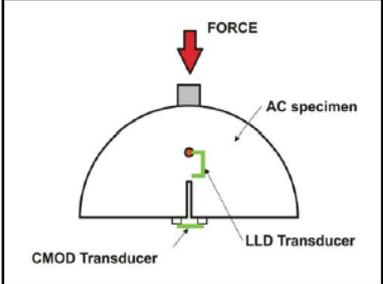
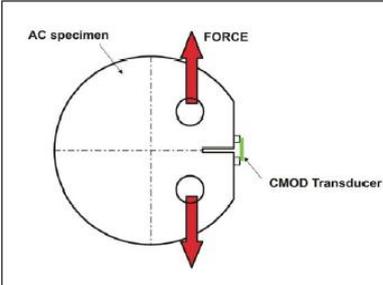
Li e Marasteanu (2004) mostraram que a configuração de amostra na forma semicircular foi aplicada com sucesso para medir a resistência de fratura de misturas asfálticas. Mas em seguida, outros estudos mostraram que a configuração de corpos-de-prova para ensaios de fratura em misturas asfálticas em forma de disco, denominada nos Estados Unidos de *Disk-Shaped*, apresentada na ASTM E399 como um dos métodos para materiais metálicos, igualmente se aplica no caso de concretos asfálticos.

Dentre os ensaios descritos na literatura, mostram-se na Tabela 2.1 algumas vantagens e desvantagens para cada geometria de amostra. A configuração de amostra semicircular apresenta a vantagem de obter dois corpos-de-prova, no caso de amostras extraídas de campo (Figura 2.13), reduzindo o número de furos necessários para fornecer uma amostragem representativa na análise. Também a configuração de carregamento de flexão em três pontos utilizado para ensaios em vigotas pode ser facilmente modificada para amostras na forma semicircular.

Entretanto, o tamanho do corpo-de-prova da geometria semicircular pode apresentar algumas desvantagens na análise dos resultados. A área disponível do corpo-de-prova depois que a pré-trinca é fabricada pode criar algumas restrições no início da trinca: a área inicial é muito pequena, estando assim próximo à parte do corpo-de-prova onde as tensões de compressão são elevadas devido ao efeito de arqueamento do mesmo. Além disso, pode haver redução da zona de fratura resultando em variabilidade muito grande de resultados devido ao volume pequeno de material que é testado.

A configuração em forma de disco, denominada de *Disk-Shaped* inicialmente utilizada em ensaios para materiais metálicos foi recentemente adaptada para concretos asfálticos (WAGONER, 2006). Destaca-se que ocorreram algumas falhas localizadas próximas aos furos de carregamento durante o desenvolvimento dos primeiros testes, como pode ser visualizado na Figura 2.14, devido à insuficiência de material necessário para suportar os esforços aplicados nesta região quando utilizadas as dimensões originais.

Tabela 2.1: Comparação entre diferentes geometrias de corpos-de-prova para ensaio de fratura

Geometria	Vantagens	Desvantagens
<p><b>SE(B)</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Configuração de carregamento simples;</li> <li>- Modo I – carregamento;</li> <li>- Flexibilidade para investigar outros parâmetros (efeito do tamanho do corpo-de-prova etc.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dificuldade de obtenção de corpos-de-prova em campo.</li> </ul>
<p><b>SCB</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilidade de extração de corpos-de-prova em campo;</li> <li>- Carregamento simples de flexão em três pontos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estado de tensão complexo;</li> <li>- Tamanho do corpo-de-prova.</li> </ul>
<p><b>DC(T)</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilidade de extração de corpos-de-prova em campo;</li> <li>- Configuração do ensaio de fratura padrão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carregamento excêntrico;</li> <li>- Preparação dos corpos-de-prova;</li> <li>- Desvio da trinca nos agregados.</li> </ul>

Fonte: MARASTEANU *et al.*, 2007 e WAGONER *et al.*, 2004.



Figura 2.13: Exemplo de extração de corpos-de-prova cilíndricos em campo.

(MARASTEANU *et al.*, 2007).

As posições dos furos de carregamento foram modificadas para assegurar que a probabilidade de falha indesejada fosse reduzida. Através da configuração do corpo-de-prova (*Disk-Shaped*) testaram-se vários comprimentos de entalhes (pré-trinca), sendo que o estudo provou que a relação  $a/w$  apresentada na Figura 2.15 deveria ser em torno de 0,25 para que não ocorresse a quebra na região dos furos de carregamento e proporcionasse o início e propagação da trinca, válida para a mecânica da fratura.

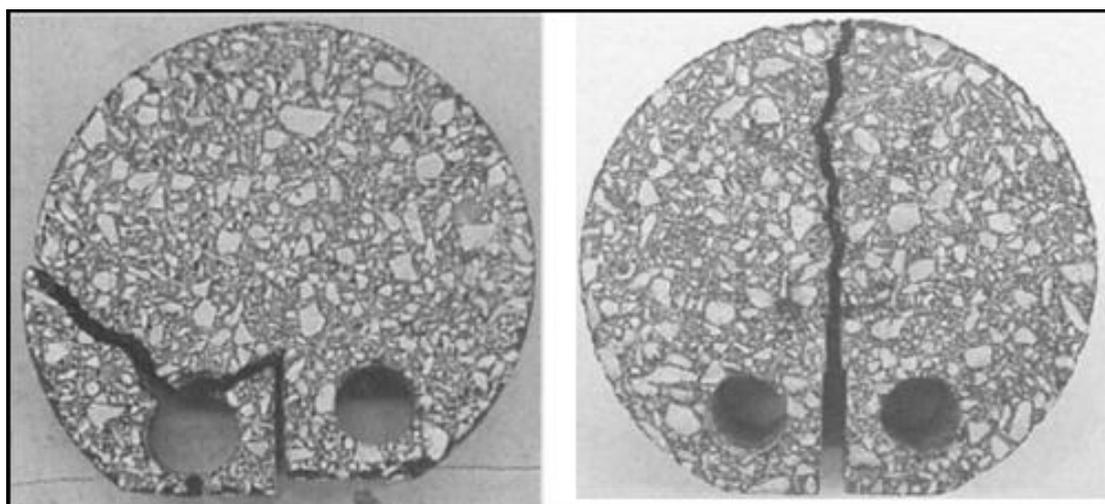


Figura 2.14: Falha na região dos furos de carregamento evidenciadas nos primeiros ensaios realizados por Wagoner *et al* (2004).

Na Figura 2.16, é mostrado um corpo-de-prova em forma de disco circular com chanfro e pré-trinca linear, nas atuais dimensões consideradas, ajustadas para misturas asfálticas, além da configuração da aplicação de carga atualmente utilizada. Todas essas dimensões estão descritas na norma ASTM D 7313/07.

O objetivo visado com o desenvolvimento da geometria em forma de disco circular com chanfro foi a de maximizar a área de superfície de fratura para reduzir a variabilidade da energia de fratura obtida em outros tipos de corpo-de-prova tais como o semicircular.

Como a configuração em forma de vigota fornece resultados de energia de fratura com boa repetibilidade, à área da superfície de fratura dessa configuração foi comparada com as outras configurações (semicircular e em forma de disco).

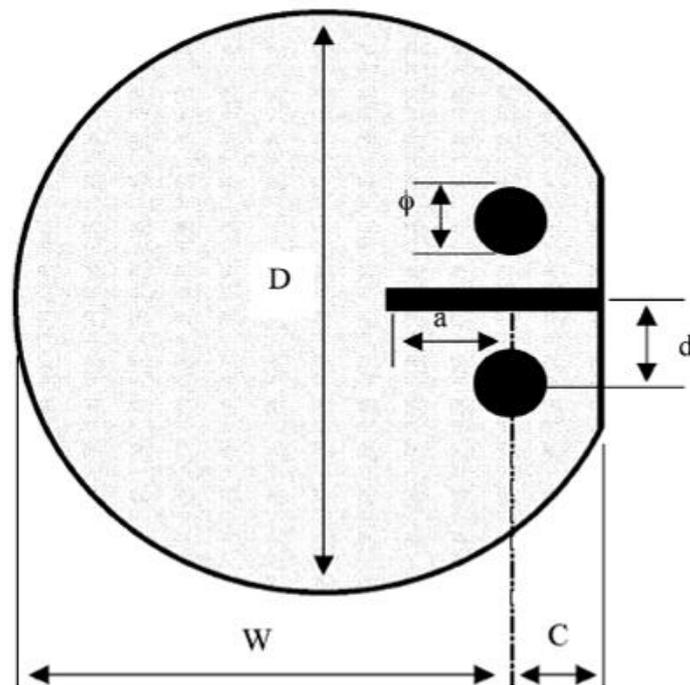


Figura 2.15: Relação  $a/w$  a ser satisfeita.

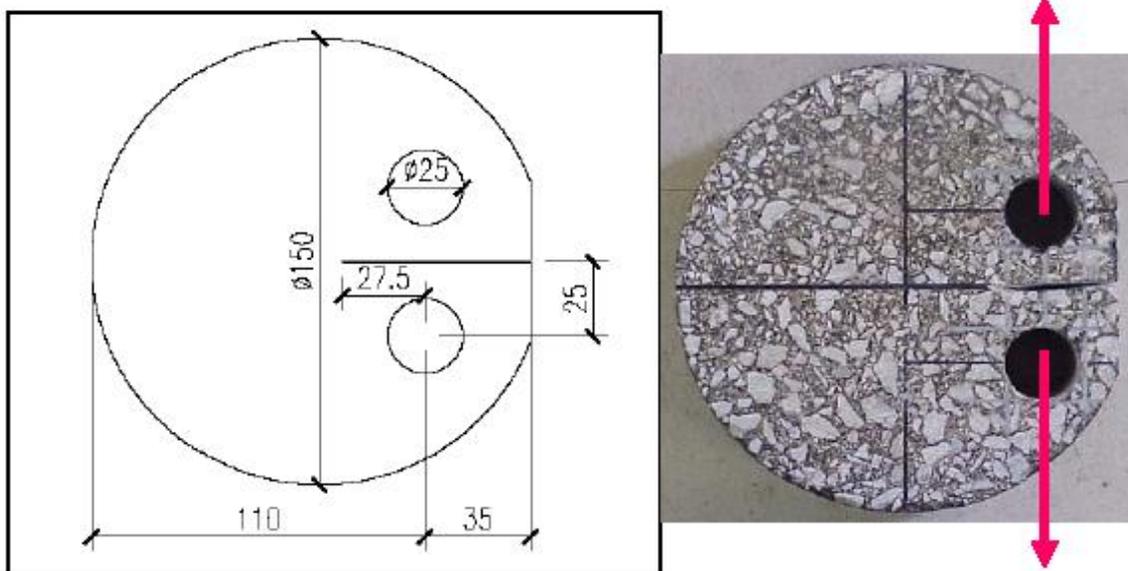


Figura 2.16: Dimensões dos corpos-de-prova *Disk-Shaped Compact* (DC(T)) (mm) e configuração da carga (MARASTEANU *et al.*, 2007).

Destaca-se que a configuração em forma de disco circular com chanfro apresenta uma diminuição de aproximadamente 35% da área da superfície de fratura e a forma

semicircular uma diminuição de 50%, considerando uma espessura de amostra de 50 mm nos dois casos.

Os ensaios compactos de tração (retangulares ou em forma de discos) podem fornecer resultados dispersos se ocorrer o desvio da trinca durante o ensaio, ou seja, se a trinca não for linear em relação ao trajeto linear do modo de trincamento I.

Wagoner (2004) notou que o desvio da trinca ocorreu durante alguns ensaios usando o corpo-de-prova em forma de disco circular (*Disk-Shaped*) e a média do ângulo de desvio num conjunto de 50 corpos-de-prova foi de 5°. Diversos mecanismos podem criar o desvio da trinca, por exemplo: a estrutura do esqueleto mineral da amostra (trinca que contorna um agregado), carregamento excêntrico, etc.

Estudos comparativos entre as geometrias de forma semicircular e em forma de disco circular (WAGONER *et al.*, (2005) mostram que a geometria em forma de disco circular foi a forma mais promissora para se determinar a energia de fratura de misturas asfálticas. Embora cada configuração apresente vantagens e desvantagens, a geometria em forma de disco circular apresenta uma área superficial de ruptura maior que a forma semicircular, o que foi fator decisivo para a escolha desta geometria na normalização do ensaio em 2007.

Porém há evidências de que a geometria em forma de disco circular apresenta desvantagem quanto ao desvio da propagação da trinca, o que futuramente poderá ser analisado e interpretado melhor com a análise computacional. Quanto mais pesquisas forem realizadas para melhor esclarecer os efeitos de tamanho e de heterogeneidade das misturas asfálticas, mais rápido será definido qual geometria é mais adequada, para se estimar a resistência à fratura de misturas asfálticas.

Descrevem-se a seguir cada uma das formas de ensaio que têm sido empregadas para avaliação das características de fratura misturas asfálticas, inclusive voltando a falar desta última forma que foi normalizada recentemente – a *Disk Shaped*.

### 2.5.2. Geometria Viga com um único entalhe - Single Edge Notched Beam SE(B)

Neste tipo de teste, as amostras são ensaiadas por flexão a três pontos e apresentam após a iniciação da trinca um crescimento de trinca estável. Também, o tamanho do corpo-de-prova pode variar em laboratório para assegurar que os mecanismos de mecânica da fratura não sejam afetados em função do efeito escala. A geometria em vigas permite investigar vários modos de aplicações de carga e entalhe (trinca inicial) para fratura de concretos asfálticos (WAGONER *et al.*, 2005).

A geometria do corpo-de-prova em forma de viga, denominada SE (B) é mostrada nas Figuras 2.17 e 2.18. Um entalhe é produzido no ponto médio inferior da viga. A viga é simetricamente apoiada sobre dois cilindros e uma linha de carga é aplicada na face superior da viga (WAGONER *et al.*, 2005a).

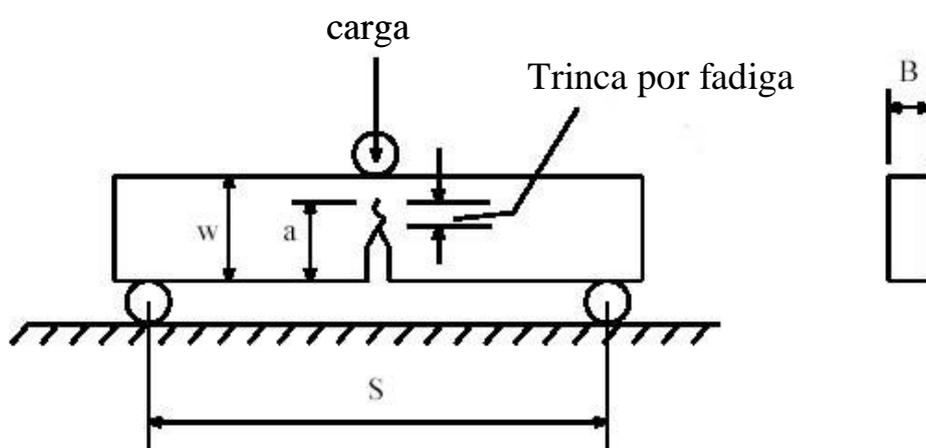


Figura 2.17: Detalhe do entalhe (único) no ponto médio da viga SE (B).

Onde:

$$B = 0.5w;$$

$$s = 4w;$$

$$a = 0,45 \text{ a } 0.55w.$$

As vantagens da configuração SE(B) incluem a facilidade para ajustar o tamanho da viga para permitir participação da maior área da superfície fraturada possível e apresentar distribuição uniforme das tensões no ensaio de flexão a três pontos.



Figura 2.18: Exemplo de corpo-de-prova em forma de viga (MARASTEANU *et al.*, 2007).

O tamanho da viga deve ser escolhido com cuidado para assegurar que propriedades relevantes de fratura possam ser determinadas. A área da seção transversal varia de 25 mm x 25 mm até 75 mm x 100 mm. As maiores dimensões visam assegurar maior área possível de fratura. Também influenciou na seleção do tamanho da viga a capacidade máxima dos compactadores usados normalmente para preparar a viga em laboratório, que eram em geral de 375 mm x 127 mm x 75 mm. No estudo de Marasteanu *et al.*, (2007), para reduzir a influência de efeito de variação da densidade, segregação de agregados etc., as vigas compactadas em geral foram serradas e ficaram com as seguintes dimensões: 375 mm de comprimento, 100 mm de altura e 75 mm de largura, conforme mostrado na Figura 2.19.

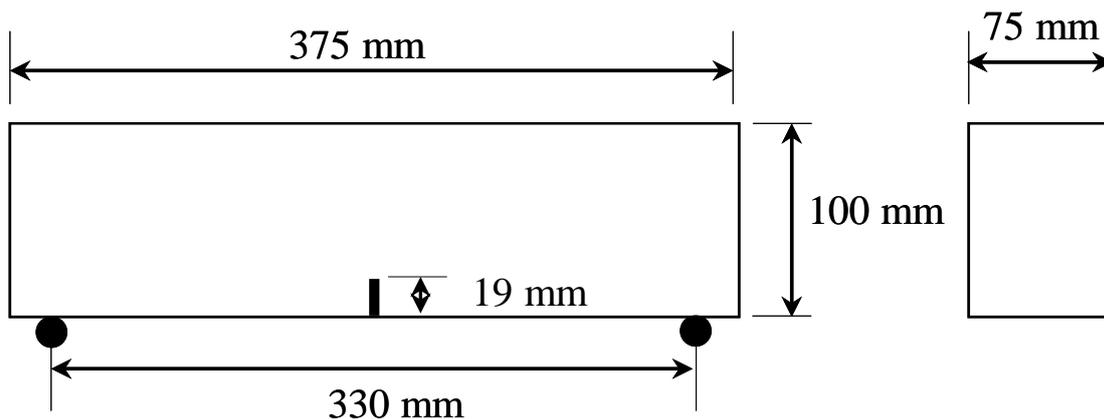


Figura 2.19: Geometria típica de uma viga SE(B) (MARASTEANU *et al.*, 2007).

O entalhe feito na parte inferior da viga geralmente é de 19 mm, resultando numa razão  $a/w$  de 0,19. Para ensaios com materiais metálicos, a relação  $a/w$  exigida é de 0,45 a 0,55 (ASTM E399, 2002; ASTM E1820, 2002). Mas no caso de misturas asfálticas, os corpos-de-prova com entalhe profundo podem apresentar resultados não desejados, tais como início da trinca devido ao peso próprio, por isso o uso de relações menores.

Dois procedimentos podem ser usados para gerar o entalhe (trinca inicial) na viga: inserir um gabarito de metal no molde antes de preparar o corpo-de-prova ou fazer o entalhe mecanicamente através de um corte após a compactação. Inserir um gabarito de metal no molde pode afetar a compactação da mistura (alinhamento dos agregados, segregação da mistura etc.), enquanto a desvantagem de fazer o entalhe mecanicamente após a compactação é que o entalhe resultante nem sempre fica bem feito.

RILEM (1991) recomenda que a largura do entalhe deva levar em consideração o tamanho máximo do agregado ( $d_a$ ), sugerindo que largura máxima do entalhe seja menor que  $0,5d_a$ .

O processo de corte do entalhe deve ser dividido em duas etapas: primeiro usa-se uma serra com lâmina de largura de 5mm para cortar aproximadamente metade da profundidade requerida; em seguida, aplica-se manualmente o restante do corte para atingir a largura final programada. A largura da lâmina de metal usada na segunda fase deve ser menor, de 1 mm. Para evitar fazer o entalhe em duas etapas pode ser

empregada lâmina de metal de 1,5 mm de largura para entalhes em misturas com tamanho máximo de agregados de até 4,75 mm.

O procedimento de ensaio com corpo-de-prova SE(B) consiste em simplesmente apoiar a viga sobre dois cilindros ou roletes para realizar o ensaio de flexão em três pontos. O método E399 *Standard Test Method* (2002) não é aplicável em concreto asfáltico, mas serve como referência para realizar a preparação do ensaio (fixação e carregamento).

Uma viga de 100 mm de altura deve ser apoiada sobre roletes de 25,4 mm de diâmetro distantes de 330 mm. Os roletes ficam livres para girar durante o ensaio, reduzindo o atrito. O ponto de aplicação do carregamento tem raio de 12,7 mm e pode girar na direção transversal para proporcionar condições de carregamento mais uniformes ao longo da largura da viga.

A aplicação de carga pode ser feita por uma prensa de 100 kN, que possua um programa de aquisição de dados: carga aplicada, deslocamento da viga, deslocamento da abertura da trinca (*crack mouth opening displacement*, CMOD) e outros dados de instrumentação. A carga pode ser monitorada por célula de carga de 10 kN com deslocamento medido por LVDT. Um *clip-on-gage* deve ser usado para medir o CMOD, preso na viga e usando referências coladas nas extremidades do entalhe. O ensaio deve ser realizado a temperatura controlada dentro de uma câmara capaz de manter a temperatura  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ .

A taxa de carregamento deve ser determinada usando o tempo de pico de carga. O tempo estimado para o pico de carga em geral está entre 5 e 10 segundos, taxa típica para tração em concreto asfáltico. Inicialmente é feito o controle do deslocamento em função da aplicação da carga constante.

A temperatura de condicionamento do corpo-de-prova pode influenciar nos resultados. Para evitar que isso aconteça, o corpo-de-prova deve ser mantido na temperatura requerida durante no mínimo 3 horas antes da realização do ensaio propriamente dito. O ensaio deve ser realizado a uma velocidade da abertura da trinca controlada pelo *clip-on-gage* até que a carga seja reduzida a 0,1 kN ou até que a viga seja completamente partida.

O  $K_I$  para a SE(B) apresentado na Figura 2.18 e 2.19 pode ser determinado como segue:

$$K_I = \frac{P.S}{BW^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.25)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[ 1,99 - \frac{a}{W} \left( 1 - \frac{a}{W} \right) \left( 2,15 - 3,93\left(\frac{a}{W}\right) + 2,7\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right) \right]}{2\left( 1 + 2\frac{a}{W} \left( 1 - \frac{a}{W} \right)^2 \right)^{3/2}} \quad (2.26)$$

Onde:

P = carga;

B = espessura do corpo-de-prova;

W = largura do corpo-de-prova;

S = calibração do modelo;

a = comprimento da trinca.

O  $K_{IC}$  é obtido se a carga crítica é aplicada na equação 2.26. A precisão com que o  $K_{IC}$  descreve o comportamento da fratura depende de quão adequadamente caracteriza a tensão e a deformação em torno da ponta da trinca, considerando condições de MFEL. No entanto, em muitos materiais, uma zona coesiva se forma à frente da ponta da trinca. Quando a área da zona coesiva é muito maior que o tamanho do corpo-de-prova, as condições do modelo MFEL não são válidas. Visando medir um valor de tenacidade estável e garantir a validade dos MFEL, três requisitos geométricos têm de ser cumpridos, além dos parâmetros já descritos:

$$a \geq 2,5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.27)$$

$$B \geq 2,5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.28)$$

$$0,45 \leq a/W \leq 0,55 \quad (2.29)$$

Onde:

$\sigma_{ys}$  = força.

### 2.5.3. Geometria Cilíndrica

Embora a geometria em forma de vigotas SE (B) seja amplamente utilizada em Metais, Rochas e Concreto de Cimento Portland a sua aplicação em misturas asfálticas é restrita, pela dificuldade de preparação do corpo-de-prova. Destaca-se que atualmente o método mais usual de compactação de misturas asfálticas nos Estados Unidos é o compactador giratório Superpave (AASHTO, 2000). No Brasil, este método já está sendo aplicado por alguns centros de pesquisas da área de pavimentação. Contudo, a metodologia Marshall ainda é a mais empregada, o que torna mais prático o uso da geometria cilíndrica.

A maior parte dos trabalhos experimentais com misturas asfálticas foi realizada em corpos-de-prova cilíndricos, moldados em laboratório ou extraídos dos pavimentos em campo. A preparação dos corpos-de-prova de misturas asfálticas em formato de vigas retangulares requer equipamento adicional e compactador especial. A comparação das propriedades das misturas obtidas a partir de diferentes configurações de corpos-de-prova se torna difícil.

#### 2.5.3.1. Geometria Semicircular (*Semi Circular Bending - SCB*)

Esta geometria de corpo-de-prova para a realização do ensaio de fratura em misturas asfálticas foi proposta por Chong e Kurrupu (1988). O corpo-de-prova SCB é um meio disco com um entalhe de  $a$ -mm de comprimento, que faz um ângulo  $\alpha$  com o eixo central do disco. A configuração do ensaio está esquematicamente representada na Figura 2.20 de Marasteanu *et al.*, (2007).

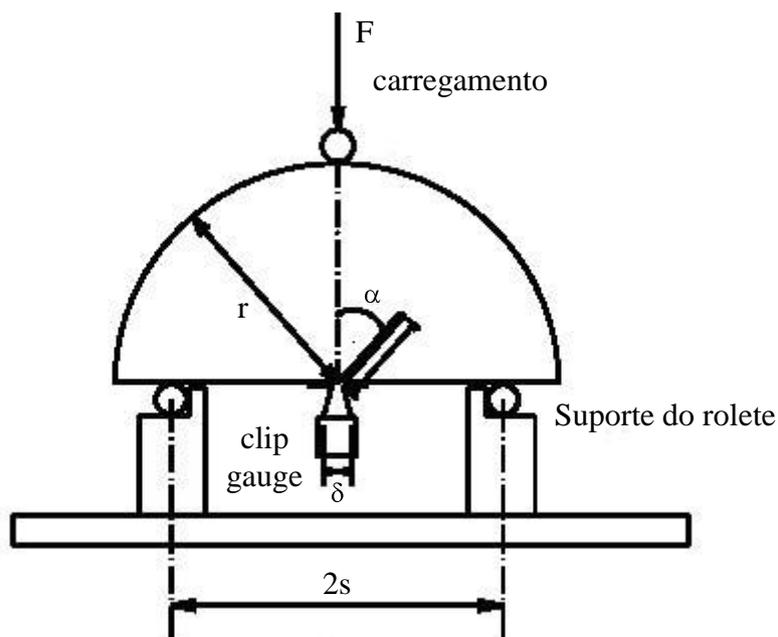


Figura 2.20: Esquema do ensaio em corpo-de-prova semicircular (SCB)  
(MARASTEANU *et al.*, 2007).

Os valores de tenacidade à fratura de Chong e Kurrupu (1988) comparavam-se aos valores determinados por outros pesquisadores para o mesmo material. A tenacidade à fratura medida com o ensaio SCB não depende do comprimento da trinca e da espessura do corpo-de-prova. Esta observação foi confirmada mais tarde por outros pesquisadores.

O  $K_I$  do corpo-de-prova SCB pode ser obtido da seguinte forma:

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi a} (Y_I + C) \quad (2.30)$$

Onde:

D = diâmetro do corpo-de-prova;

B = espessura do corpo-de-prova;

$\sigma_0$  = força;

$Y_I$  = fator de intensidade de tensão normalizada;

C = fator de correção em função de  $a/r$ .

Lim *et al.* (1994) investigaram a influência do tamanho do corpo-de-prova nesta geometria e verificaram que:

- a tenacidade à fratura é independente da espessura do corpo-de-prova ao longo das condições testadas;
- o tamanho do corpo-de-prova (em termos do diâmetro) e o comprimento do entalhe não exercem efeito significativo sobre a tenacidade à fratura aparente;
- os comprimentos de entalhes entre 3 mm e 80% do raio do SCB parecem prever valores válidos de  $K_{IC}$ .

O ensaio SCB pode ser usado para determinar o fator de intensidade de tensão do modo I, e também o fator de intensidade de tensão dos modos II e III, dependendo do ângulo do entalhe,  $\alpha$  (LIM *et al.*, 1993). Se o ângulo for igual a zero, o fator de intensidade de tensão do modo I pode ser medido.

Molenaar e Moleenar. (2000) utilizaram o ensaio SCB para determinar as propriedades de fratura de misturas asfálticas. Avaliaram sete tipos de misturas asfálticas utilizando três diferentes tamanhos de corpos-de-prova, quatro temperaturas (25°C, 15°C, 0°C e -10°C) e três taxas de carregamento (0,005 mm/s, 0,05 mm/s e 0,5 mm/s). Seguiram o método descrito na ASTM E399-90 (ASTM, 1990) e determinaram a tenacidade à fratura de misturas asfálticas. Verificaram deformação plástica excessiva em altas temperaturas que ultrapassaram os limites utilizados no cálculo da tenacidade à fratura. Os dados mostraram que, para uma taxa de deformação de 0,05 mm/s, a maioria dos corpos-de-prova não mostrou deformação não-linear significativa antes de atingir o pico de carga. Os autores concluíram que:

- $K_I$  é praticamente independente do diâmetro do corpo-de-prova para taxa de deformação de 0,05 mm/s se o diâmetro for superior a 220 mm; para taxa de deformação de 0,005 mm/s o diâmetro deve ser superior a 150 mm;
- a dependência da tenacidade à fratura aparente da espessura do corpo-de-prova é mais fraca do que sua dependência em relação ao diâmetro do corpo-de-prova;

- a tenacidade à fratura aparente pode ser interpretada como uma resistência à tração para um corpo-de-prova com entalhe. Para temperaturas abaixo de 15°C, o coeficiente de variação de tenacidade à fratura é de que cerca de metade da resistência à tração indireta. A capacidade do ensaio SCB como um ensaio de avaliação de tenacidade à fratura é satisfatório, ao passo que a habilidade do ensaio de tração indireta para determinar a resistência à tração é pequena.

Li *et al.* (2005) realizaram ensaios SCB em três misturas asfálticas utilizadas na pista experimental conhecida como MnROAD - Minnesota Road. Foram utilizados agregados de uma única pedreira, e três ligantes asfálticos diferentes (PG 58-28, PG 58-34 e PG 58-40). Os ensaios foram realizados em três temperaturas, -20°C e -30°C e -40°C, com taxa de carregamento controlada pelo *clip - ong - gage* constante de 0,0005 mm/s. Tanto a tenacidade à fratura quanto a energia de fratura das misturas asfálticas foram determinadas experimentalmente a partir do gráfico de carga versus deslocamento de carga (LLD). Os autores concluíram que:

- a tenacidade à fratura e a energia de fratura podem ser usadas para diferenciar desempenho a baixa temperatura de misturas asfálticas. A energia de fratura é parâmetro melhor do que a tenacidade à fratura devido à menor dependência daquela em relação às condições de elasticidade linear e homogeneidade dos materiais testados;
- os dois parâmetros de fratura são dependentes da temperatura;
- quanto menor é a temperatura, menor é a energia de fratura, sendo o valor mínimo de energia de fratura alcançado quando a temperatura estiver abaixo da temperatura crítica do PG negativo correspondente ao da classificação do ligante empregado.

Os corpos-de-prova utilizados no ensaio SCB podem ser preparados em um compactador giratório Superpave. A configuração de carga é bem simples: o corpo-de-prova é apoiado simetricamente sobre dois cilindros (ou roletes) fixos e distantes de 120 mm. Fitas de Teflon podem ser utilizadas para reduzir o atrito entre os dois cilindros e o corpo-de-prova. O mesmo tipo de carregamento do ensaio de tração indireta (IDT) pode ser utilizado para carregar o corpo-de-prova SCB. O deslocamento da carga pode ser

medido utilizando um extensômetro montado verticalmente com  $38 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  de comprimento de haste. O deslocamento da abertura da trinca pode ser registrado por um *clip-on gage* com 10 mm de abertura. O clip é colado na parte inferior do corpo-de-prova. Considerando-se o comportamento frágil de misturas asfálticas a baixas temperaturas, o controle da abertura da trinca é utilizado para manter a estabilidade do ensaio na região pós-pico. Uma taxa constante de abertura de trinca de  $0,0005 \text{ mm/s}$  é aplicada, gerando um gráfico de carga *versus* abertura da trinca. Uma carga de contato com valor máximo de 0,3 kN deve ser aplicada antes do carregamento real para garantir a uniformidade de contato entre a placa e o ponto de carga. O ensaio é interrompido quando a carga atinge 0,5 kN, na região pós-pico. Todos os ensaios devem ser realizados dentro de uma câmara com temperatura controlada. Para se obter temperaturas baixas correspondentes aos valores do PG negativo da classificação do ligante asfáltico usado, recomenda-se utilizar nitrogênio líquido. Uma configuração esquemática do ensaio é mostrada na Figura 2.21 (MARASTEANU *et al.*, 2007).

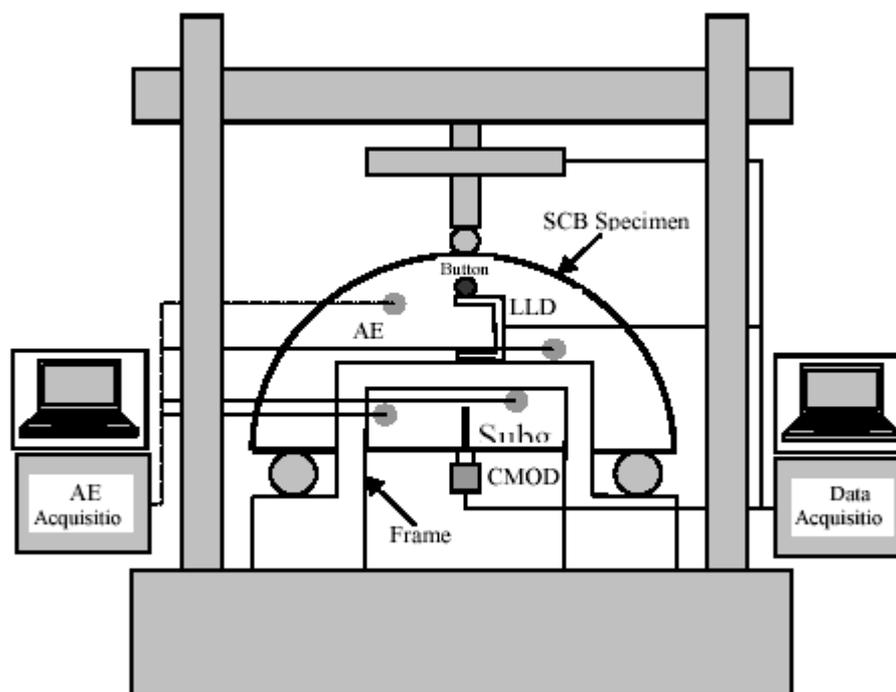


Figura 2.21: Esquema da configuração do ensaio SCB (MARASTEANU *et al.*, 2007).

### 2.5.3.2. Geometria Disco Circular com Fenda - *Disk-Shaped Compact* (DC(T))

Wagoner *et al* (2004) relatam as diversas tentativas em laboratório para o desenvolvimento de uma geometria de corpo-de-prova que proporcionasse o máximo de área para fraturar, (considerada a área do corpo-de-prova onde ocorreria o início e a propagação da pré-trinca) e que não apresentasse quebra nos furos de carregamento, como pode ser observado na Figura 2.22 e na Figura 2.23. Relata-se que os pesquisadores citados não pouparam esforços no desenvolvimento e análise de várias geometrias e diferentes formas de carregamento.

Wagoner (2006) relata vários ensaios realizados com diferentes tamanhos de amostras utilizando a geometria em forma de disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact*), sendo testados corpos-de-prova com 100, 150 e 300 mm de diâmetro, além de exemplares com 450 mm. Neste estudo também foi analisada a espessura do corpo-de-prova, sendo realizados testes em amostras com 25, 50 e 75 mm de espessura. Outro fato relevante e levado em consideração nas várias análises deste estudo foi à velocidade de carregamento, sendo pesquisadas velocidades de 0,1, 1, 5 e 10 mm/min. Ao final deste estudo concluiu-se que o corpo-de-prova na forma de disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact*) com 150 mm de diâmetro e 50 mm de espessura é o que melhor define a energia de fratura de misturas asfálticas, enfatizando que a velocidade de carregamento adotada deve ser de 1,0 mm/min.



Figura 2.22: Várias geometrias de amostras desenvolvidas e testadas (100, 150, 300 e 450 mm de diâmetro) (WAGONER, 2006). (Foto: Eng.º M.Sc. Lélío Antonio Teixeira Brito).



Figura 2.23: Outras configurações de amostras testadas (WAGONER, 2006).

(Foto: Eng<sup>o</sup>. M.Sc. Lélío Antonio Teixeira Brito).

Todo o desenvolvimento da geometria e os procedimentos experimentais do ensaio em forma de disco circular para determinar a energia de fratura em misturas asfálticas foi primeiramente executado e descrito por Wagoner *et al* (2004).

Esta nova geometria foi incorporada à ASTM E399-90 e o procedimento proposto para determinar a energia de fratura em misturas asfálticas tornaram - se efetivamente um método de ensaio. Foi apresentado pela primeira vez na forma de especificação em 2007 pela ASTM D7313-07 (*Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry*) – Método de ensaio para determinação da energia de fratura em misturas asfálticas usando corpo-de-prova de geometria de disco circular com fenda. Os corpos-de-prova devem ser preparados conforme as dimensões e a configuração apresentada na especificação da ASTM D7313-07, que pode ser observada na Figura 2.24.

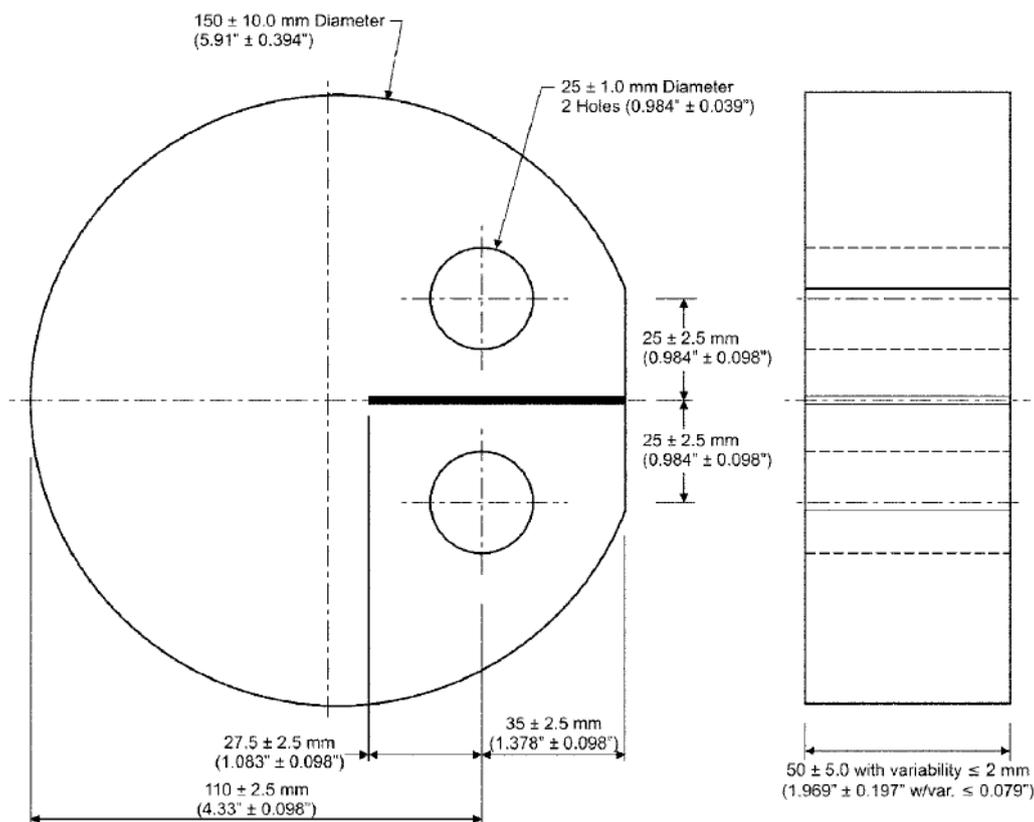


Figura 2.24: Dimensões e configuração do corpo-de-prova em forma de disco circular para ensaio de fratura de concreto asfáltico (ASTM D 7313/07).

É importante ressaltar que as dimensões apresentadas na Figura 2.24, com pequenas tolerâncias, devem ser obedecidas na fabricação e preparação dos corpos-de-prova para a realização do ensaio de fratura.

Outro aspecto importante é realizar os cortes para a fabricação dos corpos-de-prova, os faceamentos das amostras e também, na execução do entalhe (trinca inicial), utilizando equipamento de corte que possua uma serra diamantada, com injeção de água que é visando minimizar os danos do manuseio e preparação desta configuração de amostra.

Os corpos-de-prova para a realização dos ensaios, tanto produzidos em laboratório quanto extraídos em campo, devem possuir  $50 \pm 5$  mm de espessura, medidas em quatro pontos igualmente espaçados em torno da circunferência e não devem apresentar variação maior do que 2,5 mm entre estas medições.

A realização do entalhe inicial e da pré-trinca é uma etapa crítica na preparação dos corpos-de-prova. Se as dimensões do entalhe variarem significativamente entre os corpos-de-prova o valor de energia de fratura pode ser influenciado. Um entalhe que seja relativamente estreito comparado ao tamanho máximo do agregado produzirá resultados satisfatórios.

O comprimento do entalhe é também fator crítico, pois é difícil produzir uma trinca de fadiga de comprimento recomendado pela ASTM E 399-90, nestes materiais. A trinca inicial deve ser fabricada ao longo do diâmetro do corpo-de-prova, com tolerância de 1,5 mm da posição, perpendicular às faces do mesmo. Na fabricação do entalhe uma lâmina de espessura maior pode ser usada para cortar até 90% do comprimento e o restante deve ser realizado com uma lâmina de espessura menor possível, em geral 1,5 mm, levando em conta ser o diâmetro máximo dos agregados.

Na preparação da face do corpo-de-prova, onde será acoplado o *clip-on-gage*, deve-se também usar para o corte uma serra diamantada e a superfície cortada deve estar a  $90\pm 5^\circ$  em relação ao entalhe.

Os furos de carregamento devem ser produzidos a  $90\pm 5^\circ$  em relação à face do corpo-de-prova e sua posição não deve diferir mais do que 5 mm das posições especificadas.

A configuração deste ensaio foi desenvolvida para se determinar a resistência de fratura de misturas asfálticas, que, além de ajudar a diferenciar as potencialidades de diferentes tipos de misturas em laboratório, também pode avaliar as mesmas quanto à vida de serviço, analisando assim a tendência ao trincamento em campo.

A geometria do corpo-de-prova é facilmente adaptada dos corpos-de-prova de 150 mm de diâmetro, tais como os fabricados pela metodologia Superpave, especificados na ASTM D6925-08. Destaca-se também, que a geometria do corpo-de-prova pode ser adaptada para investigações de campo, utilizando amostras extraídas de revestimentos asfálticos.

Wagoner *et al* (2004), relatam vasta pesquisa realizada com amostras produzidas com o compactador giratório com 150 mm diâmetro e 115 mm de altura. De cada amostra

foram produzidos dois corpos-de-prova em forma de disco circular para a realização dos testes e também de amostras extraídas de campo. Observa-se na Figura 2.25 a configuração da amostra, layout de carregamento e *clip-on-gage* acoplado na amostra, este layout foi desenvolvido por Wagoner *et al* (2004).

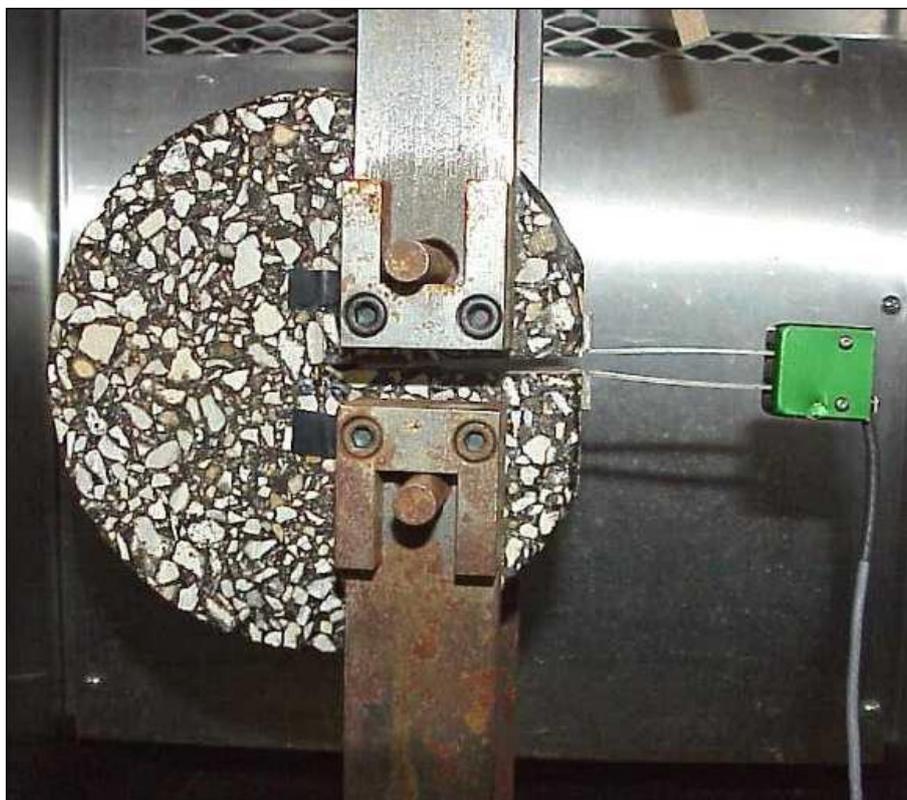


Figura 2.25: Configuração de carregamento desenvolvida por Wagoner *et al* (2004)

Wagoner *et al* (2005) destacam que esta geometria apresenta resultados satisfatórios para o estudo da resistência de fratura de misturas asfálticas, levando-se em consideração o tamanho máximo nominal dos agregados variando de 4,75 mm a 19,1 mm.

Os corpos-de-prova devem ser ensaiados em prensa capaz de proporcionar um carregamento mínimo de 20 kN de tensão com célula de carga com definição de pelo menos 0,20 kN.

O ensaio é executado aplicando-se uma tensão de tração no corpo-de-prova através dos furos de carregamento e o deslocamento da abertura da trinca é medido com o auxílio de um *clip-on-gage*. Uma taxa constante de deslocamento de abertura da trinca é

aplicada: o ensaio é controlado através da velocidade de abertura da trinca com o auxílio do *clip-on-gage*, devendo ser de 1,0 mm/min.

Após a preparação das amostras, as mesmas devem passar por uma fase de condicionamento, sendo colocadas em uma câmara de temperatura controlada por no mínimo 2 h e máximo 16 h na temperatura desejada para o ensaio.

Posteriormente, devem ser introduzidos no corpo-de-prova os dispositivos de carregamento e fazer o acoplamento com o *clip-on-gage*. Na Figura 2.26 pode ser observado o layout final de posicionamento do corpo-de-prova, desenvolvido nesta pesquisa, também pode ser observado a configuração (*Disk-Shaped Compact*) de amostra em concreto asfáltico e o acoplamento com o *clip-on-gage*.

Para a realização do ensaio aplica-se uma carga pequena de assentamento de no máximo 0,20 kN, para ajuste entre o corpo-de-prova e a prensa. Destaca-se que o ensaio estará completo ou finalizado quando o nível de carga se reduzir a um valor mínimo de 0,10 kN.

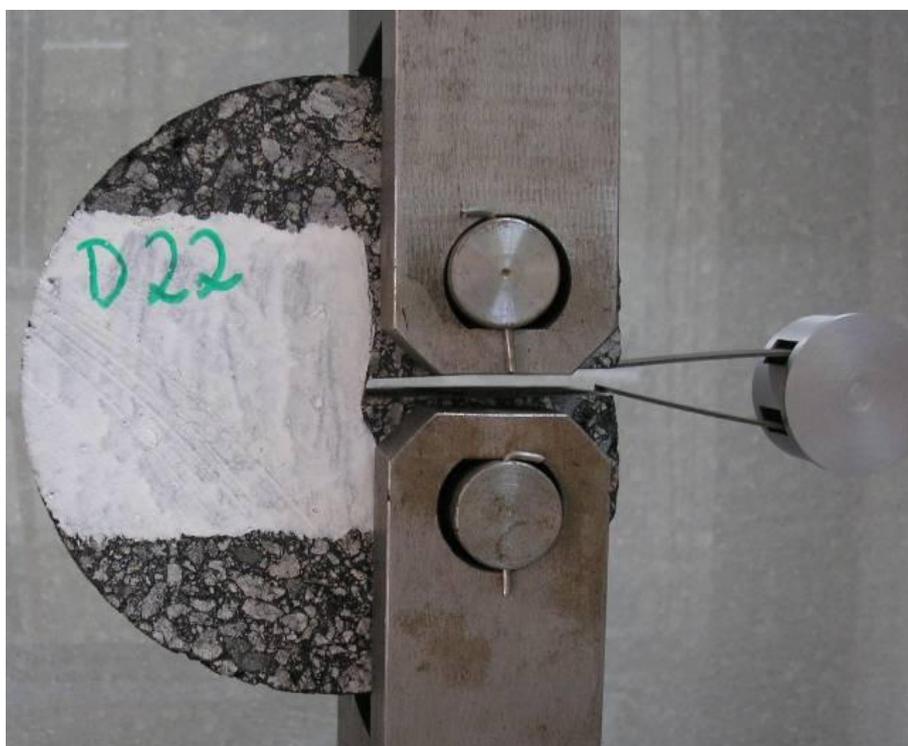


Figura 2.26: Configuração de carregamento desenvolvida nesta pesquisa.

## **3 MATERIAIS UTILIZADOS**

### **3.1 MATERIAIS**

Os primeiros corpos-de-prova utilizados para o desenvolvimento deste ensaio, para misturas asfálticas, foram provenientes de moldagens com o compactador SUPERPAVE de algumas misturas asfálticas utilizadas no Projeto Fundão, plano de recuperação da pavimentação das ruas da Cidade Universitária da UFRJ.

O interesse inicial foi vencer o desafio de preparação dos corpos-de-prova nas dimensões e características indicadas na norma ASTM D7313/07. Assim que a técnica de preparação foi estabelecida, com a criação de suportes e guias que serão explicados no capítulo 4, foram dosadas e preparadas misturas asfálticas densas, do tipo concreto asfáltico, com alguns ligantes disponíveis no Laboratório de Geotecnia – Setor Pavimentos da COPPE.

O principal objetivo neste estudo foi implantar o ensaio, resolvendo as questões práticas de interpretação da norma, adaptação da prensa, execução dos cortes dos corpos-de-prova, etc, muito mais do que explorar de forma exaustiva um grande fatorial de combinações de materiais e combinações de granulometrias e ligantes.

Cumprir esclarecer que os primeiros corpos-de-prova, utilizados nesta pesquisa, provenientes de moldagens do Projeto Fundão, foram oriundos de cinco dosagens, compostas de três tipos de ligantes diferentes e duas composições granulométricas. Nesse passo, foram utilizados e preparados para os primeiros testes de fratura em misturas asfálticas 23 corpos-de-prova.

### 3.1.1 Ligantes asfálticos

As misturas desta primeira etapa de corpos-de-prova provenientes do Projeto Fundação, compreenderam dois ligantes convencionais (PG 70-16 e PG 64-16) e um ligante modificado (Flex 65/90). As características destes ligantes estão apresentadas na Tabela 3.1, sendo que todos os dados foram fornecidos pelo Centro de Pesquisas Leopoldo Miguez de Mello – CENPES/Petrobras.

Outrossim, cumpre destacar que após realizados os primeiros testes tanto de preparação do corpo-de-prova nas especificações da norma quanto a efetiva realização do ensaio de tração em disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact*) foram realizadas mais moldagens com a utilização do compactador giratório no intuito de avaliar comparativamente as propriedades de fratura das misturas asfálticas em diferentes temperaturas (25°C e 10°C).

Para este fim as moldagens foram realizadas usando os mesmos ligantes utilizados nos primeiros testes (PG 70-16; PG 64-16 e Flex 65/90), além de um ligante modificado por borracha (Asfalto-Borracha), que teve suas características também determinadas no CENPES/Petrobras e estão apresentadas juntamente com os demais na Tabela 3.1.

Deste modo, foram utilizados nesta pesquisa quatro ligantes asfálticos, sendo dois ligantes convencionais (PG 70-16 e PG 64-16) e dois modificados por polímeros (Flex 65/90 e Asfalto-Borracha).

Tabela 3.1: Características dos ligantes asfálticos utilizados neste estudo

Ensaio	PG 70-16	PG 64-16	FLEX 65/90	Asfalto-Borracha	Método
Penetração (100g, 25°C, 5 s) (dmm)	34	43	57	69	ASTM D 5
Ponto de amolecimento (°C)	53,8	48,7	77,2	55,6	ASTM D 36
Viscosidade Brookfield (cP)					
135°C	515,00	445,00	1512,50	2387,00	ASTM D 4402
150°C	246,30	216,25	865,63	1455,00	ASTM D 4402
175°C		82,5	344,05		ASTM D 4402
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )			1,052		DNIT ME193/96

Fonte: CENPES

### 3.1.2 Agregados

Os agregados (brita 0, brita 1, pó de pedra e fíler) foram obtidos da Pedreira Sepetiba. Na Tabela 3.2 estão apresentadas às características granulométricas dos materiais pétreos empregados na produção das misturas asfálticas. Salienta-se que os agregados utilizados nesta pesquisa são de origem granítica.

Tabela 3.2: Granulometria dos materiais pétreos utilizados no presente estudo.

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Brita 0</b>	<b>Brita 1</b>	<b>Pó de pedra</b>	<b>Fíler</b>
25,00	100,0	100,0	100,0	
19,00	100,0	92,0	100,0	
12,50	100,0	35,0	100,0	
9,50	100,0	14,3	100,0	
4,75	29,0	2,6	99,7	
2,00	1,3	2,5	76,4	
1,18	1,1	2,4	60,3	
0,60	1,0	2,2	44,7	
0,30	0,9	1,9	28,9	
0,15	0,7	1,5	15,7	
0,075	0,5	1,0	7,2	100,0

Cumprir frisar que as misturas com os ligantes modificados (Flex 65/90 e Asfalto-Borracha) foram dosadas apenas com a utilização da faixa B do DNIT, tamanho nominal máximo de agregados de 19,1 mm e as misturas com os ligantes convencionais (PG 70-16 e PG 64-16) foram dosadas para as faixas B e C do DNIT, tamanho nominal máximo de 19,1 mm e 12,7 mm, respectivamente. Portanto, foram moldadas no Laboratório de Pavimentação da COPPE, para esta pesquisa, seis diferentes tipos de misturas.

Nas Tabelas 3.3 e 3.4 e nas Figuras 3.1 e 3.2 estão apresentadas as granulometrias de trabalho das misturas de 19,1 mm e 12,7 mm, respectivamente, determinados pelo CENPES.

Tabela 3.3: Granulometria de trabalho da mistura de 19,1 mm deste estudo.

Peneira (mm)	% Retida	% Passante	Potência 0,45
25,40	0,00	100,00	4,29
19,00	2,56	97,44	3,76
12,50	18,24	79,20	3,12
9,50	6,62	72,58	2,75
4,75	18,09	54,49	2,02
2,00	16,76	37,73	1,37
1,18	7,80	29,93	1,08
0,59	7,57	22,36	0,79
0,30	7,70	14,66	0,58
0,15	6,50	8,16	0,43
0,075	4,28	3,88	0,31
Fundo	3,88	0,00	

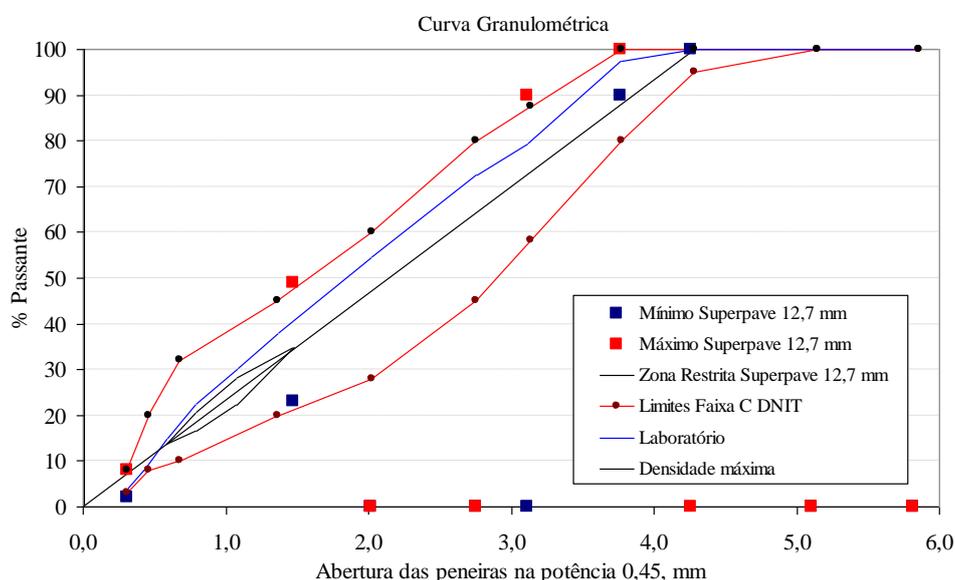


Figura 3.1: Curva granulométrica da mistura de 19,1 mm deste estudo.

Tabela 3.4: Granulometria de trabalho da mistura de 12,7 mm deste estudo.

Peneira (mm)	% Retida	% Passante	Potência 0,45
25,40	0,00	100,00	4,29
19,00	0,88	99,12	3,76
12,50	6,27	92,85	3,12
9,50	2,28	90,57	2,75
4,75	36,20	54,38	2,02
2,00	22,90	31,47	1,37
1,18	6,55	24,92	1,08
0,59	6,31	18,61	0,79
0,30	6,40	12,21	0,58
0,15	5,42	6,79	0,43
0,075	3,55	3,24	0,31
Fundo	3,24	0,00	

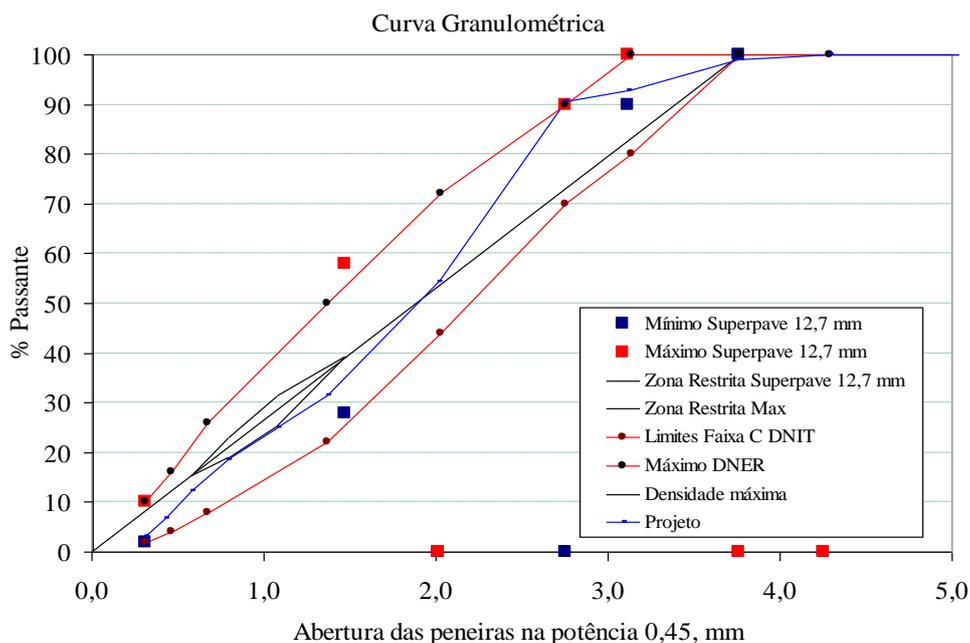


Figura 3.2: Curva granulométrica da mistura de 12,7 mm deste estudo.

### 3.1.3 Misturas asfálticas

As misturas asfálticas utilizadas nesta pesquisa foram dosadas segundo a recomendação do método de dosagem SUPERPAVE, AASHTO M323-04 e AASHTO R35-04. Essas misturas fazem parte do Projeto Fundão, parceria entre a COPPE/UFRJ e o CENPES/Petrobras.

As faixas adotadas foram as Faixas B e C do DNIT, correspondentes às faixas de tamanho nominal máximo de 19,1 mm e 12,7 mm da especificação SUPERPAVE, respectivamente. Nas Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 estão apresentados os gráficos utilizados na determinação do teor de ligante de projeto de cada uma das misturas. Destaca-se que o teor de ligante de projeto foi definido em função da percentagem do volume de vazios nas amostras em 4,0%.

As misturas dosadas foram a de ligantes modificados - Flex 65/90 (PG 70-22) e Asfalto-Borracha (PG 64-22), tamanho nominal máximo de 19,1 mm - e as dos ligantes convencionais - PG 70-16 e 64-16 com agregados de diâmetro máximo de 19,1 mm e 12,7 mm.

## Flex 65/90 (PG 70-22), 19,1 mm

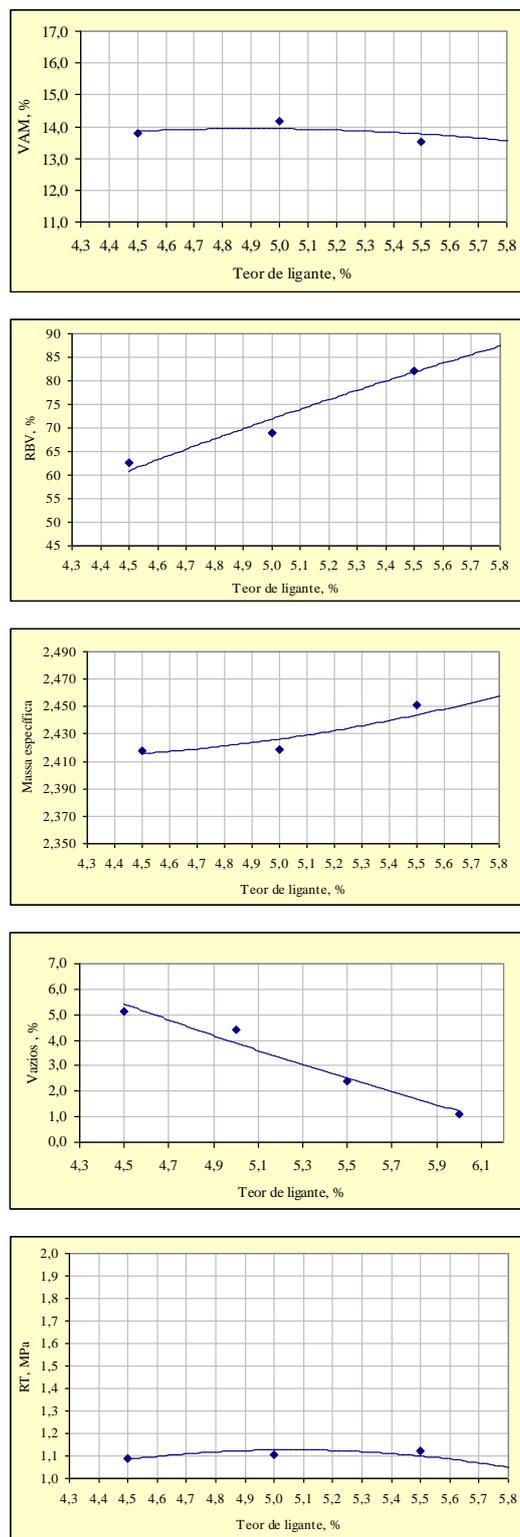


Figura 3.3: Determinação do teor de ligante de projeto Flex 65/90 (PG 70-22) (Fonte: CENPES).

## Asfalto-Borracha (PG 64-22), 19,1 mm

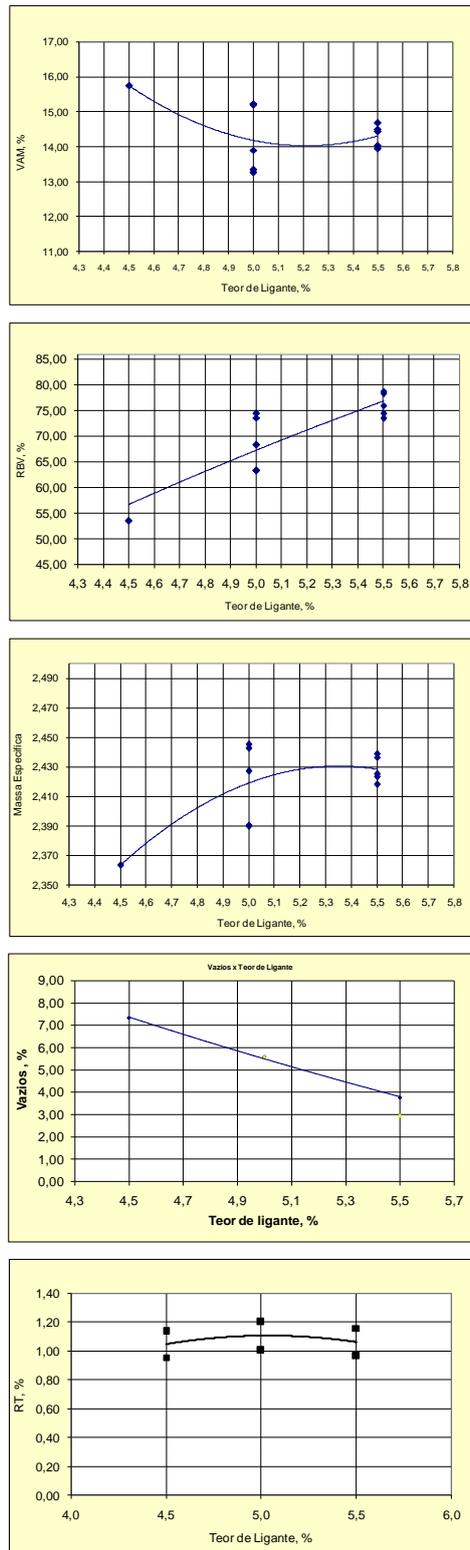
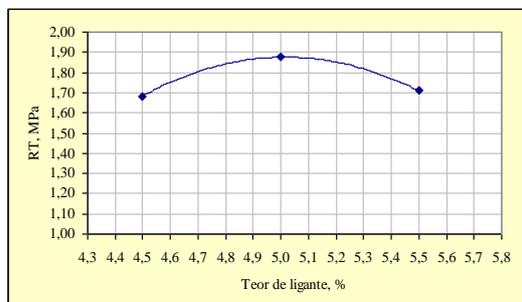
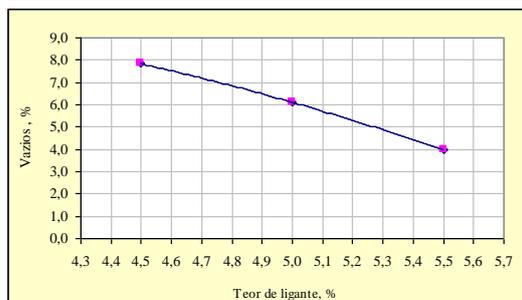
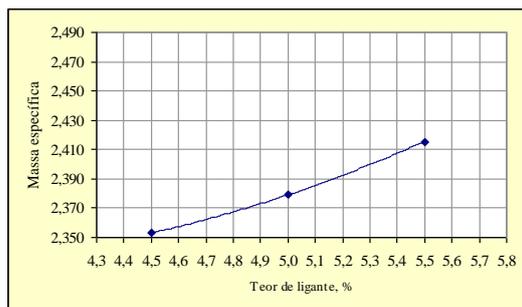
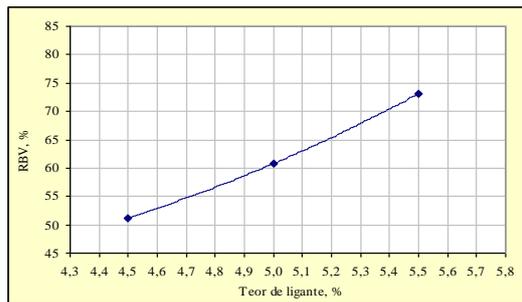
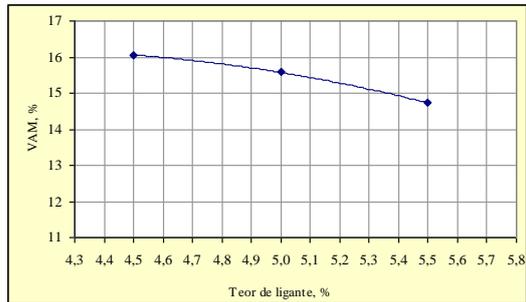


Figura 3.4: Determinação do teor de ligante de projeto Asfalto-Borracha (PG 64-22)

(Fonte: CENPES)

PG 70-16, 12,7 mm



PG 70-16, 19,1 mm

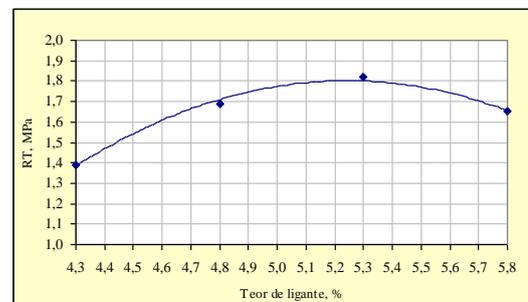
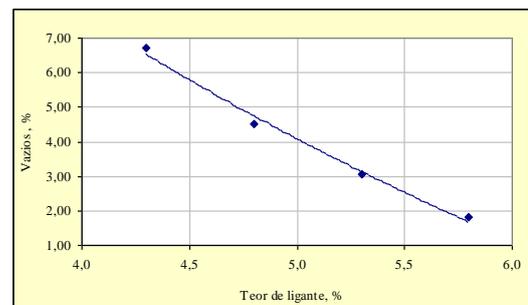
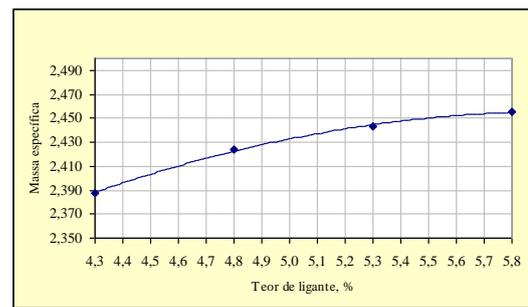
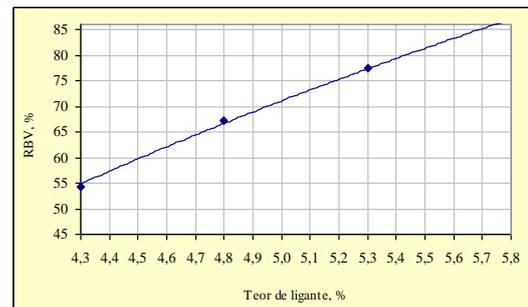
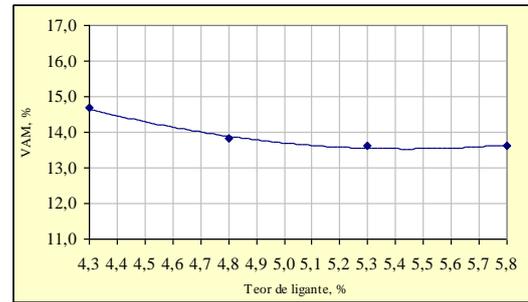
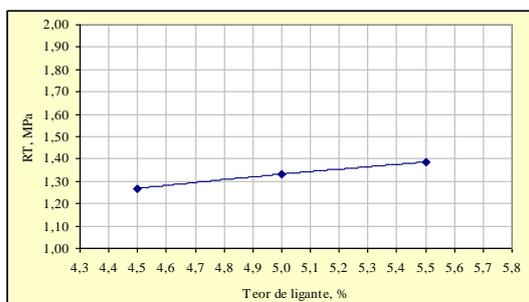
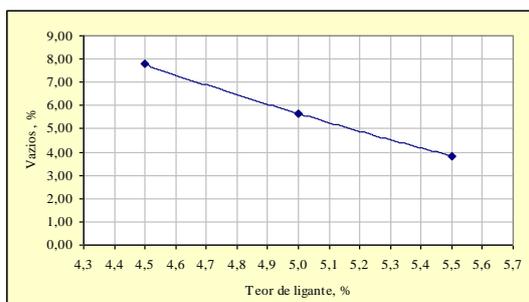
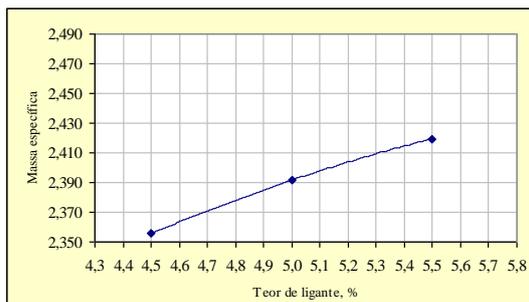
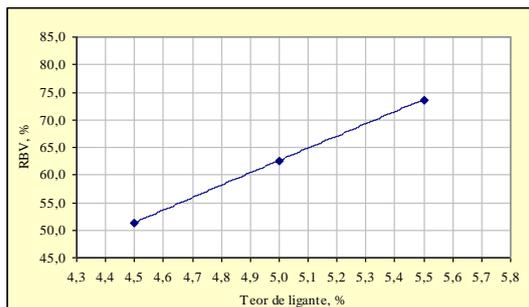
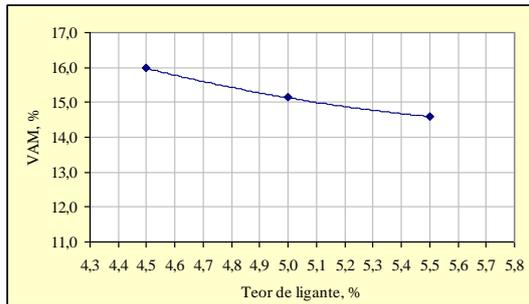


Figura 3.5: Determinação do teor de ligante de projeto PG 70-16 (Fonte: CENPES).

PG 64-16, 12,7 mm



PG 64-16, 19,1 mm

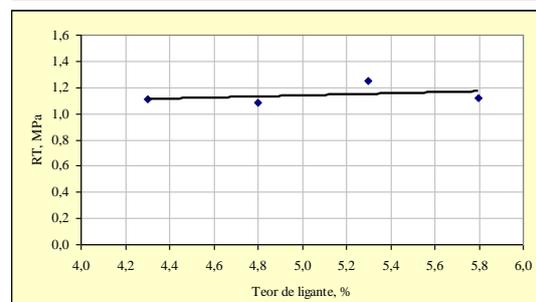
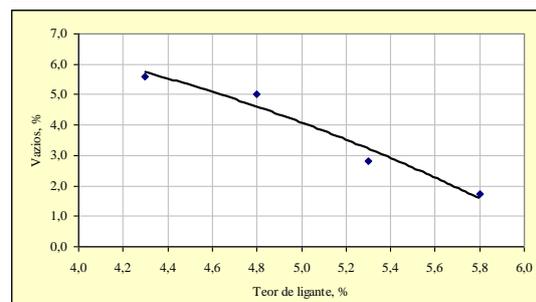
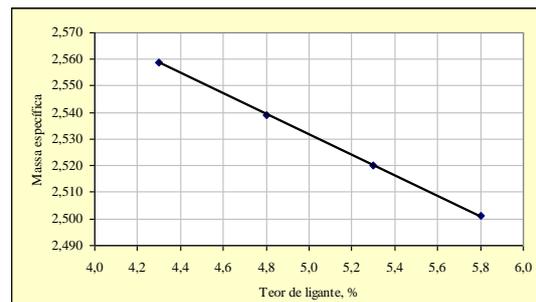
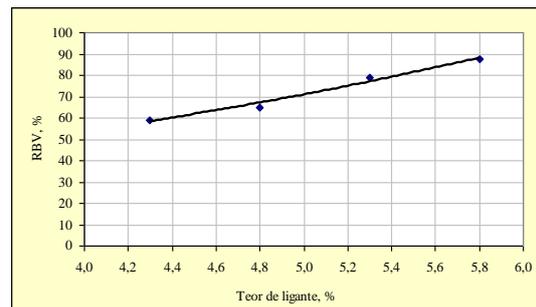
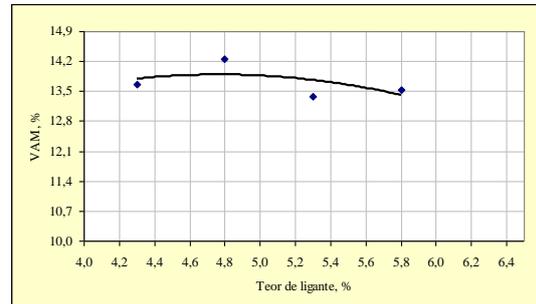


Figura 3.6: Determinação do teor de ligante de projeto PG 64-16 (Fonte: CENPES).

Salienta-se que as primeiras amostras, 23 corpos-de-prova, provenientes de moldagens do Projeto Fundação, ensaiadas nesta pesquisa foram amostras das misturas asfálticas produzidas em usina asfáltica e coletadas na pista, antes da compactação, quando da execução dos trechos experimentais na Cidade Universitária. Foram coletadas no campo, condicionadas em recipientes de 20 litros de capacidade, onde permaneceram até o transporte para o laboratório de misturas asfálticas do CENPES.

Em seguida, as misturas foram mantidas em estufa na temperatura de compactação durante aproximadamente 2 horas. Os corpos-de-prova de 150 mm de diâmetro foram moldados no compactador giratório do CENPES. Um resumo das dosagens SUPERPAVE é apresentado na Tabela 3.5, onde podem ser observados os resultados dos parâmetros volumétricos das misturas, como por exemplo, teor de ligante de projeto, volume de vazios, relação betume/vazios, vazios do agregado mineral e massa específica.

Tabela 3.5: Resumo das dosagens Superpave - Agregados Sepetiba (Fonte: CENPES).

<b>Mistura</b>	<b>Teor de Ligante (%)</b>	<b>Volume de vazios (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>MEA</b>
Flex 65/90 - 19,1 mm	5,0	4,0	72,0	14,0	2,419
PG 70-16 19,1 mm	5,0	4,0	71,0	13,7	2,430
PG 70-16 12,7 mm	5,5	4,0	73,0	14,8	2,416
PG 64-16 19,1 mm	5,0	4,0	70,0	13,9	2,530
PG 64-16 12,7 mm	5,5	4,0	73,6	14,6	2,420

Em destaque na Tabela 3.6 estão indicadas às características dos primeiros corpos-de-prova utilizados neste estudo, em número de 23 corpos-de-prova.

Tabela 3.6: Resumo das características dos primeiros corpos-de-prova moldados no CENPES e utilizados neste estudo.

Mistura	CP	Teor de ligante, %	Diâmetro, mm	Altura, mm	MEA
Flex 65/90 19,1 mm	10	5,0	150,00	108,53	2,447
	12	5,0	150,00	108,26	2,459
	13	5,0	150,00	108,61	2,454
	17	5,0	150,00	108,68	2,439
	19	5,0	150,00	108,32	2,458
PG 70-16 19,1 mm	26	5,0	150,00	107,53	2,457
	27	5,0	150,00	107,45	2,465
	34	5,0	150,00	106,23	2,473
	37	5,0	150,00	106,29	2,477
	38	5,0	150,00	107,13	2,461
PG 70-16 12,7 mm	11	5,5	149,82	108,38	2,446
	18	5,5	150,00	108,47	2,447
	22	5,5	149,86	108,28	2,449
	24	5,5	150,05	108,67	2,440
PG 64-16 19,1 mm	7	5,0	149,84	108,66	2,460
	8	5,0	149,73	106,45	2,487
	14	5,0	150,07	106,73	2,475
	23	5,0	150,19	108,38	2,468
PG 64-16 12,7 mm	16	5,5	150,31	108,48	2,445
	22	5,5	150,21	108,69	2,448
	23	5,5	150,22	110,01	2,452
	25	5,5	150,12	109,43	2,437
	27	5,5	150,09	109,43	2,425

Estes primeiros corpos-de-prova com diâmetro de 150 mm, moldados no compactador giratório, apresentaram altura de aproximadamente 110 mm. Com isso salienta-se que cada corpo-de-prova acima resultou somente em um nas dimensões para a realização do ensaio de tração em disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact*).

Posteriormente à preparação destas primeiras amostras e execução dos primeiros ensaios de fratura, foram moldadas pelo autor da presente pesquisa amostras adicionais em laboratório. Podem ser observados na Figura 3.7 aspectos das moldagens, seguindo as mesmas recomendações da Metodologia SUPERPAVE, mas com espessuras maiores, utilizando-se um compactador giratório, que pode ser visualizado na Figura 3.8.



(a) Mistura de agregados em estufa

(b) Mistura asfáltica em condicionamento

Figura 3.7: Preparação de corpos-de-prova em laboratório.



Figura 3.8: Compactador giratório utilizado na moldagem dos corpos-de-prova no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ.

Salienta-se que nesta etapa foram moldados no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ, 3 corpos-de-prova para cada mistura, totalizando 18 corpos-de-prova. As misturas foram reproduzidas igualmente, como apresentado neste capítulo, destacando-se que as curvas granulométricas de tamanho nominal máximo de 19,1 mm e 12,7 mm e

os tipos de ligantes empregados (Flex 65/90, Asfalto-Borracha, PG 70-16 e PG 64-16) nestas moldagens foram os mesmos utilizados nos primeiros corpos-de-prova provenientes das misturas dosadas para o Projeto Fundão e apresentados neste capítulo.

Os materiais foram condicionados em estufa durante 2 horas antes da compactação. Apresenta-se na Tabela 3.7 um resumo dos parâmetros volumétricos médios das misturas moldadas no Laboratório de Pavimentação, como por exemplo, teor de ligante de projeto, volume de vazios, a relação betume/vazios, vazios do agregado mineral e massa específica.

Tabela 3.7: Resumo das características médias dos corpos-de-prova moldados no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ.

<b>Mistura</b>	<b>Teor de Ligante (%)</b>	<b>Volume de vazios (%)</b>	<b>RBV (%)</b>	<b>VAM (%)</b>	<b>MEA</b>
Flex 65/90 - 19.1 mm	5,0	4,0	72,2	14,2	2,478
Asfalto-Borracha - 19.1 mm	5,4	4,0	71,9	15,0	2,456
PG 70-16 19,1 mm	5,0	4,0	71,4	13,9	2,479
PG 70-16 12,7 mm	5,5	4,0	73,0	14,6	2,470
PG 64-16 19,1 mm	5,0	4,0	70,8	13,7	2,471
PG 64-16 12,7 mm	5,5	4,0	73,6	14,3	2,464

Como destacado anteriormente, nesta etapa foram moldados 3 corpos-de-prova para cada mistura, totalizando assim, 18 corpos-de-prova preparados em laboratório. Os corpos-de-prova foram moldados com altura de aproximadamente 140 mm e diâmetro de 150 mm.

Observa-se que estes corpos-de-prova foram moldados com altura superior aos apresentados na primeira fase, com o objetivo principal de se obter de cada cilindro moldado em laboratório dois corpos-de-prova em forma de disco para a realização do ensaio de tração em disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact*), conforme será apresentado no capítulo 4. Com isso, dos 18 cilindros moldados em laboratório para as seis misturas estudadas nesta pesquisa, foram obtidos 36 corpos-de-prova em forma de disco, como pode ser observado na Figura 3.9.



Figura 3.9: Amostras em forma de disco preparadas para a realização do ensaio no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ desta pesquisa.

Na Tabela 3.8 estão as características dos corpos-de-prova em forma de disco com fenda, resultantes da moldagem em laboratório, e da serragem de dois discos por cilindro, preparados para a realização do ensaio de fratura em disco circular utilizados neste estudo. Os nomes dos corpos-de-prova se referem a este par de discos obtido a partir de cada um dos três cilindros moldados para cada mistura ligante – agregado.

Percebe-se que durante a serragem houve pequena variação de altura entre os discos e também há variação de massa específica entre cada disco de um mesmo corpo-de-prova preparado no giratório e entre os três da mesma mistura, mas dentro de limites aceitáveis. A variação de densidade ao longo de um corpo-de-prova é esperada devido à variação de distribuição de agregados e vazios.

Tabela 3.8: Resumo das características dos corpos-de-prova em forma de disco moldados no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ.

Mistura	CP	Teor de ligante, %	Diâmetro, mm	Altura, mm	MEA
Flex 65/90 - 19,1 mm	A11	5,0	150,05	52,23	2,472
	A12	5,0	150,16	48,44	2,481
	A21	5,0	150,31	51,48	2,473
	A22	5,0	149,96	50,48	2,486
	A31	5,0	150,09	52,83	2,475
	A32	5,0	150,33	52,64	2,479
Asfalto-Borracha - 19,1 mm	F11	5,4	150,02	49,52	2,473
	F12	5,4	150,02	50,79	2,448
	F21	5,4	150,09	51,37	2,467
	F22	5,4	150,09	50,78	2,448
	F31	5,4	150,11	51,58	2,442
	F32	5,4	150,11	49,49	2,457
PG 70-16 - 19,1 mm	B11	5,0	150,14	50,11	2,479
	B12	5,0	150,04	52,01	2,481
	B21	5,0	150,24	49,60	2,474
	B22	5,0	150,05	50,75	2,489
	B31	5,0	150,19	51,57	2,472
	B32	5,0	150,46	52,70	2,479
PG 70-16 - 12,7 mm	C11	5,5	150,01	54,65	2,468
	C12	5,5	150,09	55,04	2,459
	C21	5,5	150,02	53,17	2,469
	C22	5,5	150,35	52,65	2,478
	C31	5,5	150,01	50,03	2,466
	C32	5,5	150,19	50,64	2,478
PG 64-16 - 19,1 mm	E11	5,0	150,08	51,66	2,463
	E12	5,0	150,02	49,61	2,481
	E21	5,0	150,15	51,53	2,477
	E22	5,0	150,01	50,04	2,463
PG 64-16 - 12,7 mm	D11	5,5	150,05	52,87	2,460
	D12	5,5	150,22	51,41	2,465
	D21	5,5	150,23	51,94	2,463
	D22	5,5	150,16	49,76	2,473
	D31	5,5	150,06	48,59	2,461
	D32	5,5	150,10	52,43	2,465

## 4 MÉTODO DE ENSAIO DE TRAÇÃO

### 4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO EM DISCO CIRCULAR COM FENDA (*DISK-SHAPED COMPACT*)

Neste trabalho foi desenvolvido e utilizado o ensaio de tração em disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact*), ou DC(T), para determinar as propriedades de fratura de concretos asfálticos. Como comentado, as dosagens das misturas foram realizadas através da metodologia Superpave. Os corpos-de-prova foram moldados utilizando compactador giratório, e preparados seguindo as dimensões e configuração apresentadas na especificação da ASTM D7313/07.

Antes da realização do ensaio de fratura utilizando-se a configuração do corpo-de-prova em forma de disco circular com fenda foi necessário desenvolver procedimentos para a preparação dos corpos-de-prova visto que a Norma ASTM é bastante sucinta neste aspecto. Todo este desenvolvimento que vai ser descrito a seguir, contou com o apoio do Engenheiro Álvaro Dellê Vianna, e foi realizado no Setor de Pavimentos do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

#### 4.1.1 Preparação dos Corpos-de-Prova

A fase de preparação dos corpos-de-prova para a realização do ensaio consiste na execução dos furos de carregamento e a realização dos cortes da fenda (trinca inicial) e do faceamento para acoplamento com o *clip-on-gage*. Os corpos-de-prova foram moldados com altura suficiente (em torno de 11 cm) para que cada um produzisse dois corpos-de-prova (discos compactos) a serem ensaiadas no teste de fratura.

Com a moldagem executada, a primeira tarefa realizada foi o faceamento das amostras, pois os corpos-de-prova apresentavam altura superior ao indicado na configuração prescrita na especificação do ensaio. Destaca-se que, a altura do corpo-de-prova deve ser de  $50 \pm 5$  mm. O faceamento fez-se serrando aproximadamente 2,5 mm da face do

corpo-de-prova inicialmente moldado, de ambos os lados, assim, restando o terço central, que foi dividido ao meio. O corte para o faceamento das amostras foi realizado no Setor de Pavimentos do Laboratório de Geotecnia. Na Figura 4.1 pode-se observar uma fase da realização do faceamento, assim como alguns corpos-de-prova já serrados.



(a) Corte das faces do corpo-de-prova



(b) Corpos-de-prova faceados

Figura 4.1: Execução do faceamento nos corpos-de-prova.

Na realização dos cortes para a fabricação dos corpos-de-prova (execução do faceamento das amostras) foi utilizada, como recomendado pela norma e pela literatura, uma serra com disco diamantado, sempre com a injeção de água, fator relevante para minimizar os danos.

A etapa seguinte consistiu na realização dos furos de carregamento. Várias tentativas experimentais foram necessárias visto que a norma não é clara neste ponto, com bastante consumo de tempo, até atingir um bom desempenho, que será mostrado a seguir passo a passo.

Os furos de carregamento devem ser produzidos a  $90\pm 5^\circ$  em relação à face do corpo-de-prova e sua posição não deve diferir mais do que 5 mm das posições especificadas. Para atingir esta precisão, no início da pesquisa foram realizadas várias tentativas de obter a melhor configuração de operar a “broca” (o equipamento escolhido foi uma furadeira – tipo de bancada) é à forma mais eficaz de realizar os furos de maneira correta. Um detalhe muito importante é manter a verticalidade dos furos para proporcionar bom ajuste do encaixe das garras da prensa durante o ensaio propriamente dito e não

desenvolver excentricidade de carregamento, sendo que corpos-de-prova com furos não paralelos entre si devem ser descartados; por não ser possível acoplar na prensa de ensaio com precisão.

Após vários testes, concluiu-se que a maneira mais eficaz foi a utilização de uma furadeira grande, do tipo bancada, onde se pode controlar a verticalidade e horizontalidade da mesa, garantindo também que o corpo-de-prova e o gabarito fique preso com segurança.

O corpo-de-prova já com a espessura desejada de  $50\pm 5$  mm, foi envolto com uma fita adesiva, conforme se pode observar na Figura 4.2, e, posteriormente, fixado no interior de um molde de compactação tri-partido originalmente utilizado para a realização do ensaio de CBR. Todos estes cuidados foram descobertos após a perda de muitos corpos-de-prova!

Nessa etapa da realização dos furos de carregamento desenvolveu-se também um gabarito, com a função de manter a posição dos furos dentro das recomendações da especificação. Esse gabarito, confeccionado em ferro fundido apresenta todas as dimensões descritas na Norma ASTM, e assim pode ser colocado sobre o corpo-de-prova e preso juntamente com o molde tri-partido, tornado-se assim, uma “peça única”, solidária.

Posteriormente, essa composição (peça única) foi levada à furadeira de bancada para a realização dos furos de carregamento. Com este aparato, desenvolvido nesta pesquisa, foi possível atingir a verticalidade na execução dos furos e esta etapa foi vencida com sucesso. Pode-se observar na Figura 4.2, a seqüência completa das tarefas descritas para a realização dos furos de carregamento nos corpos-de-prova de misturas asfálticas produzidos nesta pesquisa.

Após as etapas de faceamento das amostras e realização dos furos de carregamento, a etapa final da preparação do corpo-de-prova para a realização do ensaio de fratura consiste na execução da fenda (trinca inicial), e também, na preparação da face do corpo-de-prova para o acoplamento ao *clip-on-gage*.



(a) corpo-de-prova sendo envolvido com fita adesiva



(b) colocação do corpo-de-prova dentro do molde



(c) colocação do gabarito de realização dos furos



(d) corpo-de-prova e gabarito fixo dentro do molde – peça única



(e) injeção de água durante a realização dos furos



(f) corpo-de-prova com furos já realizados

Figura 4.2: Etapas de preparação dos furos de carregamento nos corpos-de-prova no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ – procedimentos, equipamentos e processos desenvolvidos nesta pesquisa.

Foram várias as tentativas infrutíferas de se realizar, primeiramente, a fenda e, posteriormente, os furos de carregamento. Foram muitas as dificuldades de projetar gabaritos e moldes para a execução destas tarefas. Ressalta-se o grande consumo de

tempo para a preparação do corpo-de-prova, em função das várias etapas a realizar: faceamento, furos de carregamento e execução da trinca inicial.

Esta tarefa além das outras iniciais, da moldagem e posterior preparação do corpo-de-prova que obedeça a todos os requisitos da norma ASTM D7313, foi projetada e desenvolvida no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. Um gabarito que visa prender o corpo-de-prova de maneira segura, para realização da trinca inicial ajudou bastante a não “perder” corpos-de-prova no meio do processo. Salienta-se que a serra utilizada para o corte da trinca inicial foi a mesma que realizou o faceamento das amostras na primeira etapa, isto é, uma serra de disco diamantado com injeção de água. Após vários testes e ajustes com a peça (gabarito) juntamente com o “carrinho” da serra, a etapa de realização da trinca inicial foi vencida com sucesso.

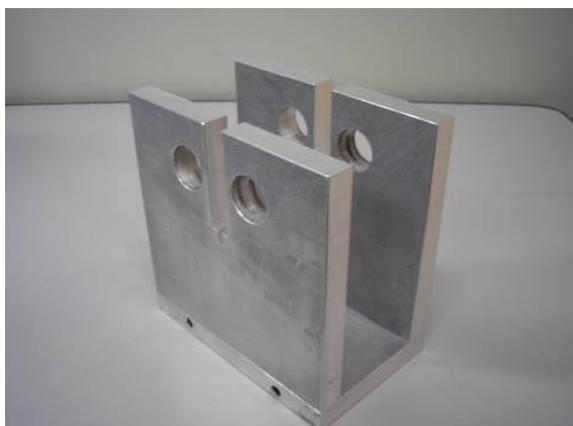
Após a realização dos furos de carregamento, os corpos-de-prova são presos no gabarito projetado no setor de pavimentos e fabricado na oficina mecânica do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, pelo Engenheiro Álvaro Dellê Vianna, destinado à realização do corte da fenda. Pode-se observar na Figura 4.3, o gabarito desenvolvido e construído em alumínio e os pinos em latão, nesta pesquisa. Destaca-se que esse mesmo gabarito também é utilizado para a execução da face onde é acoplado o “*clip-on-gage*”.



(a) fabricação do gabarito na oficina mecânica



(b) partes individuais do gabarito



(c) gabarito montado



(d) gabarito com os pinos de fixação do corpo-de-prova

Figura 4.3: Preparação do gabarito para execução dos furos nos corpos-de-prova, na oficina mecânica do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Para dar prosseguimento à execução da trinca inicial, o corpo-de-prova é colocado entre as paredes de alumínio do gabarito e preso através dos pinos de fixação. Posteriormente, o mesmo é fixado no carrinho da serra para a execução do corte. O gabarito possui o entalhe inicial e também, um “entalhe guia”, esse com a função de ajustar o disco de corte diamantado antes da colocação do corpo-de-prova. O entalhe no gabarito foi desenvolvido para garantir a verticalidade da trinca inicial em relação à face da amostra. Com isso, todos os corpos-de-prova teoricamente serão idênticos em termos de dimensões.

Na Figura 4.4 observam-se todos os passos necessários e desenvolvidos nesta pesquisa para a execução da trinca inicial.



(a) gabarito e pinos para fixação do corpo-de-prova



(b) pinos e corpo-de-prova em posição



(c) fixação e ajuste do gabarito ao carrinho da serra



(d) corpo-de-prova sendo serrado, com injeção de água

Figura 4.4: Preparação do corpo-de-prova para execução da trinca inicial no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, procedimentos desenvolvidos nesta pesquisa.

Na etapa seguinte e final, o gabarito é deitado sobre o carrinho da serra e é executado o faceamento da amostra, que servirá para a fixação das placas pequenas e posicionamento do *clip-on-gage*. A execução da face do corpo-de-prova pode ser observada na Figura 4.5, utilizando o mesmo gabarito desenvolvido nesta pesquisa para a realização da trinca inicial.



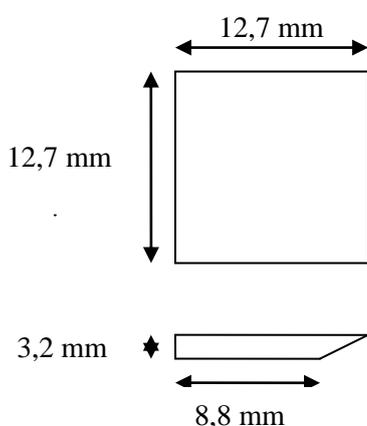
(a) configuração para o corte da face

(b) corpo-de-prova com corte executado

Figura 4.5: Execução do faceamento do corpo-de-prova no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Um modelo de *clip-on-gage* que pode ser utilizado para medir o deslocamento da abertura da trinca através de dois pontos fixos é o que possui a capacidade de medir inicialmente 5 mm de abertura. O *clip-on-gage* deve estar preso firmemente aos pontos fixos na amostra, contudo deve ter a habilidade de ser liberado se ocorrer do corpo-de-prova se romper completamente.

Para o acoplamento do *clip-on-gage* no corpo-de-prova duas placas pequenas de alumínio devem ser fixadas na face da amostra (corpo-de-prova), conforme configuração e dimensões propostas na norma e, apresentada na Figura 4.6 e na Figura 4.7, desenvolvidas nesta pesquisa.

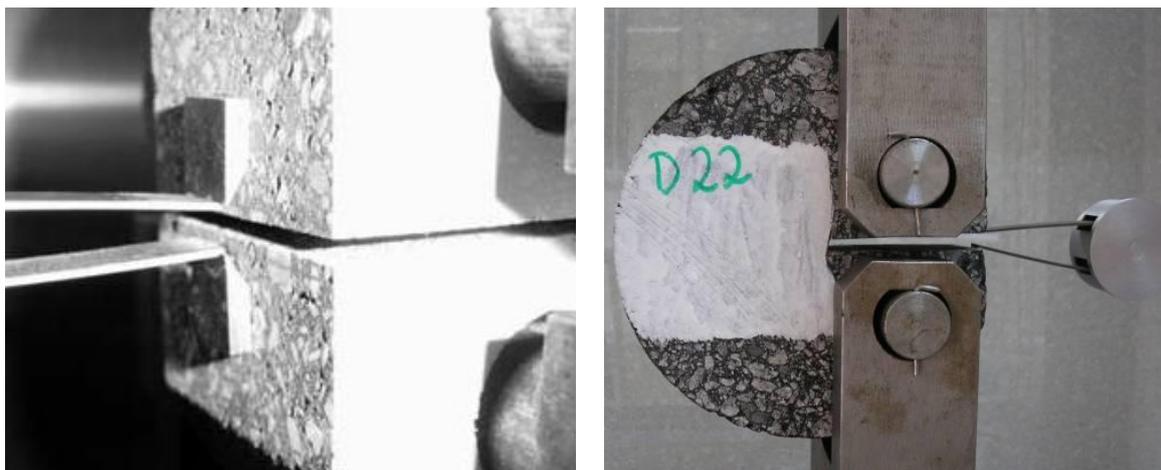


(a) Dimensões da placa



(b) Detalhe da placas coladas na amostra

Figura 4.6: Detalhes das placas fixadas na amostra para acoplamento do *clip-on-gage*.



(a) Detalhe do acoplamento do *clip-on-gage*

(b) Detalhe do *clip-on-gage* acoplado no corpo-de-prova

Figura 4.7: Acoplamento do *clip-on-gage* no corpo-de-prova.

Na Figura 4.8 apresenta-se a configuração de carregamento desenvolvida nesta pesquisa em função da prensa disponível, observa-se o corpo-de-prova preparado segundo a norma, acoplado na prensa de carregamento do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. As garras de carregamento foram projetadas e desenvolvidas nesta pesquisa, para a efetivação da realização do ensaio.

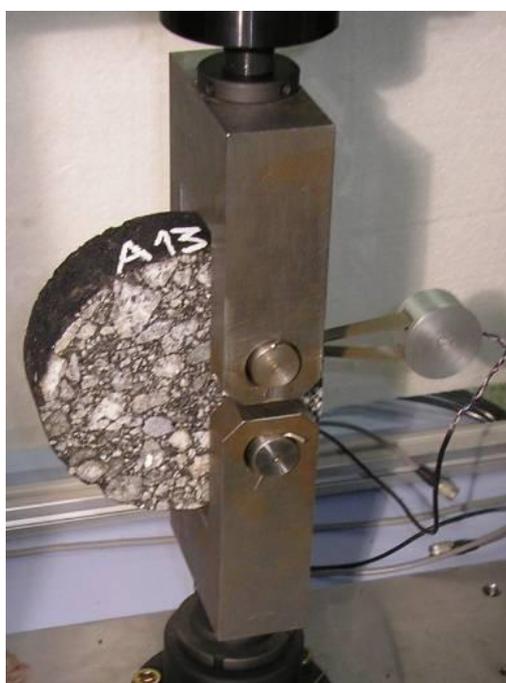


Figura 4.8: Configuração de carregamento desenvolvida nesta pesquisa – corpo-de-prova, garras, *clip-on-gage*.

#### 4.1.2 Equipamento e Execução do Ensaio de Fratura

Os primeiros ensaios de tração em disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact*) em misturas asfálticas, realizados no Brasil nesta pesquisa foram executados no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ sob coordenação do Professor Dr. Romildo Dias Toledo. Foi disponibilizado o laboratório e a equipe técnica do mesmo para o conhecimento da prensa e aparato de aquisição de dados.

Os ensaios de fratura foram realizados em uma prensa Shimadzu Autograph AG-X 100 kN, com uma célula de carga do tipo SLFL de 100 kN, como pode ser observado na Figura 4.9.

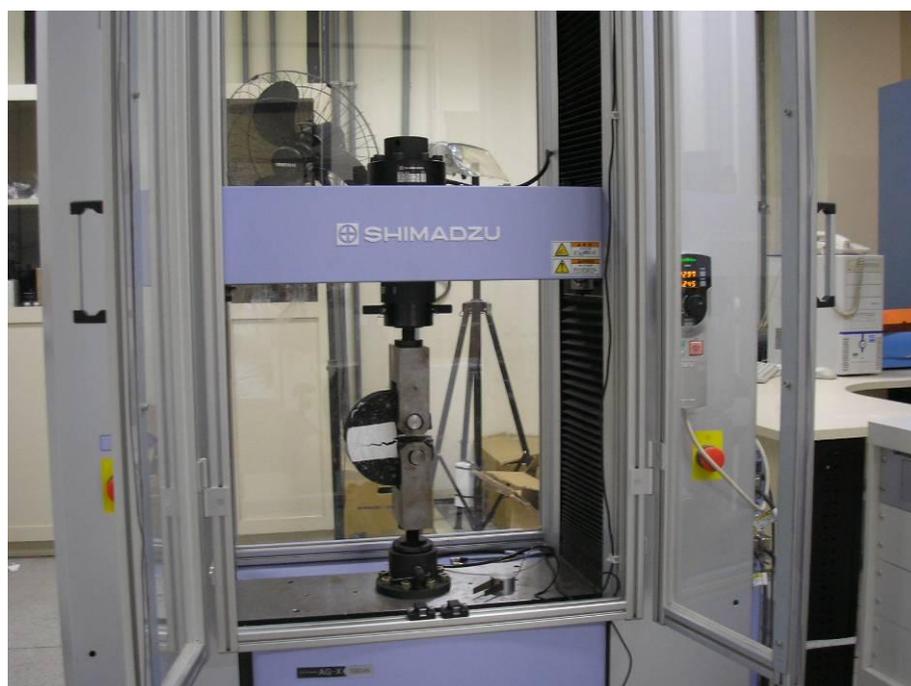


Figura 4.9: Equipamento utilizado na realização dos ensaios de fratura no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ.

O *clip-on-gage* utilizado na realização dos ensaios de fratura para o controle da velocidade de carregamento e obtenção das leituras de deslocamento da abertura da trinca é de modelo TCK 3-10 M682801, da mesma marca da prensa, Shimadzu. Destaca-se que o mesmo foi acoplado no corpo-de-prova após terem sido fixadas as placas e assim que o corpo-de-prova estivesse posicionado nas garras de carregamento.

O mesmo era retirado do corpo-de-prova, findo o ensaio, ou seja, quando a força era diminuída de 0,1 kN. Observa-se na Figura 4.10 o *clip-on-gage* utilizado nesta pesquisa.



Figura 4.10: *Clip-on-gage* utilizado para a realização dos ensaios de fratura no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ.

Para a realização dos ensaios de fratura foi necessário desenvolver uma garra para fixar o corpo-de-prova na prensa de carregamento, conforme recomendado pela ASTM D7313/07. Nesta pesquisa foram utilizadas duas garras por ensaio para proporcionar a fratura do corpo-de-prova. Com isso, foi projetada na presente pesquisa e fabricada no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ duas garras de carregamento, visando adequar a prensa para a realização do ensaio, conforme projeto apresentado na Figura 4.11 (vistas) e na Figura 4.12 (cortes).

Na Figura 4.13 pode ser observada uma perspectiva das garras acopladas ao corpo-de-prova, bem como, os pinos de carregamento e corpo-de-prova preparado nas prescrições da norma.

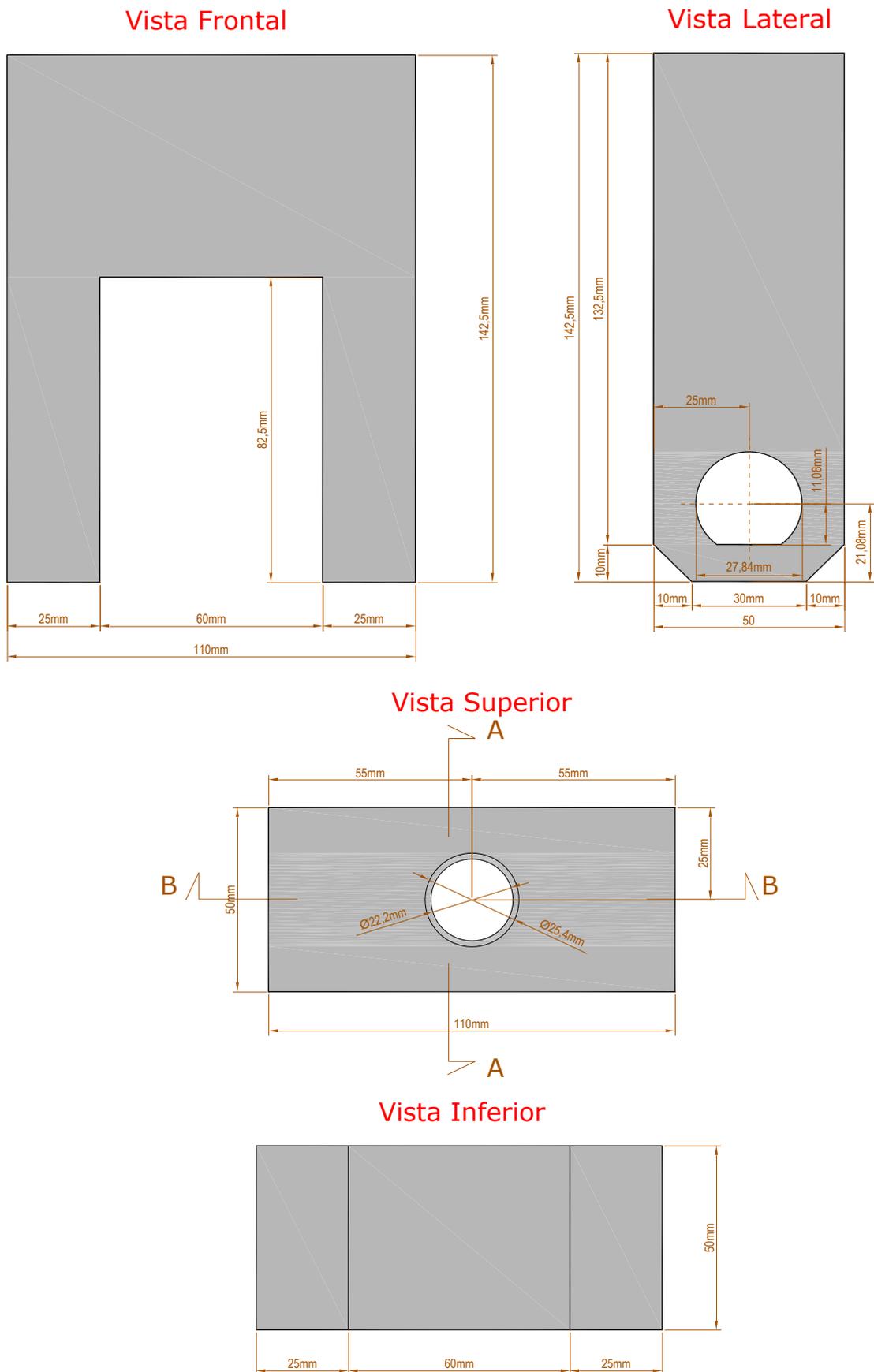
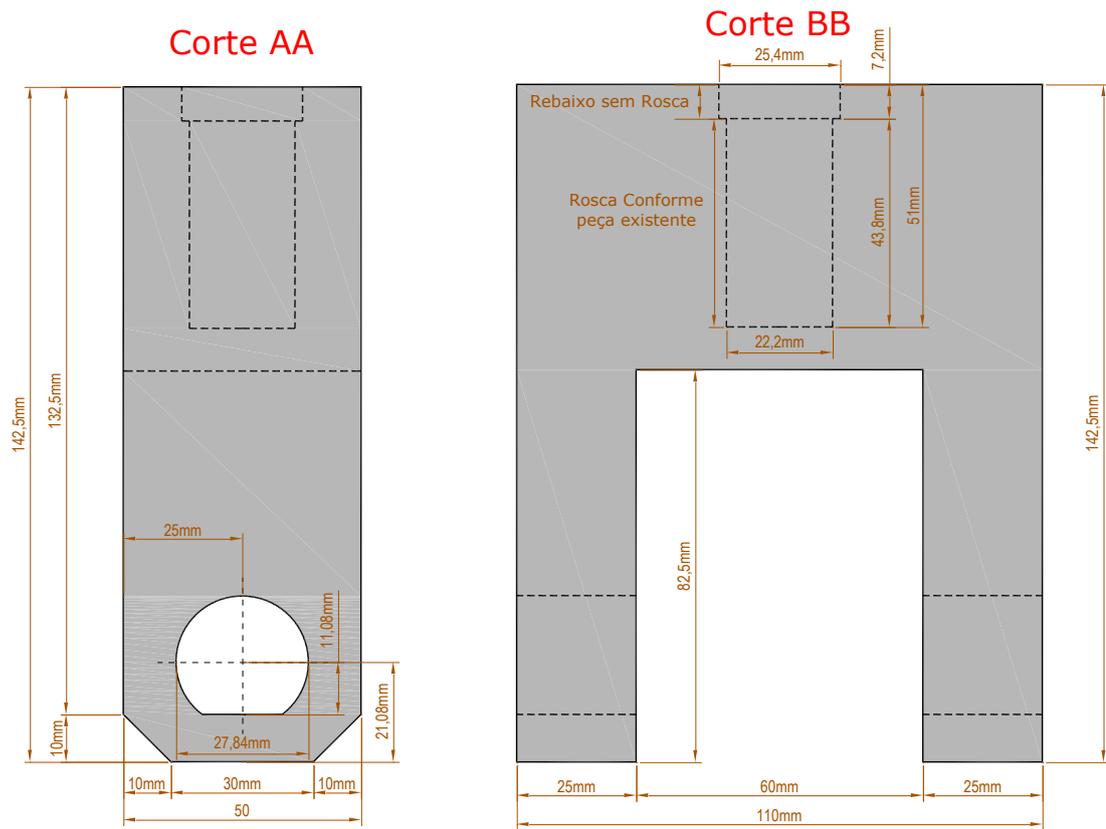
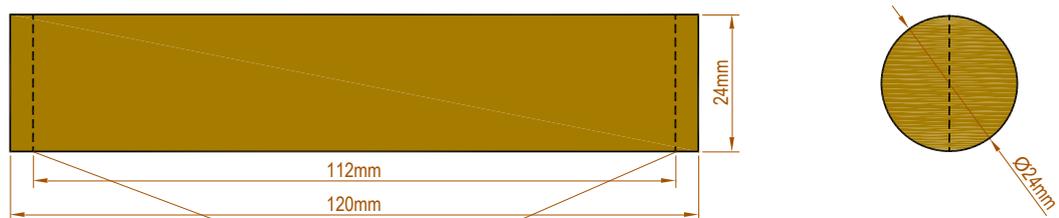


Figura 4.11: Projeto (vistas) da garra de acoplamento à prensa de ensaio.



### Pino com Chavetas nas extremidades



Posição das chavetas:  
 Esta posição das chavetas deve ser  
 deste ponto para as extremidades.  
 A extremidade livre interna entre  
 chavetas deve ser de 112mm

Figura 4.12: Projeto (cortes) da garra de acoplamento à prensa de ensaio de fratura.

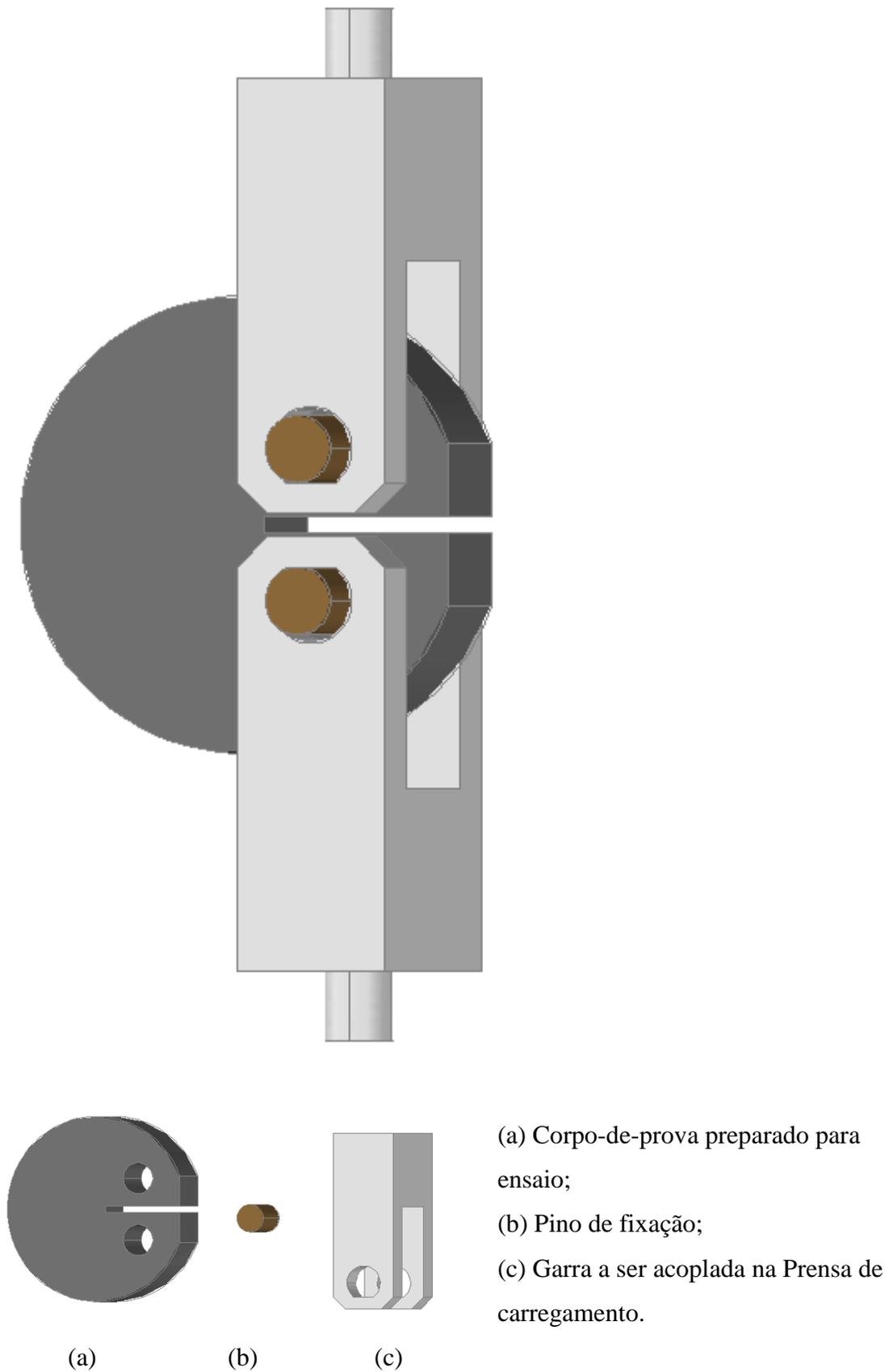


Figura 4.13: Projeto (perspectivas) da garra de acoplamento à prensa de ensaio e descrição de cada peça.

Foi investido muito tempo para o desenvolvimento das garras de carregamento, visto que a norma ASTM D 7313/07 traz em sua descrição um projeto bastante restrito de exemplo de garra. Destaca-se que a garra descrita na norma certamente é para ser utilizada em um tipo de equipamento apenas, sendo que cada marca (tipo) de prensa deverá ter seu próprio aparato de ensaio.

Com isso, foram projetadas e desenvolvidas nesta pesquisa as garras apresentadas nas figuras 4.11 a 4.13, desenvolvidas no Setor de Geotecnia da COPPE/UFRJ, pelo autor e pelo Engenheiro Álvaro Dellê Vianna, especialmente para serem utilizadas na prensa Schimadzu do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. Observam-se na Figura 4.14 as garras projetadas juntamente com o corpo-de-prova na configuração da norma.

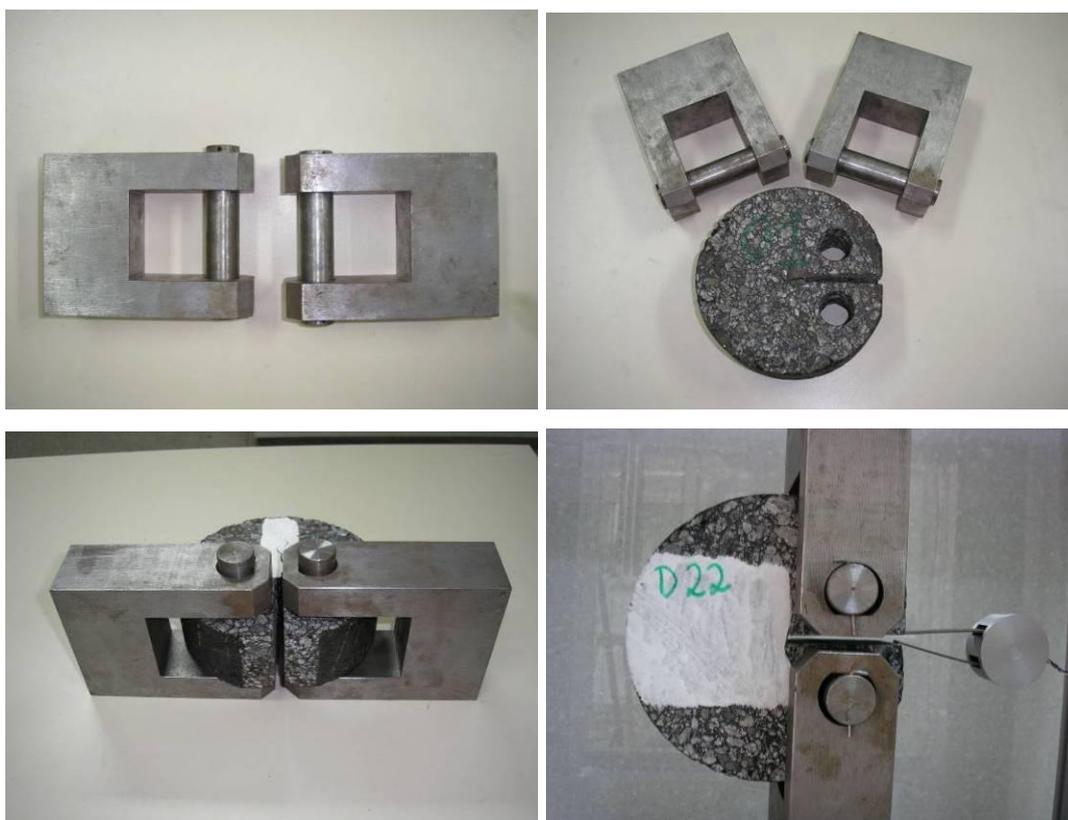


Figura 4.14: Garras fabricadas para fixação do corpo-de-prova na prensa de ensaio.

Vencida a preparação dos corpos-de-prova, antes da realização dos ensaios à temperatura de 25°C, os mesmos foram mantidos em uma câmara (sala) com temperatura controlada durante um período de, no mínimo, de 16 horas.

Em relação aos ensaios realizados à temperatura de 10°C, os corpos-de-prova foram colocados em uma câmara com controle de temperatura, localizada no Laboratório de Estruturas, onde as amostras ficaram condicionadas no mínimo por 24 horas antes da realização do ensaio - Figura 4.15.



Figura 4.15: Câmara de condicionamento das amostras para a realização do ensaio a 10°C.

Para a calibração da câmara de condicionamento à temperatura de 10°C, foi utilizado um corpo-de-prova especial, no qual se introduziu um termopar, transdutor de temperatura, com o intuito de avaliar o tempo necessário de condicionamento para atingir a temperatura de 10°C do ensaio - Figura 4.16, bem como quanto tempo demandaria para que a temperatura do corpo-de-prova diminuísse consideravelmente. Destaca-se que este termopar foi introduzido no corpo-de-prova após a realização da

moldagem através da furação com broca diamantada e posterior fechamento com massa asfáltica.



Figura 4.16: Corpo-de-prova com Termopar para controle da temperatura dentro da sala de condicionamento.

Os vários testes de calibração foram realizados, sempre de maneira a adequar o tempo necessário para o equilíbrio da temperatura interna da amostra, bem como, o tempo disponível para a realização do ensaio, sem que a temperatura variasse.

Primeiramente, foram medidas várias vezes o tempo necessário para que o corpo-de-prova, na maioria das vezes em temperatura ambiente ( $25^{\circ}\text{C}$ ), atingisse a temperatura desejada; nesta pesquisa a temperatura visada foi de  $10^{\circ}\text{C}$ . Com isso, observou-se que a cada quatro (04) horas de condicionamento, dentro da câmara, a temperatura na amostra baixava aproximadamente  $5^{\circ}\text{C}$ , sendo que passadas aproximadamente 10 horas de condicionamento a temperatura do corpo-de-prova entrava em equilíbrio constante, temperatura entre  $8^{\circ}\text{C}$  e  $10^{\circ}\text{C}$ . Após esta etapa a amostra foi confinada dentro de uma caixa térmica, como pode ser observado na Figura 4.17, e levada por diversas vezes até

a prensa de carregamento, deixando-a exposta ao ambiente, atendo-se ao tempo disponível para a realização do ensaio sem variação da temperatura do corpo-de-prova.

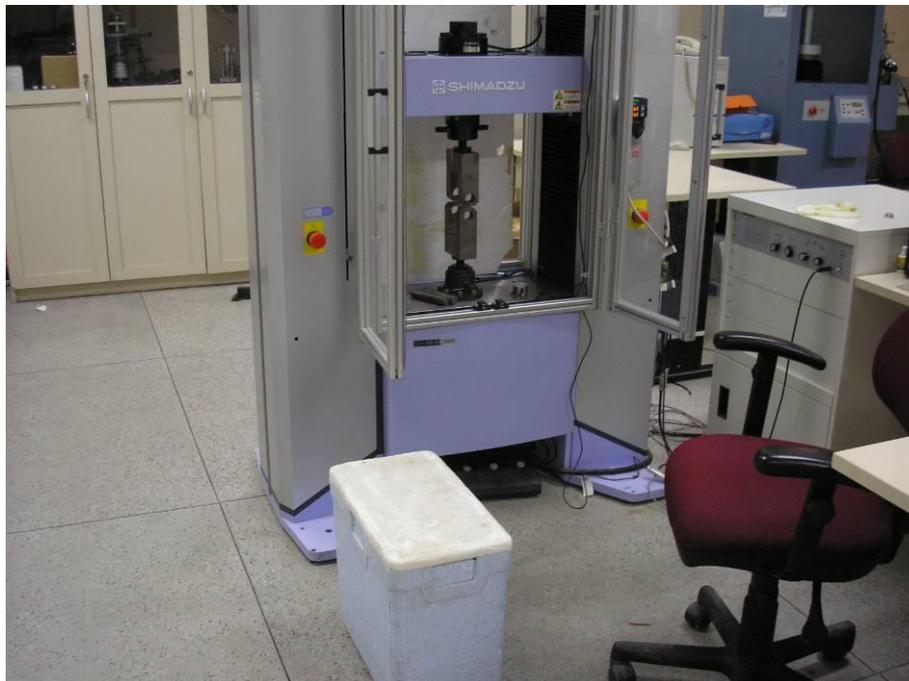


Figura 4.17: Caixa térmica utilizada para o condicionamento das amostras da câmara até a prensa de realização dos ensaios.

Observou-se que durante todo o tempo necessário para a realização do ensaio, de 10 a 15 min. a amostra não sofreu variação de temperatura, ou seja, não foram observadas diferenças de temperatura entre a saída da câmara, manuseio até a prensa e período para realização do teste.

Vale destacar que antes de ser ensaiado, os corpos-de-prova foram pintados com uma tinta branca, na região de caminhamento da trinca, com objetivo de visualizar o início e a propagação das trincas (Figura 4.18).



Figura 4.18: Exemplo de corpo-de-prova pintado antes e após a realização do ensaio.

Finalizada a etapa de preparação do corpo-de-prova e encontrando-se o mesmo na temperatura desejada, é dado início à fase de acoplamento do mesmo às garras de carregamento e ao *clip-on-gage*, o qual realiza o controle da velocidade de carregamento e leitura da abertura da trinca. Após serem introduzidos no corpo-de-prova os dispositivos de carregamento (garra) e acoplado o *clip-on-gage*, aplica-se uma carga pequena de assentamento de no máximo 0,20 kN, objetivando o ajuste dos pinos de carregamento e o corpo-de-prova.

O ensaio é controlado através do *clip-on-gage* que mantém a velocidade de abertura da trinca em 1,0 mm/min. Dá-se por encerrado o ensaio quando a força de carregamento diminuía até 0,1 kN.

#### 4.1.3 Interpretação da Energia de Fratura

A energia de fratura é calculada determinando-se a área sob a curva força *versus* abertura de trinca obtida nos ensaios de tração, juntamente com a espessura do corpo-de-prova e o comprimento disponível para o início e propagação da trinca.

Após a realização do ensaio e a aquisição dos dados de força e abertura de trinca, a etapa seguinte consiste em plotar o gráfico de força *versus* abertura de trinca e calcular a área sob a curva. A área pode ser calculada através de programas computacionais ou, através de simples formulações, como, por exemplo, a regra do paralelograma como ilustrado na Figura 4.19.

Dessa forma, com os dados de área, juntamente com o valor da espessura do corpo-de-prova e o comprimento disponível para o início e propagação da trinca, obtêm-se a energia de fratura.

Pode-se observar na Figura 4.20 e na Tabela 4.1, a nomenclatura e as dimensões da configuração do corpo-de-prova na forma de disco circular com fenda.

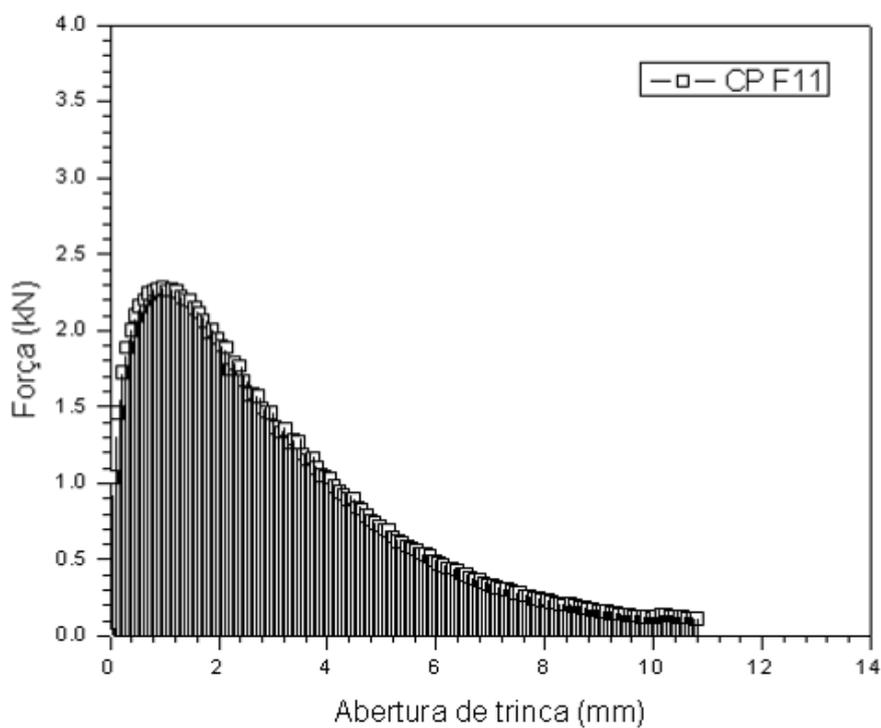


Figura 4.19: Exemplo de gráfico para o cálculo da área abaixo da curva.

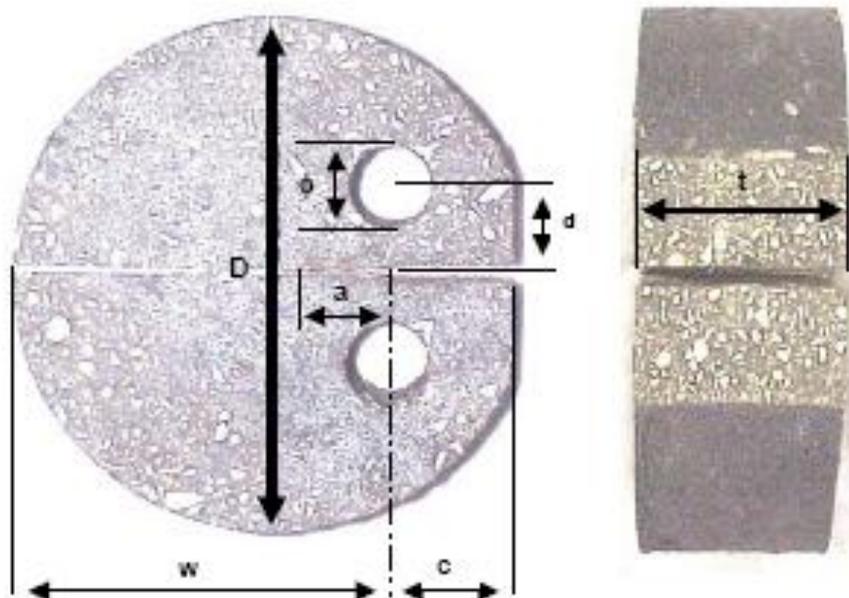


Figura 4.20: Nomenclatura e dimensões da configuração (Fonte: Wagoner, 2005).

Tabela 4.1: Dimensões recomendadas para a configuração de corpo-de-prova na forma de disco circular com fenda.

Dimensões recomendadas pela ASTM D7313/07 (mm)	
D	150,0
W	110,0
φ	25,0
A	27,5
d	25,0
C	35,0
t	50,0

Por fim, calcula-se a energia de fratura através da equação 4.1:

$$G_f = \text{ÁREA} / B * (W - a) \quad (4.1)$$

Onde:

$G_f$  = energia de fratura ( $J/m^2$ );

ÁREA = área abaixo da curva força *versus* abertura de trinca;

B = espessura do corpo-de-prova (m);

$W - a$  = comprimento do ligamento inicial (m).

## **4.2 ROTEIRO BÁSICO PARA A REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO EM DISCO CIRCULAR COM FENDA (*DISK-SHAPED COMPACT*)**

Em função do que foi minuciosamente descrito até aqui elaborou-se o roteiro básico:

1) Dosagem da mistura asfáltica a utilizar no ensaio, em conformidade com a metodologia SUPERPAVE ou outros especificados quanto aos parâmetros volumétricos (inclusive de energia de compactação);

2) Moldagem dos corpos-de-prova de acordo com o projeto (teor de ligante de projeto), em número mínimo de 2 corpos-de-prova por mistura, com diâmetro de 150 mm e altura 140 mm, utilizando-se um compactador giratório;

3) Concluída a moldagem, realizar a divisão de cada corpo-de-prova moldado, em dois, deixando cada um com altura de  $50\pm 5$  mm, conforme processo executivo apresentado na Figura. 4.1;

OBS: Nesta etapa e em outras que envolvam cortes, deve-se utilizar uma serra com disco diamantado e injeção de água, a fim de minimizar os danos na amostra;

4) Executar os furos de carregamento, a  $90\pm 5^\circ$  em relação á face do corpo-de-prova, sendo que sua posição não deve diferir mais do que 5,0 mm das posições especificadas. Esse preparo deve ser realizado de acordo com o conjunto de guias e suportes apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3 do presente estudo;

5) Fixar o corpo-de-prova no gabarito apresentado na Figura 4.3 e executar a fenda (trinca inicial), serrando-a conforme mostra a Figura 4.4;

6) Realizar a preparação da face do chanfro do corpo-de-prova para o acoplamento ao *clip-on-gage*, conforme Figura 4.5;

7) Fixação de duas placas pequenas de alumínio na face do corpo-de-prova, para acoplar o *clip-on-gage*, em consonância com as medidas descritas nas Figuras 4.6 e 4.7 desta pesquisa.

- 8) Condicionar os corpos-de-prova na temperatura desejada durante um período mínimo de 16 horas;
- 9) Montar o conjunto de garras, conforme projetos apresentados nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 na prensa de carregamento, acoplando o corpo-de-prova nas mesmas, conforme Figura 4.8;
- 10) Acoplar o *clip-on-gage* nas placas de alumínio fixadas no corpo-de-prova;
- 11) Ajuste da prensa, aplicar carga mínima de 0,20 kN;
- 12) Realização do ensaio de tração com o controle de velocidade da abertura da trinca, realizado através do *clip-on-gage*, de 1,0 mm/min;
- 13) O ensaio está completo quando a carga atingir o valor mínimo de 0,1 kN;
- 14) Determinação da energia de fratura - equação 4.1 deste estudo.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 RESULTADOS DOS PRIMEIROS TESTES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos primeiros ensaios de determinação das características de fratura de misturas asfálticas, por tração em disco circular com fenda (*DISK-SHAPED COMPACT*), bem como todos os testes de fratura realizados com os corpos-de-prova moldados em laboratório, como apresentado no Capítulo 3, e ensaiados nas temperaturas de 25°C e 10°C, conforme descrito no Capítulo 4.

#### 5.1.1 Resultados dos primeiros testes realizados a temperatura de 25°C

Pode-se observar nas Figuras 5.1 a 5.10 seqüências de fotos da realização dos primeiros testes para a determinação da energia de fratura em misturas asfálticas realizadas no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, onde foram avaliadas diversas misturas, uma mistura com ligante modificado com polímero (Flex 65/90) e as outras quatro misturas foram produzidas com ligante convencional (PG 70-16 e PG 64-16), descritas no Capítulo 3 desta pesquisa.

Observam-se visualmente, nestas seqüências de fotos, o início e a propagação da trinca durante a realização do ensaio, bem como o aparato de realização do teste: a configuração de carregamento e as garras desenvolvidas nesta pesquisa para o acoplamento na prensa de carregamento, como também se observa o comportamento de cada mistura ao longo dos estágios do ensaio. A face do corpo de prova foi pintada de branco para permitir melhor visualização da progressão da trinca.

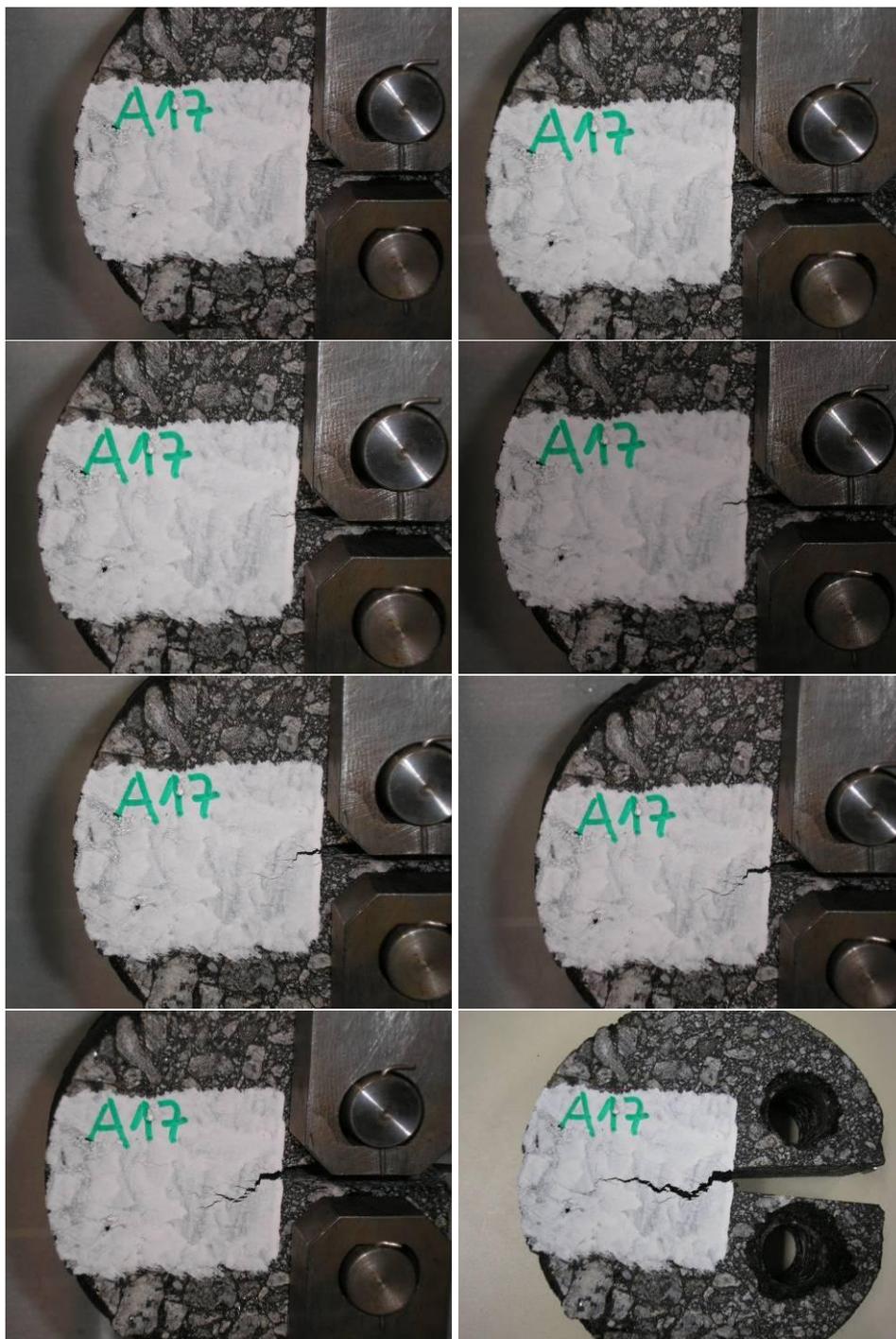


Figura 5.1: Fotos do início e propagação da trinca: Flex 65-90, 19,1 mm.

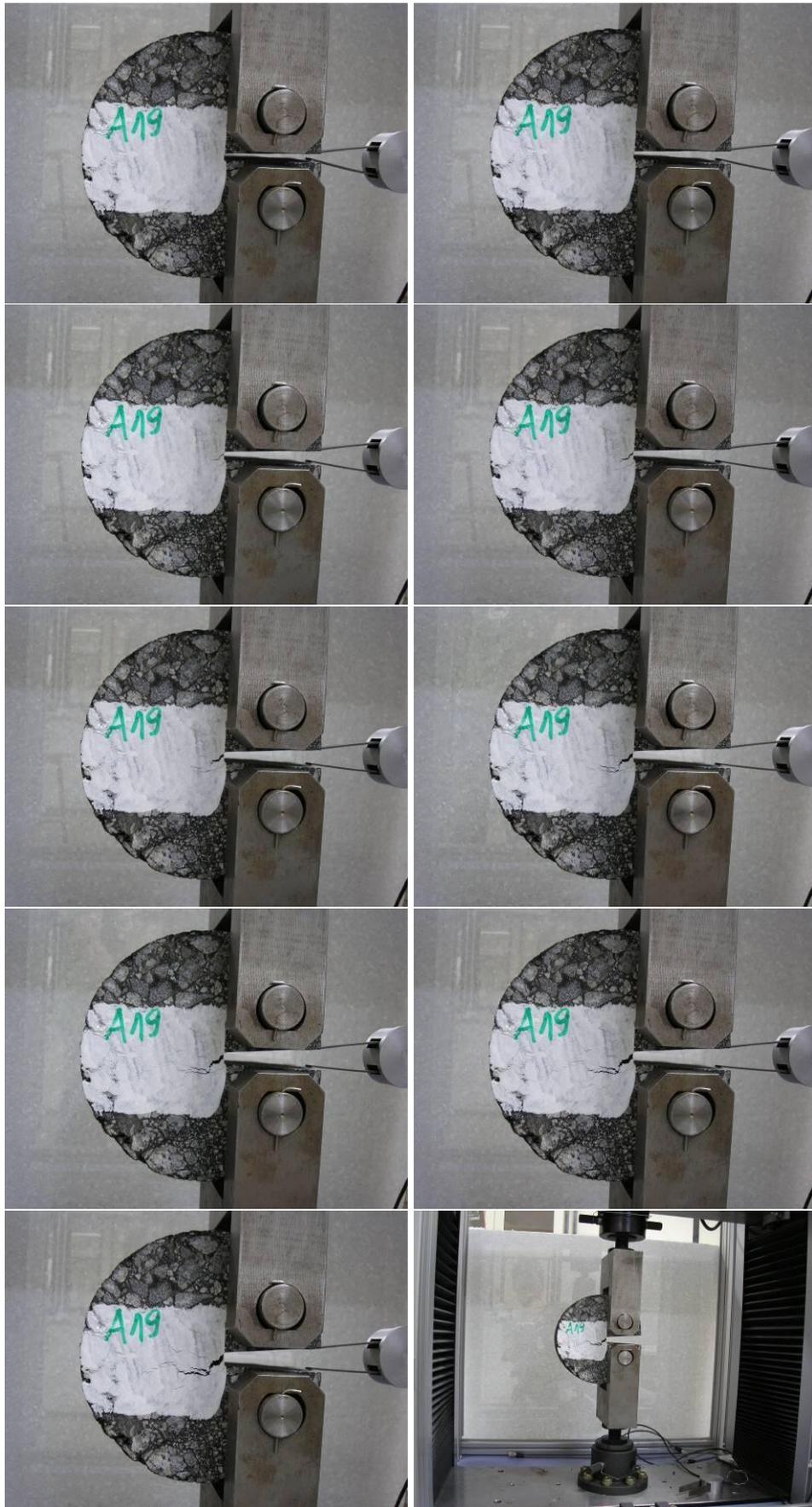


Figura 5.2: Fotos do início e propagação da trinca: Flex 65-90, 19,1 mm.

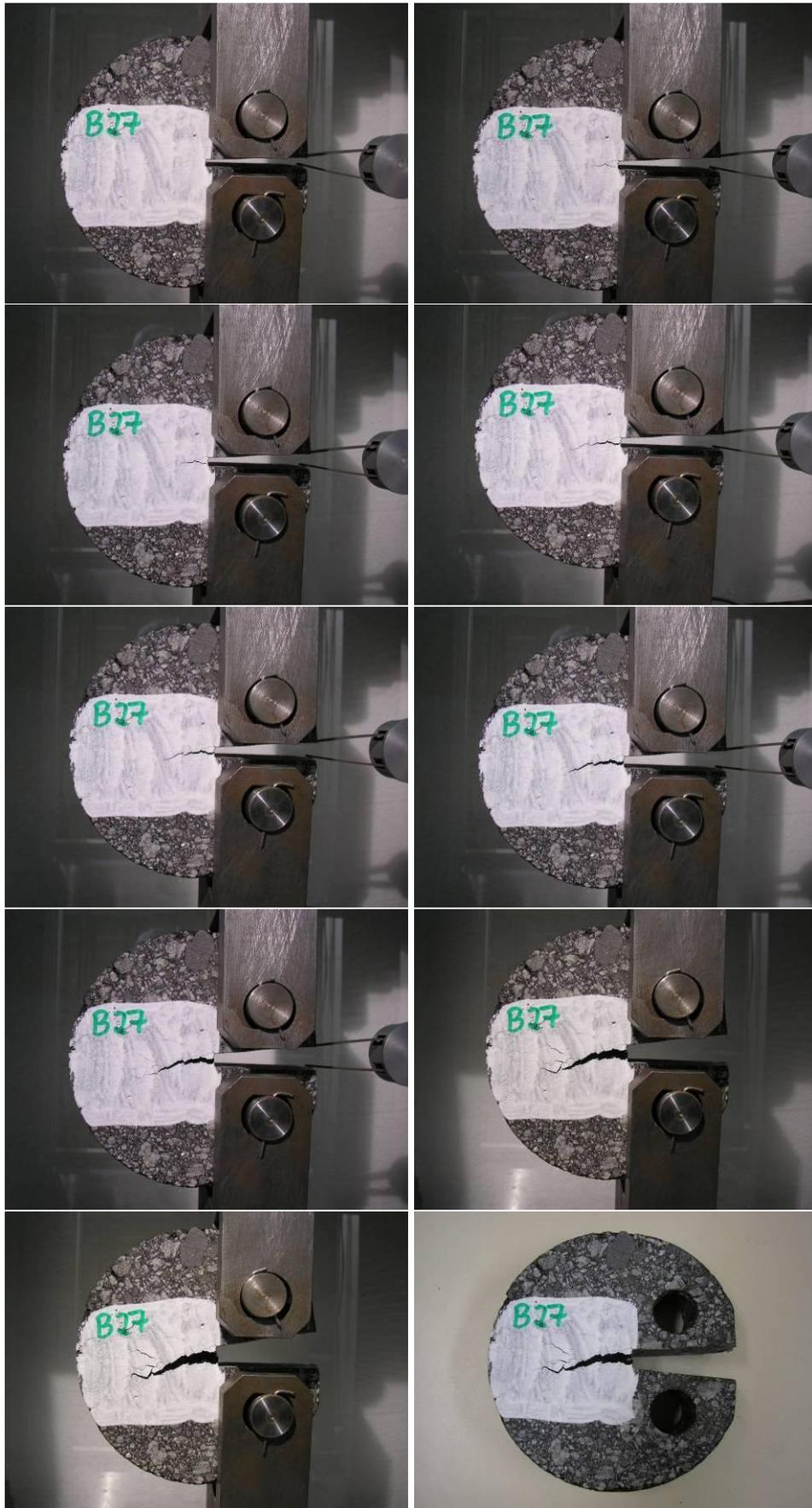


Figura 5.3: Fotos do início e propagação da trinca: PG 70-16, 19,1 mm.

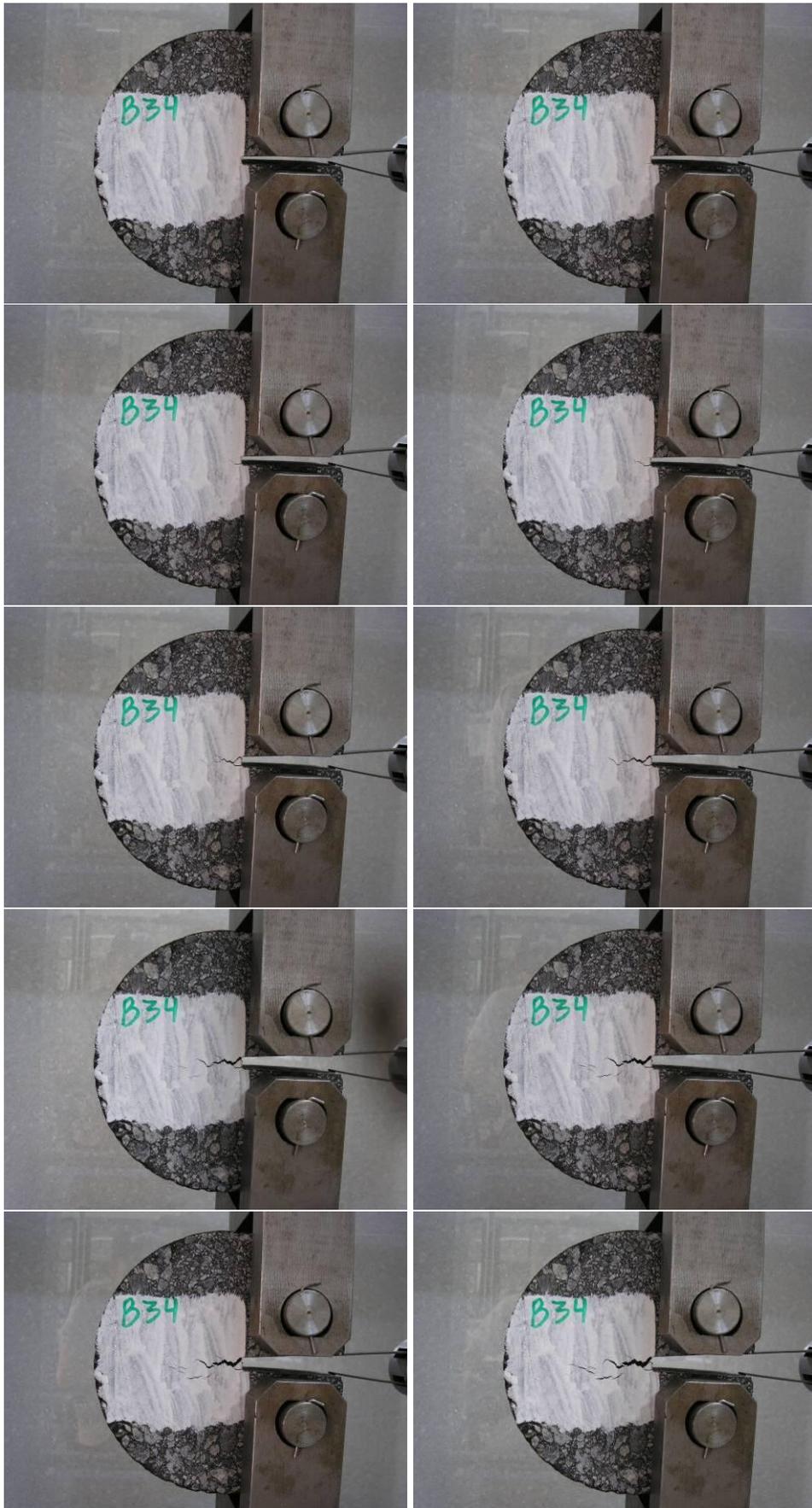


Figura 5.4: Fotos do início e propagação da trinca: PG 70-16, 19,1 mm.

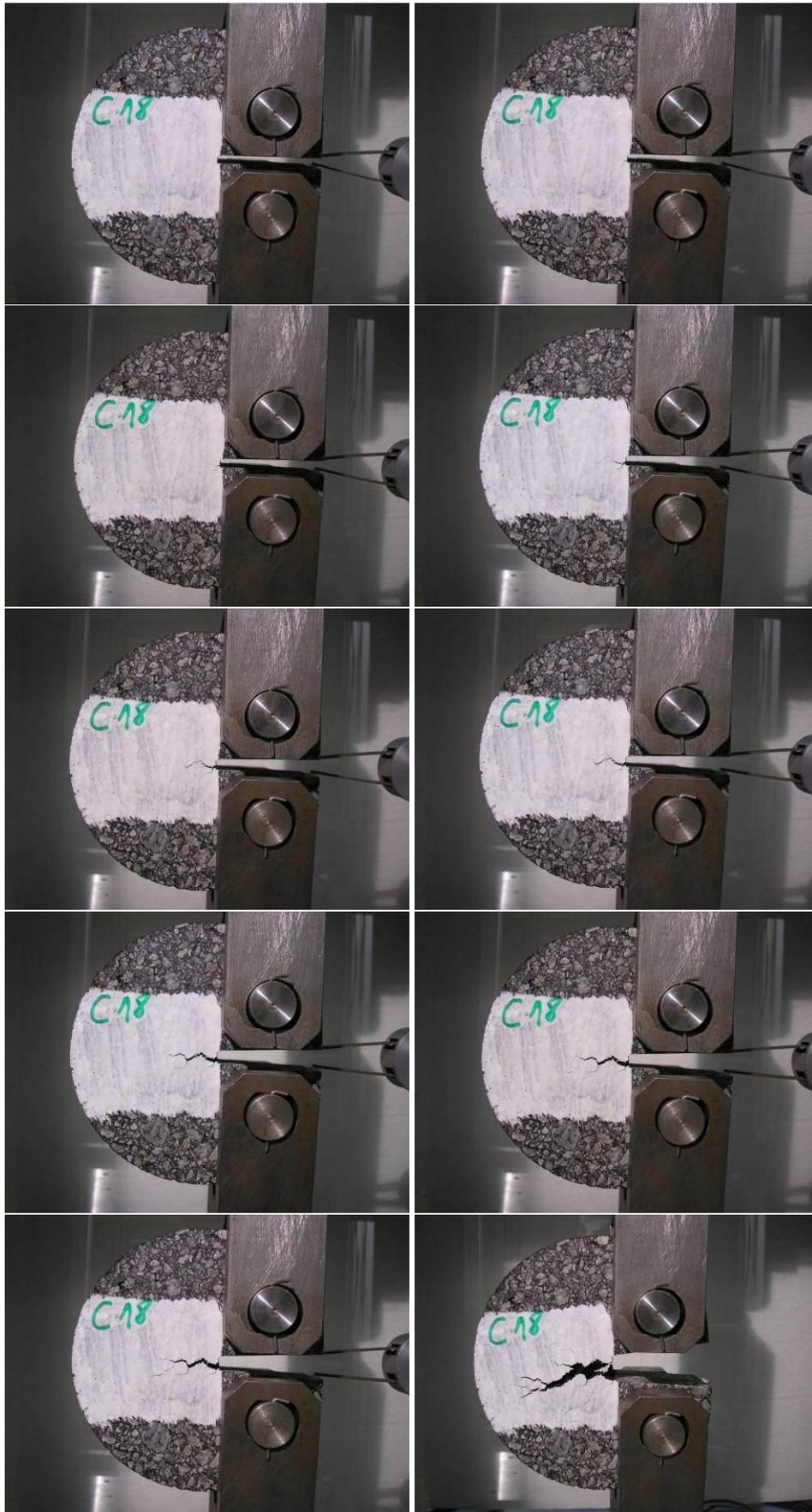


Figura 5.5: Fotos do início e propagação da trinca: PG 70-16, 12,7 mm.

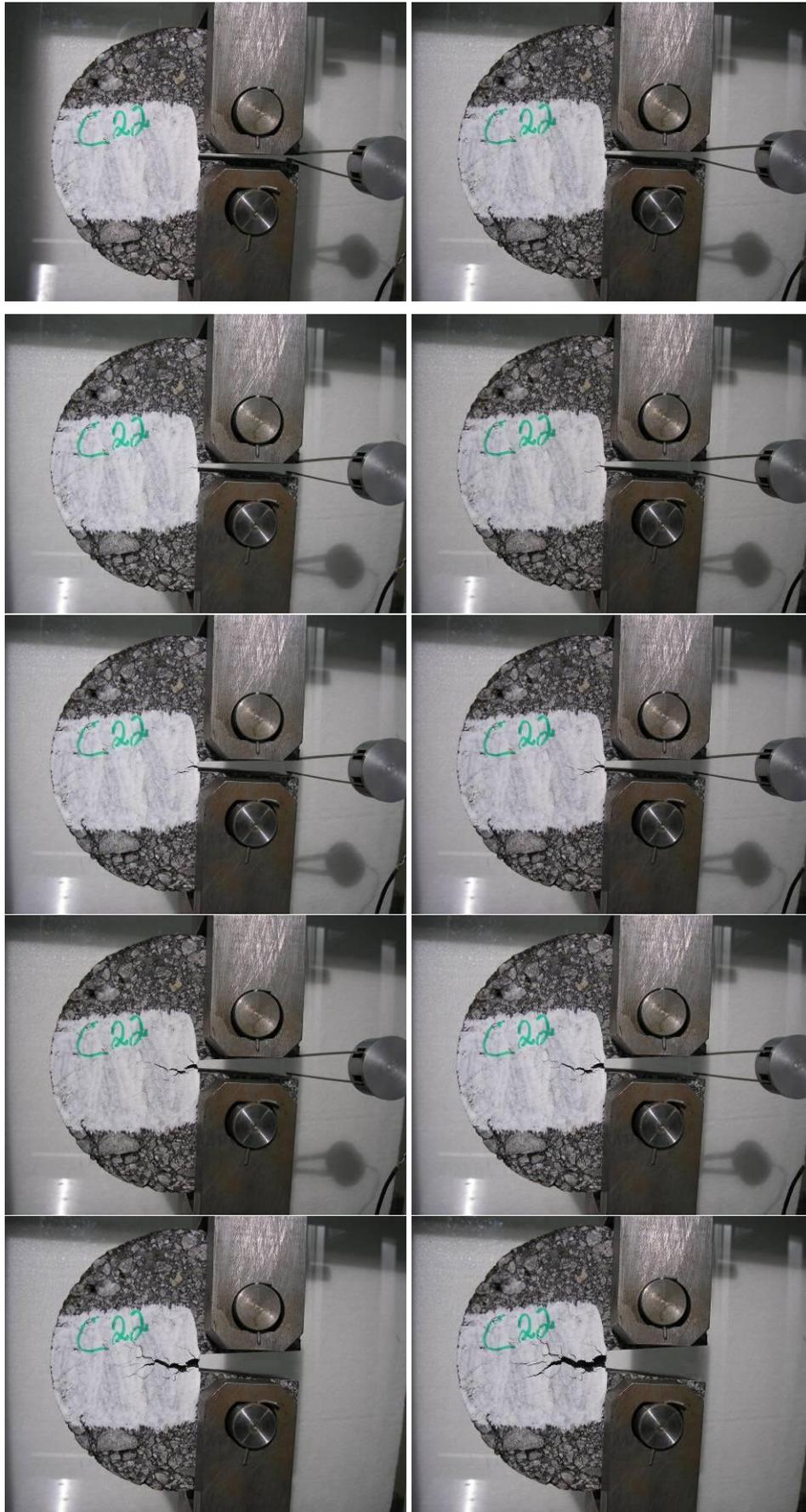


Figura 5.6: Fotos do início e propagação da trinca: PG 70-16, 12,7 mm.

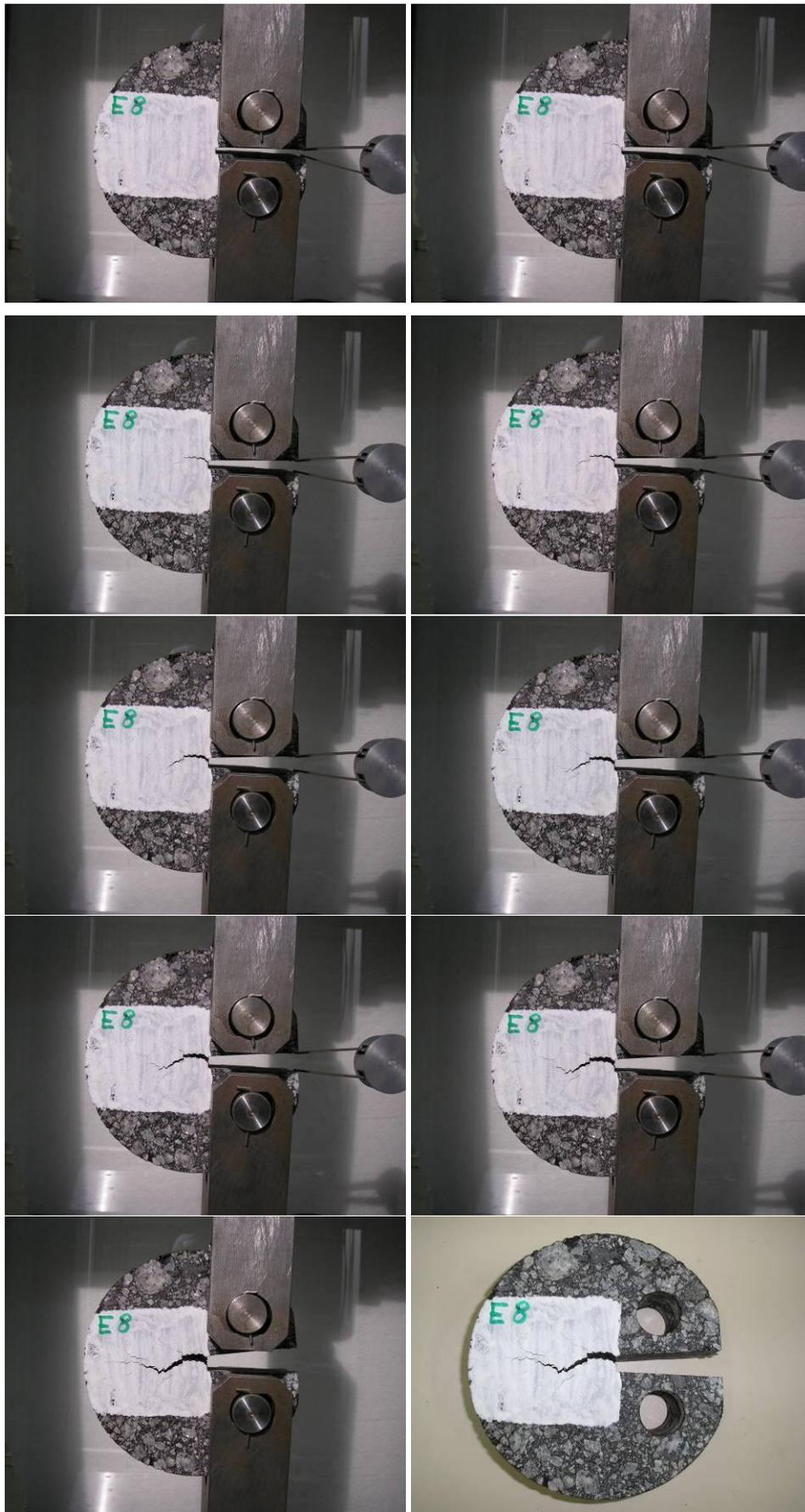


Figura 5.7: Fotos do início e propagação da trinca: PG 64-16, 19,1 mm.

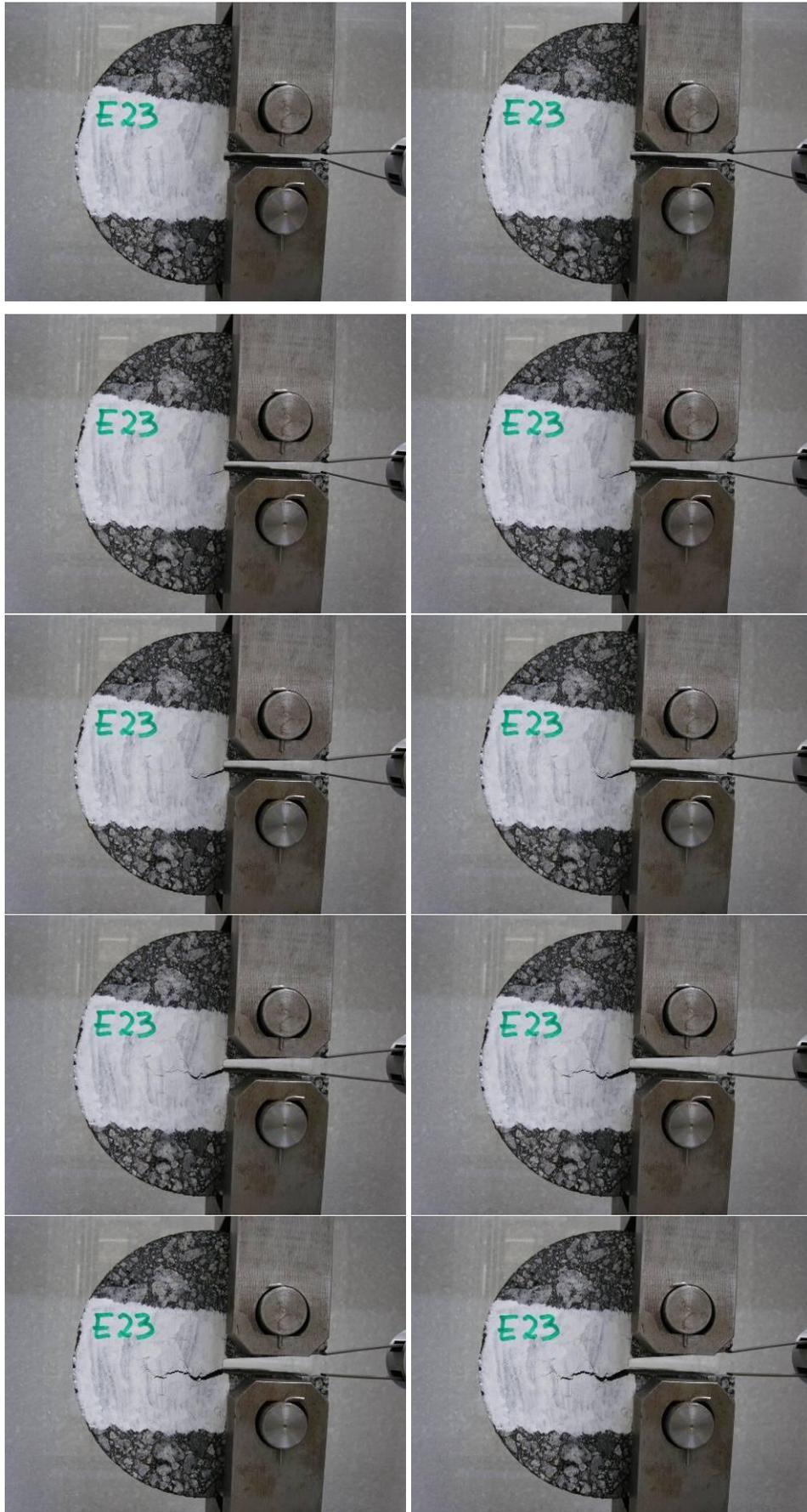


Figura 5.8: Fotos do início e propagação da trinca: PG 64-16, 19,1 mm.

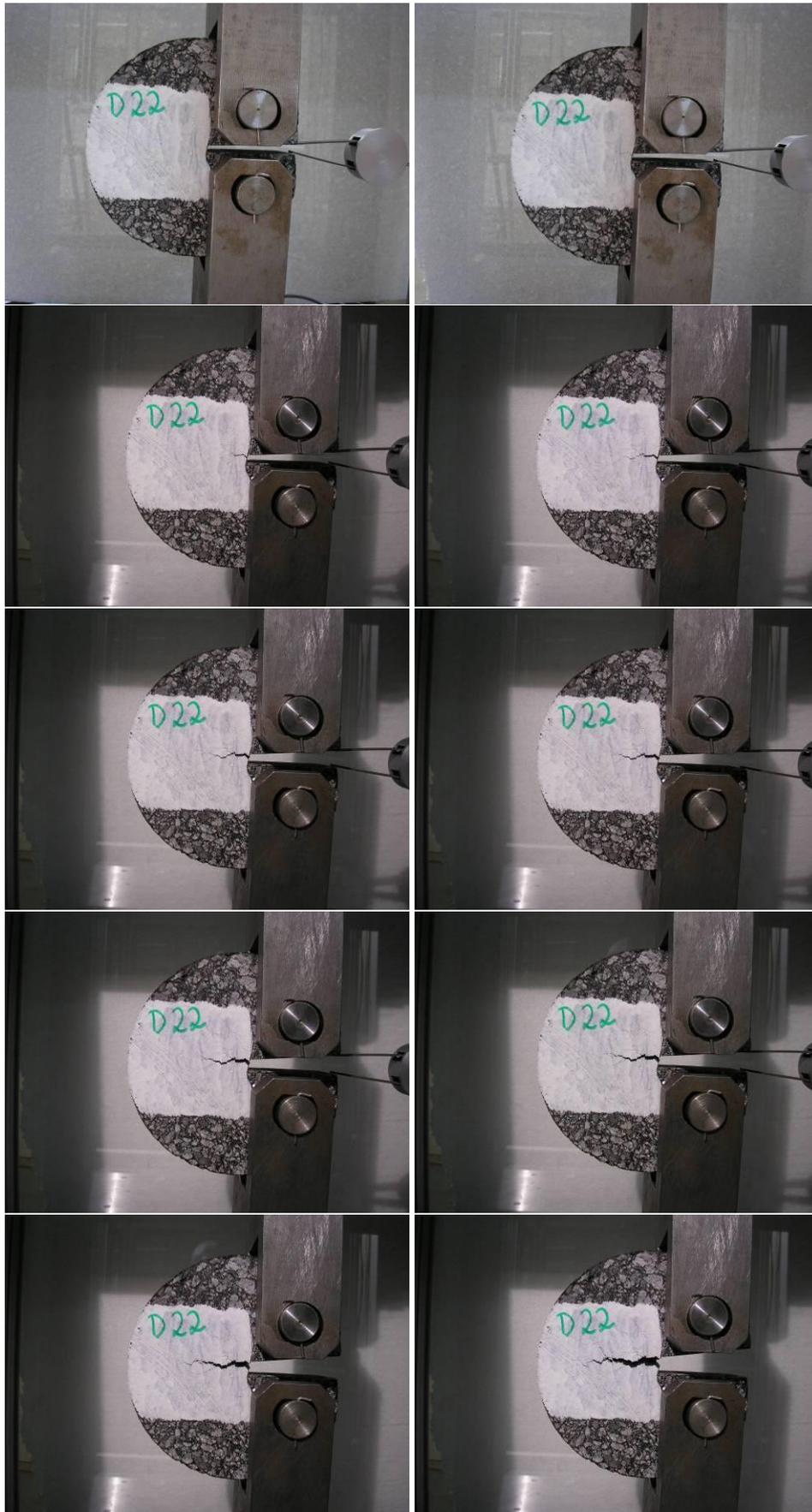


Figura 5.9: Fotos do início e propagação da trinca: PG 64-16, 12,7 mm.

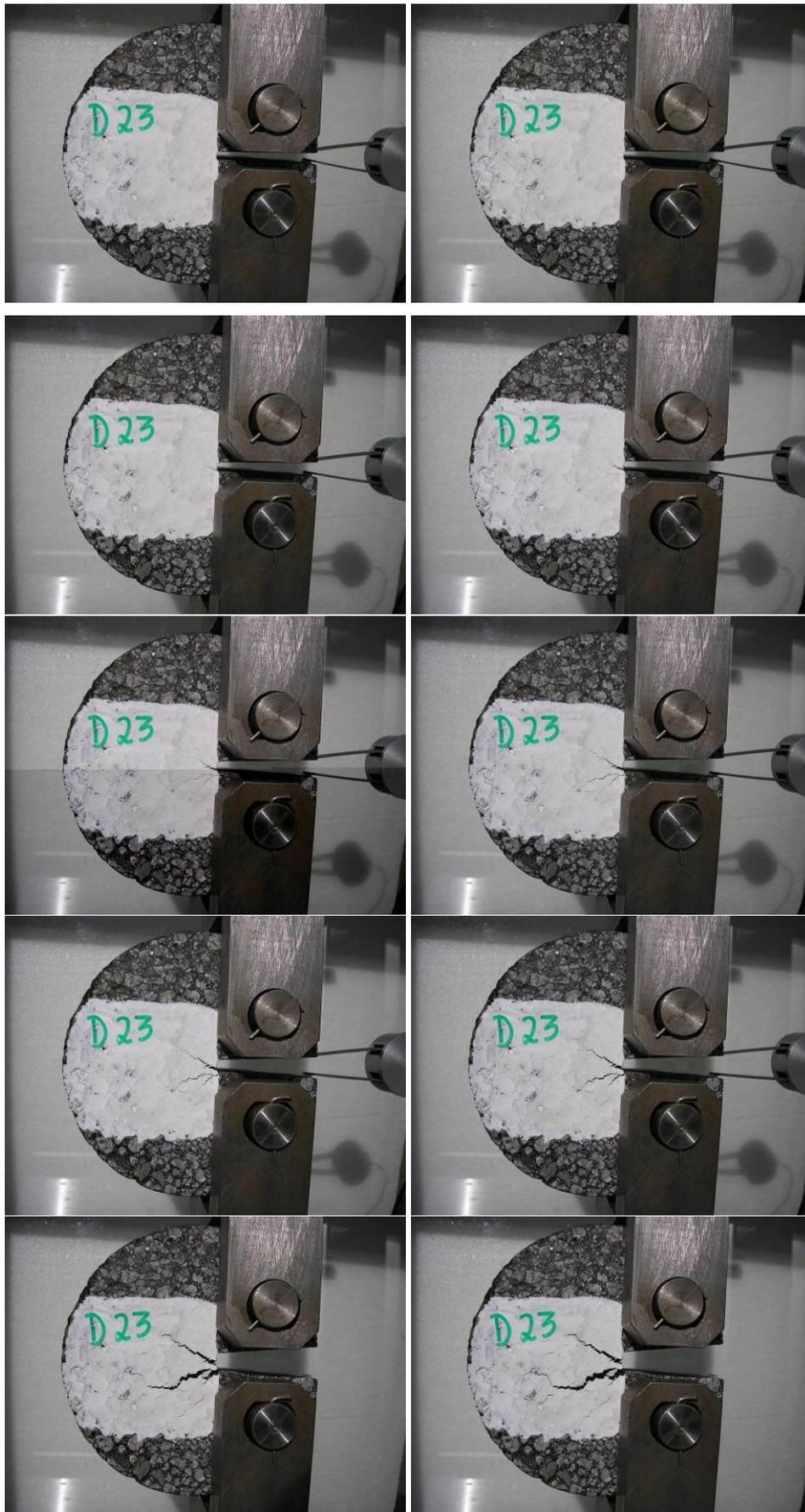


Figura 5.10: Fotos do início e propagação da trinca: PG 64-16, 12,7 mm.

Durante a execução do ensaio, a aquisição dos dados de força e abertura de trinca é obtida através de um software denominado *Trapezium X*. No mesmo instante da aquisição dos dados, o software gera a curva de força *versus* abertura de trinca, conforme mostrado na Figura 5.11. A partir dos dados coletados pelo software durante a realização do ensaio são obtidos os parâmetros necessários para obter a energia de fratura das misturas asfálticas.

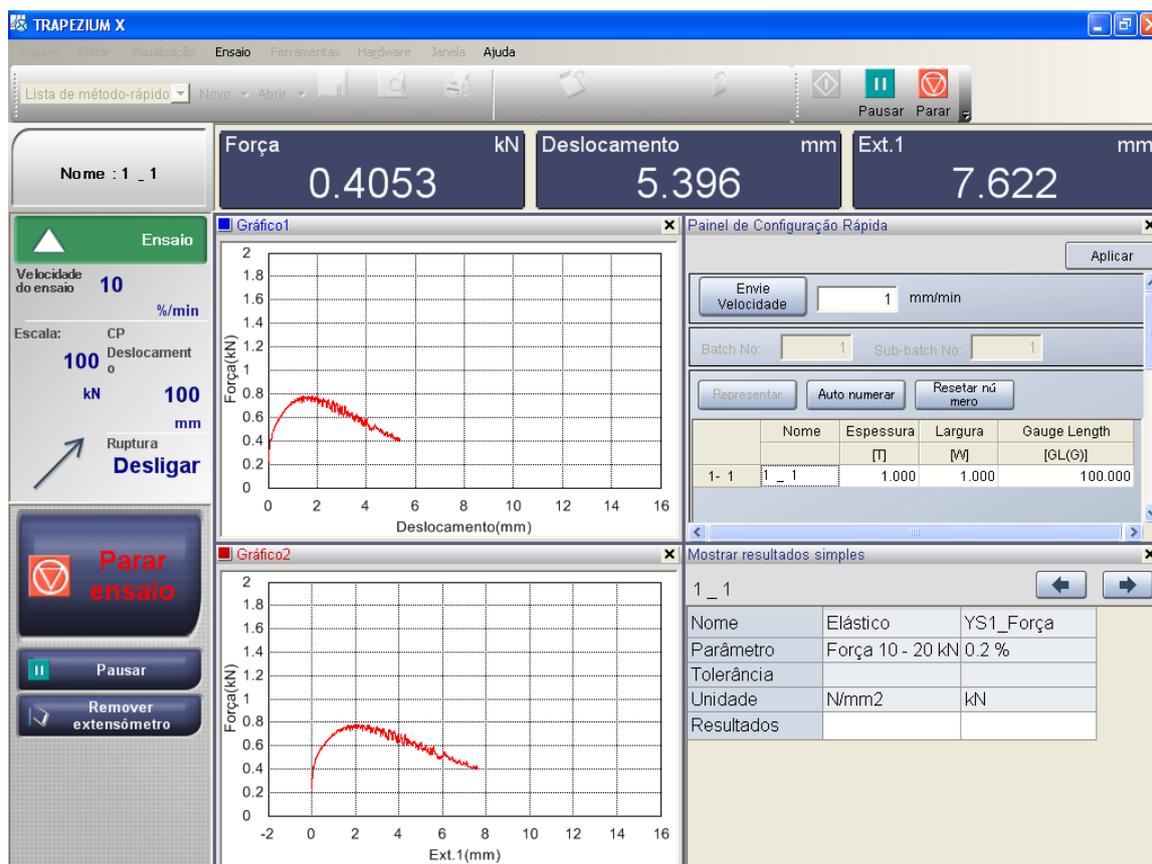


Figura 5.11: Tela principal do software *Trapezium X*.

A espessura  $B$  dos corpos-de-prova e a extensão disponível para fraturar ( $W-a$ ) são obtidas através de medidas com paquímetro. A área sob a curva é determinada empregando o método do paralelograma, utilizando o Microsoft Excel. Após a obtenção dos dados, a energia de fratura é determinada empregando-se a equação 4.1.

Nas Figuras 5.12 a 5.16 são apresentadas as curvas de força (kN) *versus* abertura de trinca (mm) de cada corpo-de-prova das diferentes misturas avaliadas neste primeira fase de testes a temperatura de 25°C.

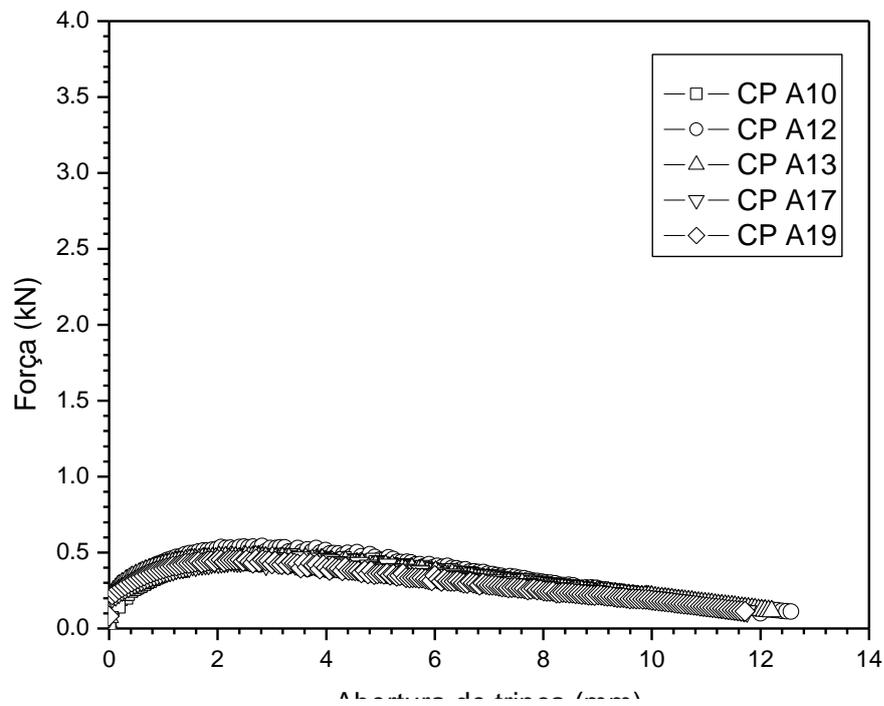


Figura 5.12: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 44/07: Flex 65/90 – 19,1 mm.

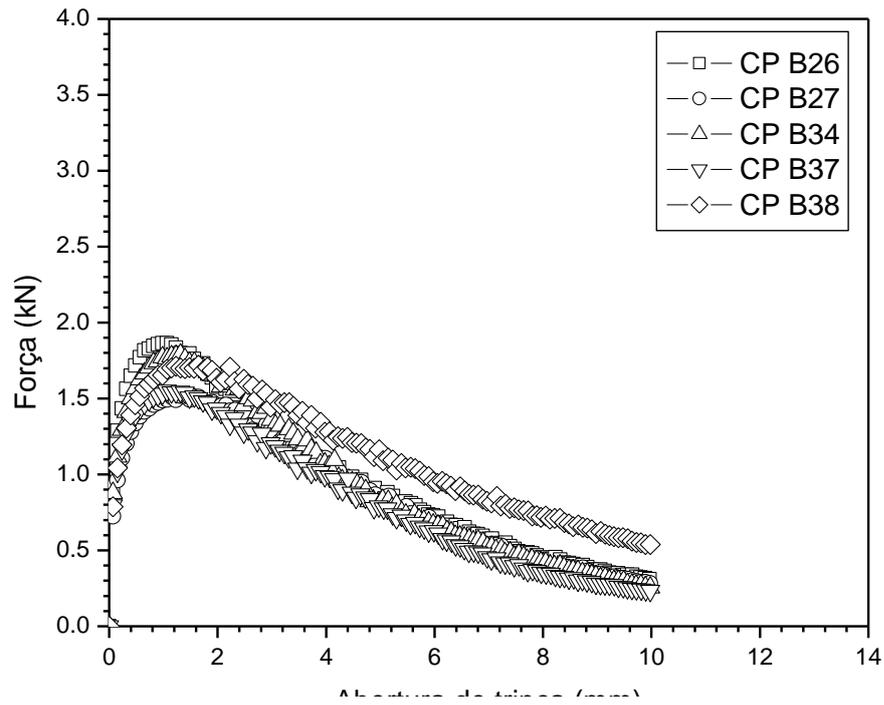


Figura 5.13: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 45/07: PG 70-16 – 19,1 mm.

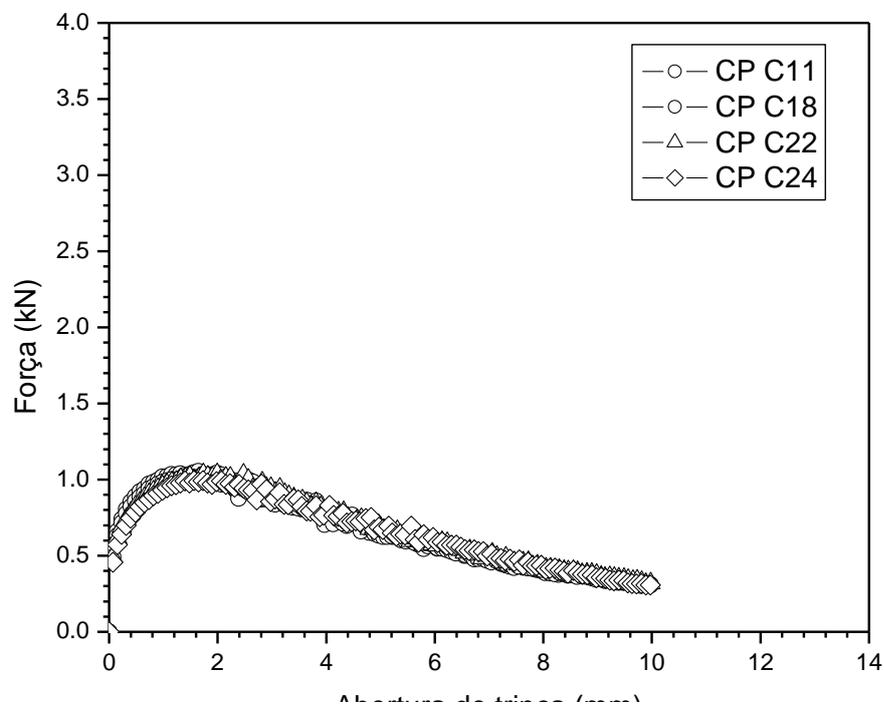


Figura 5.14: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 241/07: PG 70-16 – 12,7 mm.

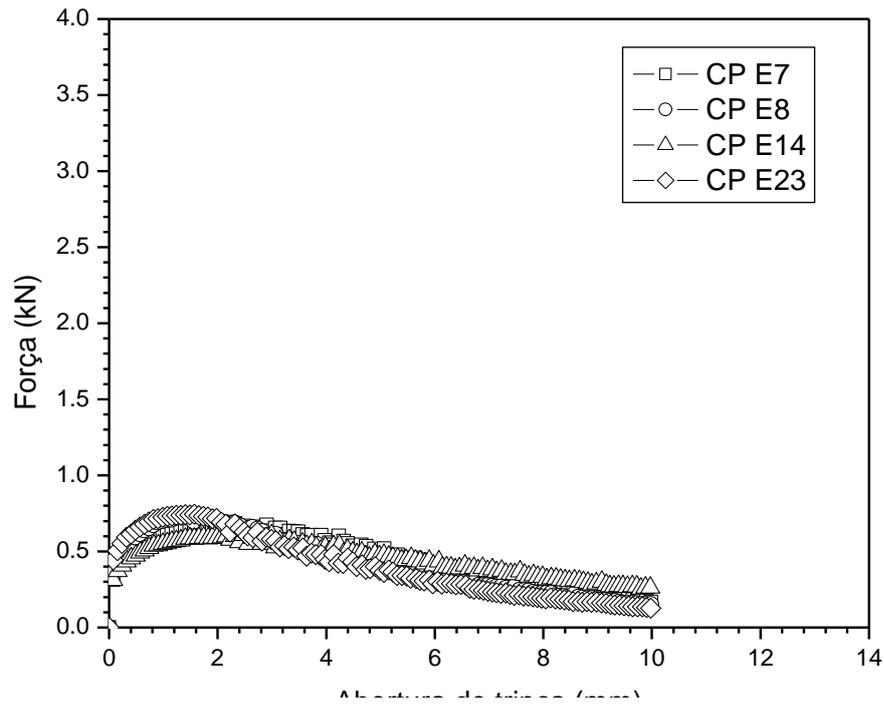


Figura 5.15: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 259/07: PG 64-16 – 19,1 mm.

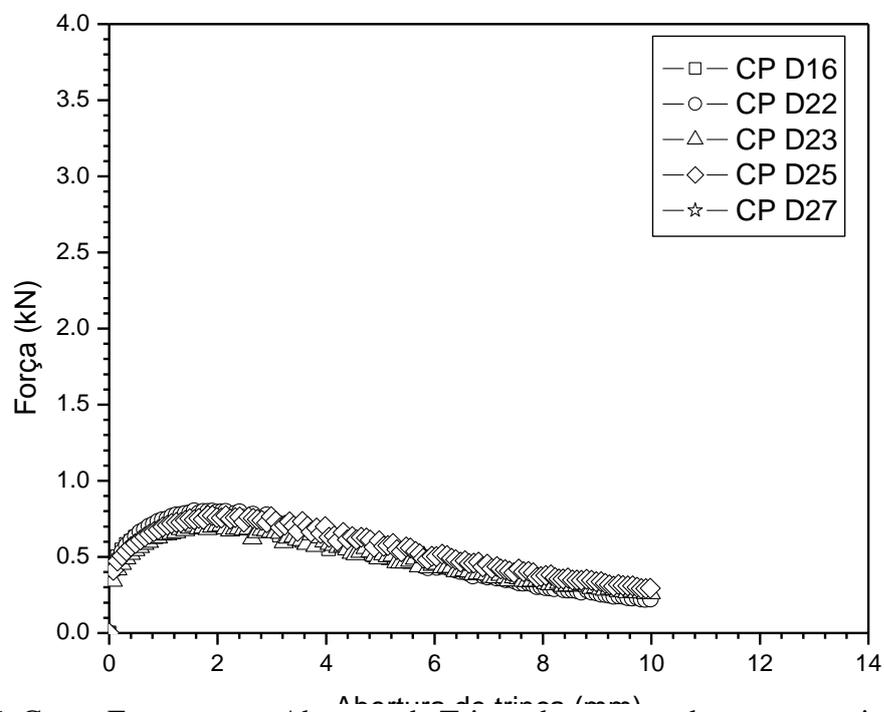


Figura 5.16: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 247/07: PG 64-16 – 12,7 mm.

Na Tabela 5.1 e na Figura 5.17 é mostrado um resumo dos resultados dos ensaios de fratura realizados no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ durante a presente pesquisa, sendo apresentadas as médias da energia de fratura de vários corpos de prova, para diferentes misturas, e os parâmetros necessários para sua obtenção.

Na Figura 5.17 mostra-se a média de energia de fratura e o desvio padrão obtido para cada mistura analisada no ensaio de fratura na configuração de corpo-de-prova *Disk-Shaped Compact*, desenvolvido nesta pesquisa. Como já relatado, os ensaios foram realizados em uma prensa Schimadzu e nesta série foram realizados em uma sala com temperatura controlada de 25°C.

Tabela 5.1: Resultados dos ensaios de fratura de misturas asfálticas deste estudo, realizados a 25°C.

Lote	Mistura	CP	Espessura (B) (mm)	W-a (mm)	Área (N.m)	Energia de Fratura (J/m <sup>2</sup> )	Média (J/m <sup>2</sup> )	DESVPAD (J/m <sup>2</sup> )	Coef. de Variação
44/07	Flex 65/90 19.1 mm	10	49.50	83.80	3.63	875.10	843.54	59.02	7.00
		12	51.00	85.40	4.04	927.58			
		13	51.30	85.60	3.59	817.53			
		17	50.30	84.30	3.49	823.06			
		19	51.10	84.40	3.34	774.43			
45/07	PG 70-16 19.1 mm	26	51.10	85.50	9.63	2204.14	2190.57	210.32	9.60
		27	49.40	84.70	8.70	2079.26			
		34	51.20	84.10	9.33	2166.78			
		37	49.00	85.60	8.27	1971.68			
		38	52.20	85.00	11.23	2530.99			
241/07	PG 70-16 12.7 mm	11	51.80	84.80	6.70	1525.28	1554.07	23.59	1.52
		18	50.20	84.10	6.53	1546.73			
		22	50.70	85.00	6.74	1563.99			
		24	50.20	83.70	6.64	1580.30			
259/07	PG 64-16 19.1 mm	7	50.10	84.00	4.54	1078.79	1019.26	62.45	6.13
		8	51.00	83.30	4.20	988.63			
		14	50.50	82.70	4.44	1063.13			
		23	51.00	83.90	4.05	946.50			
247/07	PG 64-16 12.7 mm	16	49.80	84.50	5.13	1219.08	1218.98	64.91	5.33
		22	52.10	83.40	5.16	1187.53			
		23	50.30	86.20	4.89	1127.80			
		25	50.70	84.90	5.49	1275.43			
		27	50.60	85.20	5.54	1285.05			

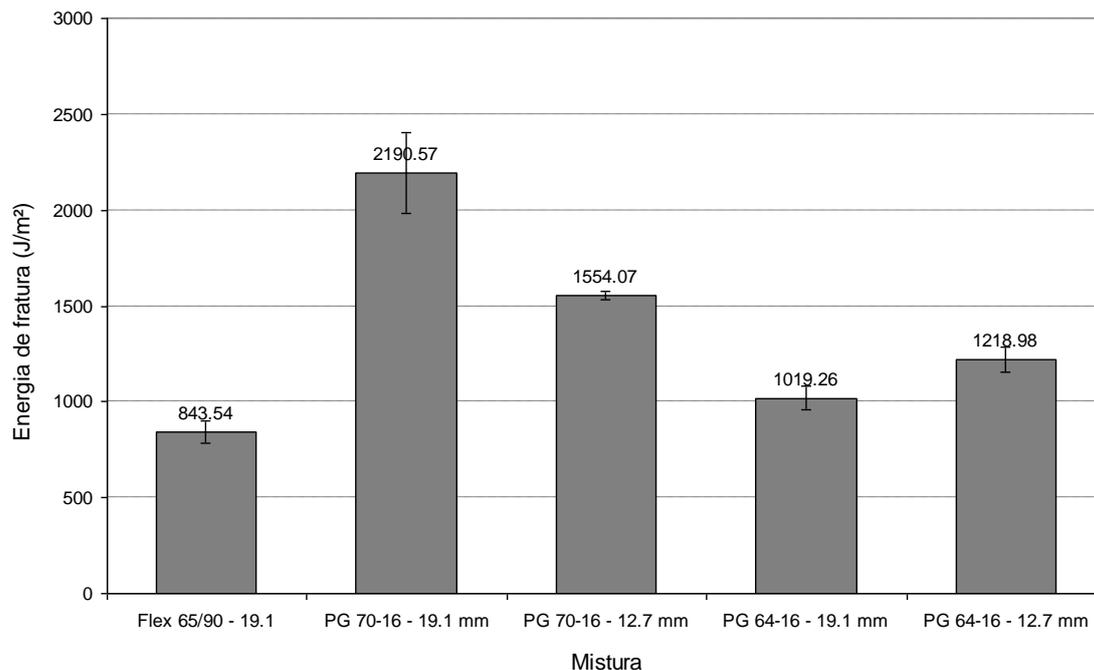


Figura 5.17: Resultados da energia de fratura para as misturas ensaiadas neste estudo a 25°C.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5.1 e Figura 5.17 pode-se verificar que, para as misturas com granulometria de 19,1 mm, o ligante PG 70-16 apresentou maior energia de fratura quando comparado com o PG 64-16 e o Flex 65/90 (PG 70-22). Em relação à granulometria de 12,7 mm, o PG 64-16 apresentou menor energia de fratura do que o PG 70-16. Comparando os ligantes convencionais pode-se verificar que o ligante PG 70-16 apresentou maior energia de fratura do que o PG 64-16 para as duas granulometrias.

Além disso, pode-se verificar que ao contrário do que indica a literatura consultada, o ligante modificado por polímero apresentou menor energia de fratura do que os ligantes convencionais. No entanto, a maioria das pesquisas realizadas utilizando esse método de ensaio empregou temperaturas mais baixas do que os 25°C aqui empregados. Outro fator que deve ser considerado é a composição de ligante modificado dos quais não são conhecidos os detalhes em cada caso das referências da literatura, e que podem influir nos resultados.

## **5.2 RESULTADOS DAS AMOSTRAS PRODUZIDAS NO LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA COPPE/UFRJ**

Após a realização dos primeiros testes e terem sido desenvolvidas as aparelhagens necessárias à preparação do corpo-de-prova, corte das faces, furos de carregamento e execução da trinca inicial, foram dosadas e moldadas no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ misturas adicionais, com os agregados e ligantes asfálticos apresentados no Capítulo 3, e mais o Asfalto-Borracha, portanto, 4 tipos de ligantes asfálticos (Flex 65/90, Asfalto-Borracha, PG 70-16 e PG 64-16) e duas composições granulométricas (19,1 mm e 12,7 mm). Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada mistura, totalizando 18 cilindros de 150 mm de diâmetro e 140 mm de altura, como descrito no capítulo 4, para a realização do ensaio de tração em disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact*) tornaram-se 36 corpos-de-prova a serem ensaiados.

A moldagem de um novo conjunto de corpos-de-prova foi essencial para ampliar a análise de contribuição dos vários parâmetros nos resultados do ensaio: tipo de ligante, temperatura, granulometria, etc.

### **5.2.1 Resultados dos ensaios realizados a temperatura de 25°C**

Nas Figuras 5.18 a 5.23 são apresentadas as curvas de força (kN) *versus* abertura de trinca (mm) de cada corpo-de-prova das diferentes misturas produzidas nesta parte da pesquisa e avaliadas através do ensaio de fratura para misturas asfálticas a temperatura de 25°C.

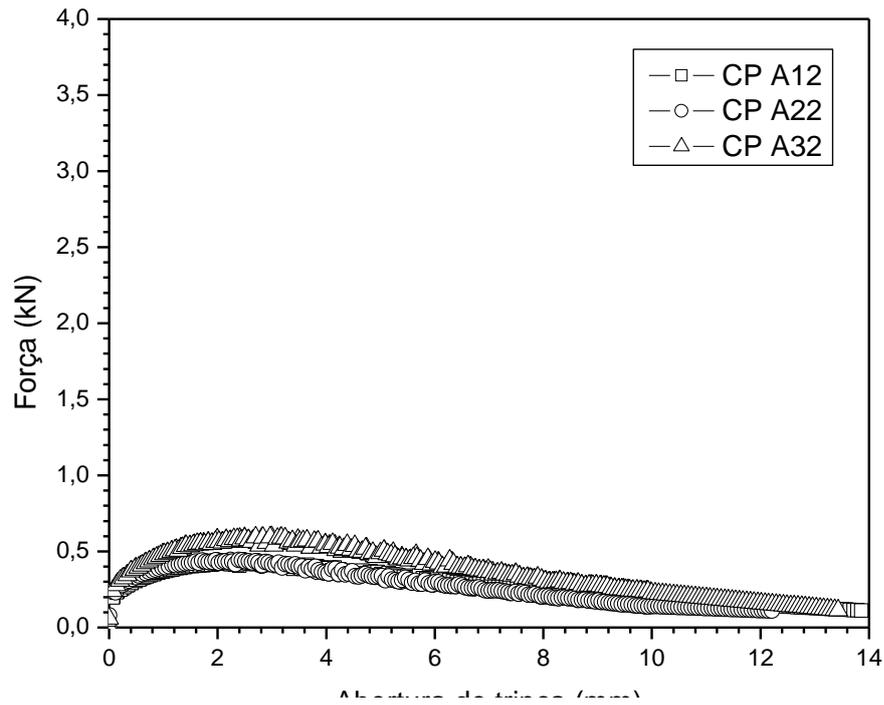


Figura 5.18: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 44/08: Flex 65/90 – 19,1 mm.

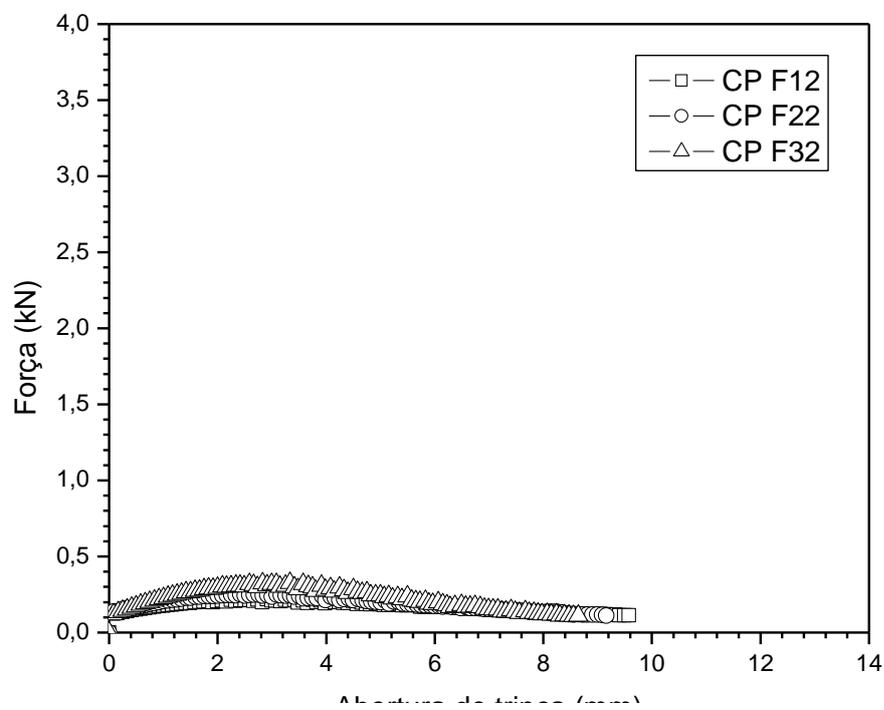


Figura 5.19: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 296/08: Asfalto-Borracha – 19,1 mm.

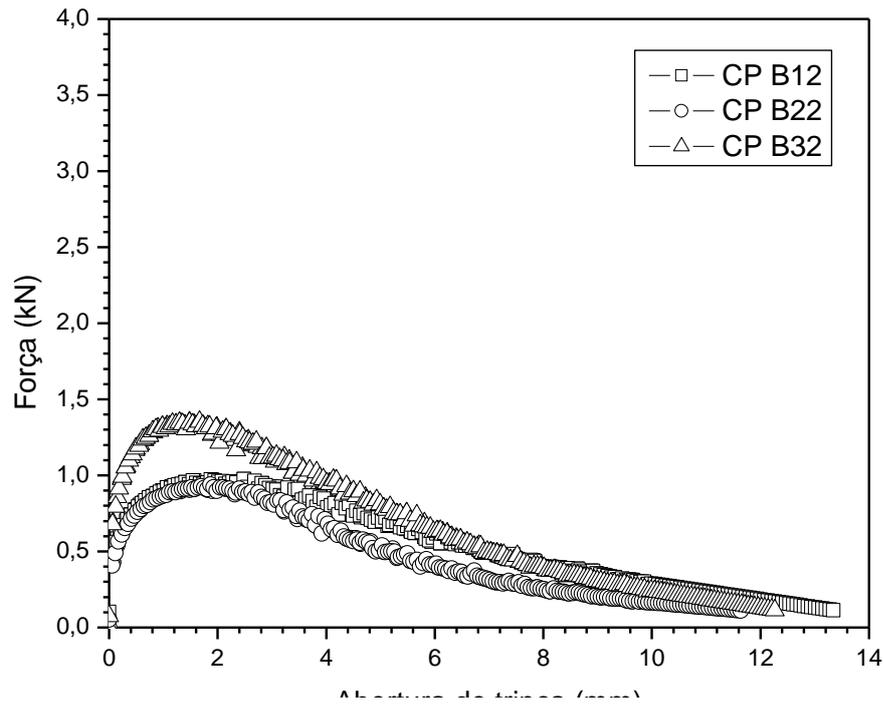


Figura 5.20: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 45/08: PG 70-16 – 19,1 mm.

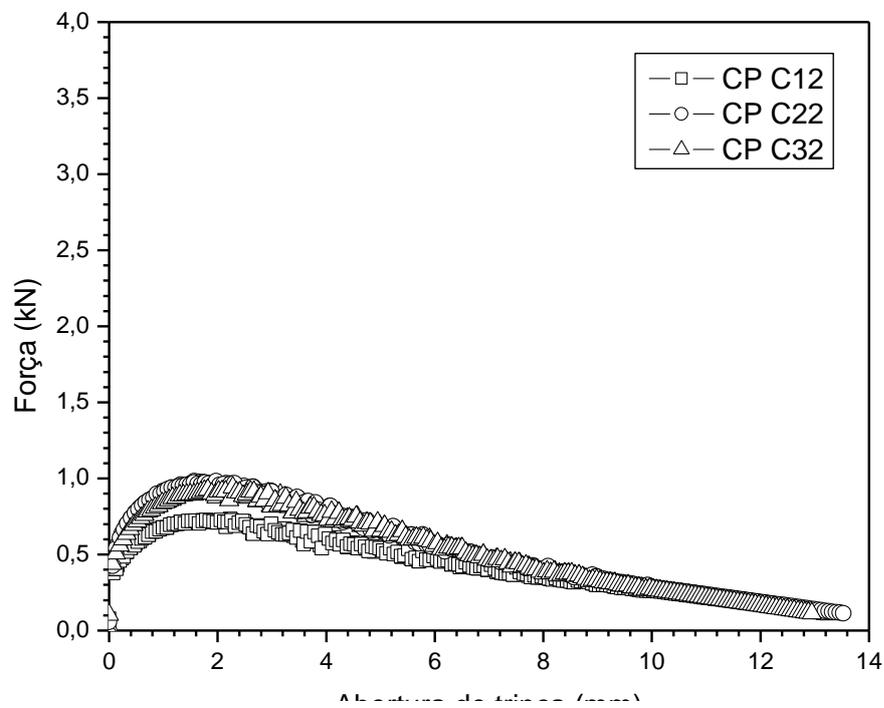


Figura 5.21: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 241/08: PG 70-16 – 12,7 mm.

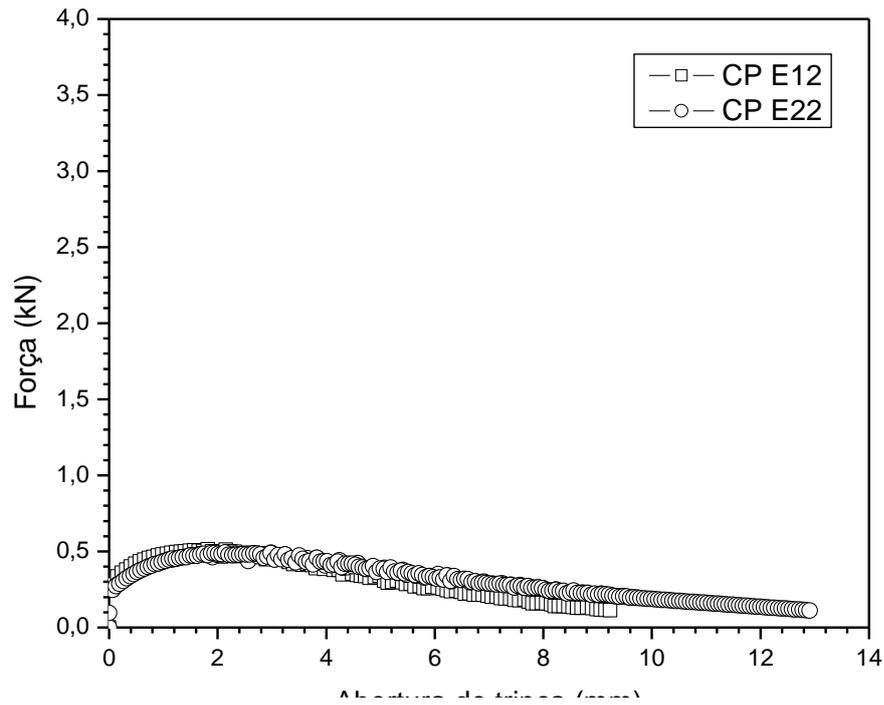


Figura 5.22: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 259/08: PG 64-16 – 19,1 mm.

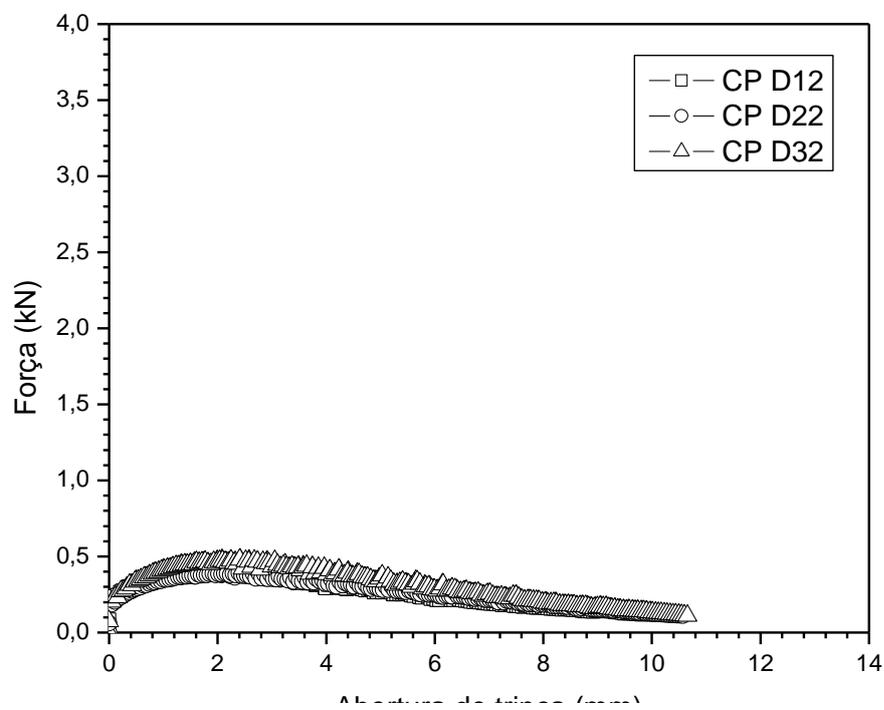


Figura 5.23: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 25°C do Lote 247/08: PG 64-16 – 12,7 mm.

Na Tabela 5.2 mostram-se os valores de energia de fratura para cada mistura preparada neste estudo, no Laboratório de Pavimentação e ensaiada no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. Além dos valores de fratura para as misturas asfálticas estudadas apresentam-se também os valores de desvio padrão, coeficiente de variação das amostras, e todos os parâmetros necessários para o cálculo da energia de fratura através da equação 4.1.

Na Figura 5.24 mostra-se um gráfico comparativo com as médias dos resultados de energia de fratura, bem como a barra de resultado do desvio padrão para cada mistura, obtidos através do ensaio de tração em disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact*) de misturas asfálticas preparadas em laboratório e ensaiadas a temperatura de 25°C.

Observa-se a partir da Tabela 5.2 e da Figura 5.24, que os maiores valores de energia de fratura foram os das misturas com ligante PG 70-16, para o tamanho máximo nominal de agregados 19,1 mm ou para 12,7 mm, quando são comparados às demais misturas. Os valores mais baixos de energia de fratura foram os da mistura com ligante Asfalto-Borracha. Destaca-se que os valores encontrados para a mistura com ligante Flex 65/90 foram praticamente equivalentes aos encontrados com ligante PG 64-16, para mistura com granulometria 19,1 mm e para 12,7 mm.

Como verificado nos primeiros testes, as misturas com ligante PG 70-16, para as duas granulometrias estudadas, apresentaram os maiores valores de energia de fratura quando ensaiadas a temperatura de 25°C.

Tabela 5.2: Resultados dos ensaios de fratura em misturas asfálticas moldados em laboratório e realizados a temperatura de 25°C.

Lote	Mistura	CP	Espessura (B) (mm)	W-a (mm)	Área (N.m)	Energia de Fratura (J/m <sup>2</sup> )	Média (J/m <sup>2</sup> )	DESVPAD (J/m <sup>2</sup> )	Média - Despad (J/m <sup>2</sup> )	Média + Despad (J/m <sup>2</sup> )	Coef. de variação
44/08	Flex 65/90 - 19.1 mm	A12	48,44	82,81	3,78	942,72	956,74	154,82	801,92	1111,56	16,18
		A22	50,48	82,11	3,35	809,40					
		A32	52,64	82,65	4,86	1118,09					
296/08	Asfalto-Borracha - 19.1 mm	F12	50,79	83,43	1,65	388,30	419,80	39,85	379,95	459,65	9,49
		F22	50,78	83,90	1,73	406,51					
		F32	49,49	83,76	1,93	464,60					
45/08	PG 70-16 - 19.1 mm	B12	52,01	81,80	7,26	1706,03	1646,20	288,15	1358,05	1934,35	17,50
		B22	50,75	82,42	5,58	1332,83					
		B32	52,70	83,06	8,32	1899,74					
241/08	PG 70-16 - 12.7 mm	C12	55,04	81,82	5,67	1259,54	1527,90	232,80	1295,10	1760,70	15,24
		C22	52,65	80,93	7,14	1675,52					
		C32	50,64	81,44	6,80	1648,64					
259/08	PG 64-16 - 19.1 mm	E12	49,61	82,54	3,05	744,47	857,24	159,49	697,75	1016,73	18,60
		E22	50,04	81,71	3,97	970,02					
247/08	PG 64-16 - 12.7 mm	D12	51,41	81,94	2,72	646,03	698,82	60,64	638,18	759,46	8,68
		D22	49,76	81,20	2,77	685,38					
		D32	52,43	81,26	3,26	765,06					

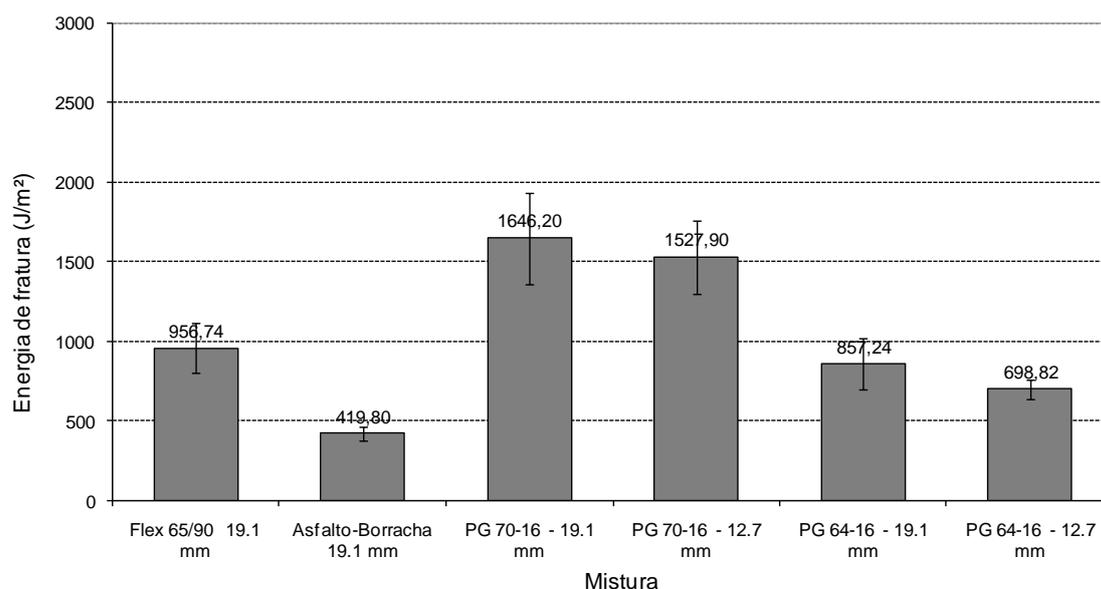


Figura 5.24: Resultados da energia de fratura para as misturas de laboratório ensaiadas a 25°C.

Por fim, ao se analisar apenas as misturas com ligantes convencionais (PG 70-16 e PG 64-16), observa-se que os valores das misturas com granulometria de 19,1 mm apresentaram valores de fratura ligeiramente mais elevados quando comparados à granulometria de 12,7 mm. Ao se analisar apenas as misturas com ligantes modificados (Flex 65/90 e Asfalto-Borracha), nota-se claramente que a mistura com ligante Flex 65/90 apresentou valores superiores ao Asfalto-Borracha. Reitera-se que todos esses

resultados foram obtidos através do ensaio de tração em disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact*) a temperatura de 25°C. Repete-se a observação de que estes ligantes modificados visavam, atender, preferencialmente a baixas temperaturas, como se verá a seguir.

### 5.2.2 Resultados dos ensaios realizados a temperatura de 10°C

Mostram-se nas Figuras 5.25 a 5.30 as curvas de força (kN) *versus* abertura de trinca (mm) de cada corpo-de-prova ensaiado, das diferentes misturas produzidas em laboratório neste estudo, e avaliadas através do ensaio de fratura a temperatura de 10°C.

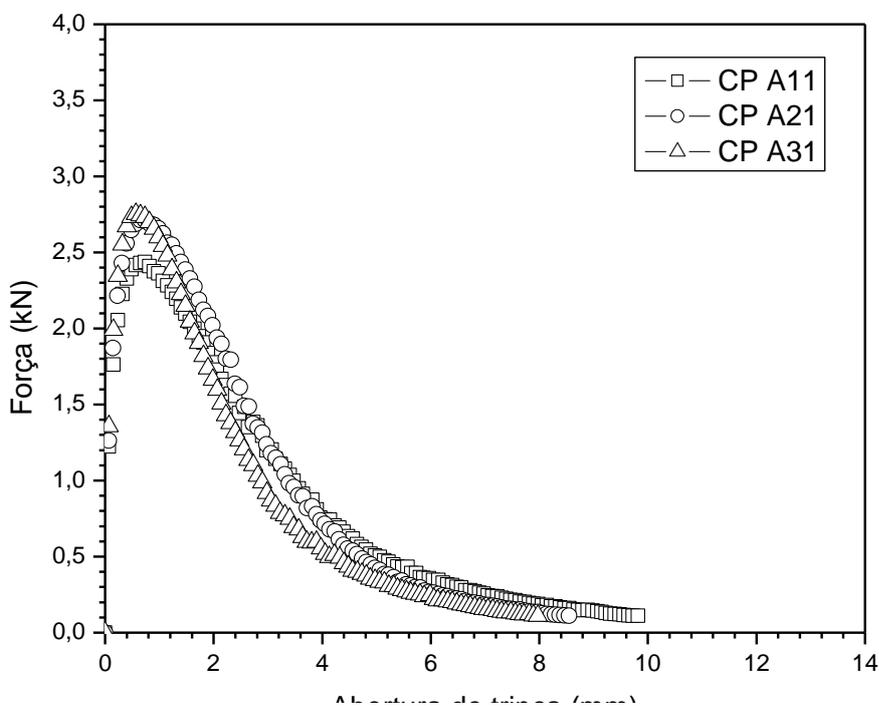


Figura 5.25: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 10°C do Lote 44/08: Flex 65/90 – 19,1 mm.

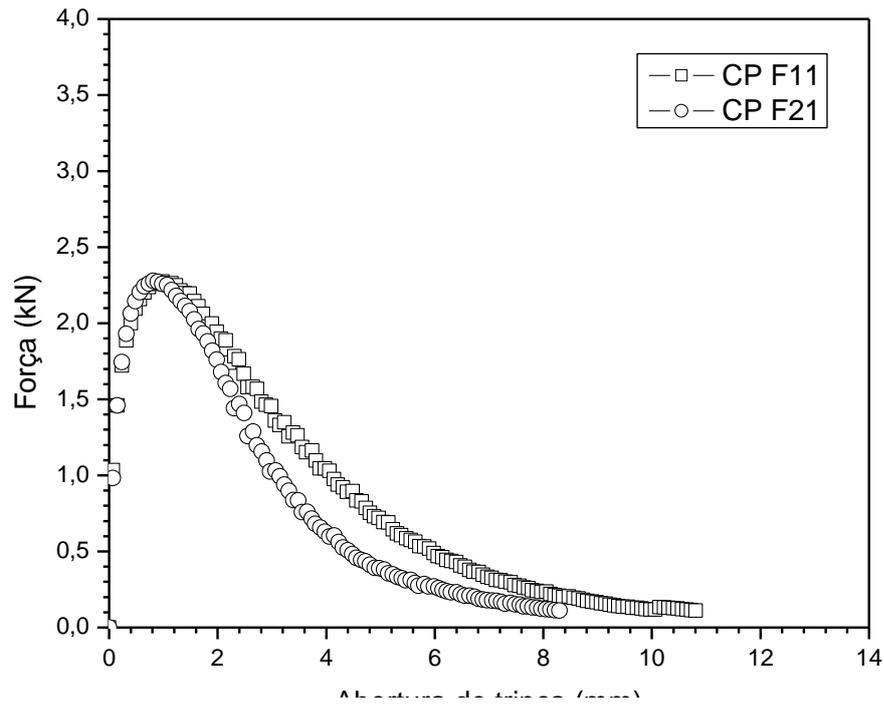


Figura 5.26: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 10°C do Lote 296/08: Asfalto-Borracha – 19,1 mm.

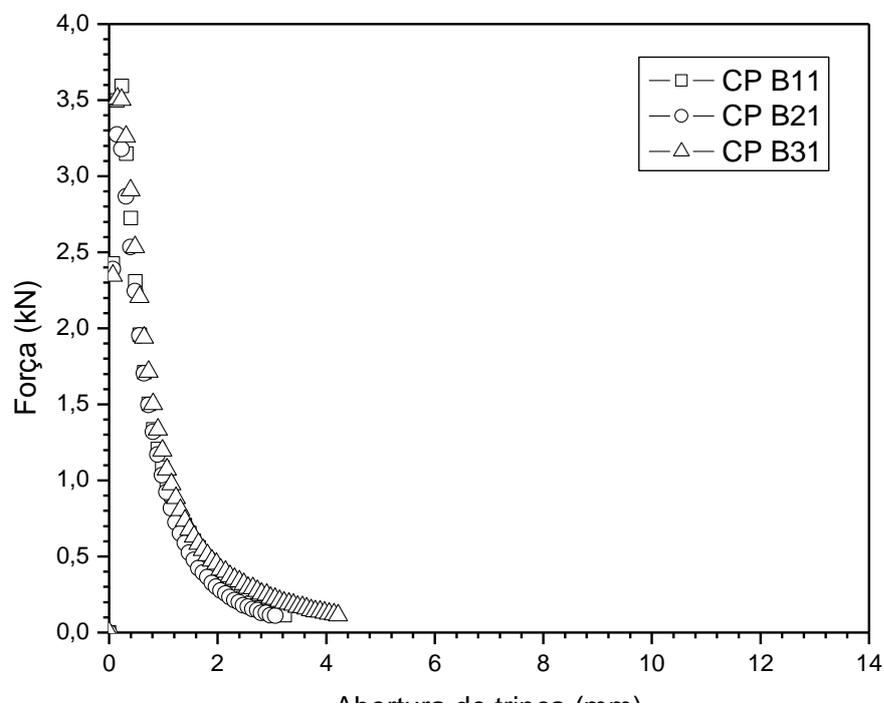


Figura 5.27: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 10°C do Lote 45/08: PG 70-16 – 19,1 mm.

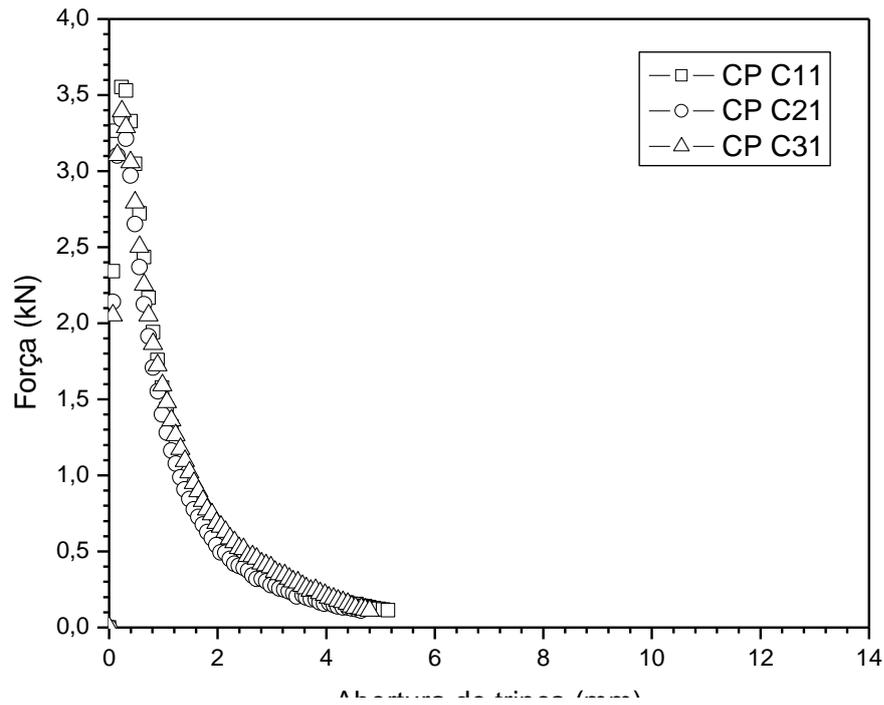


Figura 5.28: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 10°C do Lote 241/08: PG 70-16 – 12,7 mm.

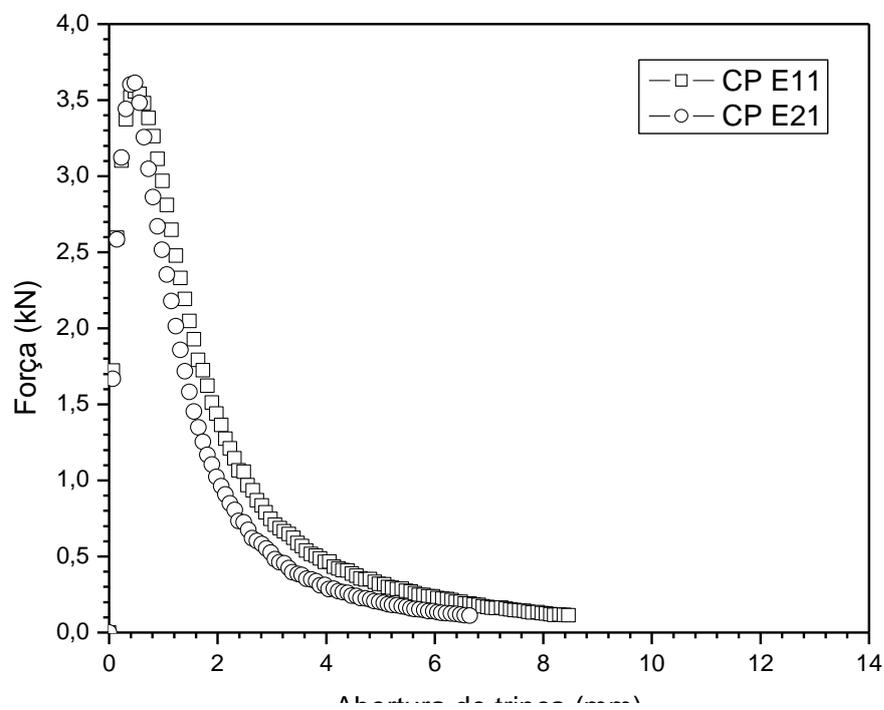


Figura 5.29: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 10°C do Lote 259/08: PG 64-16 – 19,1 mm.

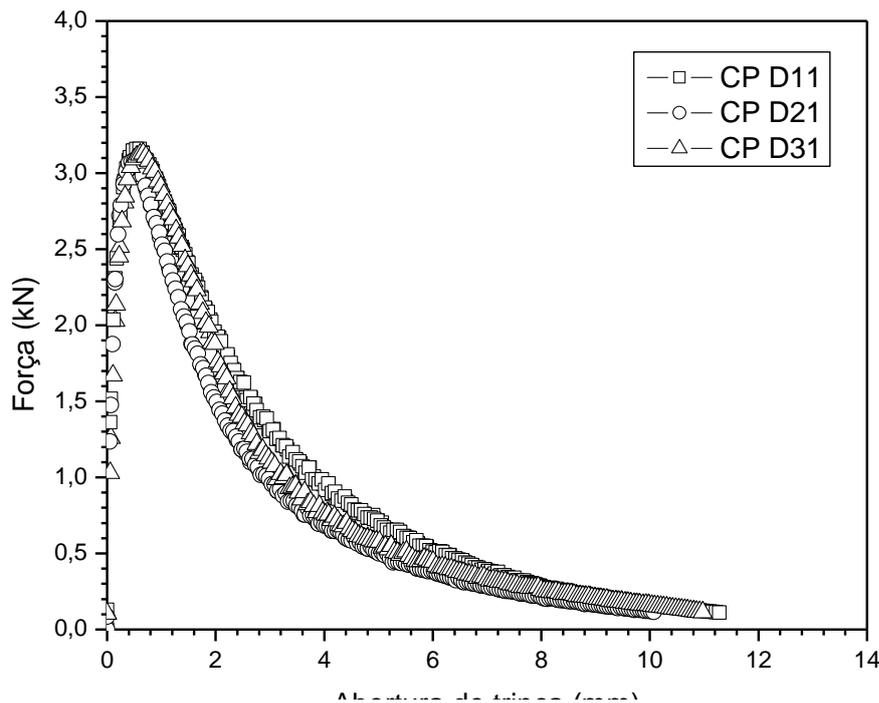


Figura 5.30: Curva Força *versus* Abertura de Trinca dos corpos-de-prova ensaiados a 10°C do Lote 247/08: PG 64-16 – 12,7 mm.

Na Tabela 5.3 e na Figura 5.31 apresentam-se os resultados de fratura, para todas as misturas asfálticas ensaiadas a temperatura de 10°C. Os resultados de energia de fratura expressos em J/m<sup>2</sup>, são apresentados na Tabela 5.3 junto com a média da espessura do corpo-de-prova, a distância (W-a), referente ao comprimento para o início e propagação da trinca, bem como as médias do desvio padrão e do coeficiente de variação para cada mistura. Na Figura 5.31 são mostrados comparativamente, os resultados da energia de fratura para cada mistura, a temperatura de 10°C.

Observa-se na Figura 5.31 que a mistura com ligante PG 70-16, para a granulometria de 19,1 mm quanto para a de 12,7 mm apresentou os menores resultados de fratura. A maior energia de fratura foi obtida pela mistura com PG 64-16 com tamanho máximo nominal de agregados de 12,7 mm. As misturas com ligantes modificados (Flex 65/90 e Asfalto Borracha) apresentaram valores muito próximos de energia de fratura. Ao se analisar comparativamente o desempenho das misturas com ligantes convencionais (PG 70-16 e PG 64-16), observa-se que as misturas com granulometria 12,7 mm apresentaram maiores valores de energia de fratura que a de 19,1 mm. Os menores

valores de energia de fratura foram os da mistura com ligante PG 70-16 e granulometria de 19,1 mm; os maiores valores de energia foram os apresentados pela mistura com ligante PG 64-16 e granulometria 12,7 mm.

Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de fratura em misturas asfálticas moldados em laboratório e realizados a temperatura de 10°C.

Lote	Mistura	CP	Altura (B) (mm)	W-a (mm)	Área (N.m)	Energia de Fratura (J/m <sup>2</sup> )	Média (J/m <sup>2</sup> )	DESVPAD (J/m <sup>2</sup> )	Média - Despad (J/m <sup>2</sup> )	Média + Despad (J/m <sup>2</sup> )	Coef. de variação
44/08	Flex 65/90 - 19.1 mm	A11	52,23	81,52	8,54	2005,08	1922,26	157,00	1765,26	2079,26	8,17
		A21	51,48	82,92	8,63	2020,51					
		A31	52,83	82,16	7,56	1741,19					
296/08	Asfalto-Borracha - 19.1 mm	F11	49,52	83,90	9,54	2296,03	2009,93	404,61	1605,32	2414,54	20,13
		F21	51,37	83,31	7,38	1723,83					
45/08	PG 70-16 - 19.1 mm	B11	50,11	83,23	3,12	747,66	753,89	72,51	681,38	826,40	9,62
		B21	49,60	82,98	2,82	684,70					
		B31	51,57	82,52	3,53	829,31					
241/08	PG 70-16 - 12.7 mm	C11	54,65	82,85	4,49	990,86	985,13	83,96	901,17	1069,08	8,52
		C21	53,17	81,41	3,89	898,45					
		C31	50,03	82,55	4,40	1066,07					
259/08	PG 64-16 - 19.1 mm	E11	51,66	83,03	7,83	1825,97	1638,85	264,62	1374,23	1903,47	16,15
		E21	51,53	82,27	6,15	1451,73					
247/08	PG 64-16 - 12.7 mm	D11	52,87	82,38	10,72	2460,84	2306,73	247,41	2059,32	2554,14	10,73
		D21	51,94	82,24	8,63	2021,35					
		D31	48,59	82,25	9,74	2438,00					

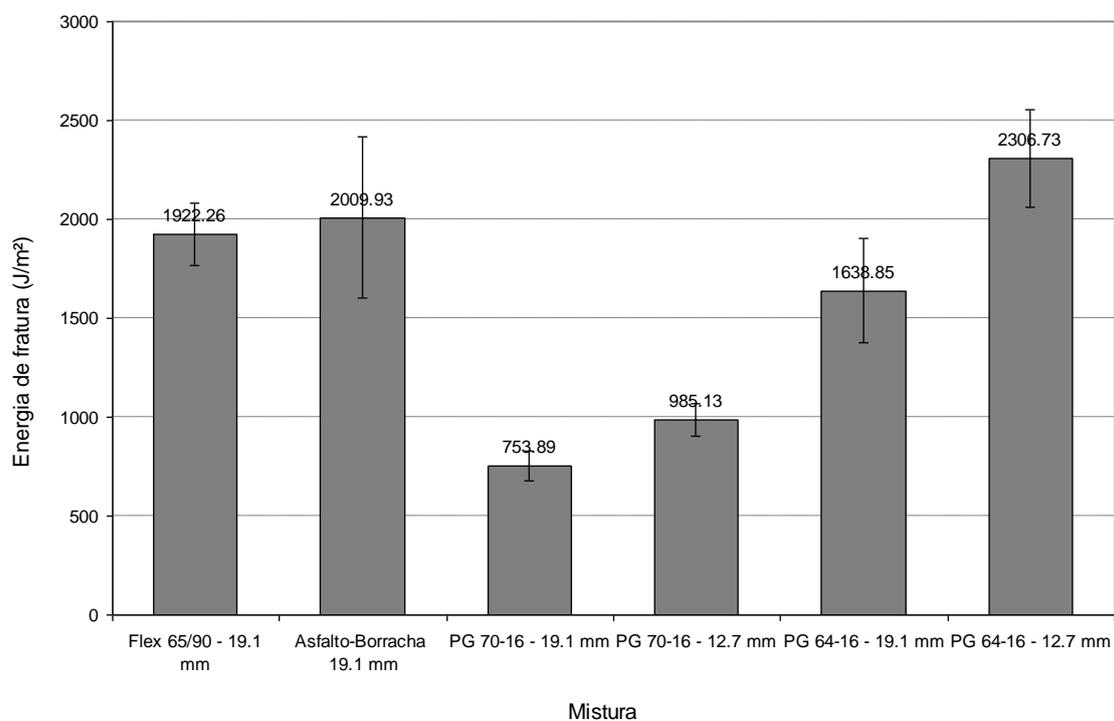


Figura 5.31: Resultados da energia de fratura para as misturas de laboratório ensaiadas a 10°C.

### **5.2.3 Comparativo dos ensaios realizados a temperatura de 25°C e 10°C com as amostras preparadas em laboratório nesta pesquisa**

Observa-se na Figura 5.32, os resultados comparativos da energia de fratura das misturas asfálticas preparadas nesta pesquisa e ensaiadas a 25°C e 10°C, nos testes de fratura realizados no Laboratório de Estruturas da COPPE, coordenado pelo Prof. Romildo Dias Toledo.

Ao se analisar comparativamente os resultados obtidos nos ensaios de fratura de misturas asfálticas para as temperaturas de 25°C e 10°C, pode-se observar a mudança de comportamento apresentada por todas as misturas estudadas nesta pesquisa em função da temperatura do ensaio:

- As misturas com ligantes modificados (Flex 65/90 e Asfalto-Borracha), a 25°C apresentaram valores muito inferiores do que a 10°C. A 25°C a mistura com Flex 65/90 apresentou valores o dobro dos apresentados com Asfalto-Borracha, contudo quando testadas a 10°C as duas misturas apresentaram valores aproximados.
- Nas misturas com ligantes convencionais observa-se que as preparadas com o ligante PG 70-16 apresentaram os maiores valores de energia de fratura a 25°C, independente da composição granulométrica, quando comparados aos resultados apresentados na temperatura de 10°C. Para o ligante PG 64-16 ocorre o contrário, a 25°C apresentou valores de energia de fratura inferiores a de 10°C.

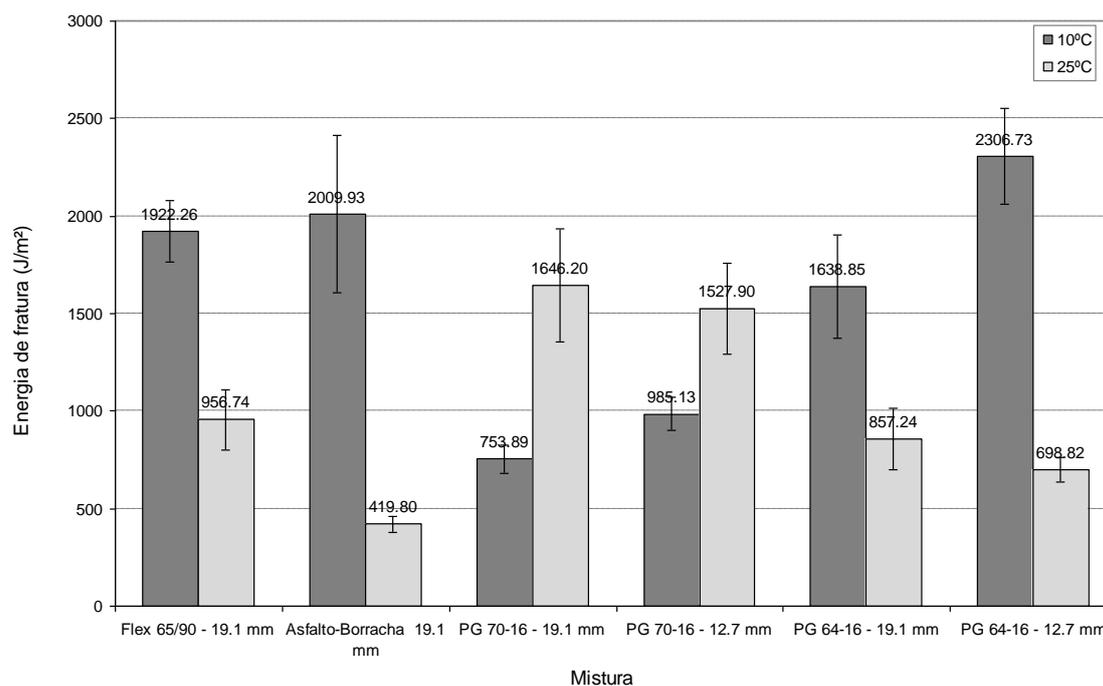


Figura 5.32: Resultados de fratura para as misturas de laboratório ensaiadas a 25°C e a 10°C.

Cumprir destacar que os maiores valores de energia de fratura obtidos nos ensaios realizados a 25°C foram apresentados pela mistura com ligante PG 70-16 com granulometria de 19,1 mm, contudo ao se considerar a faixa de variação do desvio padrão, a mistura com granulometria de 12,7 mm obteve valores aproximados. Ao se observar os resultados das misturas a 10°C os maiores valores de fratura foram obtidos pela mistura com ligante PG 64-16, todavia as misturas com ligantes modificados (Flex 65/90 e Asfalto-Borracha) apresentaram valores na mesma faixa.

Observa-se através das Figuras 5.18 a 5.23 (misturas ensaiadas a 25°C) e das Figuras 5.25 a 5.30 (misturas ensaiadas a 10°C), das curvas de força *versus* abertura de trinca, a mudança no comportamento das misturas com ligantes convencionais, que a 25° apresentaram forças de pico muito inferiores do que a 10°C, comportamento típico da mudança de material dúctil para frágil.

Observa-se, ainda, na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5, os resultados da força de pico (carga máxima) obtida para todas as misturas estudadas nesta pesquisa através dos ensaios de

tração realizados a temperatura de 25°C e 10°C, respectivamente, bem como os valores de abertura de trinca e tempo em função da mesma.

Tabela 5.4: Resultados da força de pico dos ensaios de tração realizados a temperatura de 25°C nas misturas moldadas em laboratório.

Lote	Mistura	25°C			
		CP	Força de Pico (kN)	Abertura de Trinca (mm)	Tempo (seg.)
44/08	Flex 65/90 - 19.1 mm	A12	0.43	2.17	130.80
		A22	0.45	2.17	130.80
		A32	0.60	2.98	179.30
296/08	Asfalto-Borracha - 19.1 mm	F12	0.22	1.90	114.50
		F22	0.25	1.86	112.30
		F32	0.33	1.66	100.70
45/08	PG 70-16 - 19.1 mm	B12	0.98	1.77	106.90
		B22	0.94	1.97	118.80
		B32	1.35	2.28	137.60
241/08	PG 70-16 - 12.7 mm	C12	0.74	1.91	114.40
		C22	0.99	2.37	142.70
		C32	0.94	2.70	162.50
259/08	PG 64-16 - 19.1 mm	E12	0.51	1.79	107.90
		E22	0.50	2.64	158.90
247/08	PG 64-16 - 12.7 mm	D12	0.41	3.13	187.90
		D22	0.40	2.54	152.30
		D32	0.48	3.34	200.00

Tabela 5.5: Resultados da força de pico dos ensaios de tração realizados a temperatura de 10°C nas misturas moldadas em laboratório.

Lote	Mistura	10°C			
		CP	Força de Pico (kN)	Abertura de Trinca (mm)	Tempo (seg.)
44/08	Flex 65/90 - 19.1 mm	A11	2.44	0.73	44.70
		A21	2.71	0.63	39.00
		A31	2.76	0.63	39.00
296/08	Asfalto-Borracha - 19.1 mm	F11	2.28	0.96	58.40
		F21	2.28	0.82	50.20
45/08	PG 70-16 - 19.1 mm	B11	3.60	0.22	14.30
		B21	3.29	0.16	10.80
		B31	3.67	0.19	12.50
241/08	PG 70-16 - 12.7 mm	C11	3.57	0.26	16.80
		C21	3.34	0.23	15.00
		C31	3.42	0.26	16.30
259/08	PG 64-16 - 19.1 mm	E11	3.56	0.52	32.10
		E21	3.63	0.44	27.50
247/08	PG 64-16 - 12.7 mm	D11	3.16	0.53	32.40
		D21	3.09	0.48	29.80
		D31	3.13	0.66	40.80

Na figura 5.33 mostram-se os resultados médios da força de pico obtida para todas as misturas ensaiadas a 25°C e 10°C comparativamente.

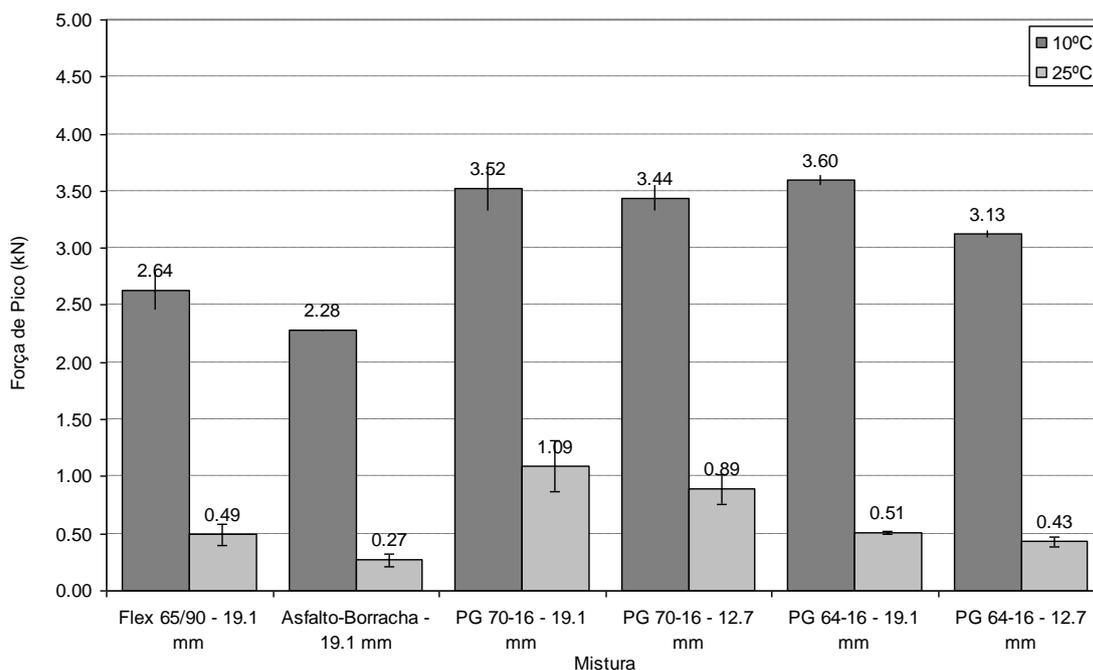


Figura 5.33: Resultados da média da Força de Pico (kN) para as misturas de laboratório ensaiadas a 25° C e a 10°C.

Ao se analisar comparativamente os resultados obtidos de força de pico (carga máxima) obtida para cada mistura, a dada temperatura de ensaio, bem como a abertura da trinca (mm) e o tempo (seg.) em função da mesma nos ensaios de tração realizados em disco com fenda, podem ser feitas as seguintes observações:

- Observando os resultados de força de pico das misturas ensaiadas a 25°C e de energia de fratura para todas as misturas, mostrados na Figura 5.32, nota-se que as misturas com ligante PG 70-16 com tamanho máximo nominal de agregados 19,1 mm apresentaram as maiores forças de pico e os maiores valores de energia de fratura;
- Ao se analisar os resultados obtidos para as misturas com ligantes modificados (Flex 65/90 e Asfalto-Borracha) nota-se que as maiores forças de pico foram obtidas pela mistura Flex 65/90, que apresentou o dobro dos valores do Asfalto-Borracha, e analisando os resultados de energia de fratura nota-se o mesmo comportamento;

- Ao se analisar os resultados de força de pico obtidos para todas as misturas ensaiadas a 10°C, nota-se comportamento diferenciado comparativamente aos resultados obtidos de energia de fratura para as mesmas misturas e temperatura (Figura 5.32). Por exemplo, as misturas com ligante PG 70-16 apresentaram os menores valores de energia de fratura, contudo, para a força de pico os maiores valores foram obtidos por esta mistura, mostrando ser bem resistente. Observa-se, também, que os resultados de força de pico foram muito aproximados para todas as misturas, contudo nas Tabelas 5.4 e 5.5 nota-se que o tempo relacionado a cada força de pico é diferenciado. Pode-se observar que as misturas com ligantes convencionais PG 70-16 e PG 64-16, mostram-se misturas com comportamento frágil em função da energia de fratura, contudo nas forças de pico mostram-se bastante resistentes e apresentam valores superiores às misturas com ligantes modificados.

Por fim, conforme se observa na Figura 5.34, cabe registrar que em algumas amostras, como também apresentado na literatura internacional (Wagoner *et al*, 2004) ocorreu o desvio da trinca em torno dos agregados. Destaca-se que esta ocorrência pode acabar influenciando na análise dos resultados.

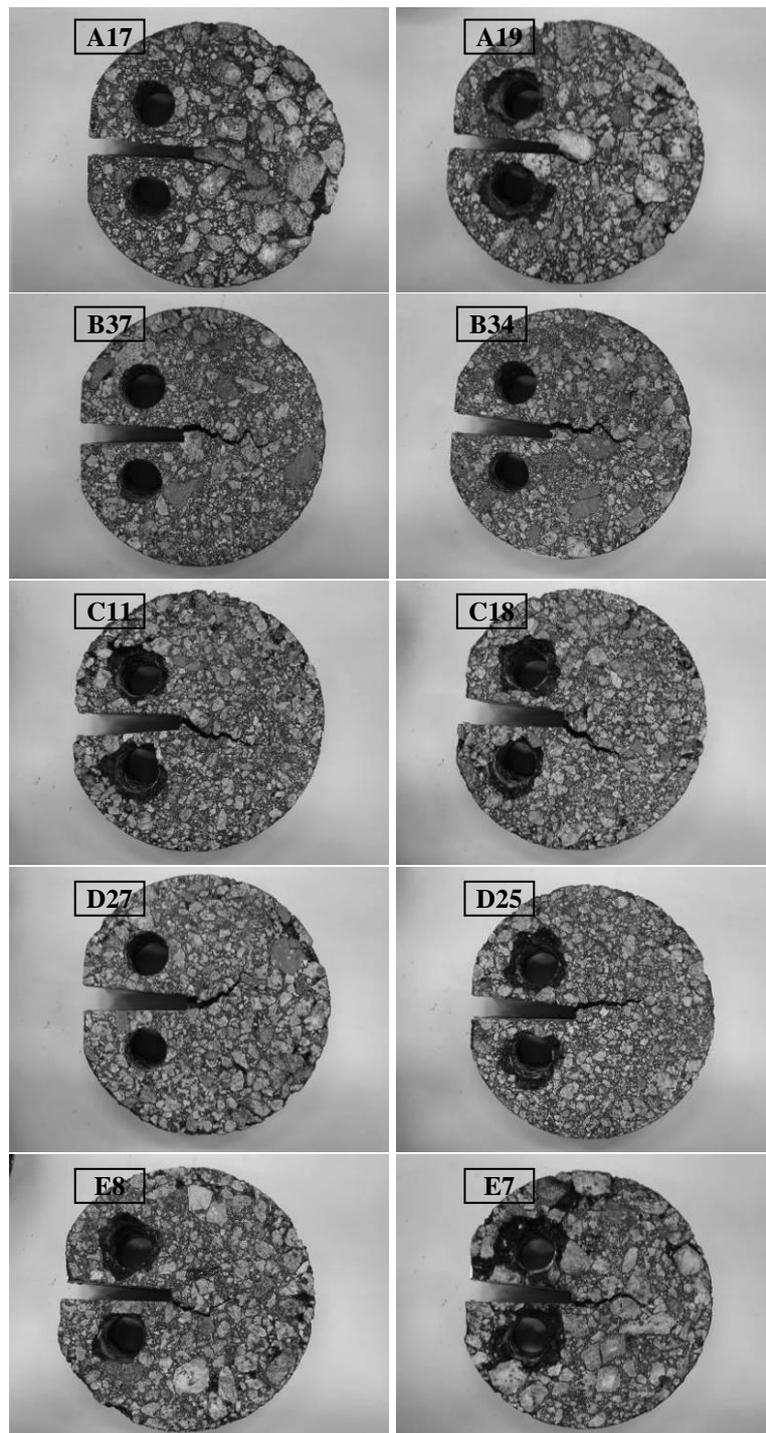


Figura 5.34: Exemplos de corpos-de-prova nos quais houve desvio da trinca durante o ensaio de fratura.

### 5.3 CORRELAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS ENSAIADAS A 25°C E RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

Salienta-se que para as misturas ensaiadas em laboratório, bem como para os corpos-de-prova utilizados nos primeiros testes de fratura foram realizados os ensaios de resistência a tração. Contudo para esta análise serão apenas considerados os resultados de resistência a tração das amostras moldadas no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ.

Observam-se na Tabela 5.6 os valores da resistência a tração das amostras ensaiadas e na Figura 5.35 o gráfico da média dos valores em comparativo para todas as misturas.

Tabela 5.6: Resultados da Resistência a tração das misturas produzidas em laboratório.

<b>Lote</b>	<b>Mistura</b>	<b>CP</b>	<b>Resistência a tração (MPa)</b>
44/08	Flex 65/90 - 19.1 mm	A1	1,36
		A2	1,51
		A3	1,55
		<b>Média</b>	<b>1,47</b>
296/08	Asfalto-Borracha - 19.1 mm	F1	1,42
		F2	1,46
		F3	1,59
		<b>Média</b>	<b>1,49</b>
45/08	PG 70-16 - 19.1 mm	B1	1,98
		B2	2,18
		B3	2,24
		<b>Média</b>	<b>2,14</b>
241/08	PG 70-16 - 12.7 mm	C1	2,02
		C2	1,98
		C3	2,13
		<b>Média</b>	<b>2,04</b>
259/08	PG 64-16 - 19.1mm	E1	1,54
		E2	1,69
		E3	1,64
		<b>Média</b>	<b>1,62</b>
247/08	PG 64-16 - 12.7 mm	D1	1,82
		D2	1,49
		D3	1,59
		<b>Média</b>	<b>1,64</b>

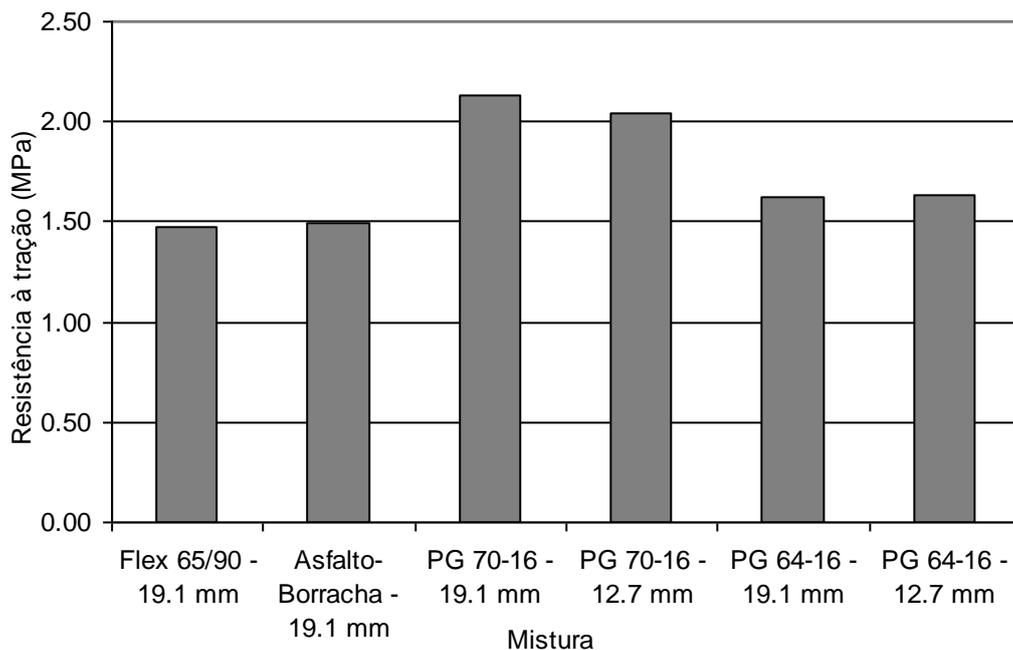


Figura 5.35: Resultados de resistência a tração para as misturas estudadas.

Ao se observar os resultados da resistência a tração das misturas ensaiadas, nota-se que a mistura com ligante PG 70-16, independente da faixa granulométrica apresentou os maiores valores de resistência. Também se destaca que os valores mostrados pelas misturas com ligantes modificados não apresentaram significativa diferença em relação ao valores obtidos pela mistura com ligante PG 64-16.

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa correlacionando os dados obtidos através do tradicional ensaio de resistência a tração, conhecido nacional e internacionalmente como Ensaio de Compressão diametral, ou tração indireta, com os dados obtidos através dos ensaios de tração em disco circular com fenda (*Disk-Shaped Compact*), apresenta-se na Tabela 5.7 os resultados para cada ensaio, bem como a média dos mesmos e na Figura 5.36 mostra-se um gráfico de correlação para os ensaios realizados.

Tabela 5.7: Resultados da Resistência a tração e Energia de fratura das misturas produzidas em laboratório.

<b>Lote</b>	<b>Mistura</b>	<b>CP</b>	<b>Resistência a tração (MPa)</b>	<b>Energia de Fratura (J/m<sup>2</sup>)</b>
44/08	Flex 65/90 - 19.1 mm	A1	1,36	942,72
		A2	1,51	809,40
		A3	1,55	1118,09
		<b>Média</b>	<b>1,47</b>	<b>956,74</b>
296/08	Asfalto-Borracha - 19.1 mm	F1	1,42	388,30
		F2	1,46	406,51
		F3	1,59	464,60
		<b>Média</b>	<b>1,49</b>	<b>419,80</b>
45/08	PG 70-16 - 19.1 mm	B1	1,98	1706,03
		B2	2,18	1332,83
		B3	2,24	1899,74
		<b>Média</b>	<b>2,14</b>	<b>1646,20</b>
241/08	PG 70-16 - 12.7 mm	C1	2,02	1259,54
		C2	1,98	1675,52
		C3	2,13	1648,64
		<b>Média</b>	<b>2,04</b>	<b>1527,90</b>
259/08	PG 64-16 - 19.1mm	E1	1,54	744,47
		E2	1,69	970,02
		E3	1,64	
		<b>Média</b>	<b>1,62</b>	<b>857,24</b>
247/08	PG 64-16 - 12.7 mm	D1	1,82	646,03
		D2	1,49	685,38
		D3	1,59	765,06
		<b>Média</b>	<b>1,64</b>	<b>698,82</b>

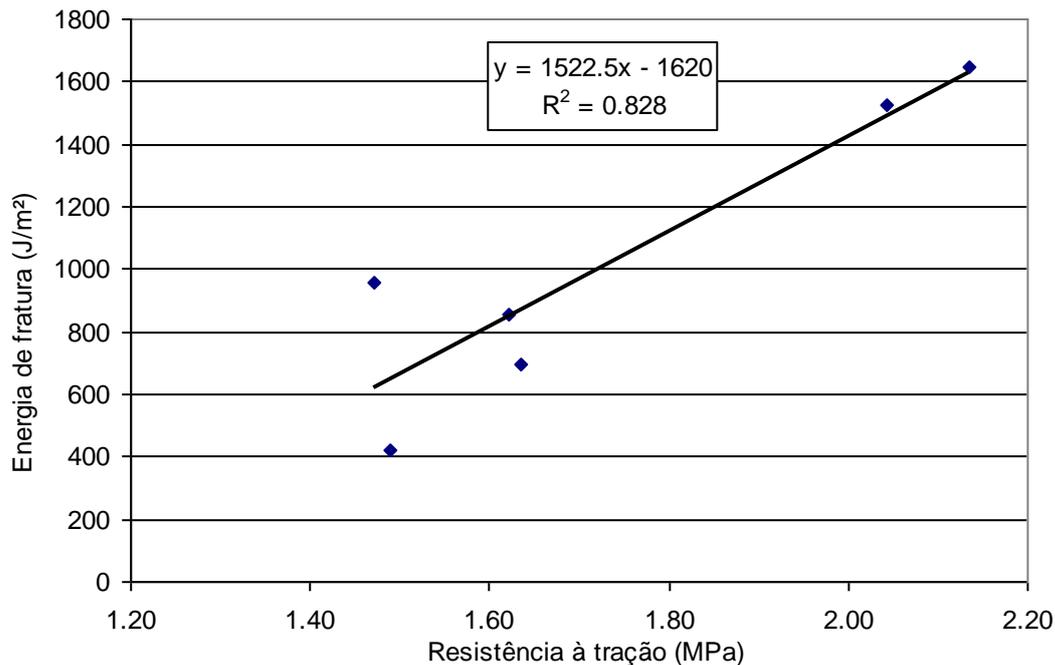


Figura 5.36: Correlação entre a Resistência a tração e a Energia de Fratura para as misturas estudadas.

Ao analisar a correlação entre os valores de resistência a tração e de energia de fratura para os corpos-de-prova das misturas preparadas em laboratório, fica evidente que quanto maior a resistência tração maior a energia de fratura para as amostras estudadas.

Contudo, seria de grande importância a continuidade desta pesquisa no intuito de tentar correlacionar os resultados dos ensaios executados tradicionalmente no país com os resultados obtidos nos testes de fratura. Salienta-se que além de resultados de resistência de tração, todas as misturas estudadas nesta pesquisa possuem resultados de módulo de resiliência, bem como resultados de fadiga a tensão controlada e a deformação, para que em futuros trabalhos possam ser utilizados e estudados através de mais análises as várias combinações possíveis.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Pode-se considerar que o objetivo principal desta pesquisa foi atingido, que era aplicar o ensaio de fratura em misturas asfálticas utilizando-se o corpo-de-prova em forma de disco circular com fenda.

Para este fim projetaram-se e construíram-se equipamentos para preparação dos corpos-de-prova e os acessórios necessários à adaptação do equipamento de carregamento propriamente dito a prensa.

Para a preparação dos corpos-de-prova foi necessária à execução de furos de carregamento e cortes do entalhe e faceamento, com o desenvolvimento de um molde para fixar os corpos-de-prova de modo a permitir a pré-trinca e o faceamento nos mesmos, que não está descrito na Norma ASTM de referência para esta pesquisa.

Os resultados obtidos nos ensaios de fratura de misturas asfálticas para as temperaturas de 25°C e 10°C, mostraram claramente a mudança de comportamento apresentada pelas misturas estudadas nesta pesquisa quanto à temperatura do ensaio, composição granulométrica e tipo de ligante.

As misturas com ligantes modificados (Flex 65/90 e Asfalto-Borracha), a 25°C apresentaram valores de energia de fratura muito inferiores do que a 10°C. A 25°C a mistura com Flex 65/90 apresentou valores duas vezes maiores que os apresentados com Asfalto-Borracha, contudo quando testadas a 10°C as duas misturas apresentaram valores semelhantes.

Nas misturas de ligantes convencionais, observa-se que as preparadas com o ligante PG 70-16 apresentaram os maiores valores de energia de fratura a 25°C, independente da composição granulométrica, quando comparados aos resultados na temperatura de 10°C. Para o ligante PG 64-16 ocorreu o contrário.

Os maiores valores de energia de fratura obtidos nos ensaios realizados a 25°C, foram apresentados pela mistura com ligante PG 70-16 e granulometria de 19,1 mm.

Para os ensaios a 10°C, os maiores valores de fratura foram obtidos com a mistura de ligante PG 64-16, sendo que as misturas com ligantes modificados (Flex 65/90 e Asfalto-Borracha) apresentaram valores na mesma ordem de grandeza.

Como verificado nos primeiros testes, as misturas com ligante PG 70-16, para as duas granulometrias estudadas, apresentaram os maiores valores de fratura quando ensaiadas a temperatura de 25°C.

Ao correlacionar-se os resultados de resistência de tração das misturas moldadas no Laboratório de Pavimentação da COPPE/UFRJ com os resultados obtidos através dos testes de fratura a 25°C, nota-se claramente que quanto maior a resistência a tração maior é a energia de fratura para as misturas estudadas nesta pesquisa.

Como sugestão das pesquisas futuras:

1. Fazer um planejamento fatorial para considerar a influência de fatores tais como: temperatura; composição granulométrica; disposição dos agregados nos corpos-de-prova; localização da trinca inicial; tipo de ligante etc, na energia de fratura.
2. Realizar comparações entre os resultados desse ensaio e os resultados dos ensaios correntes de fadiga tradicionais a tensão controlada e também a deformação controlada nas mesmas misturas para melhor interpretar os resultados e determinar o comportamento das misturas asfálticas quanto ao início do trincamento e sua propagação.
3. Inovar correlações com resultados de ensaio de resistência a tração por compressão diametral estática.
4. Estudar novos processos executivos para a realização dos furos de carregamento, novos moldes e equipamentos, visando diminuir o tempo necessário para a preparação dos corpos-de-prova;
5. Realizar pesquisa comparando-se a energia de fratura de amostras moldadas em laboratório e amostras extraídas de campo, já que esta configuração de amostra foi desenvolvida também com este intuito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials.  
"Method for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device". Provisional Standards TP9-96, Washington, D.C., April, 2000.
- AASHTO R321-03 - "Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt Subjected to Repeated Flexural Bending" *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*, 24<sup>th</sup> Edition, 2004.
- AASHTO R35-04 - "Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA)," *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*, 24<sup>th</sup> Edition, 2004.
- AASHTO T322-03 - "Standard Test Method for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device," *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*, 24<sup>th</sup> Edition, 2004.
- ASTM 7313 -07 - "Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry", *ASTM International*, 2007.
- ASTM E1820-01 - "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, ASTM International, pp.1031-1076, 2002.
- ASTM E399-90 - "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, ASTM International, pp.443-473, 2002.
- BAZANT, Z. P. e PLANAS, J. - *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasi-Brittle Materials*, CRC Press, Boca Raton, 1998.
- BHURKE, A.S., SHIN, E.E., and DRZAL, L.T. - "Fracture Morphology and Fracture Toughness Measurement of Polymer-Modified Asphalt Concrete," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No 1590, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp 23-33, 1997.

- BRAZ, Delson - *Tomografia computadorizada no estudo da mecânica da fratura em misturas asfálticas* Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear). COPPE/UFRJ. 1997.
- BRAZ, M. H. P. - *Propriedades de Fadiga de soldas de alta resistência e baixa liga com diferentes composições microestruturais*. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 1999.
- CHONG, K.P. e KURUPPU, M.D. "New Specimens for Mixed Mode Fracture Investigations of Geomaterials", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 30, No. 5, 701-712, 1988.
- EFFTING, C. "*Mecânica da fratura aplicada aos materiais duteis e frágeis*". Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC. Joinville, SC, 247 p., 2004.
- FRANCO, F. A. C. P - "*Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV*". Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 2007.
- GRIFFITH, A.A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions, Series A*, v. 221, 1920, p.163-198.
- HOSSAIN, M., SWARTZ, S., e HOQUE, E. "Fracture and Tensile Characteristics of Asphalt-Rubber Concrete" *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp.287-294, 1999.
- HUANG, Y.H., *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- JACOBS, M.M.J., P.C HOPMAN., e A.A.A MOLENAAR, "Application of Fracture Mechanics Principles to Analyze Cracking in Asphalt Concrete," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 65, pp. 1-39, 1996.
- KIM, K.W. e EL HUSSEIN, H.M., "Variation of Fracture Toughness of Asphalt Concrete Under Low Temperatures," *Construction and Building Materials*, Vol. 11, Nos. 7-8, pp. 403-411, 1997.
- LI, X. e MARASTEANU, M.O. "Evaluation of the Low Temperature Fracture Resistance of Asphalt Mixtures Using the Semi Circular Bend Test.", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist*, Vol. 73, 401-426, 2004.
- LI, X., MARASTEANU, M.O., DAI, S., e LUKANEN, E. "Prediction of Low Temperature Crack Spacing in Asphalt Pavements", *Proceedings, the 7th International conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Trondheim, Norway, 2005.

- LIM, I. L., JOHNSTON, I. W. e CHOI, S.K. "Stress Intensity factors for Semi-Circular Specimens Under Three-Point Bending." *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.44, No.3, 363-382, 1993.
- LIM, I. L., JOHNSTON, I.W., CHOI, S.K. e BOLAND, J.N. "Fracture Testing of a Soft Rock with Semi-Circular Specimens Under Three point Bending. Part1-Mode I." *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science* 31, 199-212, 1994.
- LOUREIRO, T. G. *Estudo da evolução do dano por fadiga em misturas asfálticas*. Dissertação UFC. 2003
- MAJIDZADEH, K., KAUFFMANN, E. e RAMSAMOOJ, D. "Application of Fracture Mechanics in the Analysis of Pavement Fatigue", *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 40, pp. 227-246, 1971.
- MARASTEANU, M.; ZOFKA, A.; TUROS, M.; LI, X.; VELASQUEZ, R.; LI, X.; BUTTLAR, W.; PAULINO, G.; BRAHAM, A.; DAVE, E.; OJO, J.; BAHIA, H.; WILLIAMS, C.; BAUSANO, J.; GALLISTEL, A. e MCGRAW J. Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements. National Pooled Fund Study 776. Final Report. MN/RC 2007-43. Minnesota Department of Transportation. Research Services Section. 395 John Ireland Boulevard. St. Paul, MN 55155, 338 p., 2007.
- MARASTEANU, M.O., LABUZ, J.F., DAI, S. e LI, X. "Determining the Low-Temperature Fracture Toughness of Asphalt Mixtures," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No 1789, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 191-199, 2002.
- MARASTEANU, M.O., Li, X., CLYNE, T.R., VOLLER, V.R., TIMM, D.H. e NEWCOMB, D.E. *Low temperature cracking of asphalt concrete pavements*, Final Report, Center for Transportation Studies, University of Minnesota, Minneapolis, MN, 2007.
- MEDINA, J. e MOTTA, L.M.G., 2005 - *Mecânica dos Pavimentos*. 2ª Edição, Edição dos autores, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MOAVENZADEH, F. "Asphalt fracture". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist*, Vol. 36, 51-79, 1967.
- MOBASHER, B., MAMLOUK, M.S. e LIN, H-M. "Evaluation of Crack Propagation Properties of Asphalt Mixtures", *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 123, No. 5, pp. 405-413, 1997.

- MOLENAAR, J. M. M. e MOLENAAR, A.A.A. "Fracture Toughness of Asphalt in the Semi-Circular Bend Test", *Proceedings, 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress*, Barcelona, Spain, 2000.
- MONTEIRO, S.A. *Aplicação da Mecânica da Fratura no Trincamento no Concreto Asfáltico Utilizado em Pavimentos Rodoviários. Tese de Doutorado*, UNB, Brasília, DF, Brasil. 2003.
- NCHRP Project 1-37A Final Report. "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures", National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2004.
- PARIS, P.C. e ERDOGAN, F. "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering*, Series D, 85, No. 3, 1963.
- PAULINO, G. H., SONG, S. H., e BUTTLAR, W. G. "Cohesive Zone Modeling of Fracture in Asphalt Concrete," *Proceedings of the Fifth RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, C. Petite and I. Al-Qadi eds., May 5-7, Limoges, France, 2004.
- PAULINO, G.H. e KIM, J. H. "A New Approach to Compute T-Stress in Functionally Graded Materials by Means of the Interaction Integral Method", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 71, pp.1901-1950, 2004.
- PINTO, S., *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1991.
- PREGO, A. S. S. "*A Memória da Pavimentação no Brasil*" ABPv, Associação Brasileira de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ, 640p., 2001.
- PREUSSLER, E.S., *Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço*. Tese de D.Sc.. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1983.
- RAMSAMOOJ, D. "Prediction of Fatigue Life of Asphalt Concrete Beams for Fracture Tests" *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 19, No. 3, pp. 231-239, 1991.
- RICE, J.R. "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks". *Journal of Applied Mechanics*, Vol.35, pp. 379-386, 1968.

- RICE, J.R. e ROSENGREN, G. F. "Plane Strain Deformation Near a Crack Tip in a Power-Law Hardening Material". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.16, pp. 1-12, 1968.
- RILEM COMMITTEE ON FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE (TC 89-FMT). Determination of the fracture parameters ( $K_{sIC}$  and  $CTOD_c$ ) of plain concrete using three-point bend test. *Materials and Structures*, v.23, p.457-460, 1991.
- RILEM COMMITTEE ON FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE (TC 89-FMT). Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete. *Materials and Structures*, v 23, p. 461-465, 1991.
- RILEM Report 5. *Fracture Mechanics Test Methods for Concrete*, Chapman & Hall, London, 1991.
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D-Y. e KENNEDY, T.W. "*Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*". NAPA Educational Foundation, Maryland, 1998.
- RODRIGUES, R. M. "*Estudo do trincamento de pavimentos*". Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 221 p., 1991.
- ROQUE, R., ZHANG, Z. e SANKAR, B. "Determination of Crack Growth Rate Parameters of Asphalt Mixtures Using the Superpave IDT." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 68, 404-433, 1999.
- RUIZ, G. PANDOLFI, A. e ORTIZ, M. "Three-dimensional Cohesive Modeling of Dynamic Mixed-Mode Fracture", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.52, pp.97-12, 2001.
- SENÇO, W. "*Manual de Técnicas de Pavimentação*", volume 1, Ed. PINI Ltda. São Paulo, SP, 1997
- SOARES, J. B; MOTTA, L. M. G. e LOUREIRO, T. G., "Estudo sobre o Dano Progressivo em Misturas Asfálticas no Ensaio de Fadiga à Compressão Diametral". ABPv – Associação Brasileira de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2006.
- SONG, S. H., G. H. PAULINO e BUTTLAR, W.G. "A Bilinear Cohesive Zone Model Tailored for Fracture of Asphalt Concrete considering Rate Effects in Bulk Materials", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol-73, No. 18, p 2829-48, 2006.

- SONG, S.H., G.H. PAULINO, e W.B. BUTTLAR, “Simulation of Crack Propagation in Asphalt Concrete Using a Cohesive Zone Model,”. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2004
- SOUZA, F. V. *Modelo multiescala para análise estrutural de compósitos viscoelásticos suscetíveis ao dano* – Dissertação UFC. 2005.
- SPECHT, L. P. “Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus”. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, RS. 279p., 2004.
- VILCHEZ, G. E. M. *Contribuição para elaboração de método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistemas anti-reflexão de trincas*. Tese (Doutorado em Engenharia de Aeronáutica e Mecânica Civil). ITA. 2002. 135p.
- WAGONER, M. P., 2006. *Fracture Testes for Bituminous-Aggregate Mixtures: Laboratory and Filed Investigations*. Doctor of Philosophy, Urbana, Illinois, EUA.
- WAGONER, M. P., BUTTLAR, W. G. e PAULINO, G.H. “Development of a Single-Edge Notched Beam Test for Asphalt Concrete Mixtures”, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 33, No. 6, pp. 452-460, 2005a.
- WAGONER, M. P., BUTTLAR, W. G. e PAULINO, G.H. "Development of a Single-Edge Notched Beam Test for the Study of Asphalt Concrete Fracture", *Geotechnical Special Publication No. 130: Advances in Pavement Engineering*, Proceedings of Sessions of the GeoFrontiers 2005 Congress, Austin, TX, 2005b.
- WAGONER, M. P., BUTTLAR, W.G., PAULINO, G.H. e BLANKENSHIP, P. "Laboratory Testing Quite for Characterization of Asphalt Concrete Mixtures Obtained from Field Cores", submitted to *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2007.
- WAGONER, M.P., BUTTLAR, W.G. e PAULINO, G.H. "Disk-Shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture" *Society for Experimental Mechanics*, Vol. 45, No. 3, pp. 270-277, 2005.
- WAGONER, M.P., BUTTLAR, W.G. e PAULINO, G.H. “Disk-Shaped Compact Tension Fracture Test: A Practical Specimen Geometry for Obtaining Asphalt Concrete Fracture Properties,” Accepted to *Experimental Mechanics*, 2004.

- WAGONER, M.P., BUTTLAR, W.G., e G.H. PAULINO, "Development of a Single-Edge Notched Beam Test for Asphalt Concrete Mixtures," Submitted to ASTM Journal of Testing and Evaluation, 2004.
- WAGONER, M.P., BUTTLAR, W.G.; PAULINO, G.H. e BLANKENSHIP, P. "Investigation of the Fracture Resistance of Hot-Mix Asphalt Concrete Using a Disk-Shaped Compact Tension Test". *84th Annual Transportation Research Board Meeting*, TRB, National Research Council, Washington D.C, 2005c.
- WASTERGAARD, H.M. Bearing Pressures and Cracks. *Journal of Applied Mechanics*, v.6, p. 49-53, 1939.
- ZHANG, Z., ROQUE, R. e BIRGISSON, B. "Evaluation of laboratory Measured Crack Growth Rate for Asphalt Mixtures", *Transportation Research Record*, 1767, 67-75, 2001.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)