O USO DE ÓXIDO DE GRAFENO PARA REPARAÇÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO - UMA REVISÃO

J. PAULA^{1*}, L. R. S. CARNEIRO¹, P. LUDVIG¹, S. N. SILVA¹

¹ Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG, Av. Amazonas, 7675, Belo Horizonte – MG - Brasil

RESUMO

O modal rodoviário é o principal sistema logístico do Brasil, sendo responsável pelo transporte de 60% de todas as cargas no território e 57% das rodovias brasileiras apresentam algum tipo de manifestação patológica, isso ocorre devido a projetos de design ruins, aumento imprevisto de cargas rodoviárias e falta de manutenção preventiva. Estudos recentes mostraram o potencial da adição de óxido de grafeno (GO) em revestimentos asfálticos. Este trabalho tem como objetivo discutir o papel do óxido de grafeno na melhoria das propriedades dos revestimentos asfálticos e nos microrrevestimentos asfálticos. De acordo com a literatura, a introdução de 3% de óxido de grafeno melhora a viscosidade, a temperatura de trabalho e a resistência aos ciclos de fadiga.

Palavras-chave: óxido de grafeno; revestimentos asfálticos; micro revestimentos asfálticos; patologia de pavimentos.

1. INTRODUÇÃO

Dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e de uma pesquisa da Conferência Nacional de Transportes (CNT), ambos a partir de 2018, 60% de todas as cargas no território e 57% das rodovias brasileiras apresentam algum tipo de manifestação patológica, o que reflete na cadeia produtiva do país.

Segundo o DNIT/IPR 720 (2006), *“os pavimentos são concebidos para durarem um determinado período”*. O período compreendido entre o inicial e o final é denominado ciclo de vida do pavimento. Caso sejam realizadas manutenções periódicas o ciclo de vida poderá ser prolongado, reduzindo os custos operacionais da rodovia. Ainda de acordo com o DNIT, os pavimentos betuminosos apresentam tendência ao trincamento, devido a sua forma de atuação flexível sobre a base composta por solo e brita. A repetição de cargas, a qual se dá pela passagem de veículos, geram ciclos de fadiga, os quais ocasionam fissuramentos, e posteriormente as trincas.

Uma das técnicas empregadas na manutenção periódica, desde que o pavimento não apresente danos estruturais, é o microrrevestimento asfáltico, o qual pode ser seguido de uma remoção superficial de parte do revestimento desgastado ou não. Os microrrevestimentos são comumente aplicados na revitalização de camadas rolantes em estradas brasileiras. A norma técnica de referência, de acordo com o DNIT é a 035/2005-ES - Pavimentos flexíveis – Microrrevestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero – Especificação de serviço.

O desenvolvimento de novos materiais tecnológicos e sua aplicação em revestimentos asfálticos podem minimizar muitas das patologias atuais e reduzir custos com reparos futuros. A introdução do óxido de grafeno (GO) na matriz asfáltica, o qual atua como agente aglutinador, resultando na melhora das propriedades do revestimento asfáltico.

De acordo com SILVA (2017). *“O termo “grafeno” não é novo e foi usado pela primeira vez em 1987, mas a definição oficial foi dada pela International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) em 1994”*. Ainda segundo SILVA (2017) o grafeno é o nanomaterial mais pesquisado no mundo atualmente, devido as suas propriedades, as quais produzem melhorias nas propriedades dos demais materiais, entretanto seu custo de produção ainda é elevado, devido ao fato da produção em escala industrial estar em fase de implantação.

O grafeno possui espessura de um átomo, o seu derivado óxido de grafeno possui entre 3 a 20 vezes a espessura de um átomo, com custo de produção inferior ao do grafeno.

O presente estudo, por meio de revisão bibliográfica, tem por objetivo verificar a influência da utilização do óxido de grafeno nas propriedades do pavimento asfáltico.

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi utilizada a técnica de Benchmarking, trata-se de uma metodologia utilizada para comparar os processos e as métricas de desempenho de um negócio, neste trabalho é analisado o resultado de pesquisas bibliográficas, sendo um comparativo entre as pesquisas realizadas, para identificar os resultados e sua empregabilidade, descobrindo assim, oportunidades de melhorias, no caso específico deste trabalho, o objetivo é verificar os resultados de aplicações e a possibilidade de utilização específica na camada de revitalização.

No primeiro capítulo é realizada a introdução e o objetivo do trabalho. No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, com os conceitos empregados neste trabalho, referentes a Patologia de asfaltos, Microrrevestimento asfáltico, Grafeno, Óxido de Grafeno. No terceiro capítulo é realizada a exposição da Metodologia, a onde é apresentada as principais propriedades relatadas na pesquisa bibliográfica utilizando o óxido de grafeno em asfaltos. Por fim no quinto capítulo a conclusão do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Patologia de Asfaltos

As patologias presentes nos asfaltos podem ser classificadas em dois grupos. O primeiro de ordem estrutural, os quais tem sua origem em erros provenientes de projetos, falhas de material e de execução. O segundo grupo é de ordem funcional, devido ao desgaste natural devido a fadiga, proveniente do ciclo repetido de cargas durante seu uso e das intempéries.

Neste trabalho será abordado o segundo grupo de patologias, as quais são possíveis de serem corrigidas através do emprego do microrrevestimento asfáltico.

tendo como fonte de referência a norma do DNIT 005/2003 - Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia.

De acordo com (Bernucci et. al., 2008), “as fendas são aberturas na superfície asfáltica e podem ser classificadas como fissuras, quando a abertura é perceptível a olho nu apenas à distância inferior a 1,5m, ou como trincas, quando a abertura é superior à da fissura”.

Segundo a norma do DNIT 005/2003 as fissuras não apresentam danos funcionais ao pavimento. Pela classificação da citada norma as trincas podem ser:

- Trinca isolada, sendo subdivididas em: transversal; longitudinal e de retração;
- Trinca interligada, subdivididas em: tipo “Couro de Jacaré” e tipo “Bloco”.

Figura 1. Exemplos de patologias em pavimentos, (a) Trinca isolada curta longitudinal e (b) Trincas longitudinais longas (Bernucci et. al., 2008).

2.2. Microrrevestimento asfáltico

Segundo (Bernucci et. al., 2008), o microrrevestimento asfáltico pode ser considerada evolução das lamas asfálticas, pois usa o mesmo princípio e concepção, contudo a adição de polímeros, permite a modificação das suas propriedades e por consequência a ampliação da sua vida útil. Sua aplicação é restrita a patologias de ordem funcional, com o objetivo de restaurar a capacidade de tráfego do pavimento, realizar o selamento da superfície e o prolongamento da vida útil do pavimento.

2.3. Grafeno

O grafeno foi descoberto em 2004, pelos pesquisadores Andre Geim e Konstantin Novoselov, pertencentes a Universidade de Manchester, como resultado do trabalho receberam o prêmio Nobel de Física no ano de 2010. Utilizando o grafite como matéria prima e fita adesiva, os pesquisadores obtiveram êxito em isolar uma única camada plana de átomos de carbono, com formato hexagonal.

O grafeno é exatamente uma camada de carbono de grafite. Os átomos de carbono são dispostos em uma estrutura de favo de mel (S. Nazarpour e S. R. Waite, 2016).

Figura 2. Representação gráfica da estrutura química do grafeno empilhado em camadas (S. Nazarpour e S. R. Waite, 2016).

Figura 3. Representação gráfica da estrutura química do grafeno duas camadas isoladas (S. Nazarpour e S. R. Waite, 2016).

2.4. Óxido de Grafeno

O óxido de grafeno (GO) é obtido através do Método Modificado de Hummer, a partir da oxidação do grafite. O método se divide em três etapas distintas: oxidação, purificação e esfoliação. A oxidação é obtida através do uso dos seguintes agentes oxidantes concentrados: H_2SO_4 , KMnO_4 e H_2O_2 . Conforme descrito por (Zhao et al., 2016) o método consiste em: “*Após a oxidação, os produtos são centrifugados e depois esfoliados com o auxílio de vibração ultrassônica para obter a solução aquosa GO uniformemente dispersa*”. O resultado do processo é a formação de 3 a 20 camadas de grafeno agrupadas.

Figura 4. O modelo estrutural de acordo com Ruess, o modelo mostra claramente as duplas ligações deixadas não oxidadas (A. M. Dimiev e S. Eigler, 2017).

Figura 5. Modelo de Lerf-Klinowski da estrutura GO (A. M. Dimiev e S. Eigler, 2017).

Segundo (A. M. Dimiev e S. Eigler, 2017): “O óxido de grafeno (GO) é um material bidimensional (2D) derivado da matriz do grafeno introduzindo várias funcionalidades do oxigênio. Os átomos de oxigênio são covalentemente ligados a átomos de carbono, convertendo-os do estado sp^2 -hibridizado no grafeno-mãe no estado sp^3 -hibridizado”.

3. METODOLOGIA

3.1. Seleção de artigos

Para o desenvolvimento desta revisão bibliográfica foram identificados 412 artigos, com os seguintes parâmetros de referência para a pesquisa:

- 3.1.1. Seleção por data de ocorrência - como critério foi estabelecida a ocorrência em pesquisas com data de publicação a partir de 2010. Devido a utilização do grafeno como compósito material ser recente.
- 3.1.2. Pesquisa por palavras-chave – com pesquisa inicial na base CAPES, foram adotadas as palavras ou expressões:
- 3.1.3. Combinação de palavras-chaves – considerando a palavra grafeno (a) e a palavra (d) foram associadas as demais palavras e expressões listadas de (a) a (i) para a obtenção dos resultados.
- 3.1.4. Aderência do título com o objetivo de pesquisa – a combinação entre grafeno e asfalto apresentou várias ocorrências relacionadas a pesquisas de supercondutores, as quais foram desconsideradas, pois não apresenta aderência ao tema pesquisado.
- 3.1.5. Leitura do Abstract – Após a primeira seleção foi realizada a leitura prévia dos resumos de cada artigo, a aderência aos objetivos da pesquisa foi definida como critério de seleção.
- 3.1.6. Leitura do artigo – como segundo critério de refinamento da pesquisa, foi adicionada a leitura das conclusões obtidas nos artigos.
- 3.1.7. Aderência relevante ao tema – artigos selecionados para desenvolvimento da análise

comparativa de resultados.

Baseado na técnica descrita por (KESSLER,1963), sobre acoplamento de artigos, a seleção com a restrição de datas e utilizando a combinação descrita nos critérios, resultou na de ocorrência de 412 artigos, na data de 19/01/2019. Aplicando critérios de aderência ao tema pesquisado, verificando o título e as palavras-chave, foram selecionados 178 artigos, os quais se mantinham dentro dos objetivos pesquisados. Foi realizada a leitura dos artigos selecionados, restando na base de dados 42 artigos, os quais foram novamente submetidos aos critérios de relevância. Desta forma restaram 10 artigos os quais compõem a base de pesquisa para a apresentação dos resultados obtidos. Conforme apresentado na Figura 6, as quantidades de publicações dentro do objetivo de pesquisa apresentam um baixo percentual, 2,0% de ocorrência de uma base de 412 ocorrências.

Figura 6. Representação gráfica – Artigos pesquisados.

3.2. Propriedades identificadas nos resultados da pesquisa bibliográfica

De acordo com (Bernucci et. al., 2008): “*Todas as propriedades físicas do asfalto estão associadas à sua temperatura. O modelo estrutural do ligante como uma dispersão de moléculas polares em meio não-polar ajuda a entender o efeito da temperatura nos ligantes asfálticos*”. A norma ABNT NBR 6576/98, assim como a norma europeia EM 12591/2000, apresenta ensaios correlacionando a temperatura com a viscosidade. Considerando a vida útil dos pavimentos a resiliência em relação ao ciclo de fadigas, as pesquisas contemplaram os resultados relativos à resistência a fadiga. A incorporação de água no asfalto após a utilização do óxido de grafeno foi considerada, devido a possibilidade de redução da sua oxidação e do seu envelhecimento. Todas as análises foram realizadas considerando o teor de óxido de grafeno adotado na composição, afim de descrever quais os percentuais indicados para a obtenção dos resultados.

3.2.1. Resistência a fadiga

O aumento da resistência entre os ligantes proporcionou uma maior resistência ao ciclo de fadiga, conforme demonstrado pela pesquisa realizada por (Jing Li et al, 2018): “*os percentuais utilizados entre 0,02 a 0,08% apresentaram melhorias, aumentando a aglutinação entre as partículas, comparada a mistura original*”.

Na pesquisa foram adotados dois tipos de compostos asfálticos, com a adição de polímeros e sem a adição de polímeros. Os compostos apresentados na figura 6 identificados pelas siglas: GO (óxido de

grafeno); PS (poliestireno); SBS (estireno butadieno estireno); PS-GNPs (nano plaquetas de óxido de grafeno combinadas com poliestireno); GNPs (nano plaquetas de óxido de grafeno).

A viscosidade do ligante foi medida nas temperaturas de 135°C, 165°C e 175°C, através do emprego do viscosímetro de Brookfield de acordo com a norma T0625-2011 (JING LI et al, 2018).

Os resultados apresentados, em comparação as amostras com sem adição do óxido de grafeno mostraram aumento na resistência a fadiga.

Figura 7. Representação esquemática do mecanismo de síntese do aglutinante incorporado por GNPs-PS (Jing Li et al, 2018).

Figura 8. Imagens (a) MEV (Microscopia de Varredura Eletrônica) e (b) MFA (Microscopia de Força Atômica) de GNPs-PS (Jing Li et al, 2018).

Conforme apresentada na pesquisa de (Kefei Liu et al, 2018) a utilização do óxido de grafeno aumentou a capacidade de deformação do asfalto, conforme é apresentado no gráfico da figura 9 e figura 10. O gráfico demonstra a relação das amostras testadas para os ciclos típicos de fluência e de recuperação no

qual foram empregados os carregamentos de teste com 0,1 kPa e com 3,2 kPa. As amostras utilizadas: HMAB-1 (100,00% mistura de asfalto a quente – amostra de controle) ; HMAB-2 (99,5% mistura de asfalto a quente + 0,05% de GO); WMAB-1(96,95% mistura de asfalto a quente com aditivo aglutinante + 3,00% Sasobit + 0,05% de GO); WMAB-2(94,95% mistura de asfalto a quente com aditivo aglutinante + 5,00% de óleo de cozinha usado + 0,05% de GO); WMAB-3 (91,95% mistura de asfalto a quente com aditivo aglutinante + 5,00% de óleo de cozinha usado + 0,05% de GO + 3,00% Sasobit). Os valores de entre recuperação e carregamento do asfalto modificado GO + WCO (WMAB-2) foram 33% vezes maiores e 48% menores que os do asfalto de controle, respectivamente (Kefei Liu et al, 2018).

Figura 9. Gráfico do ciclo típico de fluência e recuperação para os HMABs e WMABs a com carga aplicada de 0,10 kPa, adaptado (Kefei Liu et al, 2018).

Figura 10. Gráfico do ciclo típico de fluência e recuperação para os HMABs e WMABs a com carga aplicada de 3,20 kPa, adaptado (Kefei Liu et al, 2018).

Segundo a pesquisa realizada por (Brcic, 2016) a adição do grafeno aumentou do módulo de elasticidade (E) da mistura asfáltica e a recuperação da elasticidade. Na pesquisa foram utilizadas adições entre 1,00% e 2,00% de grafeno, resultando em variação no módulo de elasticidade entre 3,00 MPa e 17,9 MPa, proporcional ao teor adicionado.

De acordo com (Jing et al, 2018): “A resistência à temperatura e as propriedades mecânicas dos asfaltos foram analisadas ensaios de reologia dinâmica de cisalhamento (DSR) e de recuperação por fluência sob tensão múltipla (MSCR), que revelaram que uma quantidade ótima de GOs-SH (0,02%) pode efetivamente melhorar a baixa temperatura e desempenho anti fissuras do asfalto SBS”.

3.2.2. Resistência a incorporação de água

Conforme indicado na figura 11, a incorporação do óxido de grafeno melhorou as propriedades de resistência a incorporação de água, os teores empregados no asfalto modificado: 0,02% a 0,08% de GO (Jing Li et al, 2018).

Figura 12. Ilustração do mecanismo de bloqueio da entrada de água no asfalto modificado PS-GNPs (nano plaquetas de óxido de grafeno combinadas com poliestireno) (Jing Li et al, 2018).

3.2.3. Deformação plástica

Figura 13. Esboço do experimento para determinar a capacidade de aquecimento dos ligantes de asfalto, é realizada a leitura das variações de temperatura x tempo (Navarro, 2018).

A pesquisa sobre a adição de grafeno com as proporções de 0,1%, 0,5%, 1,0% e 3,0% em peso de asfalto. Foram observados resultados relativos à resistência a deformações plásticas a altas temperaturas. Conforme é apresentado o esquema de ensaio na figura 13. A adição de grafeno resulta em aumento da temperatura do ligante, tendo como consequência o aumento do desempenho das deformações plásticas (Navarro, 2018).

De acordo com (Navarro, 2018) uma proporção elevada de grafeno na composição do asfalto poderá torna-lo frágil.

Ao utilizar percentuais variando entre 0,50% e 3,00% de grafeno, foi verificada uma variação de temperatura de trabalho inicial de 64°C para 76°C, refletindo na melhoria da deformação plástica e da resistência do asfalto (Amin, 2016).

3.2.4. Viscosidade

Segundo Kefei Liu (2018): “Isso indica que a adição de 0,05% em peso de GO obviamente aumentou a viscosidade do asfalto”. Conforme é apresentado na figura 14, foi comparada a viscosidade entre das cinco amostras tipos de asfalto (HMAB-1, HMAB-2, WMAB-1, WMAB-2 e WMAB-3), com e sem a adição do óxido de grafeno.

Figura 14. Desempenho da Viscosidade x Temperaturas das amostras, adaptado (Kefei Liu et al, 2018).

Quando comparadas as amostras HMAB-1 e HMAB-2 (com adição de 0,05% de GO), fica evidenciado o melhor desempenho do óxido de grafeno (Kefei Liu et al, 2018).

Segundo (Kefei Liu et al, 2018): “Esses resultados sugerem que a adição de 0,05% em peso de GO pode aumentar o nível de tráfego no pavimento asfáltico do nível padrão ao pesado, e mais de 3% em peso”.

De acordo com (Jing Li et al, 2018): “A resistência à temperatura e as propriedades mecânicas dos asfaltos foram analisadas ensaios de reologia dinâmica de cisalhamento (DSR) e de recuperação por

fluência sob tensão múltipla (MSCR), que revelaram que uma quantidade ótima de GOs-SH (0,02%) pode efetivamente melhorar a baixa temperatura e desempenho anti fissuras do asfalto SBS”.

O emprego do óxido de grafeno, dosagem entre 1,0% a 3,0% na mistura asfáltica, proporcionou melhora na mistura asfáltica, através da comparação entre viscosidade versus temperatura (Y. Li et al, 2018). Ainda segundo (Y. Li et al, 2018): “*Os resultados indicaram que quando a taxa de dosagem GO de 3% utilizado, o incremento de viscosidade máxima de 12,5% (e 15,0%) e o incremento de viscosidade mínimo de 5,4% (e 4,1%) obtido*”.

O estudo realizado por (Kefei Liu et al, 2018), utilizando os seguintes teores de óxido de grafeno nas dosagens de asfalto com SBS modificado: 0,00% A0 (amostra de controle); A0.02 (amostra + 0,02% GO); A0.05 (amostra + 0,05% GO); A0.10 (amostra + 0,10% GO); A0.20 (amostra + 0,20% GO) e 1,00% A1 (amostra + 1,00% GO). Conforme apresentado na figura 15, o desempenho da viscosidade x temperatura demonstrou maior eficiência na dosagem de 0,05% de óxido de grafeno.

Figura 15 – Gráfico comparativo entre viscosidade x temperatura, devido a influência da adição de GO nas amostras, adaptado (Kefei Liu et al, 2018).

Segundo KEFEI (2018): “*O GO pode rapidamente adsorver moléculas grandes (como colóides e asfaltenos) no ligante de asfalto, aumentando significativamente este material em termos da viscosidade da temperatura de pavimentação, resistência à deformação permanente e função elástica*”.

4. CONCLUSÃO

As pesquisas bibliométricas comprovam a viabilidade da utilização do óxido de grafeno adicionado a mistura asfáltica, os teores identificados nas pesquisas consultadas variam de 0,05% a 3,0% de adição sobre o peso do asfalto. Adições inferiores a 0,5% não demonstraram eficiência para todas as propriedades, sendo o teor ideal indicado nas pesquisas de 2,0%, as principais propriedades melhoradas são:

4.1. Viscosidade

Segundo (Y. Li et al, 2018) ao utilizar o percentual de 3,0% de óxido de grafeno a viscosidade teve ganho entre 5,4% a 12,5%.

4.2. Variação de temperatura

Segundo (AMIN, 2016), adicionar 3,0% de óxido de grafeno a mistura asfáltica, aumentou a alta temperatura de 64°C para 76°C.

4.3. Resistência a deformação

De acordo com (Jing Li et al, 2018), a redução do fissuramento em baixa temperatura. Segundo KEFEI (2018), o óxido de grafeno, aumenta a resistência a deformação permanente e função elástica da mistura asfáltica.

4.4. Resistência aos ciclos de fadiga

Segundo (Kefei et al, 2018). A adição de 0,05% em peso de GO pode aumentar o nível de tráfego no pavimento asfáltico do nível padrão ao pesado, e mais de 3,0% em peso. Segundo (Jing Li et al, 2018), os percentuais utilizados entre 0,02 a 0,08% apresentaram melhorias, aumentando a aglutinação entre as partículas, comparada a mistura original.

Para aplicação no Brasil é necessário definir qual seria a região, pois a função variação climática, a viscosidade indicada, o teor de hidrocarbonetos da emulsão asfáltica e a resistência a deformação, irão influenciar no teor de óxido de grafeno ideal a ser adotado. Entretanto é inegável, conforme as pesquisas, os benefícios em razão da utilização do óxido de grafeno na mistura asfáltica.

5. REFERÊNCIAS

- Amin I. et. all. (2016), *Laboratory evaluation of asphalt binder modified with carbon nanotubes for Egyptian climate*. Construction and Building Materials 121 361–372 - <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.168>
- Bernucci L. B. et. all. (2006). *Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, CDD 625.85.
- Brcic H. (2016), *Investigation of the graphene oxide and asphalt interaction and its effect on asphalt pavement performance*. Norwegian University of Science and Technology. Department of Civil and Transport Engineering.
- Dimiev A. M. (2017), *Graphene Oxide: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, Inc., ISBN 9781119069430.
- DNIT (2003), *NORMA DNIT 005/2003 – TER - Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia*.
- DNIT (2005), *NORMA DNIT 035/2005 - ES Pavimentos flexíveis – Micro revestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero – Especificação de serviço*.
- Han M. et. all. (2018), *Studies on the secondary modification of SBS modified asphalt by the application of octadecyl amine grafted graphene nano platelets as modifier*. Diamond & Related Materials 89 140–150 - <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.08.011>
- Jing Li et. all. (2018), *Comparative analysis, road performance and mechanism of modification of polystyrene graphene nanoplatelets (PS-GNPs) and octadecyl aminegraphene nanoplatelets (ODA-GNPs) modified SBS incorporated asphalt binders*. Construction and Building Materials 193 501–517 - <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.210>
- Jing L. et. all. (2018), *Preparation and Properties of SBS-g-GOs-Modified Asphalt Based on a Thiol-ene Click Reaction in a Bituminous Environment*. Polymers, 10, 1264 - www.mdpi.com/journal/polymers - <https://doi:10.3390/polym10111264>
- Yao H. et. all. (2017), *Property Analysis of Exfoliated Graphite Nanoplatelets Modified Asphalt Model Using Molecular Dynamics (MD) Method*, Appl. Sci. 7, 43 - www.mdpi.com/journal/applsci - <https://doi:10.3390/app7010043>

- Yuanyuan L. et. all. (2018), *Investigation of the graphene oxide and asphalt interaction and its effect on asphalt pavement performance*. Construction and Building Materials 165 572–584 - <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.068>
- Kefei L. et. all. (2018), *Performance evaluation and modification mechanism analysis of asphalt binders modified by graphene oxide*. Construction and Building Materials 163 880–889 - <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.171>
- Kefei L. et. all. (2018), *Evaluation of mechanical performance and modification mechanism of asphalt modified with graphene oxide and warm mix additives*. Journal of Cleaner Production 193 87e96 - <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.040>
- Kessler, M. M. (1963). *Bibliographic coupling between scientific papers*. American Documentation, v. 14, p. 10–25.
- Kessler, M. M. (1965), *Comparison of the results of bibliographic coupling and analytic subject indexing*. American Documentation, v. 16, n.3, p. 223–233.
- Nazarpour S. et. all. (2016), *Graphene Technology from Laboratory to Fabrication*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim, Germany.
- Moreno-Navarro F. et. all. (2018), *Mechanical and thermal properties of graphene modified asphalt binders*. Construction and Building Materials 180 265–274 - <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.259>
- Zhao, L. et. all. (2016), *Investigation of the effectiveness of PG@GO on the reinforcement for cement composites*. Construction and Building Materials 113, 470-478.