

INFLUÊNCIA DA ENERGIA E TEMPERATURA DE COMPACTAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE CONCRETOS ASFÁLTICOS: UM ESTUDO DOS TRIBUNAIS DE CONTAS DO DISTRITO FEDERAL, GOIÁS E PIAUÍ.

Inarya Macedo / Centro Universitário Uninovafapi / inaryamacedo@gmail.com

Claudeny Simone / TCE-PI/ cl.deny@gmail.com

Layse Carvalho / TCDF/ laysegabrielle@gmail.com

Daniel Brandão/TCEGO/danielmbrandao@gmail.com

Tobias/TCE-PE/tobiasacp@tce.pe.gov.br

Elci Pessoa/New Roads/elci.junior@terra.com.br

RESUMO

O presente trabalho aborda um estudo realizado em conjunto pelos Tribunais de Contas do Distrito Federal, Goiás e Piauí a fim de subsidiar a elaboração e consolidação dos procedimentos de Auditoria de Obras Públicas Rodoviárias. A investigação consistiu na utilização dos laboratórios de controle tecnológico de obras rodoviárias de cada Corte de Contas na execução de ensaios segundo metodologia Marshall para concretos asfálticos analisando a interferência de dois parâmetros fundamentais para a qualidade dos revestimentos rodoviários do tipo flexível que é o controle do Grau de Compactação, sob influência direta da variação da energia de compactação da camada, responsabilidade do TCDF, e da variação da temperatura, incumbência do TCE-PI, no momento da compactação. Os ensaios técnicos realizados foram de Compactação Marshall, determinação da densidade aparente, densidade máxima teórica e Estabilidade Marshall. Os resultados mostraram forte correlação entre os parâmetros estudados, permitindo ao Grupo Técnico basear-se com os dados do estudo nas assertivas necessárias às conclusões de procedimentos importantes que apoiarão auditores e fiscais de obras públicas na análise da qualidade dos trabalhos rodoviários contratados e pagos com recursos públicos.

Palavras-chave: pavimentos, controle tecnológico, laboratório, rodovias.

1. INTRODUÇÃO

A melhoria na qualidade de estradas e rodovias tem impacto direto na redução do número de acidentes, redução no tempo de transporte, redução do consumo de combustíveis, redução no custo da manutenção de veículos automotores e, conseqüentemente, aumento da vida útil dos mesmos (MOTHÉ, 2009). Além disso, possibilita qualidade no deslocamento e o desenvolvimento de uma região, tornando-se elo entre ambientes urbanos e/ou rurais.

Segundo Balbo (2007) o pavimento é uma estrutura composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo.

Cada uma destas camadas deve possuir características físicas e mecânicas suficientes para suportar as solicitações impostas pelo tráfego existente atendendo às características físicas e mecânicas previamente determinadas em projeto (v. Figura 1).

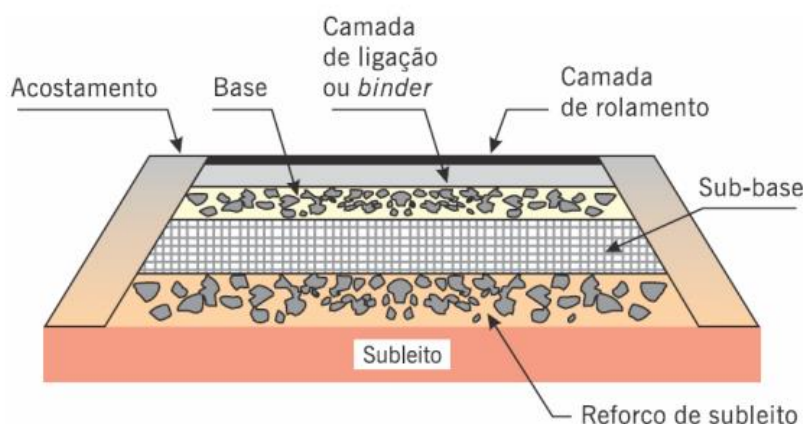


Figura 1 – Camadas constituintes do pavimento flexível. (ODA, 2014).

O revestimento asfáltico, em sua maioria o Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ), é a camada superficial, de pavimentos flexíveis ou semi-flexíveis, que recebe diretamente o trânsito de veículos e tem por principal finalidade estrutural a absorção de cargas resultantes do tráfego transferindo-a parcialmente para as camadas subjacentemente inferiores a ela (Pessoa, 2014).

O concreto Asfáltico fisicamente é composto por vazios (ar), asfalto (ligante), agregado miúdo, agregado graúdo e filler. Sua elaboração se dá através da proporção adequada desses constituintes a fim de que o mesmo atinja características adequadas para a finalidade que sua aplicação se destina.

Em se tratando de Obras Rodoviárias, os concretos asfálticos devem cumprir alguns requisitos impostos pelo projeto, para que o mesmo cumpra sua função e por normas vigentes para garantia da sua qualidade.

Características essenciais como a estabilidade, resistência à tração, densidade aparente e real, volume de vazios e grau de compactação são interdependentes e indicativos tanto da qualidade como vida útil da via afetando diretamente o surgimento de patologias prematuramente, caso estas não estejam definidas e calculadas corretamente.

Vários autores como Chardbourn *et al* (1998), Bernucci (2008), Silva (2008), Ceratti (2011), Fonseca (2016) afirmam que o principal objetivo da compactação de pavimento flexível é alcançar a densidade ótima ajudando garantir que o pavimento terá a capacidade necessária para suportar as cargas do tráfego esperado e durabilidade para resistir às condições do tempo.

O grau de compactação é definido como sendo a razão das densidades da massa asfáltica compactada encontrada em campo pela densidade encontrada na compactação de corpos de prova em laboratório, e influencia características importantes da massa compactada, como a estabilidade resistência à tração e densidade.

Em 2013 o Tribunal de Contas da União emitiu o acordo nº 328/2013 – para avaliação de obras rodoviárias recém-concluídas, tanto do ponto de vista funcional como estrutural, o estudo verificou que nove das onze obras auditadas apresentavam problemas de forma precoce, em torno de sete meses após a conclusão da obra, concluindo os defeitos apresentados não são decorrentes do período de utilização da via, mas sim da má qualidade na execução da obra (CNT, 2017).

Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo apresentar os resultados do estudo de grau de compactação de concreto asfálticos, ensaiados nos laboratórios de controle tecnológico do Distrito Federal, Goiás e Piauí que subsidiaram a elaboração de procedimentos de auditoria, do Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas e a influência exercida nos resultados de estabilidade, fluência e resistência à tração quanto a qualidade dos pavimentos objetos de auditoria em todo o Brasil.

2. METODOLOGIA

O trabalho necessitou ser dividido em várias etapas pelos laboratórios das Cortes de Contas envolvidas e o estudo objetivou analisar o grau de compactação de concretos asfáltico a partir de duas variáveis importantes: a variação da energia de compactação e a variação da temperatura no momento da compactação. Definido as variáveis a característica mecânica analisada foi a Estabilidade que é carga expressa em *Kgf* que produz a ruptura diametral de um corpo de prova de mistura betuminosa em condições padronizadas de ensaio (Pinto, 1997).

A seguir são descritas as etapas envolvidas na pesquisa:

2.1 Etapa I: Coleta de materiais

No Lab/TCDF a partir do traço de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) utilizado em uma obra da região, foram coletados os materiais em uma usina de asfalto, no Lab/TCEPI o traço foi obtido utilizando os parâmetros da Metodologia Marshall para determinação de um teor ótimo de ligante com base em uma composição granulométrica na faixa “C” da Especificação de Serviço DNIT ES 031/2006 (v. Figura 2).

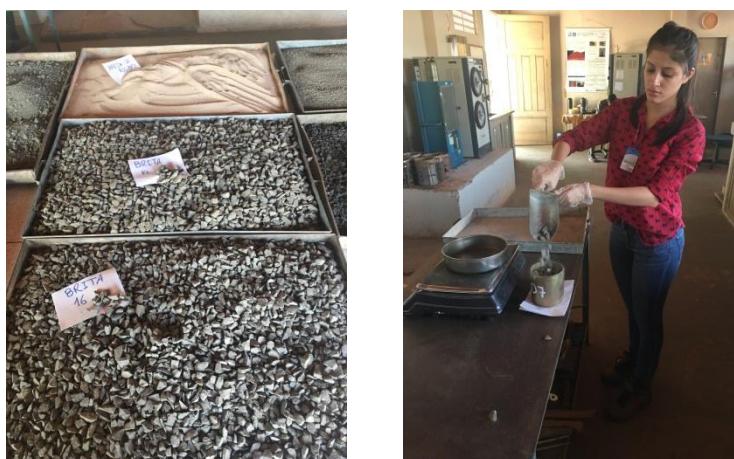


Figura 2 – Materiais utilizados no estudo e execução de ensaios de caracterização dos agregados. (Fonte: Autores)

2.2 Etapa II: Preparação dos corpos de prova

No Lab/TCDF foram moldados 15 corpos de prova, apresentados na Tabela 1, cuja variação decorreu da aplicação de diferentes níveis de energia (grupos de 15, 30, 45, 60 e 75 golpes com 03 corpos de prova para cada quantidade de golpes), variando-se a quantidade de golpes por face do CP durante a compactação tendo como base os procedimentos de preparação de corpos de prova definidos na norma DNER-ME 043/95 e mantendo a faixa de temperatura constante entre 140° a 146°. A Tabela 1 apresenta o resumo dos corpos de prova moldados em laboratório.

Da mesma maneira, no Lab/TCEPI os 24 corpos de prova foram moldados entre 100 °C e 170°C, conforme norma anterior, variando a temperatura a cada 10°C e mantendo a energia de 75 golpes por face, conforme Tabela 2.

Quantidade de CPs	Quantidade de golpes por face
3	15
3	30
3	45
3	60
3	75

Fonte: Autores (2018)

Tabela 1 – Quantidade de cp's ensaiados pelo TCDF.

Quantidade de CPs	Temperatura de compactação
3	100°C
3	110°C
3	120°C
3	130°C
3	140°C
3	150°C
3	160°C
3	170°C

Fonte: Autores (2018)

Tabela 2 – Quantidade de cp's ensaiados pelo TCEPI.

2.3 Etapa III: Volumetria, determinação das densidades aparentes e máximas teóricas, ensaio de Estabilidade.

Após a moldagem, e aguardado o período de 24 horas para desforma dos corpos de prova, procedeu-se com as medidas de volumetria (pesagem ao ar, imerso e seco saturado) e medidas de espessura e diâmetro, ainda seguindo as prescrições segundo DNER-ME 43/95.

Foram determinadas as densidades dos CPs conforme os procedimentos definidos na norma DNER-ME 117/94. Findando os procedimentos com a determinação do valor de Estabilidade para cada cp's, conforme DNER-ME 43/95.

Na Figura 04 ilustram-se os procedimentos seguidos para confecção dos corpos de prova.



Pesagem dos agregados.



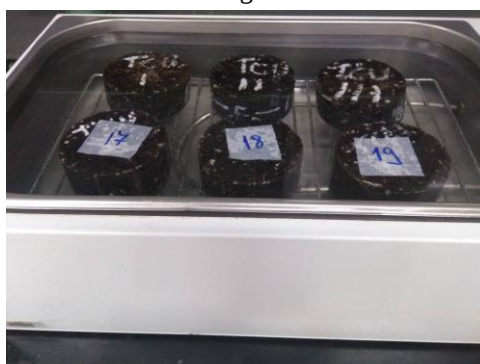
Mistura com o ligante CAP 50/70.



Compactação dos cp's.



Tempo de espera para desforma.



Condicionamento em Banho Maria a 60°C por 40 minutos.



Disposição do equipamento para determinação da estabilidade do concreto asfáltico.

Figura 4 – Procedimentos para confecção dos corpos de prova nos laboratórios do TCDF e TCEPI.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

Inicialmente, todas as amostras foram submetidas ao procedimento descrito no item 6.1 da norma DNER-ME 117/94, cujos resultados de densidade aparente são apresentados na Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente resultados do Lab TCDF e Lab TCE/PI. Além disto, determinaram-se os valores de grau de compactação e estabilidade e seus valores médios para cada variação de grupo de golpes e temperatura. A densidade máxima utilizada foi a Densidade Máxima Teórica (DMT), calculados a partir das ponderações relativas às densidades reais de cada insumo nos traços asfálticos e o seu percentual aplicado na composição da massa, com valores de 2,515 g/cm³ e 2,648 g/cm³ respectivamente.

Na Tabela 3 e 4 encontram-se os valores de Densidade Aparente, Densidade Máxima Teórica e Grau de Compactação resultante dos ensaios executados nos laboratórios.

Quantidade de golpes por face	ρ (g/cm³)	DMT (g/cm³)	GC (%)
75	2,48	2,515	98,71
75	2,48	2,515	98,48
75	2,48	2,515	98,60
60	2,46	2,515	97,75
60	2,50	2,515	99,53
60	2,50	2,515	99,22
45	2,49	2,515	98,91
45	2,49	2,515	99,08
45	2,49	2,515	98,83
30	2,47	2,515	98,03
30	2,46	2,515	97,61
30	2,47	2,515	98,33
15	2,42	2,515	96,41
15	2,43	2,515	96,42
15	2,44	2,515	97,13

Fonte: Autores (2018)

Tabela 3 – Densidade aparente (ρ) e grau de compactação Lab/TCDF.

Temp. Comp.	CP's	ρ (g/cm³)	DMT (g/cm³)	GC (%)
100	1	2,355	2,648	88,9
100	A	2,359	2,648	89,1
100	B	2,373	2,648	89,6
110	2	2,392	2,648	90,3
110	C	2,395	2,648	90,5
110	D	2,399	2,648	90,6
120	3	2,449	2,648	92,5
120	E	2,441	2,648	92,2
120	F	2,462	2,648	93,0
130	4	2,520	2,648	95,2
130	G	2,490	2,648	94,0
130	H	2,503	2,648	94,5
140	5	2,527	2,648	95,4
140	I	2,507	2,648	94,7
140	J	2,511	2,648	94,8
150	6	2,516	2,648	95,0
150	K	2,543	2,648	96,0
150	L	2,511	2,648	94,8
160	7	2,505	2,648	94,6
160	M	2,515	2,648	95,0

Temp. Comp.	CP's	ρ (g/cm ³)	DMT	GC (%)
160	N	2,549	2,648	96,3
170	8	2,533	2,648	95,7
170	O	2,503	2,648	94,5
170	P	2,556	2,648	96,5

Fonte: Autores (2018)

Tabela 4 – Densidade aparente (ρ) e grau de compactação Lab/TCEPI.

A partir dos dados obtidos foram gerados gráficos de correlação entre a quantidade de golpes aplicados e o valor obtido no ensaio de determinação da Estabilidade Marshall (Lab/TCDF) e variação da temperatura e o valor obtido no ensaio de Estabilidade Marshall (Lab/TCEPI), cujos resultados são apresentados nas Figuras 5 e Figura 6, respectivamente.

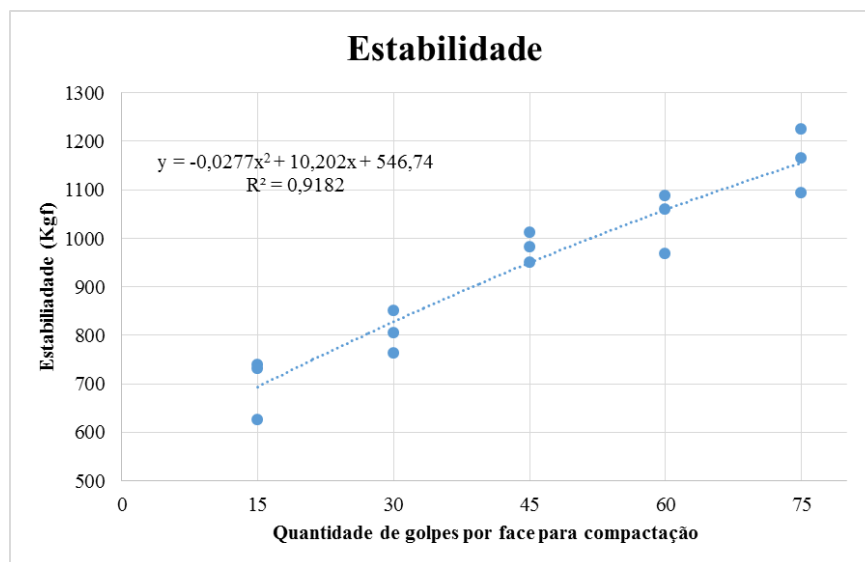


Figura 5 – Estabilidade x Quantidade de golpes por face.

Observa-se na Figura 5 que com o incremento da quantidade de golpes por face no corpo de prova houve o aumento do valor de Estabilidade.

Segundo Bernucci *et al.* (2008) este parâmetro mecânico é determinado pela carga máxima a qual o corpo-de-prova resiste antes da ruptura, definida como um deslocamento ou quebra de agregado de modo a causar diminuição na carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante (0,8mm/segundo); pois com o aumento da quantidade de golpes, há um melhor arranjo entre os agregados graúdos, miúdos e ligante asfálticos diminuindo os vazios entre estes e proporcionando melhor resistência mecânica devido a aumento da rigidez do compósito.

A correlação obtida foi de $R^2 = 0,92$, com um aumento cerca de 39,8% no valor de estabilidade

médio entre os corpos de prova compactados com 15 golpes para os cp's compactados à 75 golpes.

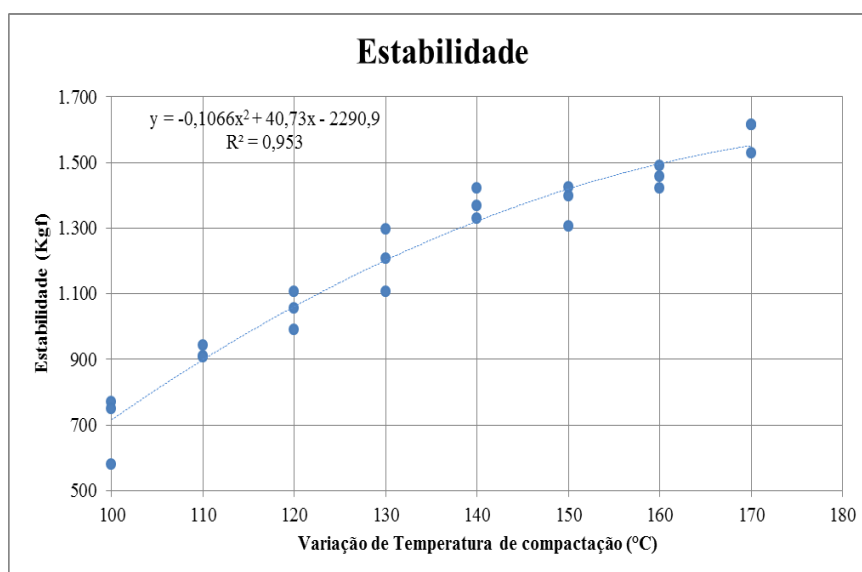


Figura 6 – Estabilidade x Temperatura de Compactação.

Da mesma forma, obteve-se correlação $R^2 = 0,95$ do valor de estabilidade em função da variação de temperatura, quanto maior a temperatura maior valor de estabilidade, pois sendo o ligante asfáltico termo plástico, quanto maior temperatura menor diminuição da viscosidade e em consequência esse material, forma uma película mais abrangente nos agregados dando à matriz trabalhabilidade suficiente para um arranjo eficiente entre os componentes da massa asfáltica. O que demonstra que estes dois parâmetros possuem forte influência na qualidade final do revestimento asfáltico. Este fato, no momento da execução, deve ser controlado rigorosamente por uma equipe competente, a fim de proporcionar as pavimento flexível, vida útil condizente com o projetado de acordo com a região e o tráfego local.

Com o incremento da temperatura houve um aumento cerca de 60% entre o valor de estabilidade à temperatura de 100 °C e 170°C. Observou-se maior sensibilidade deste parâmetro quanto às diferenças de temperatura, do que quanto à energia de compactação, pois se houver uma mistura com o percentual elevado de agregado graúdo, sendo esta uma mistura densa, é possível alcançar valores de grau de compactação (GC) que se enquadrem nas especificações vigentes deste atributo.

Geraram-se também gráficos referentes à estabilidade e GC, a fim de ilustrar o comportamento deste parâmetro de qualidade quanto a massa asfáltica compactada. O grau de compactação reflete-se em outros parâmetros mecânicos que dependem de uma boa execução deste serviço no momento da aplicação na plataforma de rolamento.

Na Figura 7 apresenta-se o gráfico de correlação entre grau de compactação versus estabilidade

elaborado pelo Lab/TCDF, os dados apresentam certa dispersão corroborada com o valor de $R^2 = 0,48$. Tendo em vista que o grau de compactação foi calculado a partir dos dados de densidade aparente e densidade máxima teórica é possível inferir que a estabilidade sofre pouca influência quanto a compactação neste caso.

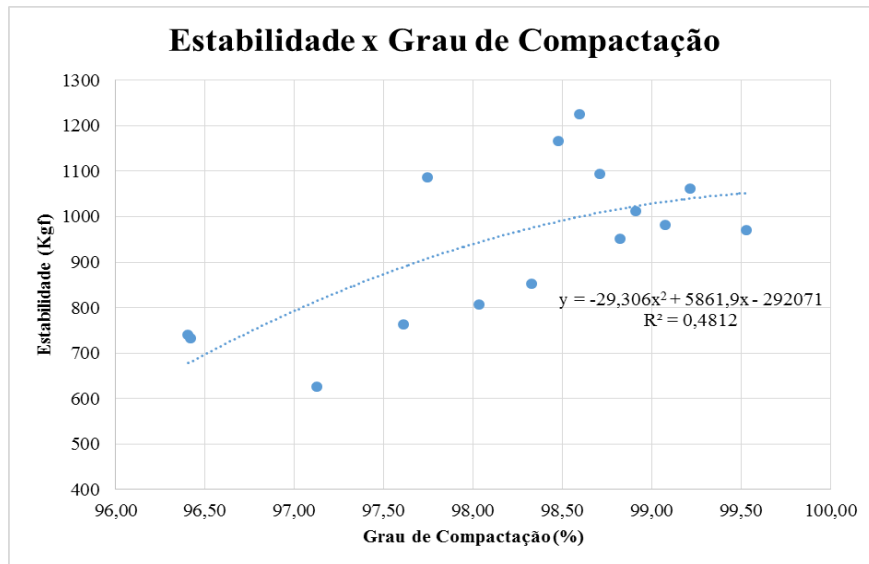


Figura 7 – Estabilidade x Grau de compactação TCDF.

Nos ensaios desenvolvidos pelo Lab/TCEPI, conforme apresentado na Figura 8, ilustra-se o gráfico de correlação entre a estabilidade e o grau de compactação no caso em que houve variação da temperatura de compactação dos corpos de prova.

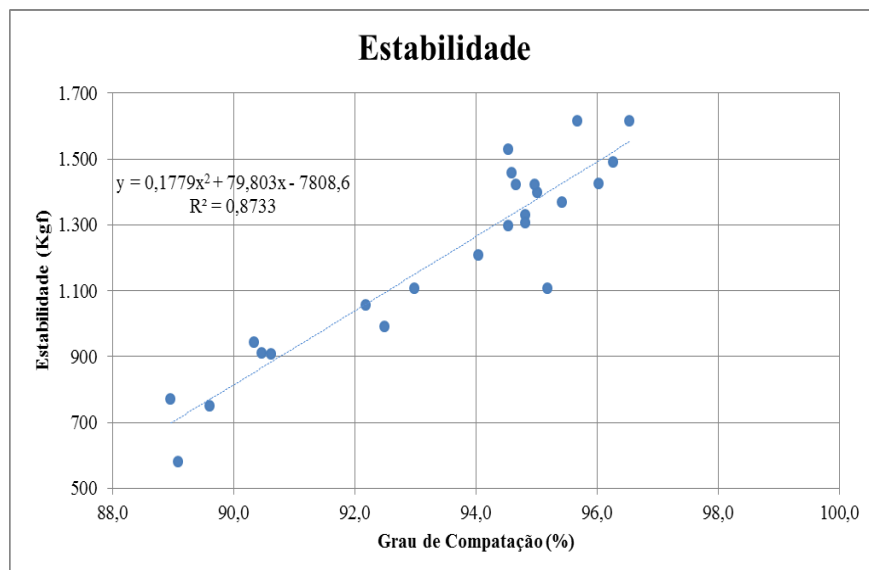


Figura 8 – Grau de compactação x Estabilidade

Observa-se que a medida de que se eleva a temperatura houve o incremento do GC e a partir de

140°C, onde se obteve valor médio de 95% de GC, mesmo elevando-se a temperatura o valor de GC se mantém estável (entre 95% e 95,6%) e o valor de estabilidade varia apenas em torno de 13%. Neste sentido, observa-se que após a temperatura de 140°C os dois parâmetros pouco variam e influenciam entre si.

Observam-se valores altos de estabilidade obtidos pelos dois laboratórios, apesar de utilizarem traços diferentes do revestimento do tipo concreto asfáltico. E comportamentos similares dos dois parâmetros estudados (quantidade de golpes por face e variação da temperatura), onde à medida que se os elevou houve o incremento do valor de estabilidade. Que se reflete de sobre maneira na qualidade do revestimento aplicado nas vias.

Devido à falta de controle tecnológico na maioria das obras rodoviárias de pavimentação asfáltica, tendo em vista a praticamente inexistência de controle tecnológico por parte das empresas contratadas, a perda da qualidade de parâmetros mecânicos importantes para a manutenção da vida útil do pavimento determinados em projeto compromete a aplicação dos recursos públicos, bem como não cumpre as principais finalidades do sistema rodoviário que é a eficiência, segurança e conforto.

4. CONCLUSÕES

Com os dados obtidos, foi possível subsidiar trabalhos importantes e entender o comportamento do revestimento asfáltico quando influenciado pela energia de compactação e variação da temperatura, principalmente em obras públicas e demonstrar a eficiência e importância que os Laboratórios de Controle Tecnológico possuem frente a resolução de questões científicas e prática de obras rodoviárias em apoio as auditorias executadas pelas Cortes de Contas em cada estado do Brasil.

Os dois laboratórios (Lab/TCDF e Lab/TCEPI) encontraram correlações entre as variações de energia de compactação e variação de temperatura de compactação, demonstrando que estes parâmetros no momento da execução do pavimento devem ser rigorosamente atendidos, visto que são fatores preponderantes ante a qualidade final do pavimento flexível rodoviário.

Outros parâmetros relacionados ao grau de compactação estão sendo estudados, como a resistência à tração por compressão diametral e o volume de vazios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- _____. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** – Brasília : CNT, 2017.
- ALBUQUERQUE, Alexandre Pedro Foradini **Influência da energia e da temperatura de compactação nos parâmetros volumétricos e nas propriedades mecânicas dos concretos asfálticos.** Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2005.
- ALBUQUERQUE, Alexandre Pedro Foradini **Influência da energia e da temperatura de compactação nos parâmetros volumétricos e nas propriedades mecânicas dos concretos asfálticos.** Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação.** Rio de Janeiro, 2005.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** Ed. Oficina de textos: São Paulo, Brasil, 2007.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Petrobras, Abeda. 2008.
- CERATTI, J. A. P; REIS, R. M. M. de R. **Manual de dosagem de concreto asfáltico.** São Paulo : Oficina de Textos ; Rio de Janeiro : Instituto Pavimentar, 2011.
- CHADBOURN, B. A.; NEWCOMB, D. E.; VOLLER, V. R.; DE SOMBRE, R. A.; LUOMA, J. A.; TIMM, D. H., **An asphalt paving tool for adverse conditions.** Final Report, Minnesota Department of Transportation, 1998.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 043/95: **Misturas Betuminosas a quente: Ensaio Marshall.**
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 117/94: **Misturas Betuminosas: Determinação da Densidade Aparente.**
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ES 031/2006: **Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico.**
- GRAVE, L. E. **Efeito da temperatura de compactação nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas.** Lajeado: Centro Universitário UNIVTES, 2016.
- PINTO, S. **Materiais pétreos e concreto asfáltico: conceituação e dosagem.** Rio de Janeiro. Departamento de Fortificação e Construção – Instituto Militar de Engenharia, 1997.