

# **AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS INCORPORADAS COM ELEVADO TEOR DE MATERIAL FRESADO**

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ASPHALT  
MIXTURES INCORPORATED WITH HIGH CONTENT OF RECLAIMED  
ASPHALT PAVEMENT

**Mateus Valdevino de Siqueira**  
mvs5@discente.ifpe.edu.br

**Prof. Dr. Ronaldo Faustino da Silva**  
ronaldofaustino@recife.ifpe.edu.br

---

## **RESUMO**

A reciclagem de pavimento asfáltico possui relevância no segmento rodoviário, posto que permite a obtenção de qualidade técnica, redução de custos e mitigação dos impactos ambientais. Dessa forma, o incremento de elevados teores de material fresado e sua aplicação em base asfáltica pode apontar uma solução viável para segmentos sujeitos a elevado tráfego. Portanto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com elevado teor de material asfáltico reciclado. Utilizou-se um percentual de 50% de RAP e executaram-se os ensaios mecânicos de resistência a tração por compressão diametral; desgaste cântabro; módulo de resiliência e fadiga. Posteriormente, modelou-se uma estrutura por meio do software MeDiNa a fim de avaliar, frente a condições reais de tráfego, o desempenho estrutural e funcional. Dentre os principais resultados está o aumento do módulo de resiliência e da resistência a tração, baixo desgaste cântabro e adequada resposta ao trincamento por fadiga durante a vida útil do pavimento.

Palavras-chave: Pavimentação. Material Asfáltico Fresado. Reciclagem. Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

Asphalt pavement recycling has relevance in the road segment, since it allows the achievement of technical quality, cost reduction and mitigation of environmental impacts. Thus, the increase in high levels of milled material and its application on an asphalt base may point to a viable solution for segments subject to high traffic. Therefore, the present work aims to evaluate the mechanical properties of asphalt mixtures with a high content of recycled asphalt material. A percentage of 50% RAP was used and mechanical tests of tensile strength by diametrical compression were

performed; cannabar wear; resilience and fatigue module. Subsequently, a structure was modeled using the MeDiNa software in order to assess, in view of real traffic conditions, the structural and functional performance. Among the main results is the increase in the resilience module and tensile strength, low cannabinoid wear and adequate response to fatigue cracking during the life of the pavement.

Keywords: Paving. Reclaimed Asphalt Pavement. Recycling. Sustainability.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A degradação da qualidade estrutural e/ou funcional do pavimento asfáltico, função do tráfego e do clima, proporciona a necessidade de mecanismos de restauração para retornar as condições de conforto e segurança de uma rodovia. Nessa perspectiva, a reutilização do insumo CAUQ, assim como o incremento de novos materiais, possibilita a formação de revestimentos recicláveis. (CERATTI, BERNUCCI, SOARES, 2015).

Não só os impactos ambientais provenientes do descarte de materiais, mas também a elevação de preços do ligante asfáltico são razões para o aprimoramento das técnicas de reciclagem de misturas asfálticas. Nesse sentido, a incorporação do Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) – nomenclatura do compósito envelhecido utilizado na nova mistura - como constituinte parcial para novas camadas de pavimento fomenta estudos para compreensão da interação dessa estrutura (HUANG *et al*, 2005; ZHAO *et al*, 2013).

Consoante Haghshenas *et al*. (2016), classifica-se uma mistura de elevado teor de RAP quando incorporada com uma taxa superior a 25% de fresado em relação à totalidade de material virgem. Nessa perspectiva, o uso de material fresado, conforme a quantidade acrescida na mistura, deve ser posto considerando um percentual de ativação do ligante envelhecido. Suzuki (2019) aponta três possibilidades: 0% de ativação (i) – considera-se apenas como agregado -; 100% de ativação (ii) ou ativação parcial (iii). Nesse sentido, Pires (2018) e Gaspar (2019) apresentam metodologias de compreensão da ativação e interação entre as distintas formas de ligante.

Devido à grande variabilidade de aplicação de misturas asfálticas recicladas, há de considerar as condições expostas ao referido material. Uma vez que se distinguem os carregamentos, intempéries e camada de aplicação (revestimento ou base) altera-se a resposta estrutural do pavimento (BALBO, 2007). Nessa perspectiva, a compreensão das características mecânicas, fornecidas mediante ensaios laboratoriais, é fundamental para projetar misturas asfálticas, devendo atender o binômio técnica-economia e possuir qualidade superior as misturas convencionais.

Sendo assim, à medida que se eleva a quantidade de material reciclado, promove-se o enrijecimento da mistura reciclada final, haja vista o significativo teor de ligante envelhecido (CANCHANYA, 2017). Dessa maneira, o critério de falha por fadiga tem-se elevada relevância, visto que é necessária a compatibilidade da rigidez entre as camadas que compõe o pavimento.

Além disso, o aumento expressivo das cargas atuantes no pavimento devido à maior capacidade de carregamento dos veículos fomenta pesquisas para trechos submetidos a elevado volume de tráfego. Nessa perspectiva, a norma IP-05/2004 da Prefeitura de São Paulo restringe a aplicação de camadas granulares. Ademais,

Andrade (2017) aponta a incompatibilidade de rigidez entre camadas granulares quando submetidas a elevado tráfego, demonstrando a eficiência para camadas compostas de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) ou base asfáltica.

Todavia, bases cimentadas necessitam de significativo período de cura, o qual, por vezes, impacta indiretamente a região a qual encontra-se inserida a rodovia. Portanto, deve-se investigar a resposta de estruturas compostas por material fresado, os quais podem associar benefícios técnicos e ambientais.

Posto isto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas incorporadas com material fresado, bem como o seu comportamento estrutural frente a uma avaliação empírico-mecânica para fins de uso em base asfáltica. As características mecânicas observadas são: resistência a tração (i); desgaste cântabro (ii); módulo de resiliência (iii) e fadiga por compressão diametral (iv).

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 Materiais**

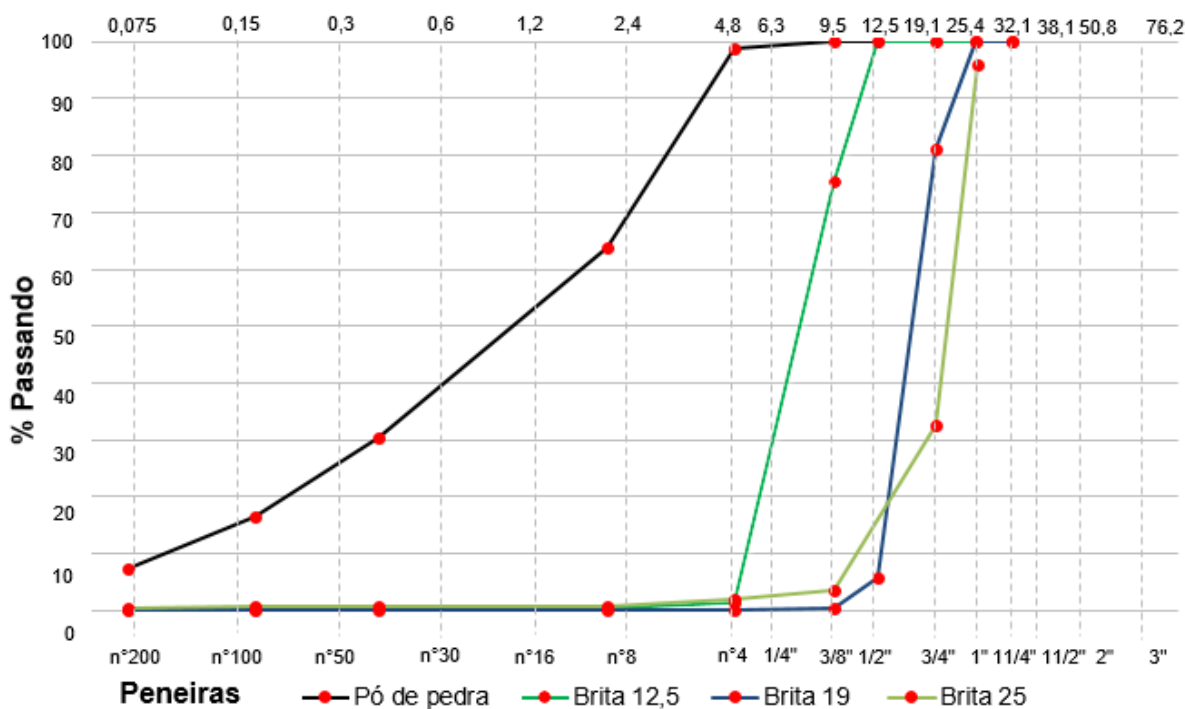
Para realizar os experimentos e atingir os objetivos propostos, utilizaram-se os seguintes materiais:

- Agregados graúdos (brita granítica 25,0 mm, 19,0 mm, 12,5 mm) e agregado miúdo (pó de pedra), obtidos da pedreira Guarany, localizada no município de Jaboatão dos Guararapes – PE;
- Fíller formado por cal hidratada tipo CH-1 obtida no comércio local no município de Recife;
- CAP 50/70, cedido pela empresa Greca Asfalto, posta no município de Araucária – PR;
- Placa de revestimento asfáltico extraído da rodovia PE-017 pela empresa JBR Engenharia.

#### **2.1.1 Caracterização dos agregados**

Determinou-se, consoante a Figura 1, as curvas granulométricas dos agregados, preconizados pela norma NM 248:2003, bem como na Tabela 1 os ensaios de caracterização física.

Figura 1 – Curva granulométrica dos agregados graúdos



Fonte: Autor (2020)

Tabela 1 – Caracterização dos agregados

Ensaio	Norma	Amostra	Requisito	Resultado
Adesividade	DNER-ME 078/94	brita 12,5	-	satisfatório
		brita 19,0	-	satisfatório
		brita 25,0	-	satisfatório
Módulo de finura	NBR 7211/2019	pó de pedra	-	4,09
		brita 12,5	-	1,78
		brita 19,0	-	0,07
		brita 25,0	-	0,40
Índice de forma	DNIT 424/2020- ME	brita 12,5	≥ 0,5	0,70
		brita 19,0	≥ 0,5	0,69
		brita 25,0	≥ 0,5	0,84
Abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98	brita 12,5	≤ 50%	28%
		brita 19,0	≤ 50%	29%
		brita 25,0	≤ 50%	22%
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97	pó de pedra	≥ 55%	79,8

Fonte: Autor (2020)

### 2.1.2 Caracterização do ligante asfáltico

Expõem-se, na Tabela 2, os resultados da caracterização do ligante asfáltico utilizado na pesquisa. Os valores encontrados estão coerentes com os permitidos pela norma DNIT-EM 095/06.

Tabela 2 – Caracterização do ligante asfáltico

Características	Norma	Requisitos CAP 50/70	CAP utilizado
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	DNER-ME 003/99	50-70	52
Ponto de amolecimento, mín, °C	ABNT 6560/2016	46	44
Viscosidade Saybol-Furol	DNER-ME 004/94	-	-
a 135 °C, mín.	-	141	135
a 150 °C, mín.	-	50	47
a 177 °C, mín.	-	30-150	95

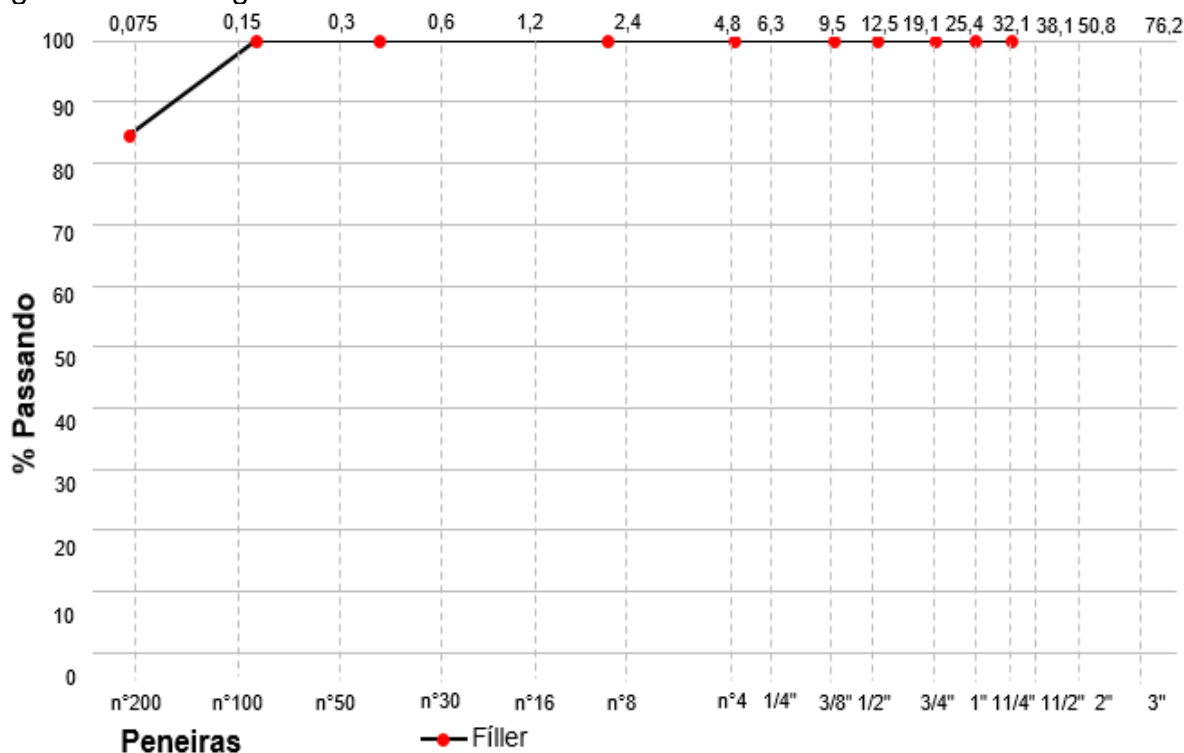
Fonte: Autor (2020)

A escolha pelo referido material é razão da sua elevada utilização em projetos de implantação e restauração em rodovias localizadas no nordeste brasileiro. Além disso, utilizou-se o CAP 50/70 em função da reduzida exposição às intempéries da camada (base), para a qual torna-se viável reduzir o custo com a obtenção do material frente a cimentos asfálticos modificados.

### 2.1.3 Caracterização do material de enchimento (fíller)

Elegeram-se a cal hidratada tipo CH-1 para fins de enchimento da mistura asfáltica, uma vez que esse material apresenta adequado desempenho nos parâmetros de coesão, adesividade e resistência ao efeito deletério da água. A distribuição granulométrica encontra-se apresentada na Figura 2, atendendo aos critérios exigidos na norma DNER-EM 367/97.

Figura 2 – Curva granulométrica do fíller

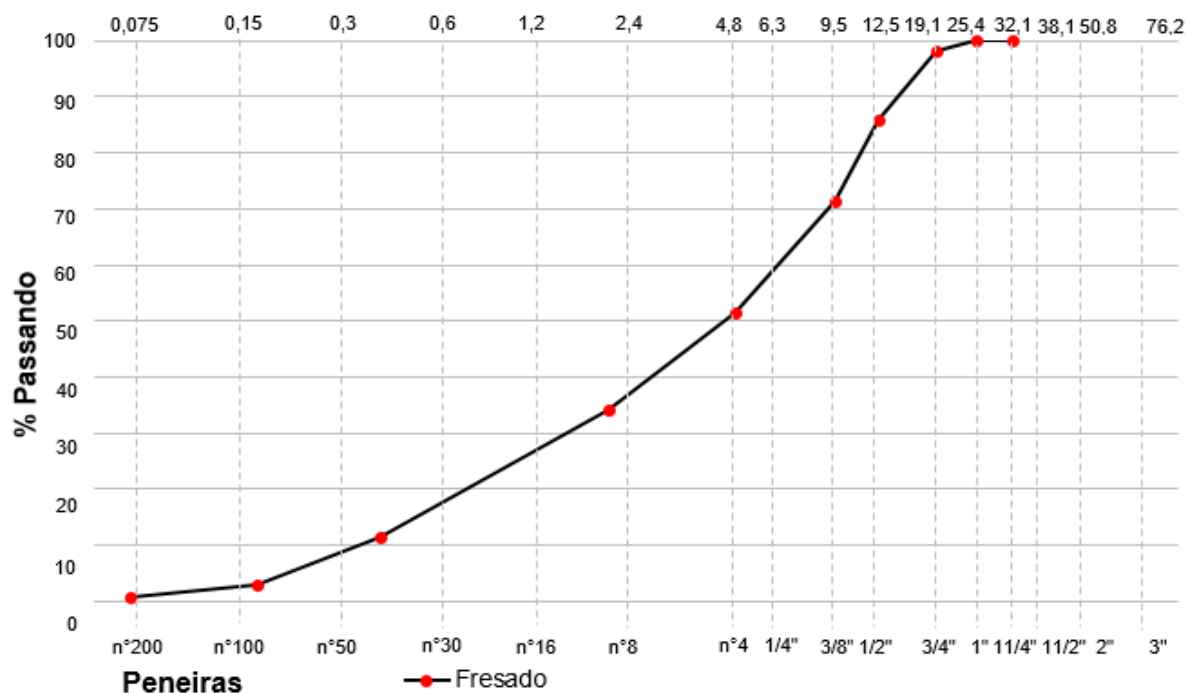


Fonte: Autor (2020)

### 2.1.4 Caracterização do material fresado

O material reciclado incorporado nesta pesquisa foi submetido a um aquecimento a 60° C e posterior desagregação por meio do tambor Los Angeles, sem esferas, revolucionado com 300 giros. O referido procedimento buscou representar uma extração *in situ* via equipamento fresador. Posteriormente, realizou-se o ensaio de peneiramento para o conhecimento de sua estrutura granular, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Curva granulométrica do material fresado



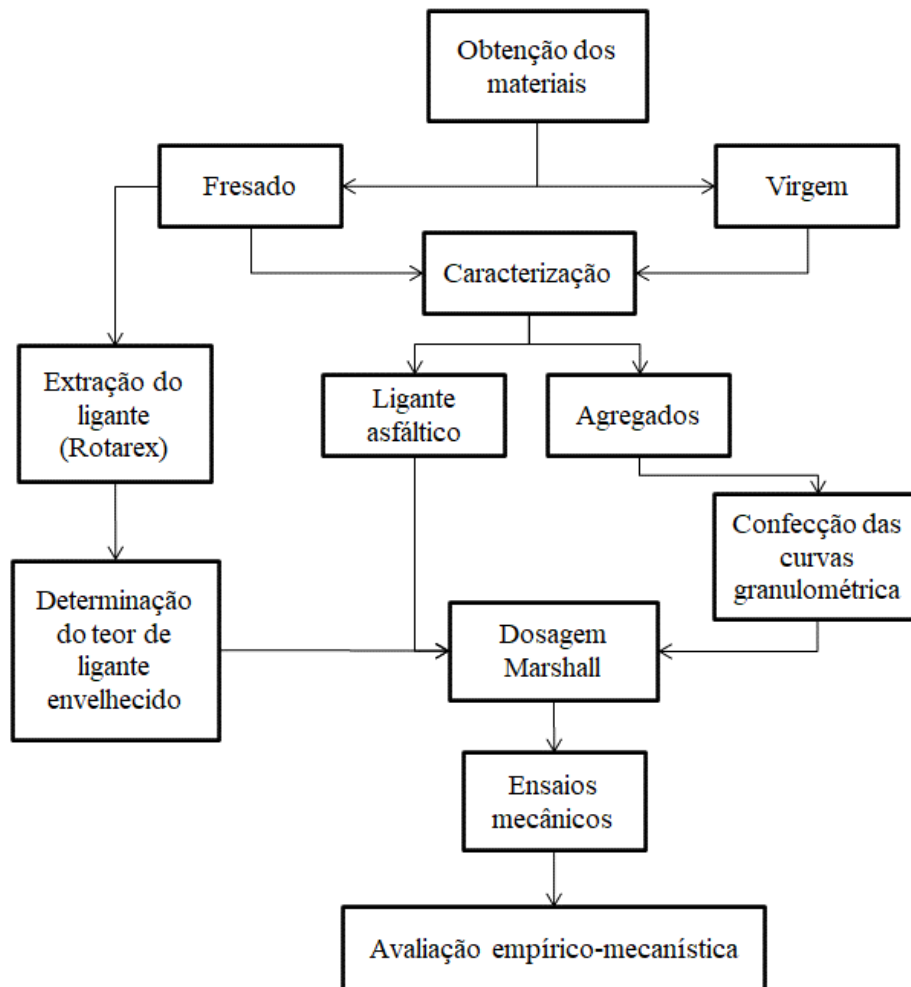
Fonte: Autor (2020)

## 2.2 Métodos

Buscou-se determinar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas compostas por um teor fixo de 50% de material reciclado para fins de aplicação em base asfáltica.

Os ensaios de caracterização e de moldagem foram realizados na empresa Geosond, localizada na cidade do Recife. Todavia, os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Figura 4 – Etapas da pesquisa



Fonte: Autor (2020)

### 2.2.1 Determinação dos teores de ligante

Haja vista a utilização de material reciclado, fez-se necessário a extração do ligante envelhecido presente nessa mistura. O procedimento citado tem por objetivo determinar qual o teor de material asfáltico e conseqüentemente a quantidade de CAP virgem a ser adicionado na mistura para obtenção do teor ótimo.

Utilizou-se o equipamento Rotarex, consoante a Figura 4, para quantificação do ligante asfáltico presente no material fresado, obtendo-se o valor de 5%.

Segundo Tobias (2013), a porcentagem de ligante (asfalto) na mistura final é obtido pela fórmula:

$$P = 0,035a + 0,045b + kc + F \quad (1)$$

Onde:

P - % de asfalto da mistura final.

a - % retida na peneira nº 8.

b - % que passa na peneira nº 8 menos a % retida na peneira nº 200.

c - % que passa na peneira nº 200.

k = 0,15 quando % que passa na peneira nº 200 for entre 11% e 15%.

F – Depende da absorção do agregado (varia entre 0% a 2%, geralmente usa-se 0,7%).

Ademais, o percentual de ligante envelhecido na mistura final, o qual deve ser acrescido de material virgem, foi obtido mediante a fórmula (TOBIAS, 2013):

$$\%ASF_{RAPM} = \frac{\%ASF_{RAP} \cdot \frac{\%AGM \cdot \%AGR_{APM}}{100}}{100 - \%ASF_{RAP}} \quad (2)$$

Onde:

$\%ASF_{RAPM}$  – Porcentagem de asfalto envelhecido na mistura final.

$\%ASF_{RAP}$  – Porcentagem de asfalto contido no RAP.

$\%AGM$  – Porcentagem de agregado na mistura final.

$\%AGR_{APM}$  – Porcentagem de agregado envelhecido do RAP na mistura final.

$\%ASF_{RAP}$  é calculada mediante o ensaio ASTM – D 2172-95, como descrito antes.

$\%AGM = 100\% - P$ .

$\%AGR_{APM} = 25\%$  ou  $37\%$  ou  $50\%$ .

Tendo o valor de  $\%ASF_{RAPM}$  obteve-se a porcentagem de asfalto novo:

$\%ASF_{novo} = \%P - \%ASF_{RAPM}$

Figura 5 – Rotarex utilizada para extração do ligante envelhecido



Fonte: Autor (2020)

Utilizou-se o método Marshall para dosagem da mistura asfáltica, bem como não houve aplicação de Agente Rejuvenecedor (AR), uma vez que se busca aplicação



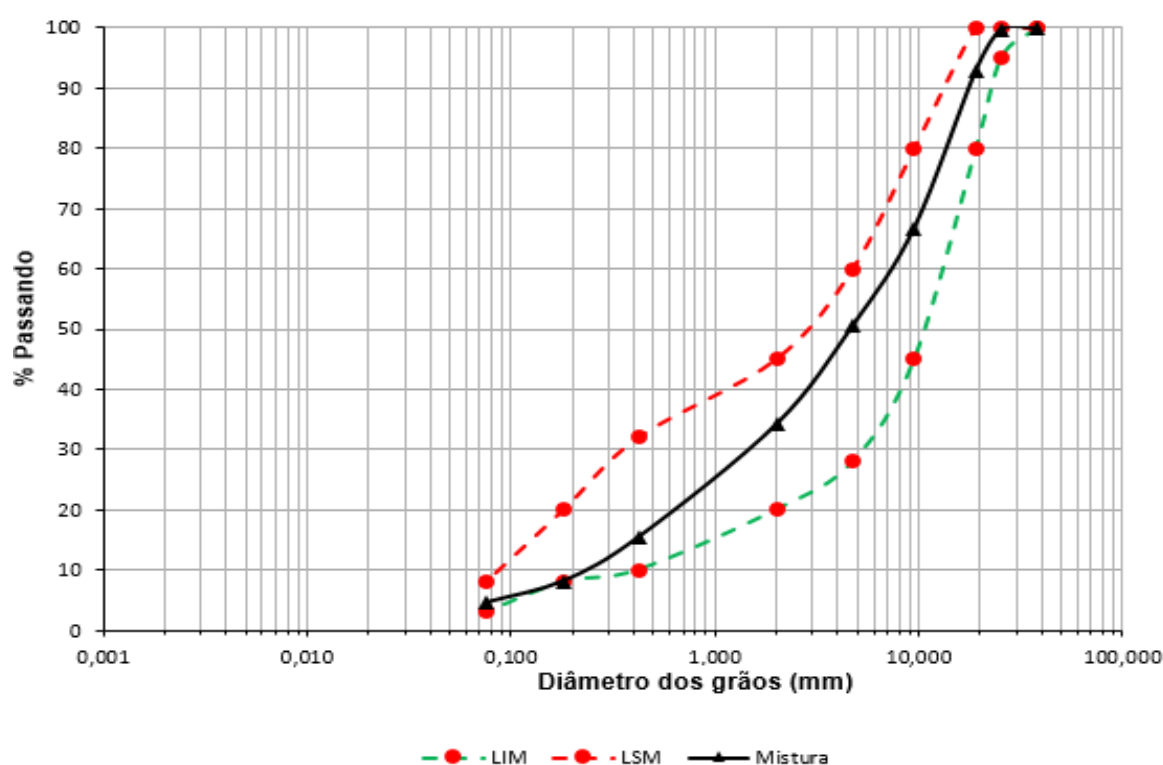
do material para camada de base. Nesse sentido, a referida estrutura não estará sujeita as intempéries a níveis significativos como o revestimento asfáltico (BALBO, 2007; MEDINA; MOTTA, 2015).

### 2.2.2 Confeção da curva granulométrica

Determinou-se o esqueleto mineral da mistura asfáltica por meio do enquadramento da curva granulométrica dentro dos limites impostos para utilização de uma faixa B, consoante a norma DNIT 033/2005 – ES.

Sendo assim, expõe-se na Figura 6 a curva granulométrica da mistura asfáltica reciclada.

Figura 6 – Curva granulométrica da mistura reciclada



Fonte: Autor (2020)

Nessa conjuntura, apresentam-se na Tabela 3 os percentuais dos materiais que compõe a mistura asfáltica reciclada.

Tabela 3 – Percentagens de insumos utilizados para composição da mistura asfáltica

Material	Dosagem (%)
CAP virgem	2,27
Brita 25	7,64
Brita 19	8,59
Brita 12,5	7,64
Fresado	50,00
Pó de Pedra	21,00
Cal hidratada	2,86
Soma	100

Fonte: Autor (2020)

### 2.2.3 Ensaios mecânicos

A fim de compreender o comportamento das propriedades mecânicas da mistura asfáltica reciclada, discriminam-se na Tabela 4 os ensaios realizados, bem como o número de amostras estudadas.

Tabela 4 – ensaios mecânicos aplicados aos corpos de prova

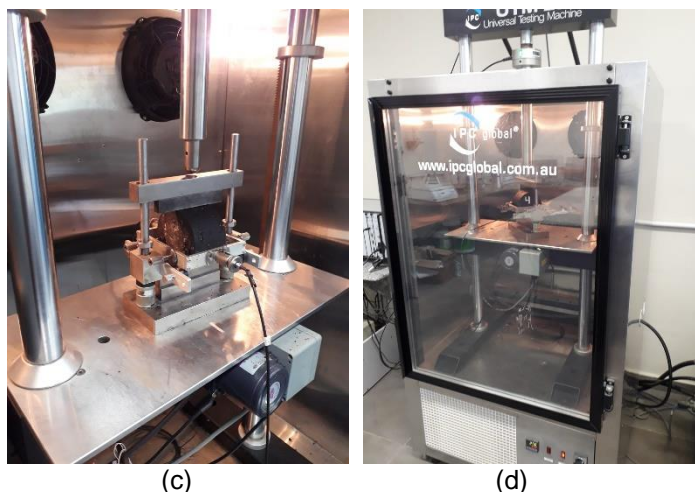
Ensaio	Norma	Nº de CP's	Dimensão (cm)	Sigla
Resistência à tração por compressão diametral	DNIT 136/2018 - ME	4	10 x 6	RT
Desgaste por abrasão de misturas betuminosas – ensaio Cântabro	DNER–ME – 383/99	4	10 x 6	CT
Determinação do módulo de resiliência	NBR 16018/2011	8	10 x 6	MR
Fadiga por compressão diametral à tensão controlada	DNIT 183/2018 - ME	12	10 x 6	F

Fonte: Autor (2020)

Foram ensaiados oito corpos de prova para o ensaio de módulo de resiliência, dos quais, identificou-se que a amostra MR VII possuía discrepância frente às demais analisadas, enquadrando-se como outlier. Dessa maneira, optou-se por exclusão da mesma e posterior análise com as sete amostras restantes.

Figura 8 – Resistência a tração por compressão diametral; corpos de prova após ensaio de cântabro; módulo de resiliência; fadiga.





Fonte: Autor (2020)

#### **2.2.4 Avaliação empírico-mecanista**

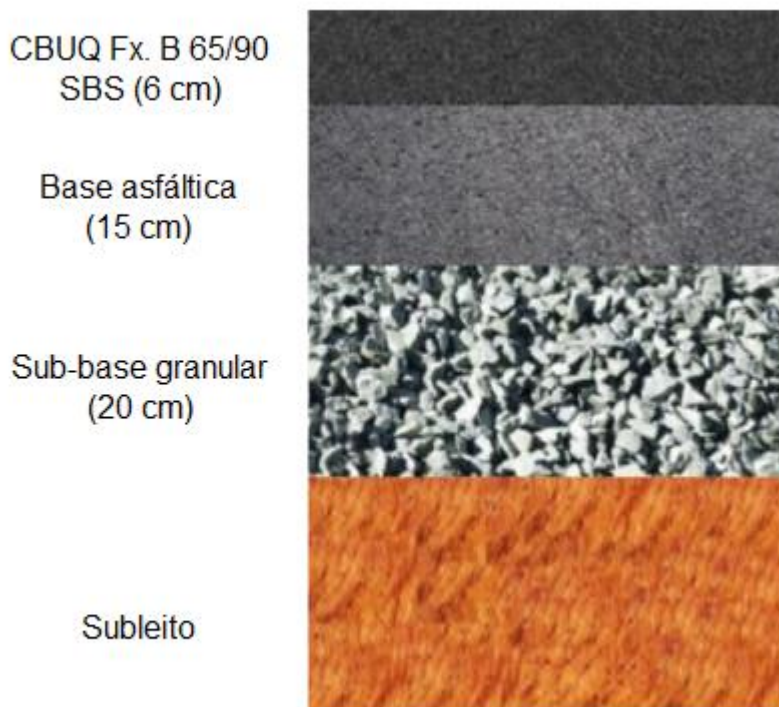
Após os ensaios mecânicos, os dados foram tratados e analisados com a finalidade de fornecer subsídios para a avaliação empírico-mecanística de previsão de desempenho em distintas aplicações. O procedimento utilizou o software MeDiNa, em sua versão 1.1.5, fornecida gratuitamente pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Para a validação como base asfáltica, simulou-se uma estrutura por meio de dados da rodovia PE-017 fornecido pela empresa JBR Engenharia. O referido segmento possuirá um tráfego previsto de número de eixos padrões rodoviários  $N = 1,13e+08$ , quando aplicado uma taxa de crescimento de 3% a.a, para uma vida útil de dez anos. O procedimento utilizado possui base no manual de estudos de tráfego do DNIT (IPR - 723).

Visto que a região é um dos principais polos logísticos de Pernambuco, optou-se por uma estrutura cuja execução permitisse rápida liberação do fluxo veicular, haja vista a rodovia ser de pista simples e sem possibilidades de desvio para obras.

Dessa forma, uma vez que se trata de uma simulação para restauração de uma rodovia, aplicou-se um revestimento de CBUQ fx. B modificado, base asfáltica (material analisado) e sub-base granular (existente na PE-017), com o perfil apresentado na Figura 9. As referidas camadas possuem módulos de resiliência de 3184 MPa (CBUQ), extraída do banco de dados do MeDiNa e 200 MPa (sub-base e subleito) obtidos mediante processo de retroanálise do trecho, consoante informações fornecidas pela empresa JBR Engenharia.

Figura 9 – Perfil do pavimento proposto para análise empírico-mecânica



Fonte: JBR Engenharia (2020)

### 3 RESULTADOS E ANÁLISE

#### 3.1 Resistência à tração indireta por compressão diametral

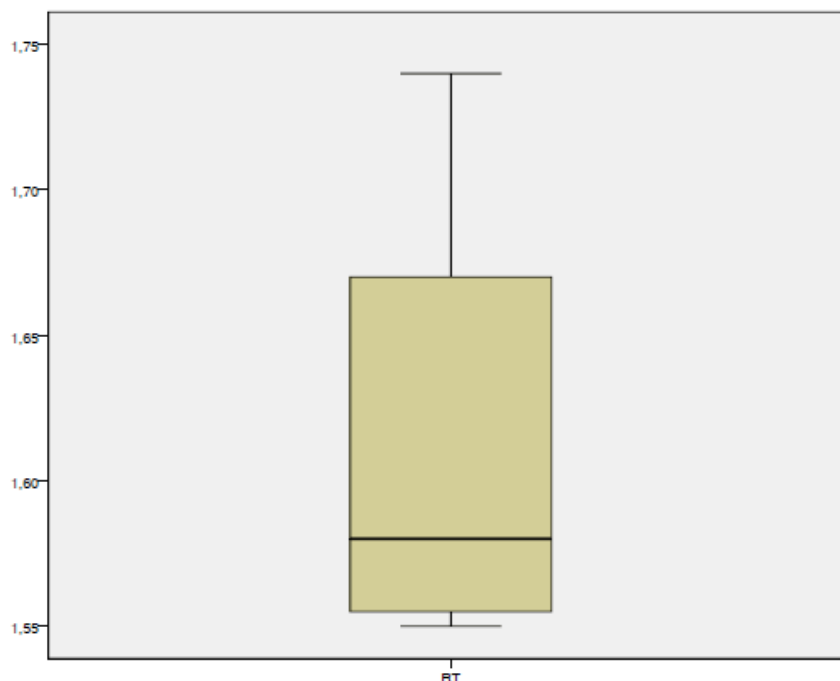
Apresenta-se, na Tabela 5, os parâmetros das amostras submetidas ao ensaio de tração, bem como a análise estatística básica em função dos resultados das amostras, conforme a Figura 10.

Tabela 5 – Síntese dos resultados do ensaio de tração indireta por compressão diametral

Corpo de prova	Altura média do CP (cm)	Diâmetro (cm)	Leitura do anel (div)	Carga aplicada (kgf)	Resistência à tração estática máxima (MPa)
RT I	6,14	11,9	890	1755,97	1,74
RT II	6,34	11,2	795	1568,54	1,55
RT III	6,19	11,1	810	1598,13	1,56
RT IV	5,98	11,1	860	1696,78	1,60

Fonte: Autor (2020)

Figura 10 – Boxplot das amostras do ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Autor (2020)

Foram realizados quatro ensaios para verificação da resistência a tração por compressão diametral. Nesse sentido, obteve-se um mínimo de 1,55 MPa, entretanto uma média de 1,61 MPa. Dessa forma, atende-se à especificação mínima exigida de 0,65 MPa, descrita na norma DNIT 033/2005 - ES, visto que se considera o material aplicado como binder.

O aumento da resistência é promovido pelo elevado teor de ligante envelhecido presente na mistura. Nesse sentido, diversos autores encontraram uma correlação crescente da resistência a tração ao passo que incrementava teores de material fresado frente a uma mistura de referência – sem adição (SUZUKI, 2019; CENTOFANTE, 2016; BOHN, 2017; AL-QUADI *et al*, 2016).

### 3.2 Desgaste por abrasão de misturas betuminosas – ensaio cântabro

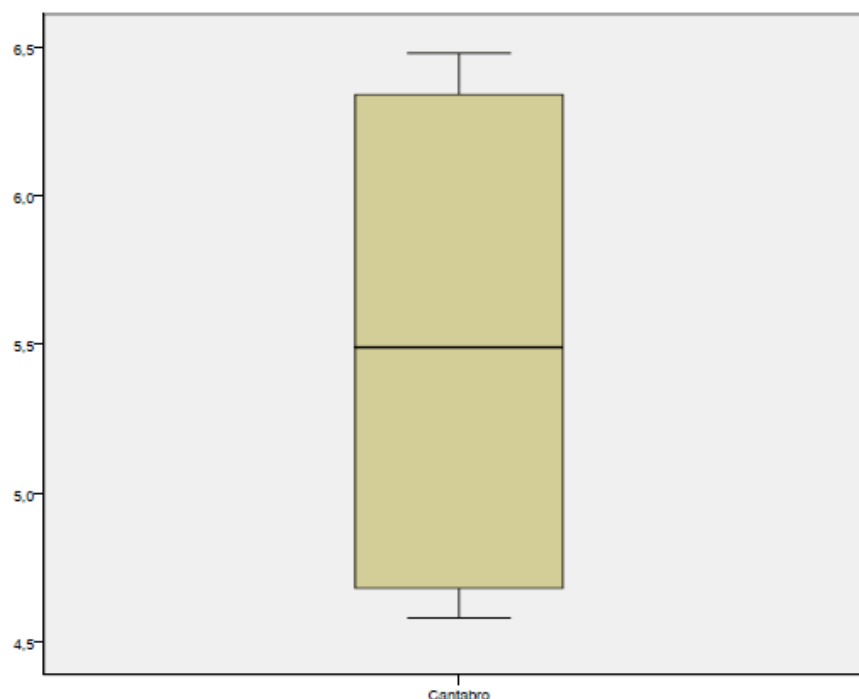
Expõe-se, na Tabela 6, os parâmetros das amostras submetidas ao ensaio de cântabro, assim como a análise estatística básica em função dos resultados das amostras, conforme a Figura 11.

Tabela 6 – Síntese dos resultados do ensaio cântabro

Corpo de prova	Altura média do CP (cm)	Diâmetro médio (cm)	Peso inicial (g)	Peso após ensaio (g)	Desgaste Cântabro (%)
CT I	6,24	10,8	1195,2	1138,1	4,80%
CT II	6,42	10,2	1196,8	1122,6	6,20%
CT III	6,24	10,1	1184,5	1130,2	4,60%
CT IV	6,08	10,1	1199	1121,3	6,50%

Fonte: Autor (2020)

Figura 11 – Boxplot das amostras do ensaio de desgaste cântabro



Fonte: Autor (2020)

Realizaram-se quatro ensaios para verificação do desgaste cântabro. Nesse sentido, obteve-se um valor máximo de 6,50%, todavia uma média de 5,51%. Dessa forma, prevê-se o adequado comportamento do material, visto que a norma ABNT NBR 15140/2014 limita em 20% de desgaste para misturas abertas com 7% de volume de vazios ( $V_v$ ). Portanto, para a presente mistura, com volume  $V_v$  de 4%, granulometria densa e uso em base, torna-se válido a comparação, atendendo os requisitos para aplicação.

O ensaio cântabro para uso em base asfáltica tem por objetivo verificar a capacidade de coesão indireta dos agregados e ligantes quando posto sob um carregamento o qual emite uma força de arrancamento das partículas (tráfego). Nessa perspectiva, deve-se observar que o fluxo veicular pode ser liberado ainda sobre a camada de base, para em momento posterior – não superior a 30 dias -, realizar o seu revestimento.

### 3.3 Determinação do módulo de resiliência

Expõe-se, na Tabela 7, os parâmetros das amostras submetidas ao ensaio módulo de resiliência, assim como a análise estatística básica em função dos resultados das amostras, conforme a Figura 12.

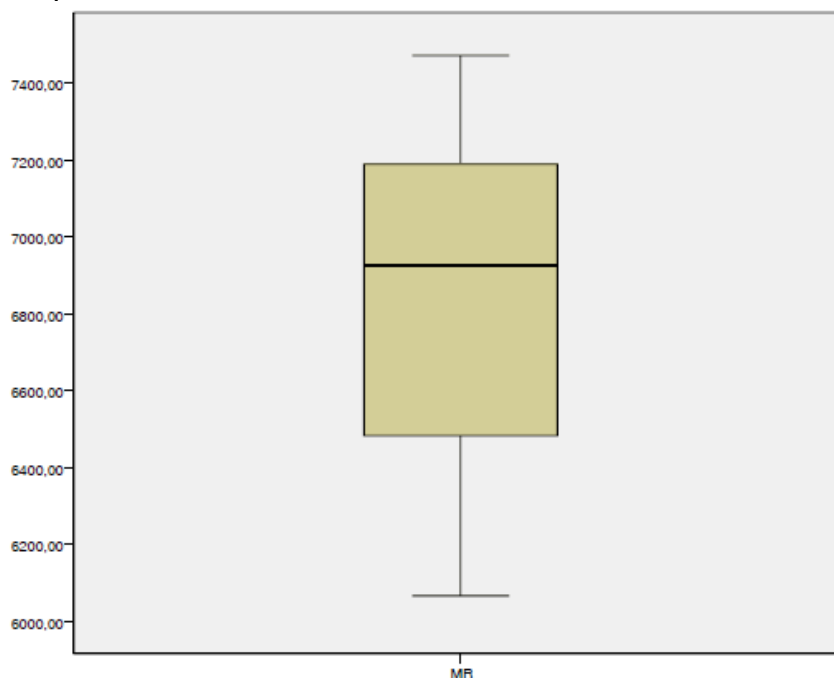
Tabela 7 – Síntese dos resultados do ensaio de módulo de resiliência

Corpo de prova	MR (MPa)
MR I	7472
MR II	6067
MR III	6756
MR IV	6211
MR V	7270

Corpo de prova	MR (MPa)
MR VI	6926
MR VII	9363
MR VIII	7108

Fonte: Autor (2020)

Figura 12 – Boxplot das amostras do ensaio de MR



Fonte: Autor (2020)

Obteve-se um valor mínimo de 6067 MPa, porém um média de 6830 MPa. Devido ao teor de ligante envelhecido presente na mistura reciclada, tende-se a elevar a rigidez do material, uma vez que não houve aquecimento no componente envelhecido (BERNUCCI *et al*, 2008).

Nessa perspectiva, Suzuki (2019) apontou uma elevação do MR em dosagens compostas por elevado teor de material fresado (>25 %) quando comparado às baixas adições. Ademais, pesquisas de Centofante (2019) e Bohn (2017) também atestaram elevação do MR à proporção que se incrementava altos teores de material asfáltico reciclado.

Dessa forma, o comportamento enrijecido do material fresado quando incrementado na mistura é consequência da quantidade significativa de moléculas de asfaltenos presente no ligante envelhecido. A inutilização de AR inibe o revigoramento da fração de maltenos, as quais tendem a diminuir o módulo de resiliência do material (BARROS, 2020).

### **3.4 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada**

Expõem-se, na Tabela 8, os parâmetros das amostras submetidas ao ensaio de fadiga por compressão diametral, assim como a análise estatística básica em função dos resultados das amostras, conforme a Figura 13.

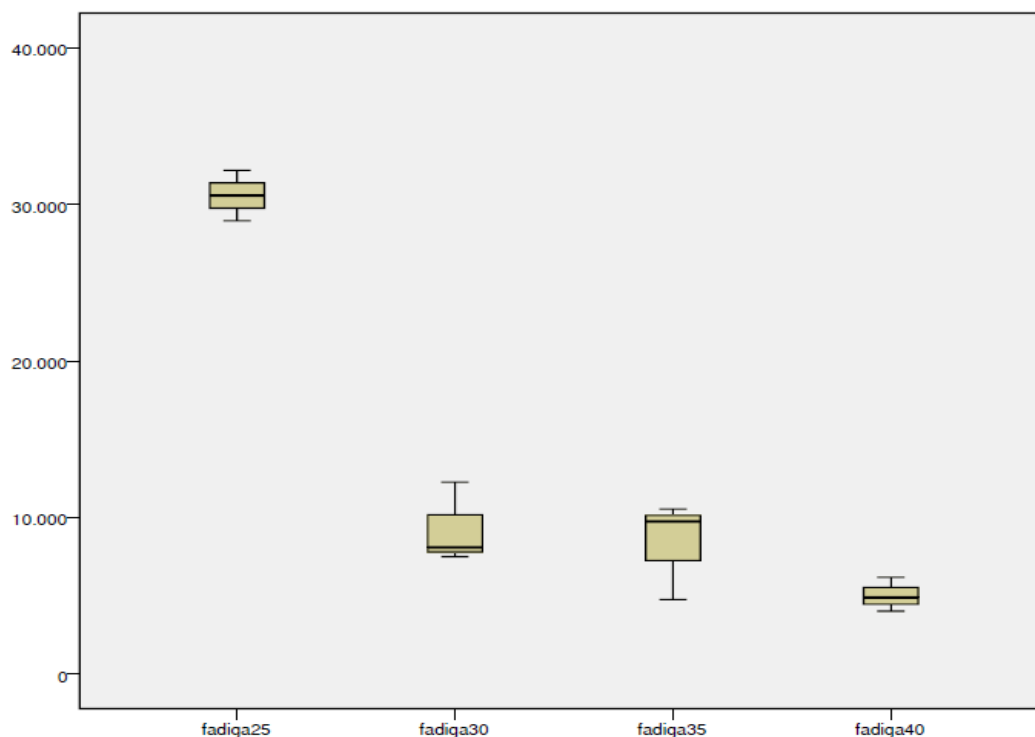


Tabela 8 – Síntese dos resultados do ensaio de fadiga

CP	Esp. (cm)	D. (cm)	Nível de Tensão (%)	Carga aplica. (N)	MR (MPa)	Deformação Específica Resiliente	Diferença de Tensões (MPa)	Número de Aplic.
F XII	6,48	10,15	25	4025	6830	5,70E-05	1,56	30564
F XI	6,58	10,19	25	4025	6830	5,60E-05	1,53	32168
F X	6,35	10,15	25	4025	6830	5,82E-05	1,59	28951
F IX	6,31	10,16	30	4830	6830	7,02E-05	1,92	12256
F VIII	6,29	10,17	30	4830	6830	7,04E-05	1,92	8081
F VII	6,33	10,17	30	4830	6830	6,99E-05	1,91	7496
F VI	6,23	10,17	35	5635	6830	8,29E-05	2,26	10531
F V	6,17	10,17	35	5635	6830	8,37E-05	2,29	4751
F IV	6,46	10,17	35	5635	6830	7,99E-05	2,18	9741
F III	6,30	10,19	40	6440	6830	9,35E-05	2,55	6171
F II	6,29	10,17	40	6440	6830	9,38E-05	2,56	4886
F I	6,26	10,15	40	6440	6830	9,45E-05	2,58	4011

Fonte: Autor (2020)

Figura 13 – Boxplot das amostras do ensaio de fadiga por compressão



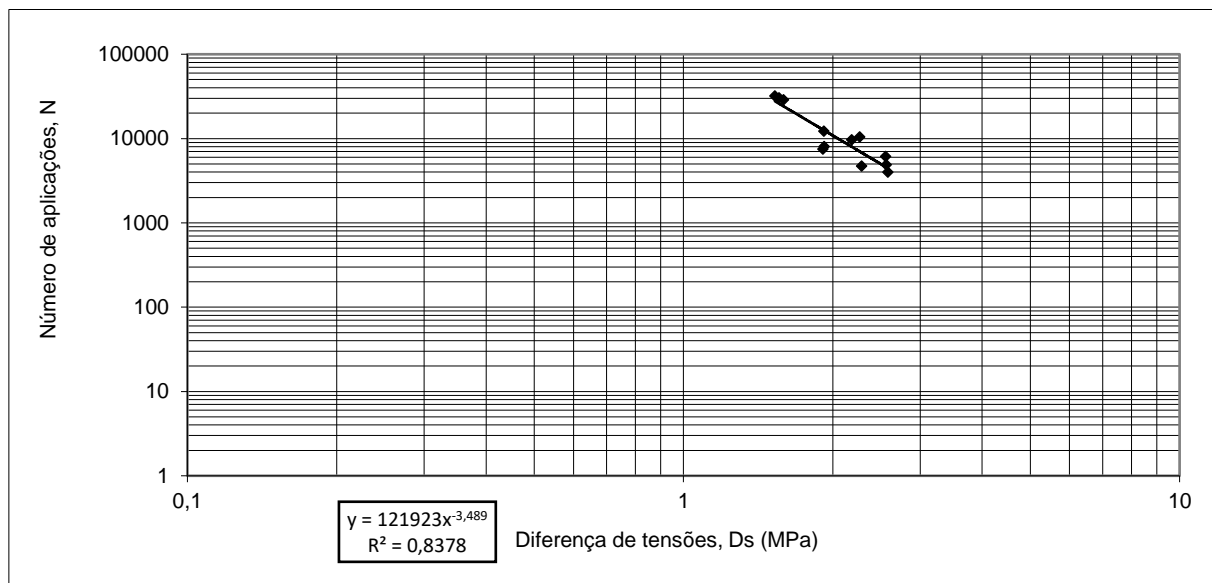
Fonte: Autor (2020)

Observa-se a redução do número de ciclos da mistura quando incrementado o carregamento de 25% para 40% da resistência à tração. Nesse sentido, o número de aplicações decai de 30.000 para 5.000 ciclos. Todavia, esse comportamento é comum para misturas asfálticas. Além disso, o material em campo não é submetido a tensões próximas a sua capacidade resistente, mas sim de baixas tensões cíclicas que promovem o efeito de fadiga.



Ademais, na Figura 14, são apresentados os coeficientes de regressão da curva de fadiga. O modelo apresenta um  $R^2$  de 0,83, o qual atende o mínimo de 0,80 consoante a norma DNIT 183/2018 – ME.

Figura 14 – Curva de fadiga Ds x N



Fonte: Autor (2020)

O modelo de vida de fadiga encontrado apresenta os coeficientes  $k_1 = 121923$  e  $k_2 = -3,489$ . Sendo assim, para o estado de diferença de tensões de 0,84 MPa ( $S_y$  e  $S_z$  obtidos no AEMC), o número  $N$  admissível para estrutura iniciar seu processo de ruptura por fadiga é após  $2,22e+05$  repetições de eixos padrões rodoviários.

Nesse sentido, Silva (2020) apresentou um modelo com  $k_1 = 26560$ ,  $k_2 = -2,299$  e  $R^2 = 0,9678$ . Utilizou-se, na referida pesquisa, misturas compostas por 100% de material fresado, bem como ausência de AR. Desse modo, para o mesmo estado de tensões aplicadas na base asfáltica, o número  $N$  admissível é de  $3,94e+04$ .

Logo, compreende-se que o percentual de material fresado impacta inversamente na vida de fadiga da mistura. Todavia, o processo de falha por fadiga inicia em números expressivos de solicitações de eixo padrão, fato que tardiamente promove um trincamento significativo na estrutura.

Entretanto, ressalta-se que devido ao elevado módulo de rigidez, deve-se analisar o trincamento prematuro do material. Portanto, recomenda-se uma análise empírico-mecânica para verificação da tensão a depender camada de aplicação do material.

### 3.5 Avaliação empírico-mecanística

Figura 15 – Resultado da análise empírico-mecanística no software MeDiNa

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020  
 Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA    MODELAGEM    RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Mateus Valdevino de Siqueira    EMPRESA: Instituto Federal de Pernambuco

PROJETO: TCC

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	6,0	3184	0,30
2	CONCRETO ASFÁLTICO	50% Fresado	15,0	6830	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	Base existente (sub-base) - PE-017	20,0	200	0,35
SL	SUBLEITO	Subleito - PE-017	0,0	200	0,45

**EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO**

**DADOS DO TRÁFEGO**

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	6383
FV:	8,458
N anual (1º ano):	1,97e+07
% Veículos na faixa de projeto:	50
N Anual da faixa:	9,85e+06
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	1,13e+08

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---  
 Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 85%  
 Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 22,8%  
 Afundamento de Trilha de Roda: 0,0mm

Fonte: Autor (2020)

Posterior ao dimensionamento empírico-mecanístico, constata-se que a área trincada após o fim da vida útil de projeto (10 anos) será de 22,8%. Nessa perspectiva, o referido resultado enquadra-se como aceito, visto que para a categoria de sistema arterial primário, a qual se classifica a rodovia projetada, tem-se um limite de 30% de superfície trincada ao término do período de projeto para um nível de confiabilidade de 85% (DNIT, 2020).

Pontua-se que devido à elevada rigidez promovida pela base asfáltica, o critério de falha por fadiga sobrepõe a deformação permanente, haja vista o elevado teor de ligante envelhecido presente na mistura.

Além disso, expõe-se a análise mecânica de deslocamento, deformação e tensão gerados na estrutura do pavimento, consoante a Tabela 9:

Tabela 9 – Análise mecânica das camadas do pavimento proposto

Camada	Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Uz (µm)	Sx (MPa)	Sy (MPa)	Ey (m/m)
Rev.	1	0	0	0,00001	<b>198,02355</b>	0,215227	0,406961	0,000108
	2	0	0	5,9999	201,22889	0,216952	0,209013	0,000041
Base	3	0	0	6,00001	201,22892	0,444391	0,427366	0,000041
	4	0	0	20,9999	198,45091	-0,552273	<b>-0,797285</b>	<b>-0,000094</b>
Sub-base	5	0	0	21,00001	198,46853	0,026813	0,029251	0,00002
	6	0	0	40,00009	163,22612	-0,006769	-0,010092	-0,00011
Subleito	7	0	0	41,00001	160,84045	0,038609	0,03891	0,000016
	8	0	0	60,9999	144,82342	0,01547	0,014683	-0,000038

Fonte: Autor (2020)

Nesse sentido, obteve-se uma tensão de tração máxima de aproximadamente 0,80 MPa, localizada na fibra inferior da base asfáltica. O valor obtido é 50% da resistência a tração do material analisado (1,61 MPa).

Ademais, a estrutura esta sujeita a uma deflexão de  $19,80 \times 10^{-2}$  mm, quando avaliada no ponto de contato pneu-revestimento. Dessa forma, atende-se ao critério de deflexão por fadiga proposto na norma DNER-PRO 269/94, a qual apresenta como deflexão admissível máxima, para o número N utilizado, um valor de  $43 \times 10^{-2}$  mm.

Por fim, a deformação específica de tração máxima é  $9,40 \times 10^{-5}$  m/m. O valor é aplicado dentro do modelo de fadiga para calculo da área trincada.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Em função dos resultados obtidos nos ensaios, além da simulação, podem-se enumerar as conclusões restritas às amostras estudadas, a saber:

- A elevação do teor de material fresado promove ganho relevante de resistência a tração indireta, visto que o teor de ligante envelhecido proporciona uma estrutura mais rígida.
- O desgaste cântabro fornecido pelo material é significativamente menor ao necessário, atestando a viabilidade para aplicação em base asfáltica.
- O módulo de resiliência é compatível com os valores utilizado em dosagens de misturas asfálticas recicladas, apresentando valor superior a misturas convencionais. O parâmetro deve ser avaliado para cada interação carga-estrutura a fim de apresentar as tensões e deformações submetidas ao pavimento. Além disso, pontua-se que elevada rigidez é função do teor de ligante envelhecido presente de forma significativa na mistura final.
- O teor de material fresado impacta inversamente no número de aplicações admissíveis pela estrutura. Todavia, para o teor de 50% de fresado, dentre as condições analisadas, atende-se o critério de área trincada por fadiga durante a vida útil para condições reais de carregamento.
- A inutilização de agente rejuvenescedor não comprometeu a vida útil do material quando analisado em condições para camada de base. Nesse sentido, apresenta-se como solução técnica atrativa frente a BGTC e CCR, por exemplo, as quais exigem período de cura significativo para liberação do tráfego.
- O presente estudo limitou-se a utilização para fins de base asfáltica, a qual possui critérios de desgaste em razão do clima e tráfego distintos quando comparado com a camada de revestimento.
- Para estudos futuros, deve-se buscar analisar as propriedades da mistura asfáltica com distintos teores de material fresado e agente rejuvenescedor. Além disso, utilizar uma maior quantidade de corpos de prova para garantir uma maior acurácia e consistência nos testes estatísticos.

## REFERÊNCIAS

- AL-QADI, I. L. *et al.* **Impact of high RAP content on structural and performance properties of asphalt mixtures.** Research Report FHWA-ICT-12-002, Illinois Department of Transportation, Bureau of Material and Physical Research, Springfield, IL, 2012.
- ANDRADE, L. R. **Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado.** 2017. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211. **Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6560. **Ligantes asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15140. **Misturas asfálticas – Determinação da perda de massa por abrasão cântabro.** Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16018. **Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida.** Rio de Janeiro, 2011.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BARROS, A. G. **O efeito do uso de agentes rejuvenescedores encapsulados sobre a autorregeneração de misturas asfálticas.** 2020. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. Brasil, 2020.
- BERNUCCI, L. L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros.** 1 ed. Programa Asfalto nas Universidades, Petrobras Distribuidora S.A., 2008.
- BOHN, K. A. **Avaliação de misturas asfáltica recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero.** 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Centro de Tecnologia, RS, 2017.
- CANCHANYA, J. P. **Avaliação do comportamento mecânico e reológico de mistura asfáltica com adição de 20% de material fresado – RAP.** 2017. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Brasil, 2017.
- CENTOFANTE, R. **Laboratory study using rap in recycling hot mix.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso - Método de ensaio**. DNER-ME 078/94. Rio de Janeiro, Brasil. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles” - Método de ensaio**. DNER-ME 035/98. Rio de Janeiro, Brasil. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Desgaste por abrasão de mistura betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro - Método de ensaio**. DNER-ME 383/99. Rio de Janeiro, Brasil. 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Equivalente de areia - Método de ensaio**. DNER-ME 054/97. Rio de Janeiro, Brasil. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Material betuminoso – determinação da penetração - Método de ensaio**. DNER-ME 003/99. Rio de Janeiro, Brasil. 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Material betuminoso – determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada - Método de ensaio**. DNER-ME 004/94. Rio de Janeiro, Brasil. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Material de enchimento para misturas betuminosas - Especificação de Material**. DNER-EM 367/97. Rio de Janeiro, Brasil. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Projeto de restauração de pavimentos flexíveis - Método de ensaio**. DNER-PRO 269/84. Rio de Janeiro, Brasil. 1984.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material**. DNIT 095/2006. Rio de Janeiro, Brasil. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de estudos de tráfego**. IPR - 723. Rio de Janeiro, Brasil. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina - Especificação de serviço.** DNIT 033/2005. Rio de Janeiro, Brasil. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Pavimentação asfáltica - **Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio.** DNIT 183/2018. Rio de Janeiro, Brasil. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.** DNIT 136/2018. Rio de Janeiro, Brasil. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina - Especificação de serviço.** DNIT 033/2005. Rio de Janeiro, Brasil. 2005.

GASPAR, M. S. **Mecanismos de interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna.** 2019. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

HAGHSHENAS, H.F.; NABIZADEH, H.; KIM, Y-R.; SANTOSH, K. **Research on High-RAP Asphalt Mixtures with Rejuvenators and WMA Additives.** University of Nebraska-Lincoln, Report N<sup>o</sup> SPR-P1(15) M016. Lincoln, 2016.

HUANG, B. *et al.* Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement. Transportation Research. **Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1929, p. 37-45, 2005.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

PIRES, G. M. **A new methodology for the measurement of the reclaimed asphalt degree of binder activation.** Nottingham: University of Nottingham, 2018.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Dimensionamento de pavimentos flexíveis tráfego meio pesado, pesado, muito pesado e faixa exclusiva de ônibus.** IP-05/2004. São Paulo, Brasil. 2004.

SILVA, J.P.S.; FARIAS, M. M. Estudos laboratoriais para determinação do comportamento da vida de fadiga de misturas asfálticas rejuvenescidas. **Transportes**, São Paulo, v.28, p 111-121, abril, 2020.

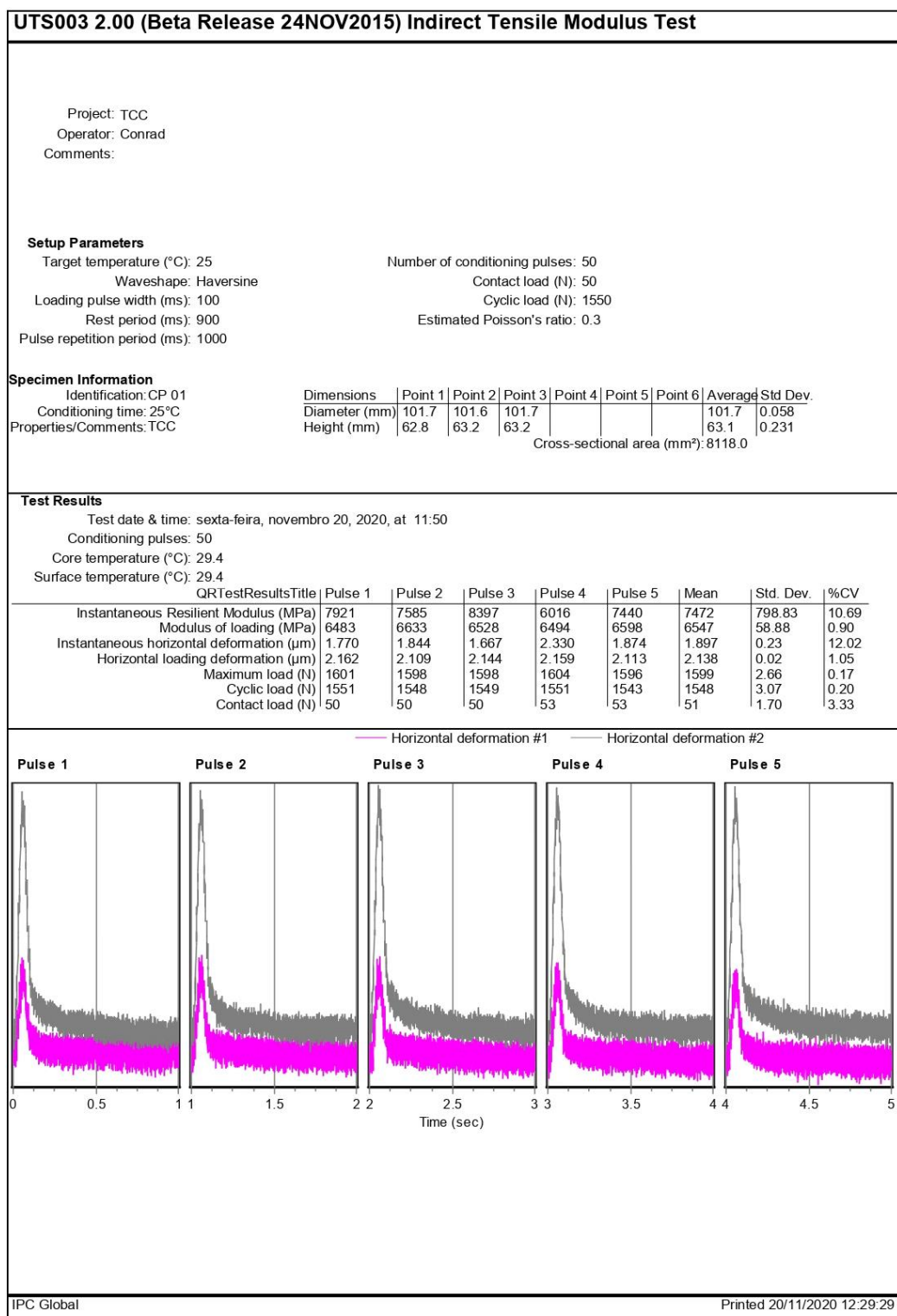
SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado.** 2019. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade São Paulo, São Paulo. Brasil, 2019.

TOBIAS, B. L. **Dosagem de misturas asfálticas recicladas contendo pelo menos 25% de material fresado.** 2013. Trabalho de conclusão de curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ZHAO, S. *et al.* Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 92-100, 2013.

## APÊNDICE

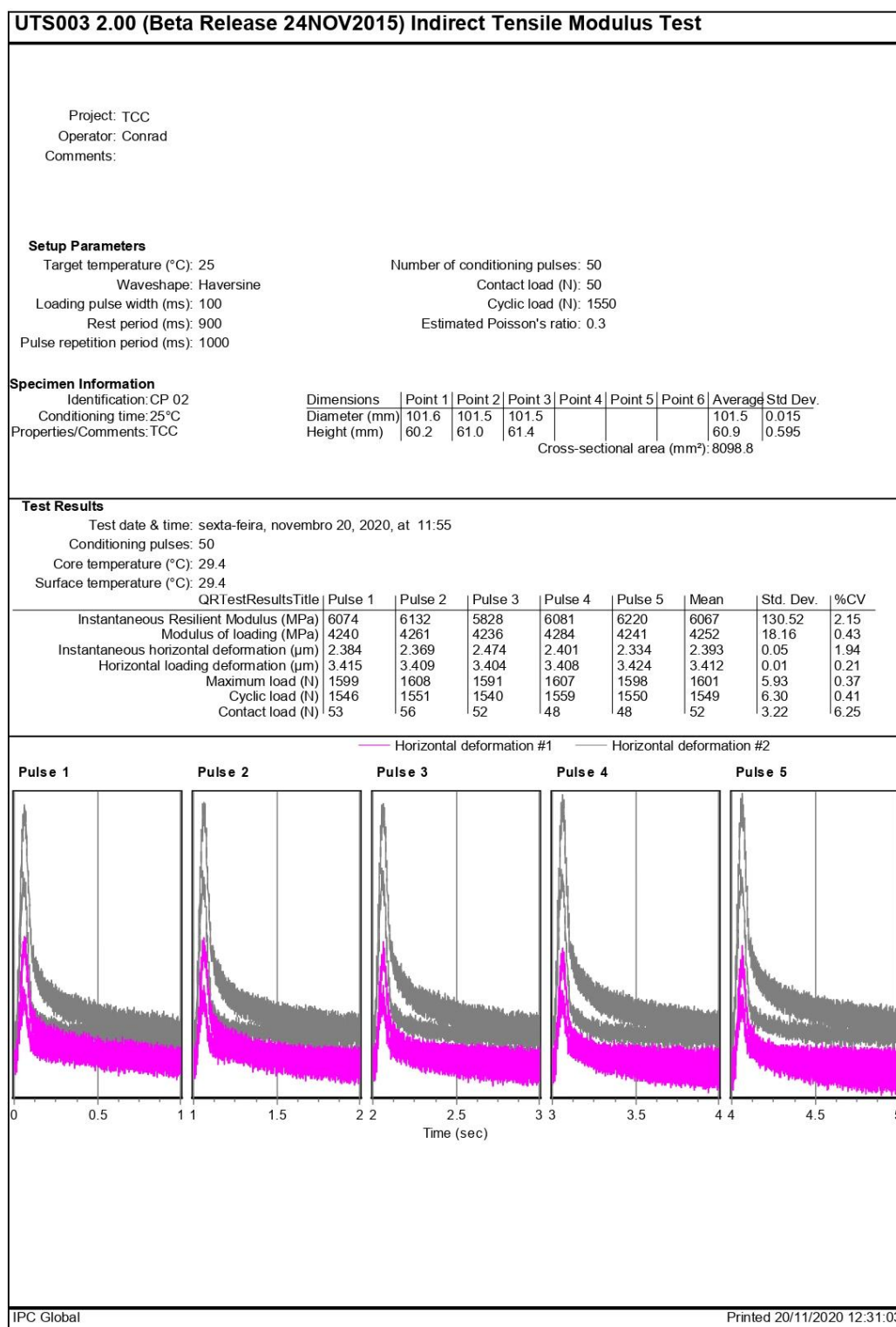
Figura 16 – Relatório do ensaio de módulo de resiliência do CP 01



Fonte: Autor (2020)

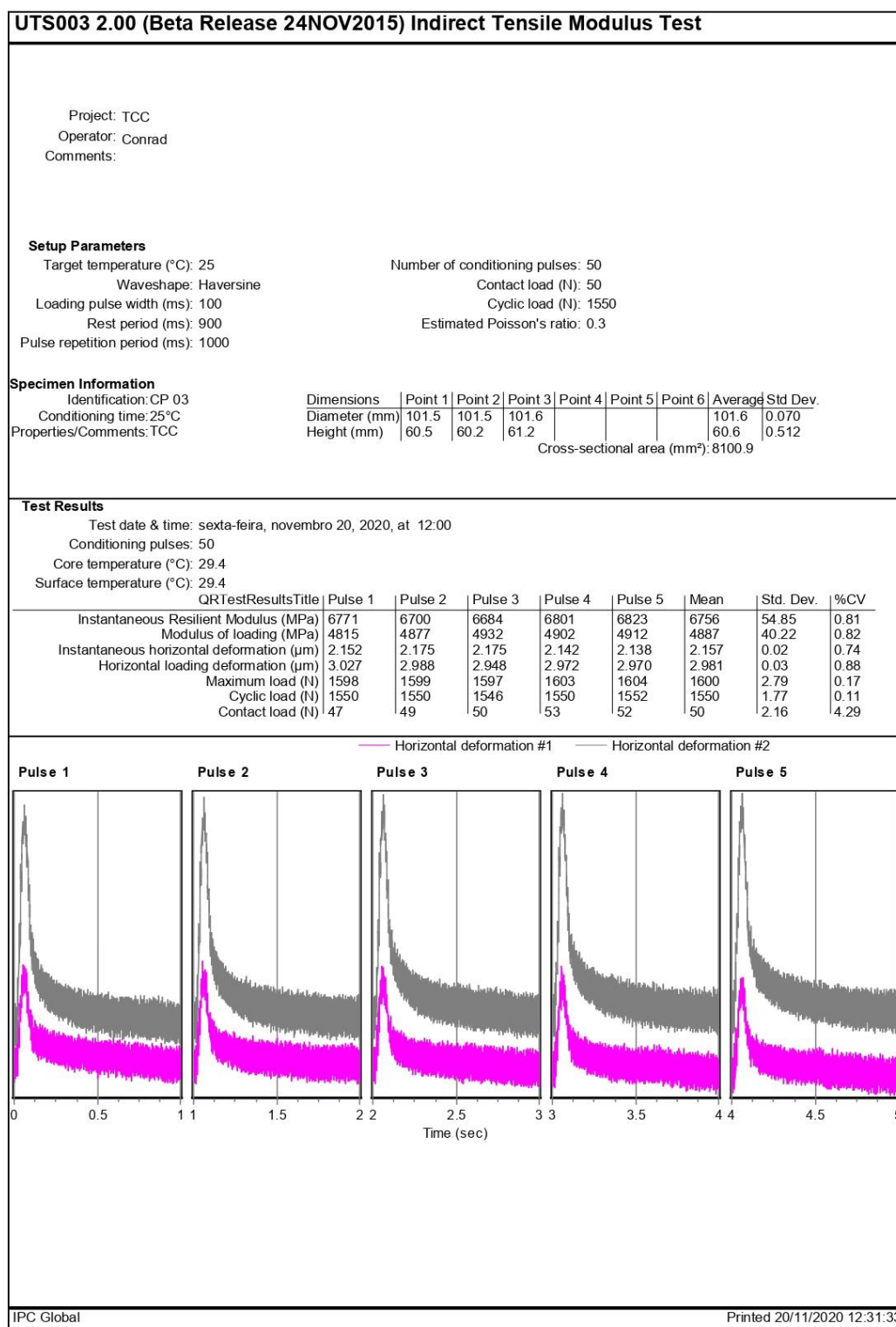


Figura 17 – Relatório do ensaio de módulo de resiliência do CP 02



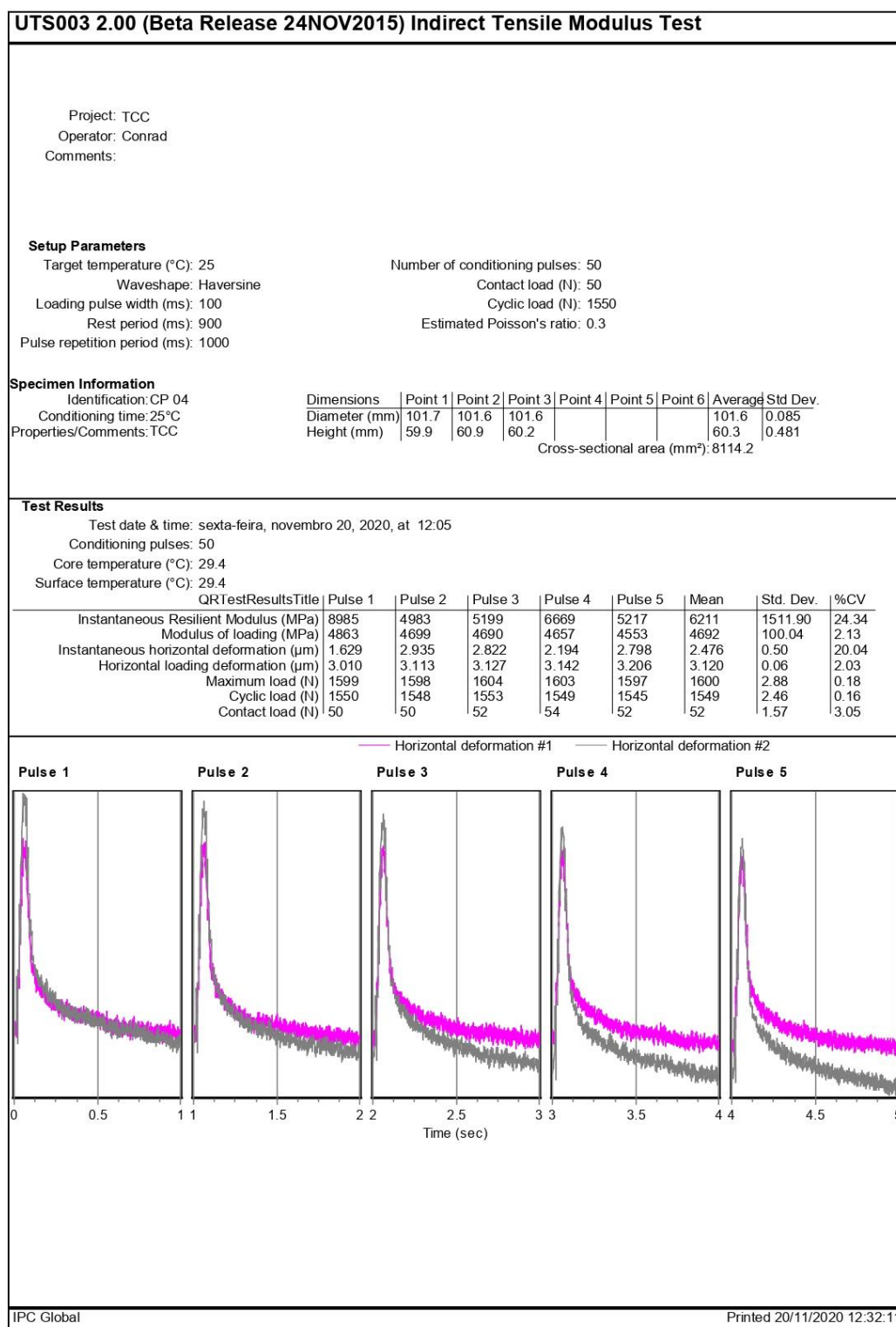
Fonte: Autor (2020)

Figura 18 – Relatório do ensaio de módulo de resiliência do CP 03



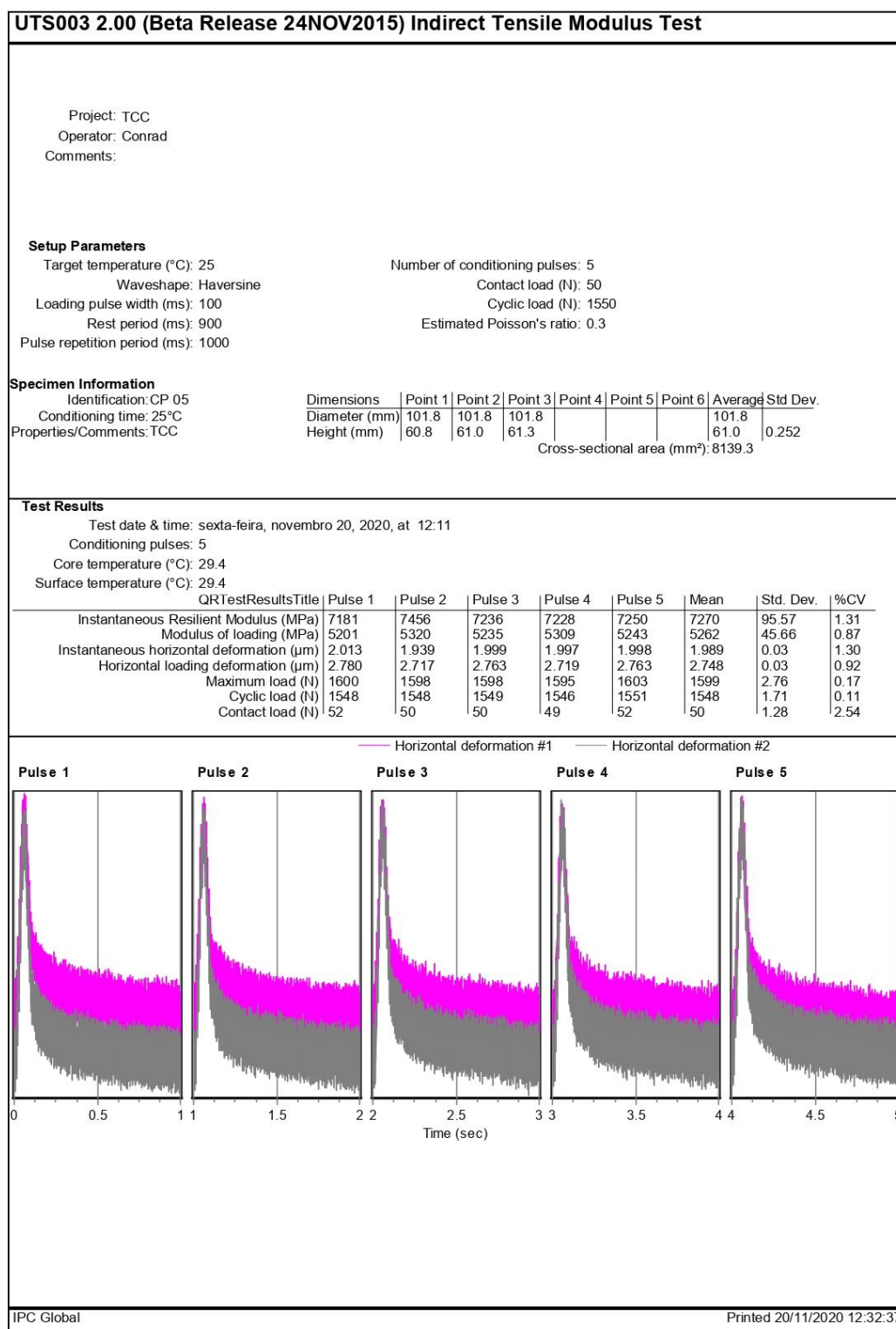
Fonte: Autor (2020)

Figura 19 – Relatório do ensaio de módulo de resiliência do CP 04



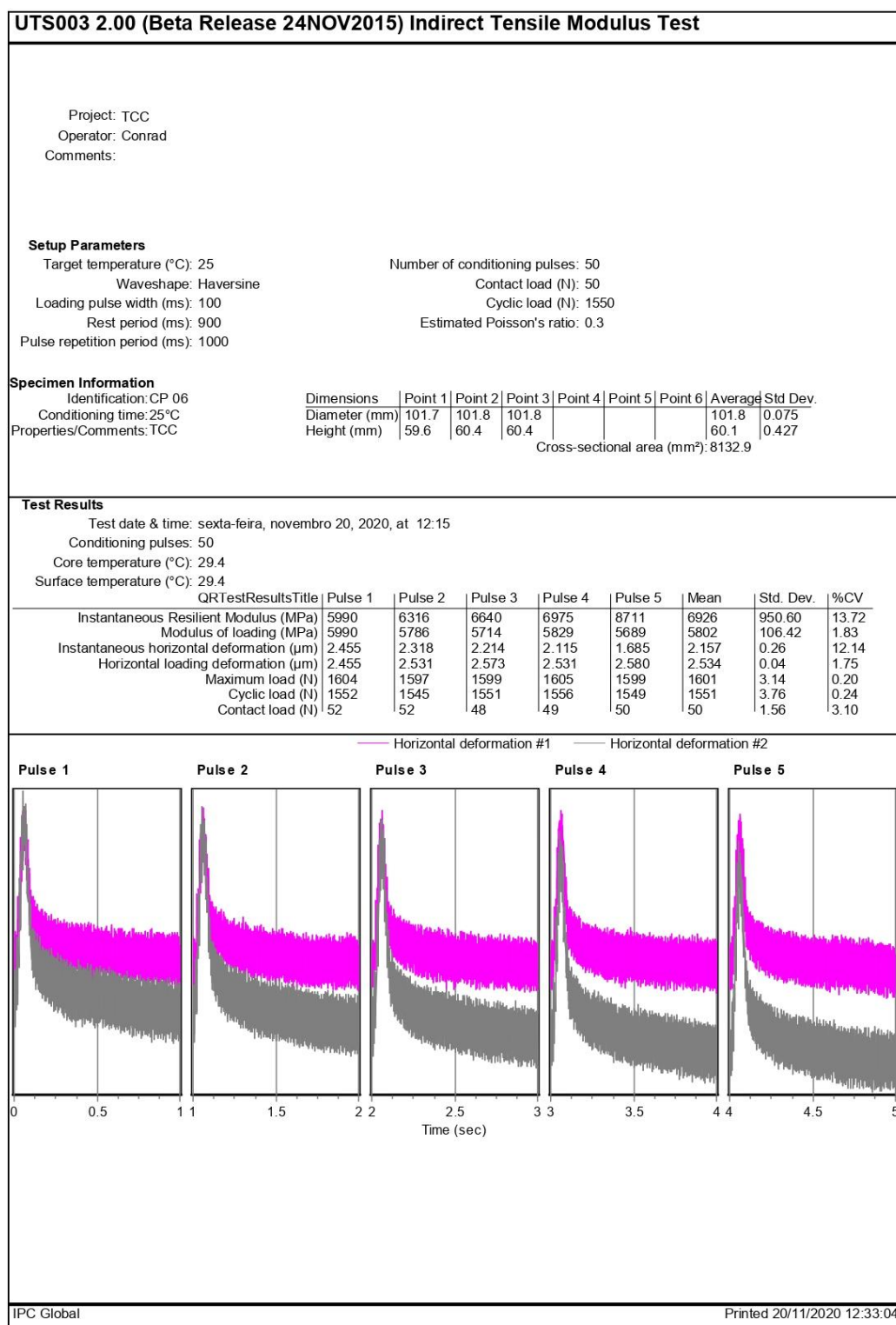
Fonte: Autor (2020)

Figura 20 – Relatório do ensaio de módulo de resiliência do CP 05



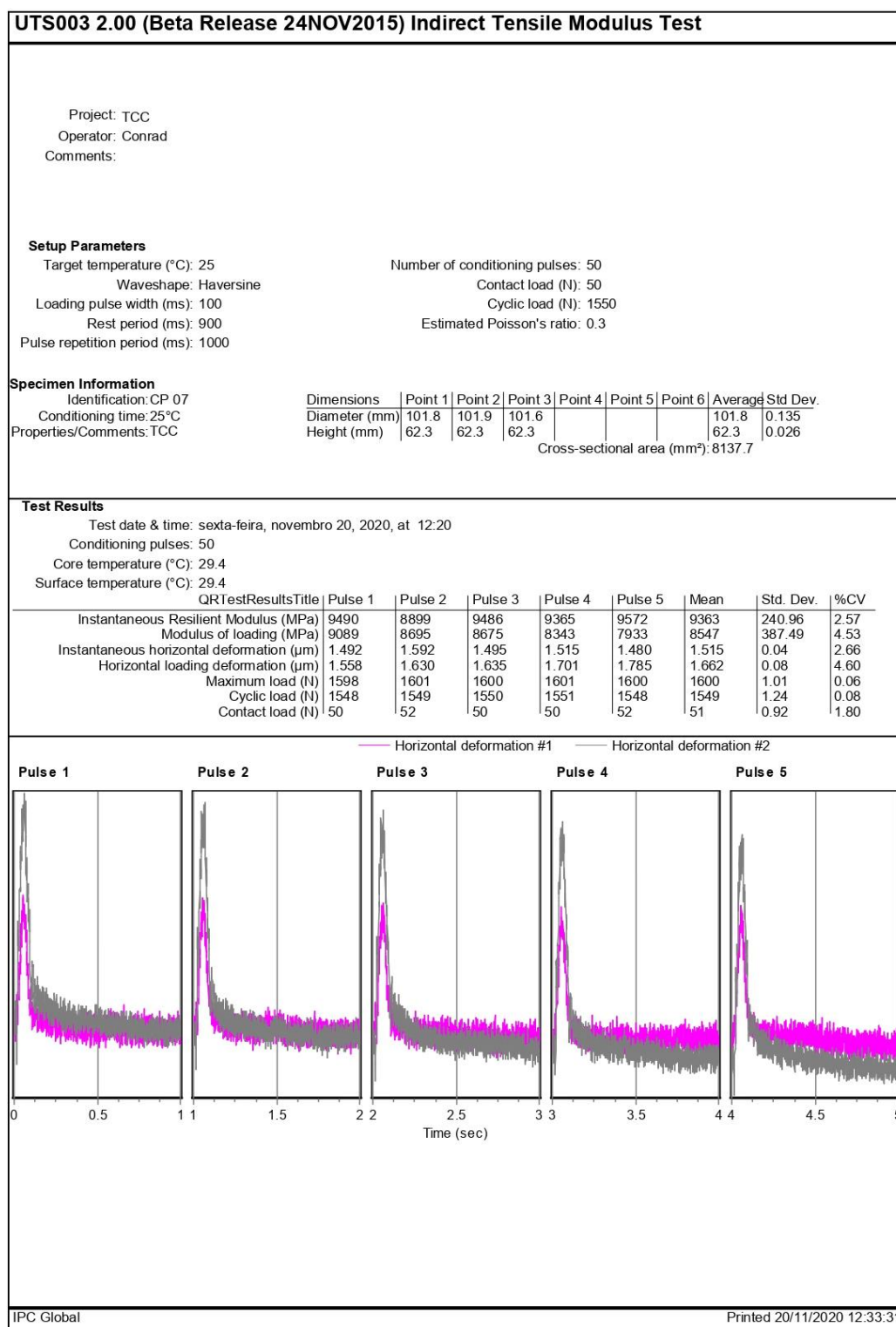
Fonte: Autor (2020)

Figura 21 – Relatório do ensaio de módulo de resiliência do CP 06



Fonte: Autor (2020)

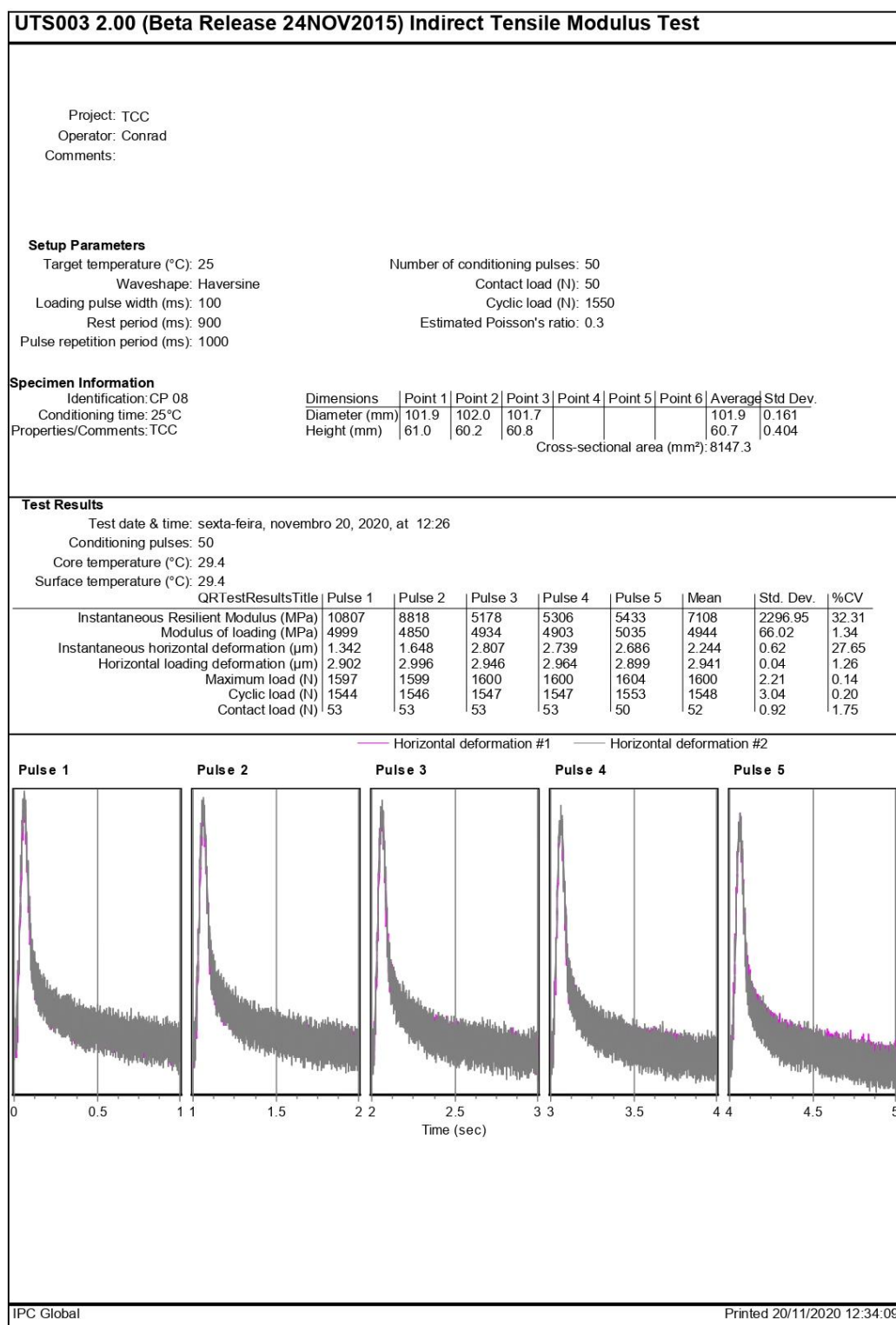
Figura 22 – Relatório do ensaio de módulo de resiliência do CP 07



Fonte: Autor (2020)

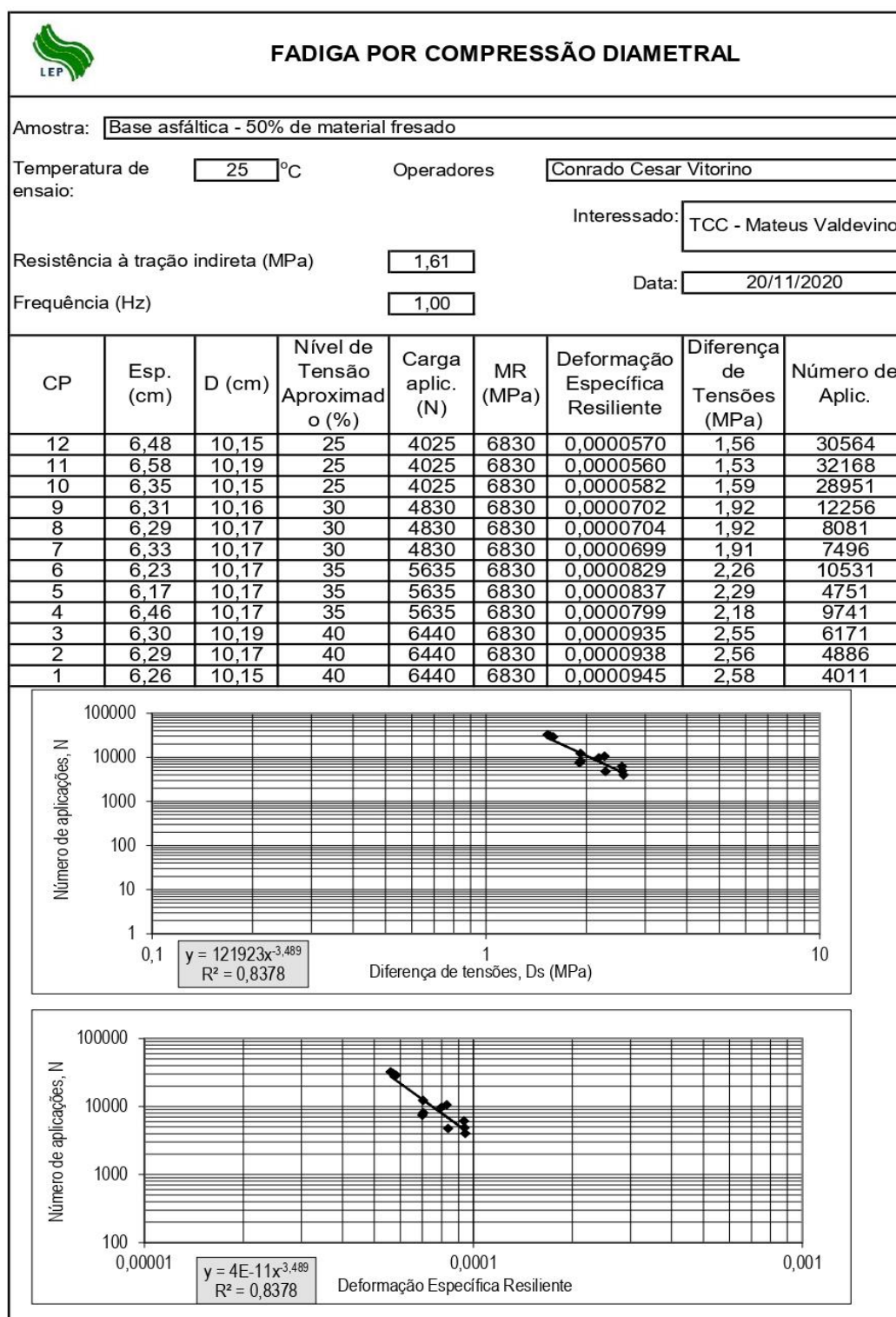


Figura 23 – Relatório do ensaio de módulo de resiliência do CP 08



Fonte: Autor (2020)

Figura 24 – Relatório do ensaio de fadiga por compressão diametral



Fonte: Autor (2020)