



Characterization and modeling of asphalt concrete from micro-to-macro scale

Gustavo Canon Falla

Born on: 8th March 1980 in Bogota, Colombia

Dissertation

to achieve the academic degree

Doctor of Engineering (Dr.-Ing.)

First referee

Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner

Second referee

Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Oeser

Dr. Sigurdur Erlingsson

Submitted on: 15th September 2020

Defended on: 18th March 2021

Abstract

There is no doubt that the publication of RDO-Asphalt [1] was an important advance in the field of road engineering in Germany. However, there are still challenges to consolidate an efficient road transport system that takes advantage of the economical and social growth opportunities that have been observed in recent years. Some of these challenges are related with the development of advanced material characterization techniques, and the creation of efficient numerical models to predict pavement responses. In this context, the following objectives of the thesis were formulated:

- To development new testing procedures to better understand the functionality of asphalt concrete constituents within asphalt mixtures.
- To develop an efficient numerical model suitable to be used within Mechanistic empirical (M-E) design methodologies of flexible pavements.

The first objective was addressed partially through the introduction of a new testing procedure in the Dynamic shear rheometer (DSR), known as multiwave test. The multiwave test was envisaged to characterize the viscoelastic properties of bitumen and mastics. The multiwave test is an efficient alternative to traditional temperature sweeps. The time efficiency of the multiwave test was almost 50% higher compared to conventional methods.

The multiwave test was used to identify the modifying effect of mineral fillers on the performance of bitumen. Using only the results of multiwave tests in combination with numerical simulations it was feasible to characterize the viscoelastic behavior, the resistance to permanent deformation and the resistance to low temperature cracking of bitumen and mastics.

The first objective was further achieved by the development of a testing device, referred to as Dresden dynamic shear tester (DDST), to characterize the viscoelastic properties of mortar. The DDST was conceptualized to determine the shear stiffness of mortar as input to multiscale modeling of asphalt concrete.

A synthetic reconstruction approach for asphalt concrete using Voronoi tessellation was presented. This approach was coupled with Finite element (FE) modeling to obtain effective material properties of a representative volume element of a Stone mastic asphalt (SMA). The numerically calculated stiffness of the SMA was below the experimentally measured value. The difference between numerical and experimental results was explained by the structural load carrying mechanism in the numerical simulation. In the multiscale approach, the aggregates "swim" in the bituminous matrix and the load is mainly carried by the mortar. Instead, in reality, the load in a gap graded asphalt is primarily carried by the aggregate skeleton.

The second objective was met through the development of a semi-analytical strategy, known as Fourier series aided finite element method (FSAFEM). FSAFEM uses the FE method in combination with Fourier analysis to simulate the tire-pavement interaction in a very efficient way. FSAFEM was validated with Three dimensional (3D) FE simulations in Abaqus. The results of both methods were almost identical, however, there was a notorious difference in the computational time: FSAFEM was almost 45 times faster than the 3D FE method.

The FSAFEM was used to determine the effect of non-uniform tire pressure loads on the durability of thin asphalt layer pavements. The calculations showed that the non-uniform tire pressure plays an important role in the performance of thin pavements. It was observed that fatigue life of thin pavements is highly affected by the non uniformity of the load.

Kurzfassung

Im letzten Jahrhundert erlebte die deutsche Gesellschaft einen sehr schnellen Wandel mit hohen Mobilitätsansprüchen, der zu einer Zunahme des Straßenverkehrs führte. Als Antwort auf diese Herausforderung wurde im Jahr 2009 ein neuartiger Ansatz zur Dimensionierung von Asphaltbefestigungen, RDO-Asphalt [1], entwickelt. Die RDO-Asphalt ist eine fortschrittliche Verfahrensweise für die rechnerische Dimensionierung von Asphaltbefestigungen unter Einbeziehung mechanistischer Modelle. Diese wissenschaftlich fundierte Verfahrensweise wurde entwickelt, weil es für die bisher angewendete traditionelle empirische Methode, RSTO-2001 [2], unmöglich war, zukünftige Entwicklungen unter den sich ändernden Anforderungen aus Verkehr, neuartigen Baustoffen und dem klimatischen Bedingungen vorherzusagen.

Es besteht kein Zweifel, dass die Einführung der RDO-Asphalt ein wichtiger Fortschritt auf dem Gebiet des Straßenbaus in Deutschland war. Es bestehen jedoch noch Herausforderungen bei der Konsolidierung eines effizienten Straßenverkehrssystems. Die in den letzten Jahren beobachteten wirtschaftlichen und sozialen Wachstumsmöglichkeiten der Gesellschaft sollten einher gehen mit der Weiterentwicklung eines effizienten Straßenverkehrssystems. Die meisten dieser Herausforderungen stehen im Zusammenhang mit der Entwicklung leistungsorientierter Verfahrensweisen zur Materialcharakterisierung und effizienter numerischer Modelle die innerhalb rechnerischer Dimensionierungsmethoden verwendet werden können.

In diesem Rahmen lag der Fokus der vorliegenden Dissertaion auf der Entwicklung leistungsbasierter Verfahrensweisen zur Materialcharakterisierung, um die Funktionalität von Asphaltkomponenten innerhalb des Asphaltgemisches besser zu verstehen. Zudem wird in der Dissertation ein fortgeschrittenes numerisches Modell zur Ermittlung von Beanspruchungszuständen von Asphaltbefestigungen vorgestellt, welches auf FE und Fourier-Analyse basiert.

Grundlage der Untersuchungen bildeten (Dynamic Shear rheometer (DSR) Versuche zur Charakterisierung des Verhaltens von Bitumen, Mastix, und Mörtel. Die DSR Versuche basieren dabei auf der Mehrwellen-Oszillation, um die viskoelastischen Eigenschaften von Bitumen zu charakterisieren. Im Ergebnis der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass der Mehrwellen-DSR Versuch eine effiziente Alternative zu den bisher angewendeten Temperatur-Sweeps darstellt. Die Zeiteffizienz des Mehrwellenversuchs ist im Vergleich zu den herkömmlichen Temperatur-Sweeps fast 50% höher

Aufbauend auf den Ergebnissen von Mehrwellenversuche konnte die modifizierende Wirkung von Füller auf das Verhalten von Bitumen identifiziert werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen zudem, dass es möglich ist, unter Verwendung der Ergebnisse des Mehrwellenversuches in Verbindung mit numerischen Simulationen die rheologischen Eigenschaften, den Widerstand gegen plastische Verformungen und das Tieftemperaturverhalten von Bitumen und Mastix bei niedrigen Temperaturen zu prognostizieren.

Ein weiteres Ziel der Dissertaion bestand in der Entwicklung eines Verfahrens zur Charakterisierung der viskoelastischen Eigenschaften von Mörtel. Aus diesem Grund wurde eine neue Prüfvorrichtung, die als Dresden Shear Tester (DDST) bezeichnet wird, konzipiert, um die Schersteifigkeit von Mörtel als Eingangsparameter für die Multiskalenmodellierung von Asphaltgemischen zu ermitteln. Unter Verwendung der Ergebnisse dieser DDST Versuche wurde ein synthetischer Ansatz zur Rekonstruktion der Mikrostruktur von Asphalt unter Verwendung von Voronoi-Tesselation erarbeitet. Dieser Ansatz wurde zudem mit der FE-Modellierung gekoppelt, um die relevanten Materialeigenschaften eines Splittmasticasphalt (SMA) zu ermitteln. Diese berechneten Werte in Form der Steifigkeit lagen unterhalb der im Versuch gemessenen

Steifigkeiten. Grund hierfür ist die in weiteren Forschungsarbeiten zu verbessernde strukturelle Belastungsfunktion der numerischen Simulation, die derzeit nur bedingt realitätskonform die Interaktion zwischen den einzelnen Komponenten in Asphaltgemisch abbilden kann.

Abschließend wird eine im Rahmen der Dissertation entwickelte semi-analytische Methode (FSAFEM) vorgestellt, die auf der Finite Elemente Methode (Finite element method (FEM)) in Kombination mit der Fourieranalyse beruht, um die für die realitätsnahe rechnerische Dimensionierung von Straßenbefestigungen erforderliche Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn auf sehr effiziente Weise zu simulieren. FSAFEM wurde mit Hilfe von 3D-Simulationen unter Verwendung des FE Programms Abaqus validiert. Im Ergebnis der Berechnungen konnte eine gute Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit den beiden Programmen erzielt werden. In diesem Zusammenhang zeigte sich, dass sich zudem mit den neu entwickelten Programm FSAFEM die Rechenzeiten signifikant verkürzen. Das Programm FSAFEM wurde schließlich angewendet, um den Einfluss von ungleichförmigen Reifenkontaktspannungen auf die Lebensdauer von dünnen Asphaltbefestigungen zu ermitteln. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass die Berücksichtigung einer ungleichförmigen Verteilung des Reifenkontaktspannung bei der rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen mit dünnen Asphaltdeckschichten einen signifikanten Einfluss auf das Ermüdungsverhalten der Deckschicht und demzufolge auf die Lebensdauer der Befestigung hat.