



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

A influência dos fileres no comportamento viscoso dos mastiques betuminosos

Marta Daniela Azevedo Miranda



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

A influência dos fileres no comportamento viscoso dos mastiques betuminosos

Marta Daniela Azevedo Miranda

1091313

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, realizada sob a orientação do Mestre Engenheiro Adriano Teixeira do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Adriano Manuel da Silva Teixeira

Assistente Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Carla Maria Ferreira de Sousa

Responsável pelo Núcleo Laboratório Central da Mota-Engil – Engenharia e Construção, SA

*A tese de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi defendida em prova pública, pela Licenciada **Marta Daniela Azevedo Miranda**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 12 de Novembro de 2014 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **16 (dezasseis) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta.*

A Direcção do MEGG / ISEP

Aos meus pais, irmã e namorado...

"A ciência humana de maneira nenhuma nega a existência de Deus. Quando considero quantas e quão maravilhosas coisas o homem compreende, pesquisa e consegue realizar, então reconheço claramente que o espírito humano é obra de Deus, e a mais notável."

Galileu Galilei

Agradecimentos

Quero agradecer a todas as pessoas ou entidades que me auxiliaram na realização da presente Tese de Mestrado. Contudo não posso deixar de mencionar algumas pessoas especiais.

Ao Engenheiro Adriano Teixeira, meu orientador, que sempre esteve disponível para me ajudar, transmitindo-me os conhecimentos necessários para eu realizar esta dissertação.

À empresa Brisa, pela disponibilização do viscosímetro rotativo, utilizado nos ensaios realizados.

Ao Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte por toda a disponibilidade para serem realizados os ensaios, assim como por me terem disponibilizado todo o material necessário.

Aos colaboradores do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do CICCOPN por tão bem recebida e muito bem me senti a trabalhar neste laboratório, em especial ao Óscar Carvalho, técnico desse Laboratório, por todo o apoio, ajuda e disponibilidade para realizar os ensaios, também à Engenheira Joana Santos, que apesar do pouco tempo que convivemos foi uma grande ajuda para todo o conhecimento sobre a higiene e segurança no trabalho.

A todos os Professores do Instituto Superior de Engenharia do Porto por todo o apoio ao longo dos anos que lá estudei, “uma vez do ISEP, para sempre do ISEP”.

A todos os meus amigos que estão na minha vida há anos e até aqueles que entraram para a minha vida desde que estou no Ensino Superior, que muito me apoiaram nos momentos mais difíceis e quando estive em baixo durante a execução deste trabalho.

À minha família pelo apoio que me deram, sem a ajuda dos meus pais jamais entraria no Ensino Superior.

À minha irmã que muito que apoiou, ajudou e sempre me ouviu quando estava sob *stress*.

Por fim, mas não menos importante ao Rui, um muito obrigada pelo apoio, amor e amizade que sempre me deu, e muito me apoiou ao longo destes anos que estamos juntos, e por muitas vezes me ter ouvido.

Palavras-chave

Viscosidade, Filer, Mastique, *Brookfield*

Resumo

As estradas têm vindo a sofrer um aumento de importância, sendo necessário aplicar pavimentos com melhores características, assim foram desenvolvidos os mastiques betuminosos. Os mastiques são misturas de betume com filer, este material tem propriedades melhoradas em relação ao betume puro.

O betume é um material viscoelástico, o que leva a que a viscosidade seja uma propriedade de vital importância estudar. A junção de fileres ao betume promove um aumento de viscosidade, levando a que esta propriedade reológica tenha ainda mais importância, principalmente porque a trabalhabilidade da mistura betuminosa fica comprometida quando a viscosidade não é a correta.

Na realização desta dissertação foram realizados ensaios em mastiques betuminosos, com recurso ao viscosímetro rotativo de *Brookfield*. Os mastiques ensaiados são compostos com fileres de diferentes origens e com diferentes taxas de incorporação, e assim foram analisadas as diferenças obtidas nos valores da viscosidade dinâmica.

Os resultados obtidos mostram que os mastiques, à temperatura de fabrico, têm um comportamento viscoso idêntico ao comportamento viscoso do betume puro.

Apesar dos mastiques produzidos terem uma viscosidade maior que a do betume puro, o valor desta propriedade reológica tende a igualar ao valor do betume, este comportamento observa-se nas temperaturas mais elevadas.

Quando se examinam os resultados dos mastiques produzidos com menor quantidade de filer, na generalidade, os valores da viscosidade obtidos são idênticos. Para taxas de incorporação maiores, os valores da viscosidade dinâmica dos mastiques produzidos são bastante mais altos e distintos. Levando a concluir que quanto maior a percentagem de filer no mastique, maior o valor da viscosidade e maior dispersão dos resultados obtidos, isto para os fileres e taxas de incorporação testadas.

Keywords

Viscosity, Filler, Bituminous mastic, *Brookfield*

Abstract

Roads have been suffering an increasing in importance, being necessary to have better pavements with improved features. Therefore, mastics, which is a bitumen mixture with filler, were created. This mixture has an especial role and importance, because it has better performance characteristics than the pure bitumen. Bitumen is a viscoelastic material, which leads us to the study of such important property like viscosity. The joining of fillers to the bitumen creates an increasing in viscosity that makes this rheological property important to study, mainly because the workability of the mixture can be damaged when the viscosity is not correct.

In order to realize this thesis, mastic tests were made with the support of Brookfield rotational viscometer. The mastics tested were made with fillers from different origins and with different amounts of the same filler. Therefore, the obtained differences of the dynamic viscosity were analyzed.

The results show that the mastics, at production temperatures, have the same behavior as the bitumen.

Despite the fact that this mixture has higher viscosity, the value of this rheological property tends to be similar as the value of the pure bitumen, when suffering higher temperatures. For mastics produced with lower quantity of filler, the viscosity values obtained are identical. For higher incorporation rates, the dynamic viscosity values of the mastics produced with different fillers are very different from each other. This leads us to conclude that the higher the percentage of filler in the mastic, the higher the dispersion of the viscosity values.

Índice

Índice de figuras	xvii
Índice de equações.....	xix
Índice de tabelas	xix
Índice de anexos.....	xx
1. Considerações iniciais.....	1
1.1. Enquadramento temático	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização do trabalho	3
2. Reologia.....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Reologia.....	6
2.3. Viscosidade.....	7
2.4. Classificações reológicas.....	13
2.4.1. Fluidos Newtonianos	14
2.4.2. Fluidos não-Newtonianos.....	15
2.5. Equipamentos para quantificar a viscosidade	19
2.5.1. Viscosímetro de tubo capilar	20
2.5.2. Viscosímetros de orifício.....	22
2.5.3. Viscosímetros de queda de esfera	23
2.5.4. Viscosímetros rotativos	23
3. Os ligantes betuminosos, o filler e a viscosidade	27
3.1. Introdução.....	27
3.2. Ligantes betuminosos.....	27
3.2.1. Betumes de pavimentação	28
3.2.2. Betumes duros.....	30
3.2.3. Betumes modificados	31
3.2.4. Betumes fluidificados	31
3.2.5. Betumes especiais anti-querosene	32
3.2.6. Emulsões betuminosas tradicionais.....	32

3.2.7.	Emulsões betuminosas modificadas	32
3.3.	Aditivos betuminosos	33
3.4.	Comportamento viscoelástico do betume.....	34
3.4.1.	Comportamento reológico do betume	34
3.4.2.	Importância da medição da viscosidade	35
3.4.3.	Viscosímetros e os ligantes betuminosos	36
4.	Metodologia experimental	37
4.1.	Introdução	37
4.2.	Betume utilizado	37
4.3.	Fileres utilizados	38
4.3.1.	Produção do mastique.....	39
4.4.	Preparação dos provetes de ensaio.....	44
4.5.	Realização do ensaio	45
5.	Resultados experimentais	49
5.1.	Introdução	49
5.2.	Resultados betume puro	49
5.3.	Resultados tendo em conta a taxa de incorporação.....	50
5.3.1.	Mastiques com taxa de incorporação de 20%	50
5.3.2.	Mastiques com taxa de incorporação de 30%	51
5.4.	Resultados tendo em conta a origem do filer.....	53
5.4.1.	Mastique com cal hidráulica	53
5.4.2.	Mastique com cal hidratada	54
5.4.3.	Mastique com cimento portland	55
5.4.4.	Mastique com filer granítico recuperado	57
5.4.5.	Mastique com filer calcário recuperado	58
5.4.6.	Mastique com pó calcário.....	59
5.5.	Variação da viscosidade betume/mastique	61
5.5.1.	Taxa de incremento betume/mastique com 20% de incorporação	61
5.5.2.	Taxa de incremento betume/mastique com 30% de incorporação	62
6.	Considerações finais.....	65
6.1.	Conclusões.....	65
6.2.	Futuros desenvolvimentos	66

Referências Bibliográficas	67
Normas.....	68
<i>Web References</i>	69
Anexos.....	69

Índice de figuras

Figura 1: Esquema da estrutura de um pavimento rodoviário flexível	2
Figura 2: Esquema de onde se insere o estudo da reologia	6
Figura 3: Corte num tubo capilar para um fluido Newtoniano	8
Figura 4: Viscosidade de diferentes óleos	8
Figura 5: Representação de um viscosímetro rotativo, A – agulha B – fluido C – cápsula de ensaio.	9
Figura 6: Modelo apresentado por Newton para representar a lei da viscosidade.....	10
Figura 7: Curva da viscosidade de um fluido com representação da viscosidade dinâmica e da viscosidade aparente	12
Figura 8: Classificação dos fluidos segundo o comportamento reológico	14
Figura 9: Representação das curvas características do comportamento reológico dos fluidos Newtonianos	15
Figura 10: Representação das curvas características do comportamento reológico dos fluidos pseudoplásticos.....	16
Figura 11: Representação das curvas características do comportamento reológico dos fluidos dilatantes	16
Figura 12: Representação das curvas características do comportamento reológico dos fluidos do tipo plástico de Bingham.....	17
Figura 13: Esquema das curvas típicas do comportamento reológico dos fluidos não-Newtonianos independentes do tempo.....	17
Figura 14: Representação das curvas características do comportamento reológico dos fluidos tixotrópicos (A) e reopéticos (B).....	18
Figura 15: Viscosímetros Primários e Secundários	20
Figura 16: Esquema da classificação de viscosímetros segundo a sua forma de executar a medição	20

Figura 17: Viscosímetros capilares, A – Ostwald B – Ubbelohde C – Cannon-Fenske.....	21
Figura 18: Viscosímetro Copo Ford	22
Figura 19: Viscosímetro de queda de esfera	23
Figura 20: Viscosímetro de <i>Brookfield</i>	24
Figura 21: Betume de pavimentação.....	29
Figura 22: Variação da viscosidade para betumes puros.....	35
Figura 23: Fileres usados; A – Cal hidráulica B – Cal hidratada, C – Cimento Portland, D – Filer granítico recuperado, E – Filer calcário recuperado, F – Pó calcário	38
Figura 24: Aquecimento dos recipientes necessários para a execução do ensaio.....	42
Figura 25: Pesagem da massa de betume e filer	42
Figura 26: Realização da mastiqu	43
Figura 27: Esquema do provete de ensaio, A – Agulha B – Fluido C – Cápsula de ensaio.....	44
Figura 28: Equipamento utilizado. a) Viscosímetro <i>Brookfield</i> , b) equipamento de controlo de temperatura, c) agulha 21, d) cápsula de ensaio, e) cápsula de fechar o equipamento	45
Figura 29: Moldagem do provete de ensaio.....	46
Figura 30: Viscosímetro de <i>Brookfield</i>	47
Figura 31: Resultados de ensaio do betume puro	50
Figura 32: Resultados dos mastiques com 20% de taxa de incorporação	51
Figura 33: Resultados dos mastiques com 30% de taxa de incorporação	52
Figura 34: Resultados obtidos com o filer A	54
Figura 35: Resultados obtidos com o filer B	55
Figura 36: Resultados obtidos com o filer C	56
Figura 37: Resultados obtidos com o filer D	58
Figura 38: Resultados obtidos com o filer E	59
Figura 39: Resultados obtidos com o filer F.....	60
Figura 40: Viscosidade relativa dos mastiques para uma taxa de incorporação de 20%	62
Figura 41: Viscosidade relativa dos mastiques para uma taxa de incorporação de 30%.....	63

Índice de equações

Equação 1: Fórmula de cálculo da tensão de corte	9
Equação 2: Fórmula de cálculo da taxa de corte	10
Equação 3: Fórmula de cálculo da viscosidade dinâmica	11
Equação 4: Fórmula de cálculo da viscosidade cinemática	12
Equação 5: Fórmula de conversão da viscosidade de <i>centipoise</i> para Pascal segundo	25
Equação 6: Fórmula de cálculo da massa volúmica do mastique betuminoso	40
Equação 7: Fórmula de cálculo da massa de filer	41
Equação 8: Fórmula de cálculo da viscosidade relativa	61

Índice de tabelas

Tabela 1: Resumos dos tipos de viscosidade existentes	13
Tabela 2: Formulação teórica do viscosímetro de <i>Brookfield</i>	25
Tabela 3: Especificações recomendadas em Portugal para betumes de pavimentação	30
Tabela 4: Tabela resumo dos viscosímetros utilizados em betumes	36
Tabela 5: Fileres usados neste estudo	38
Tabela 6: Valores das massas volúmicas dos mastiques produzidos	40
Tabela 7: Massas de filer a utilizar nos diferentes mastiques	41
Tabela 8: Valores de massa do provete para que o volume de ensaio seja o correto	45
Tabela 9: Resultados de ensaio do betume puro	49
Tabela 10: Resultados dos mastiques com 20% de taxa de incorporação	51
Tabela 11: Resultados dos mastiques com 30% de taxa de incorporação	52
Tabela 12: Resultados obtidos com o filer A	53
Tabela 13: Resultados obtidos com o filer B	55
Tabela 14: Resultados obtidos com o filer C	56
Tabela 15: Resultados obtidos com o filer D	57
Tabela 16: Resultados obtidos com o filer E	59
Tabela 17: Resultados obtidos com o filer F	60
Tabela 18: Viscosidade relativa dos mastiques para uma taxa de incorporação de 20%	61
Tabela 19: Viscosidade relativa dos mastiques para uma taxa de incorporação de 30%	62

Índice de anexos

Anexo A: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique produzido com o filer A	71
Anexo B: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique produzido com o filer B.....	75
Anexo C: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique produzido com o filer C.....	79
Anexo D: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique produzido com o filer D	83
Anexo E: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique produzido com o filer E	87
Anexo F: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique produzido com o filer F	91

1. Considerações iniciais

1.1. Enquadramento temático

A importância das vias de comunicação tem vindo a aumentar, pois cada vez mais as viagens são realizadas por meios de transporte autónomos, assim como os transportes de mercadorias. Sendo necessário garantir a comodidade dos utentes, tornando as estradas o mais durável possível, permitindo que o tráfego seja realizado de forma fluida.

Para que estas condições sejam garantidas os pavimentos devem ser o mais bem dimensionados possível, assim como as suas propriedades necessitam de cumprir os requisitos mínimos do local de implantação.

É importante que estas condições sejam garantidas, afinal “a principal função de um pavimento, nomeadamente rodoviário, é oferecer uma superfície de rolamento livre e desempenada, destinada a permitir a circulação de veículos em adequadas condições de segurança, conforto e economia” (Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias (InIR)).

Os pavimentos rodoviários são constituídos por diversas camadas, com diferentes funções e realizadas com recurso a materiais distintos, assim como a técnicas diferenciadas. Na figura 1 é possível ver um corte num pavimento rodoviário e consecutivamente observam-se as diferentes camadas que o constituem (Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias (InIR)).

Em Portugal as camadas de desgaste são constituídas principalmente por materiais flexíveis, sendo utilizados, para realizar esta camada de rolamento, materiais granulares ligados por um ligante betuminoso. A escolha deste ligante é bastante importante, pois esta camada superior de um pavimento está diretamente sujeita ao desgaste do tráfego e do clima, sendo esta camada do pavimento de vital importância para a durabilidade do mesmo.

Existem diversos ligantes betuminosos, devendo ser escolhidos consoante o tipo de pavimento, o tráfego observado no local de implantação e o clima a que estará sujeito (Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias (InIR)).

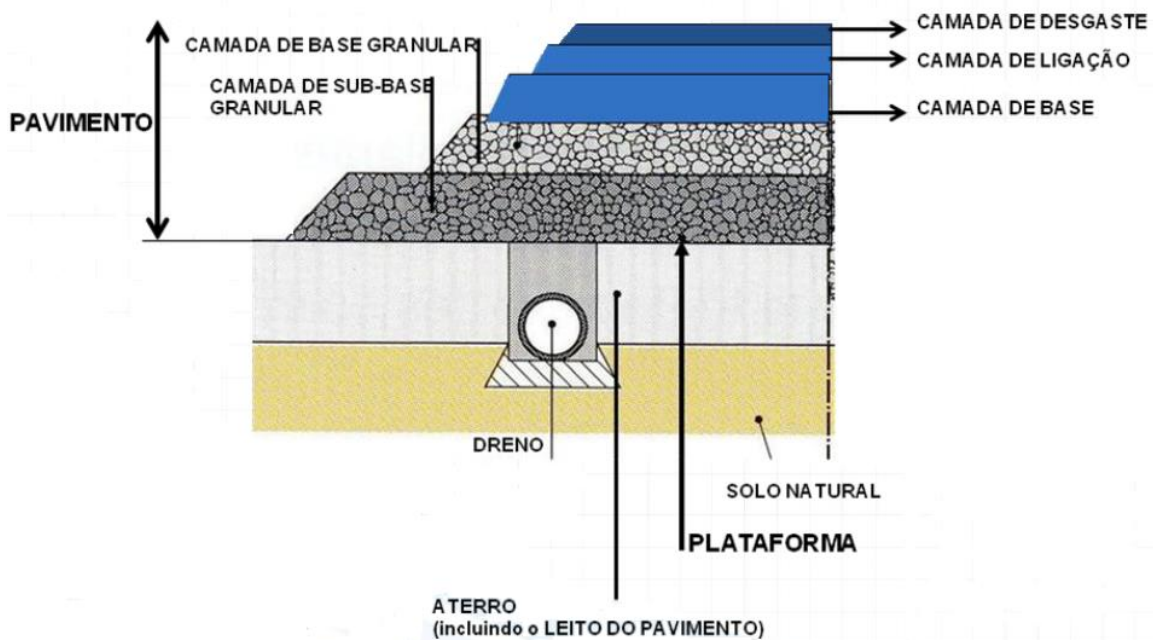


Figura 1: Esquema da estrutura de um pavimento rodoviário flexível
Adaptado de: (Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias (InIR))

Uma vez que os ligantes betuminosos são tão importantes para um pavimento bem dimensionado, frequentemente juntam-se aditivos ao betume para melhorar diversas características, desde as mecânicas, às características reológicas assim como às especificações térmicas. Os aditivos betuminosos mais utilizados são os polímeros, fibras, aditivos químicos e borracha granulada proveniente de pneus de camiões, esta é utilizada mais recentemente, e por fim os fileres, que serão o objeto de estudo do presente trabalho.

Os fileres têm maioritariamente origem em rocha moída, este material de granulometria muito fina melhora diferentes características do betume, entre um vasto leque aumenta a resistência à degradação e a rigidez da mistura betuminosa (Silva, 2005). Ao material resultante da mistura do betume com o filer designa-se por mastique betuminoso

Os ligantes betuminosos são bem distintos dos ligantes hidráulicos (também utilizados em pavimentos) devido às suas características particulares, pois os ligantes betuminosos “proporcionam ligações tenazes e flexíveis aos materiais com eles tratados” (Cepsa, 2006).

Este comportamento deve-se ao betume ser um material viscoelástico, sendo por isso muito importante estudar a viscosidade e temperatura deste material, pois estas características do betume são vitais para facilitar o fabrico e melhorar a aplicação das misturas betuminosas, poupando tempo e dinheiro.

Existem diferentes formas de determinar a viscosidade dos ligantes betuminosos, devendo ser adaptadas a cada tipo de ligante betuminoso.

1.2. Objetivos

O primeiro objetivo deste trabalho é determinar a adequabilidade do viscosímetro rotativo a mastiques betuminosos.

Sendo o segundo objetivo, se o primeiro se verificar, estudar e quantificar a viscosidade do betume quando a este é adicionado filer de diferentes origens, assim como avaliar o efeito do filer na viscosidade dinâmica do mastique.

Para determinar a viscosidade dos diferentes mastiques foi utilizado o método do viscosímetro rotativo, nomeadamente o viscosímetro de *Brookfield*, com recurso à Norma Europeia EN13302:2010.

1.3. Organização do trabalho

Este trabalho é dividido em diversos capítulos, cada um deles com uma temática particular, onde são mencionadas informações importantes para o presente trabalho.

No capítulo 1 são realizadas as considerações iniciais, fazendo um breve enquadramento temático, uma apresentação dos objetivos do trabalho, assim como uma descrição da organização do documento.

No capítulo 2 é descrita a reologia, assim como a viscosidade, propriedade reológica de elevada importância. Também são descritos os tipos de fluidos pois o seu conhecimento é importante para a análise da viscosidade dos ligantes betuminosos. Ainda se expõe os medidores de viscosidade existentes.

No capítulo 3 são mencionados os tipos de ligantes betuminosos existentes, as suas características e campos de aplicação, assim como os aditivos betuminosos mais utilizados. Para finalizar é realizada uma ligação entre a temática do presente capítulo e do capítulo anterior.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia de ensaio, os fileres usados para produzir o mastique, a origem do filer e o modo de produção do mastique.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados, sendo comparados os valores conseguidos nos diferentes ensaios.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões retiradas deste estudo e são sugeridos possíveis desenvolvimentos futuros, tendo como ponto de partida o presente trabalho.

2. Reologia

2.1. Introdução

Neste capítulo, é analisada a reologia e a viscosidade, pois estas propriedades são bastante importantes no conhecimento das características do betume.

A reologia consiste no “estudo da deformação e escoamento da matéria, que abrange o escoamento plástico de sólidos e o escoamento de líquidos viscoelásticos” (Porto Editora, 2003-2014). Este termo foi introduzido no meio científico em 1929 (Barnes, et al., 1989).

A mecânica de fluidos clássica e a elasticidade estão relacionadas com a reologia, sendo áreas da física que estudam, respetivamente, os fluidos Newtonianos e as pequenas deformações em sólidos.

Esta é uma ciência importante na produção de diversos produtos usados no dia-a-dia, mas o estudo da reologia tem várias funções, principalmente no dimensionamento de bombas e tubagens, agitadoras, bombas de calor, homogeneizadores, e até no controlo da qualidade de produtos e verificações de prazos de validade (Moser, 2011).

No segundo subcapítulo do presente capítulo é descrita a reologia, definindo-a e mencionando o que influencia o comportamento reológico de um material, e é mostrado em que área da física esta se insere.

Em 2.3. é descrita a viscosidade, propriedade que muitas vezes é confundida com a reologia, são mencionados e descritos os tipos de viscosidades existentes e ainda as unidades em que estas são medidas, entre outras particularidades.

Num quarto subcapítulo são apresentados os tipos de viscosímetros classificando-os e mencionando a aplicabilidade de cada um deles.

2.2. Reologia

A reologia é uma área da física que estuda a deformação e o escoamento de corpos sólidos ou fluidos, num determinado intervalo de tempo, sujeito a diferentes condições termodinâmicas exteriores.

A reologia é uma palavra que surge do grego *rheo*= deformação; *logia*= estudo (Nunes, 2010), sendo que este conceito foi sugerido para definir o estudo da “deformação e escoamento da matéria”, e teve origem numa discussão entre Marcus Reiner e Eugene Cook Bingham em 1928 (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014). Contudo esta definição foi aceite pela *American Society of Rheology* somente em 1929 (Barnes, et al., 1989).

O comportamento reológico de determinado material depende da viscosidade do meio que promove a dispersão da substância, do tamanho e forma das partículas que constituem o material, da concentração dessas mesmas partículas e das interações moleculares existentes entre elas (Nunes, 2010).

Geralmente a definição de reologia é um termo usado no estudo de materiais que têm um comportamento que a mecânica dos fluidos clássica e a elasticidade não conseguem descrever, como é possível ver no esquema presente na figura 2, pois o comportamento de vários materiais, como por exemplo: o sangue, a borracha, os solos, entre outros, não é o comportamento chamado clássico, sendo um comportamento mais difícil de definir.

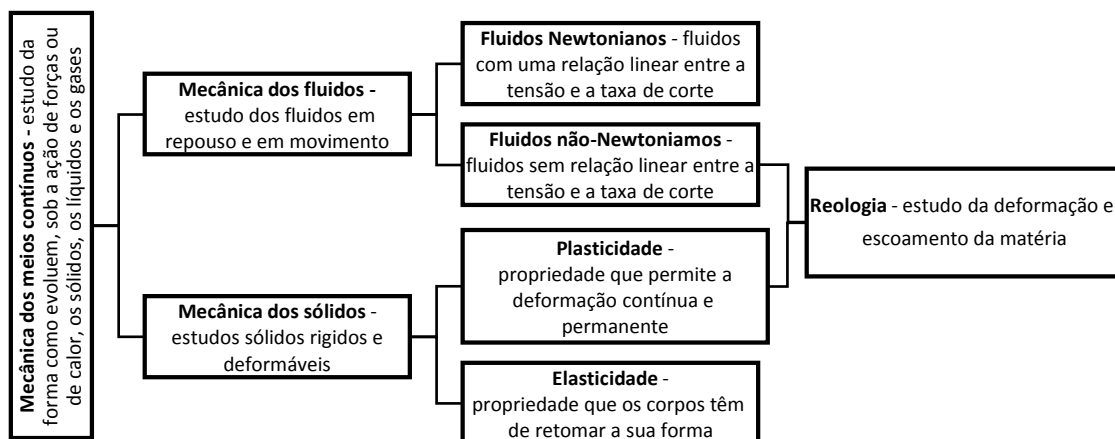


Figura 2: Esquema de onde se insere o estudo da reologia

Adaptado de: (Porto Editora, 2003-2014)

Uma das características reológicas que definem um material é a viscosidade, mas a reologia também estuda o escoamento da matéria, a plasticidade e a elasticidade. O conceito de reologia é muitas vezes confundido com o conceito de viscosidade, embora estas sejam noções diferentes estão interligadas.

2.3. Viscosidade

A viscosidade é o conceito da reologia mais conhecido, estudado e utilizado em diferentes dimensionamentos, sendo uma das propriedades definidora dos betumes.

A viscosidade consiste na resistência ao movimento, sem turbulência, por parte de um fluido, e está relacionada com as propriedades dinâmicas, sendo determinada a nível molecular pela força necessária para movimentar as partículas do fluido quando aplicada uma determinada taxa de corte.

Esta propriedade também pode ser chamada como a resistência ao fluxo por parte de um produto com determinada fluidez. Esta propriedade está relacionada com o “atrito interno” do material, se um fluido tiver um elevado valor de viscosidade, a resistência ao movimento desse mesmo fluido também é alta, assim como o seu atrito interno; no caso de um material com elevada fluidez (valor da viscosidade baixo) este flui com mais facilidade, sendo o atrito interno menor.

A viscosidade de um material depende de diversos fatores externos (Barnes, et al., 1989).

Um bom exemplo da viscosidade é a velocidade de deslocação de um barco num rio, o barco anda mais rápido quando está no centro do rio, do que quando está junto às margens, isto porque a água é um líquido com viscosidade, apesar de baixa. Esta propriedade dos fluidos faz estes se deslocarem mais ou menos vagarosamente, sendo mais rápido circular no centro do rio, do que junto às margens, pois as linhas de fluxo aumentam quando se “caminha” desde as margens para o centro do rio.

Uma situação análoga ao descrito até agora, está representada na figura 3, um corte num tubo capilar, onde estão representadas as linhas de fluxo de um fluido Newtoniano. O esquema representado na figura 3 é semelhante ao exemplo do rio pois a água é um fluido Newtoniano e o formato do tubo é idêntico ao formato de um rio.

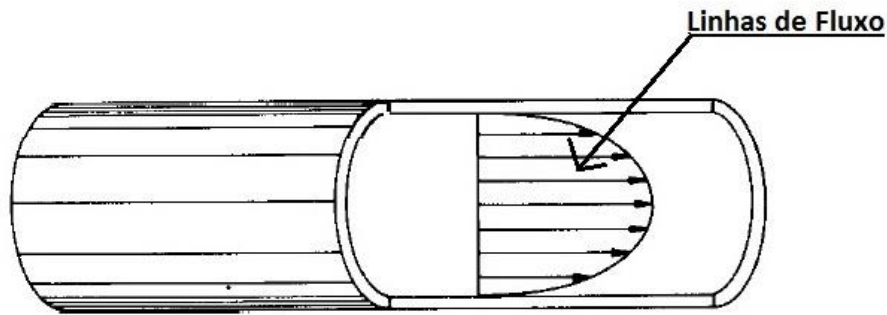


Figura 3: Corte num tubo capilar para um fluido Newtoniano
Adaptado de: (Barnes, et al., 1989)

Como já foi mencionado, no dia-a-dia é comum estar em contacto com produtos com diferentes viscosidades. Na figura 4 é possível distinguir a viscosidade de diferentes óleos, estes óleos são um bom exemplo de diversas viscosidades com que é possível estar em contacto.

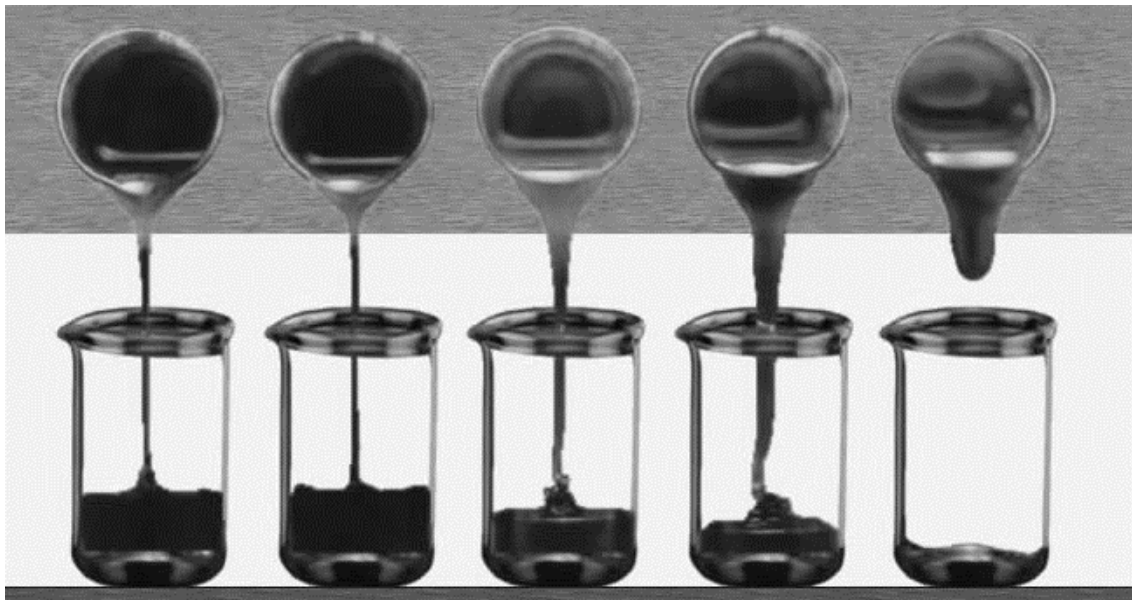


Figura 4: Viscosidade de diferentes óleos
Adaptado de: (Widman, 2009)

Para mais facilmente entender o conceito de viscosidade é necessário perceber as definições de tensão de corte e de taxa de corte.

A tensão de corte é uma relação entre a força tangencial necessária para um objeto se mover e a área lateral desse mesmo objeto. Um bom exemplo prático da tensão de corte é o caso de um viscosímetro rotativo (figura 5), que para a agulha (figura 5 A) se movimentar é necessário fazer uma força tangencial à face do objeto, sendo a tensão de corte a relação entre essa mesma força

tangencial e a área lateral da agulha. Esta tensão é medida em Pascais (Pa) e representado por τ , sendo a sua fórmula matemática apresentada na equação 1 (Santos, 2011).

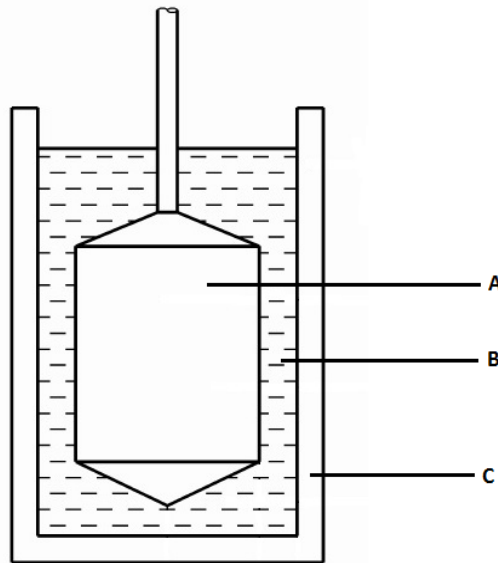


Figura 5: Representação de um viscosímetro rotativo, A – agulha B – fluido C – cápsula de ensaio
Adaptado de: (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 13302:2010, 2010)

$$\tau = \frac{F}{A}$$

[1]

τ = Tensão de corte (MPa)

F = Força tangencial (N)

A = Area lateral do objeto (mm^2)

Equação 1: Fórmula de cálculo da tensão de corte

Adaptado de: (Santos, 2011)

A taxa de corte ou gradiente de velocidade é a variação da velocidade no seio do fluido em relação à direção mais rápida desta variação, ou seja, a taxa de corte é uma relação da velocidade relativa de um fluido quando este está em movimento e a extensão desse mesmo fluido.

Recorrendo agora ao exemplo de duas placas paralelas a uma distância constante, como se pode ver na figura 6, em que a placa superior tem uma velocidade constante, U , devido a uma força tangencial, F , e a placa inferior está fixa. Assim as partículas que constituem o fluido interior têm

uma velocidade maior quanto mais perto do plano superior estão, como se vê na figura 6. Sendo a taxa de corte a relação entre a velocidade relativa e a distância, d . A taxa de corte ($\dot{\gamma}$) é medida em segundos^{-1} , com a sua expressão matemática apresentada na equação 2 (Santos, 2011).

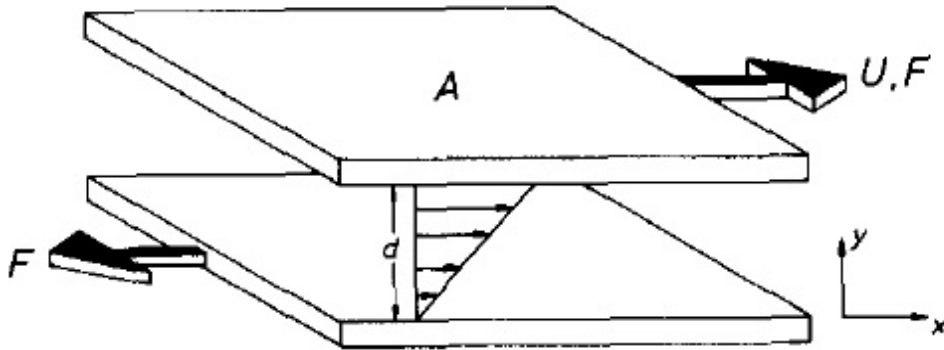


Figura 6: Modelo apresentado por Newton para representar a lei da viscosidade
Adaptado de: (Barnes, et al., 1989)

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{d}$$

[2]

$\dot{\gamma}$ = Taxa de corte (s^{-1})

V = Velocidade relativa (m/s)

d = Distância (m)

Equação 2: Fórmula de cálculo da taxa de corte

Adaptado de: (Santos, 2011)

A taxa de corte, a temperatura, a pressão e o tempo de carregamento são os principais fatores que fazem variar a viscosidade (Barnes, et al., 1989).

A viscosidade é uma propriedade dos gases e fluidos, sendo que nos dois tipos de materiais tem comportamentos diferentes, a viscosidade aumenta nos gases quando há um aumento da temperatura, já quando se observa a viscosidade nos fluidos esta diminui nas mesmas condições, ou seja, quando a temperatura aumenta (Barnes, et al., 1989).

Existem três tipos de viscosidade, a viscosidade dinâmica, a viscosidade aparente e a viscosidade cinemática (Ferreira, 2009).

A viscosidade dinâmica é uma das propriedades principais de fenômenos de transporte e hidráulica. A viscosidade dinâmica (ou absoluta) não é influenciada pela gravidade, ou seja, para a sua quantificação são utilizados medidores em que o movimento imposto ao fluido não é influenciado pela ação da gravidade.

A viscosidade dinâmica (η) é definida como sendo o declive em cada ponto da curva que relaciona a tensão com a taxa de corte, representada na figura 7. A unidade física SI (sistema internacional de unidades) da viscosidade dinâmica é o Pascal segundo (*Pa.s*); também pode ser medida em *Poise* (*P*), em homenagem a Jean Louis Marie Poiseuille. Esta é a unidade da viscosidade dinâmica no sistema CGS (centímetro-grama-segundo) (Visawanath, et al., 2007). Na equação 3 é possível ver a fórmula matemática de cálculo da viscosidade dinâmica.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

[3]

η = Viscosidade dinâmica (Pa.s)

τ = Tensão de corte (MPa)

$\dot{\gamma}$ = Taxa de corte (s^{-1})

Equação 3: Fórmula de cálculo da viscosidade dinâmica

Adaptado de: (Barros, 2012)

A viscosidade aparente é explicada como a relação entre a tensão de corte e a taxa de corte. Esta viscosidade é também definida como o declive da reta desde a origem, como é possível ver na figura 7. Este tipo de viscosidade é medido em Pascal segundo (*Pa.s*) (Ferreira, 2009).

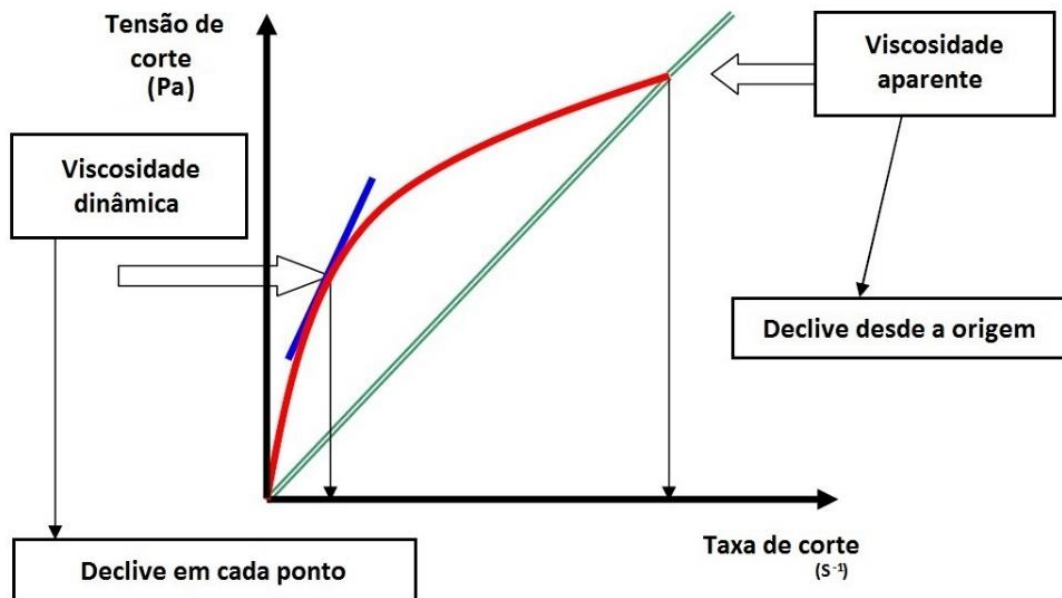


Figura 7: Curva da viscosidade de um fluido com representação da viscosidade dinâmica e da viscosidade aparente
 Adaptado de: (Catriel, 2008)

Por fim, a viscosidade cinemática (ν) é a razão entre a viscosidade dinâmica e a massa volúmica do fluido. A unidade SI da viscosidade cinemática é o (m^2/s), enquanto que no sistema CGS a unidade é o *Stokes* (St), cujo nome provém de George Gabriel Stokes (Visawanath, et al., 2007). Este tipo de viscosidade tem a fórmula de cálculo apresentada na equação 4.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

[4]

ν = Viscosidade cinemática (m^2/s)

η = Viscosidade dinâmica ($Pa.s$)

ρ = Massa Volúmica (g/m^3)

Equação 4: Fórmula de cálculo da viscosidade cinemática

Adaptado de: (Barros, 2012)

Na tabela 1 é possível ver um resumo dos diferentes tipos de viscosidade, a terminologia com que estes são representados, as unidades de medida, bem como uma breve definição da viscosidade em questão.

Nome	Nomenclatura	Unidade (SI)	Fórmula matemática	Definição
Viscosidade dinâmica	η	Pa.s	$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$	Relação entre a tensão de corte e a taxa de corte, declive em cada ponto da curva
Viscosidade aparente	-	Pa.s	-	Relação entre a tensão de corte e a taxa de corte, declive desde a origem
Varicosidade cinemática	ν	m ² /s	$\nu = \frac{\eta}{\rho}$	Razão entre a viscosidade dinâmica e a massa volúmica do fluido

Tabela 1: Resumos dos tipos de viscosidade existentes

É importante reter que por vezes um fluido com valores de viscosidade dinâmica menores que outro, pode ter valores de viscosidade cinemática maiores que o mesmo. Este aspeto acontece devido à viscosidade cinemática ser obtida pela relação entre a viscosidade dinâmica e a massa volúmica do fluido (Barros, 2012).

2.4. Classificações reológicas

As classificações reológicas são realizadas tendo em consideração os diferentes comportamentos reológicos dos fluidos, sendo que esses comportamentos reológicos são em função da viscosidade do fluido em questão.

Existem diversas classificações para os fluidos tendo em consideração as suas propriedades reológicas, quanto à deformação estes podem ser divididos em dois grupos, os elásticos e os viscosos. A deformação do primeiro grupo é reversível, ou seja, estes fluidos recuperam a forma após estarem sujeitos a uma tensão, os fluidos elásticos ou reversíveis obedecem à lei de Hooke (lei que estuda a deformação causada por uma força, quando aplicada a um corpo elástico). Os viscosos ou irreversíveis têm viscosidade constante e cumprem a lei de Newton, têm uma deformação permanente, estes fluidos escoam (Moser, 2011).

Outra forma de classificação é feita pela relação entre a tensão de corte e a taxa de corte, esta classificação é a mais conhecida e mais utilizada. Esta categorização divide os fluidos em dois tipos,

os Newtonianos e os não-Newtonianos; dentro destes dois grupos principais existem diversos grupos, como é possível ver na figura 8.

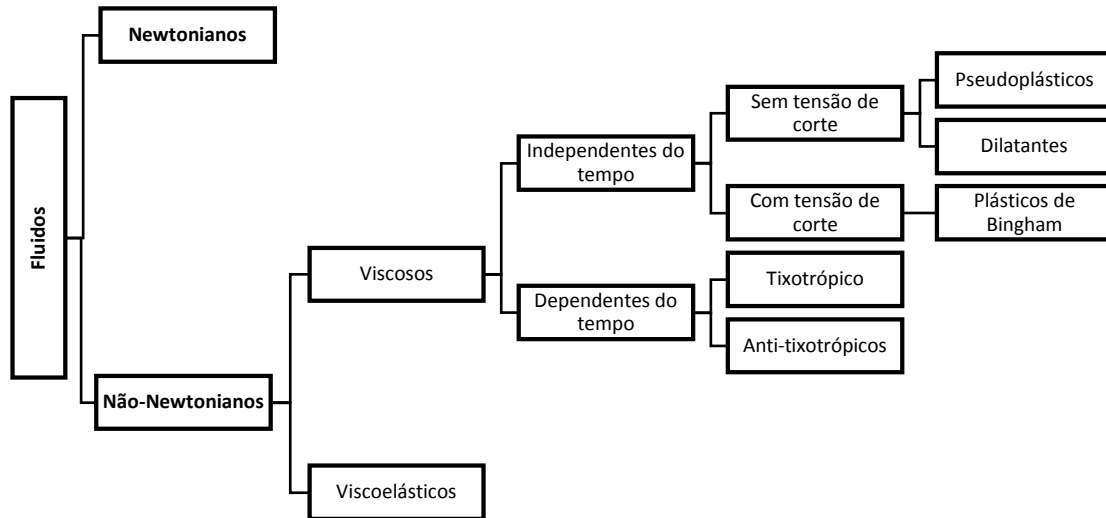


Figura 8: Classificação dos fluidos segundo o comportamento reológico
 Adaptado de: (Ferreira, 2009)

2.4.1. Fluidos Newtonianos

Os fluidos Newtonianos são fluidos para os quais o valor de viscosidade não depende da taxa de corte. São caracterizados por terem uma relação linear entre a tensão de corte e a taxa de corte, como é possível ver na figura 9A; na figura 9B observa-se que o valor da viscosidade para fluidos Newtonianos é constante, sendo independentes da tensão de corte aplicada (Yildirim, et al., 2000). Um exemplo de fluidos Newtonianos é a água ou o azeite. Este grupo de fluidos inclui todos os gases e líquidos homogêneos (Catriel, 2008).

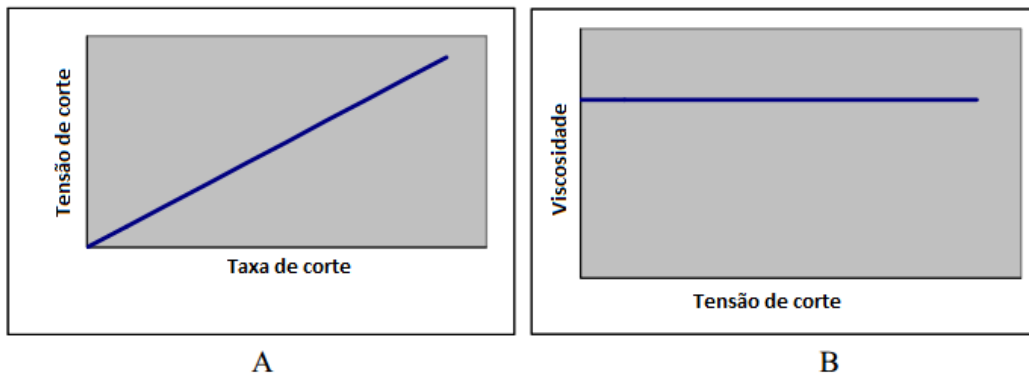


Figura 9: Representação das curvas características do comportamento reológico dos fluidos Newtonianos

Adaptado de: (Yildirim, et al., 2000)

2.4.2 Fluidos não-Newtonianos

Os fluidos não-Newtonianos são mais complexos em comparação com os fluidos Newtonianos, pois não têm uma relação linear entre a tensão de corte e a taxa de corte, e o valor da viscosidade não é constante. Por este motivo os fluidos não-Newtonianos são divididos em diversos grupos de forma a simplificar o entendimento, como é possível ver no esquema apresentado na figura 8.

A viscosidade observada neste tipo de fluidos varia com a temperatura, tensão a que estão sujeitos, taxa de corte e tempo de carregamento. Este último fator é bastante importante, de forma, que a primeira divisão dos fluidos não-Newtonianos foi realizada tendo em conta este parâmetro (Barnes, et al., 1989).

Os fluidos independentes do tempo de aplicação são caracterizados por necessitar que um valor de tensão de corte seja atingido para haver movimento por parte do fluido. As propriedades deste tipo de fluidos não são influenciadas pelo tempo de aplicação.

Mais uma vez este grupo (fluidos não-Newtonianos independentes do tempo) divide-se em dois grupos, quando têm ou não têm valor mínimo de tensão de corte, sendo estes fluidos dependentes apenas da taxa de corte; dentro do grupo que tem tensão de cedência há dois tipos de fluidos, os fluidos pseudoplásticos e os fluidos dilatantes.

Iniciando pela descrição dos fluidos pseudoplásticos, onde na figura 10, gráfico A, é possível observar a relação existente entre a tensão de corte e a taxa de corte. Este fluido é caracterizado por ter uma diminuição da viscosidade quando ocorre um aumento da taxa de corte, como é possível observar no gráfico B da figura 10 (Yildirim, et al., 2000).

Exemplos de fluidos pseudoplásticos são alguns tipos de Ketchup, mostarda, alguns tipos de tintas e algumas suspensões de argilas, entre outros (Catriel, 2008).

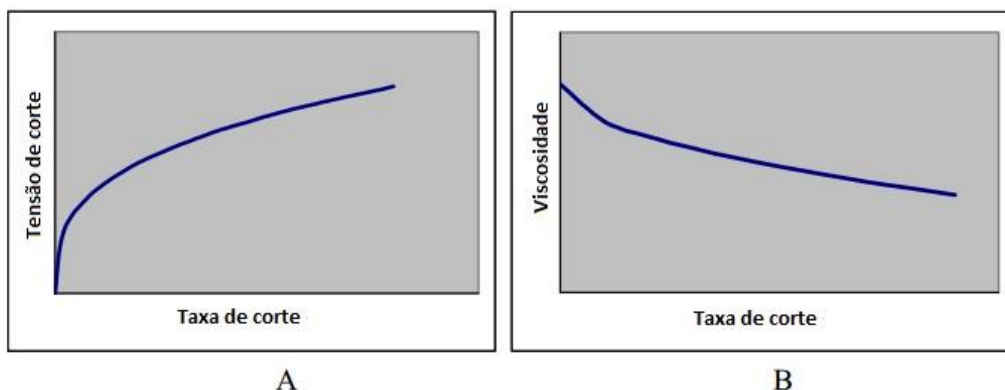


Figura 10: Representação das curvas características do comportamento reológico dos fluidos pseudoplásticos
 Adaptado de: (Yildirim, et al., 2000)

Já os fluidos dilatantes têm um comportamento inverso ao analisado anteriormente, quer na sua relação entre a tensão e taxa de corte (figura 11 A), quer na relação entre a viscosidade e a taxa de corte (figura 11 B) pois este fluido caracteriza-se por ter um aumento da viscosidade quando há o aumento da taxa de corte (Yildirim, et al., 2000).

Dentro dos fluidos dilatantes tem-se como exemplo solução de amido de milho, areia molhada, dióxido de titânio, etc (Catriel, 2008).

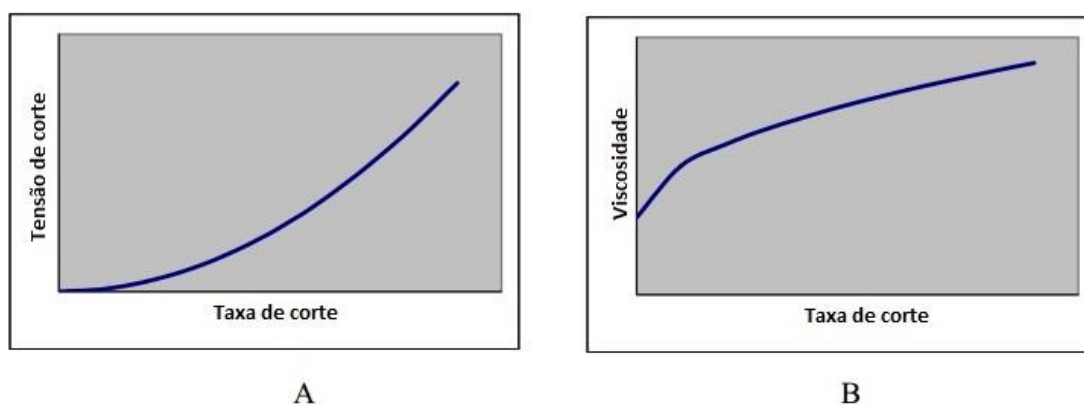


Figura 11: Representação das curvas características do comportamento reológico dos fluidos dilatantes
 Adaptado de: (Yildirim, et al., 2000)

Ainda dentro do grupo dos fluidos independentes do tempo, mas desta vez analisando os fluidos com valor de tensão de corte mínimo; este é um grupo constituído por apenas um fluido, o fluido com comportamento de plástico de Bingham, este tipo de fluido necessita que um valor de tensão de corte mínimo seja atingido para se observar escoamento, ou seja, até esse determinado valor ser atingido o fluido comporta-se como um material elástico e após a chegada ao valor mínimo de

tensão de corte este fluido comporta-se como material Newtoniano. Na figura 12 encontra-se a representação do comportamento reológico de um fluido com comportamento de plástico de Bingham (Yildirim, et al., 2000).

Exemplos de fluidos plásticos de Bingham são pasta dos dentes, chocolate, argila, emulsões, entre outros (Catriel, 2008).

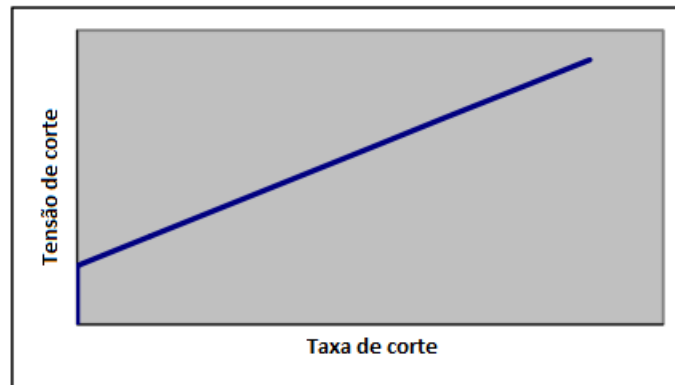


Figura 12: Representação das curvas características do comportamento reológico dos fluidos do tipo plástico de Bingham

Adaptado de: (Yildirim, et al., 2000)

Na figura 13 é possível ver-se um resumo dos diferentes comportamentos dos fluidos newtonianos e não-Newtonianos independentes do tempo, tendo em consideração a relação entre a tensão de corte e a taxa de corte (Cavadas, 2008).

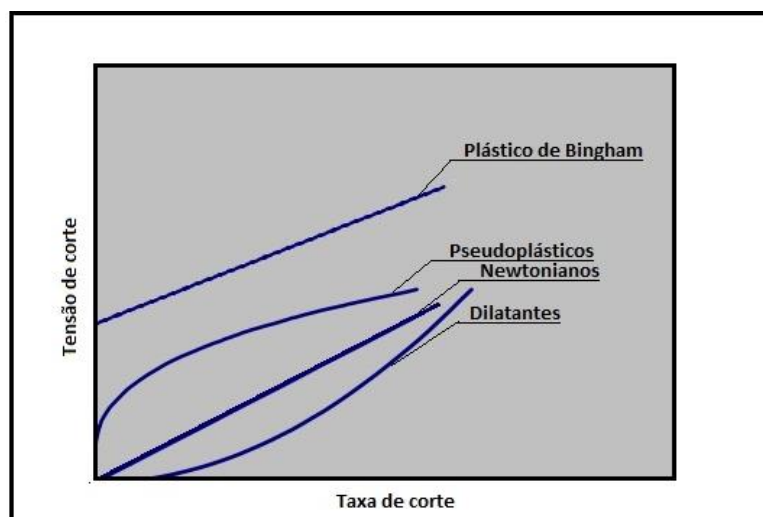


Figura 13: Esquema das curvas típicas do comportamento reológico dos fluidos não-Newtonianos independentes do tempo

Adaptado de: (Cavadas, 2008)

Analisando agora o grupo dos fluidos não-Newtonianos mas dependentes do tempo de carregamento, estes são caracterizados por terem um comportamento diversificado quanto à sua viscosidade aparente, ao longo do tempo de carregamento.

Este grupo divide-se em dois tipos de fluidos os tixotrópicos e os fluidos anti-tixotrópicos ou reopéticos.

O primeiro tipo de fluido (tixotrópico) é caracterizado por uma diminuição da viscosidade ao longo do tempo de carregamento, com uma taxa de corte ou tensão de corte constante, esta operação é seguida por uma recuperação gradual aquando da remoção da tensão de corte ou taxa de corte, como se pode ver na figura 14, gráfico A (Barnes, et al., 1989). Existem diversos exemplos deste tipo de fluido, o iogurte, as tintas para impressão, alguns derivados de petróleo, entre outros (Catriel, 2008).

Os fluidos anti-tixotrópicos têm um comportamento inverso ao observado anteriormente, ou seja, há um aumento da viscosidade ao longo do tempo de carregamento, com uma taxa de corte ou tensão de corte constante, esta operação é seguida por uma recuperação gradual aquando da remoção da tensão de corte ou taxa de corte, figura 14 gráfico B (Barnes, et al., 1989). Um exemplo deste fluido é o gesso (Catriel, 2008).

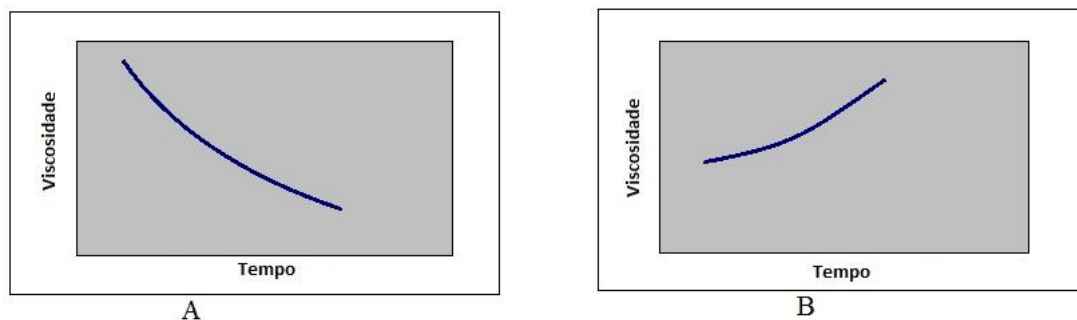


Figura 14: Representação das curvas características do comportamento reológico dos fluidos tixotrópicos (A) e reopéticos (B)

Adaptado de: (Brookfield Engineering Laboratories)

Para finalizar é analisado o grupo dos fluidos viscoelásticos. Estes fluidos são caracterizados por terem um comportamento viscoso e um comportamento elástico, em simultâneo. Os fluidos viscoelásticos cumprem a lei elástica de Hooke e também a lei da viscosidade de Newton. Devido a estas componentes, um fluido viscoelástico pode recuperar a sua forma após estar sujeito a uma tensão, enquanto o comportamento viscoso leva este tipo de fluidos a ter características dos fluidos Newtonianos descritos anteriormente (Cavadas, 2008).

Este comportamento duplo está relacionado com o tempo de carregamento e a temperatura a que o material está sujeito.

O fluido tem um comportamento elástico quando o tempo de carregamento é pequeno, mas quando o tempo de carregamento é longo observa-se um comportamento viscoso. Enquanto para um tempo de carregamento intermédio o comportamento é viscoelástico. Conclui-se que o material pode-se comportar como um sólido ou como um líquido consoante o tempo de carregamento (Santos, 2011).

As natas, a gelatina e os gelados são exemplos de fluidos viscoelásticos, mas o mais importante são os betumes, pois é o objeto de estudo do presente trabalho (Catriel, 2008).

2.5. Equipamentos para quantificar a viscosidade

Os medidores de viscosidade podem ser classificados de diferentes formas. As classificações mais conhecidas têm em consideração os tipos de fluidos para os quais são aplicáveis e a forma como executam a medição da viscosidade.

Os viscosímetros que são classificados quanto ao tipo de fluidos que medem, dividem-se em dois grupos. Num primeiro grupo inserem-se os tipos de viscosímetros que medem diretamente a tensão e a taxa de corte do fluido. Este conjunto de equipamentos designam-se por primários e qualificam a viscosidade de fluidos Newtonianos e de fluidos viscoelásticos.

No segundo grupo incluem-se os equipamentos secundários que medem a tensão e a taxa de corte mas não diretamente. Por este motivo os viscosímetros secundários só podem avaliar a viscosidade dos fluidos Newtonianos. Estes viscosímetros determinam a viscosidade de diferentes formas (Ferreira, 2009).

Na figura 15 é possível ver um esquema onde é mostrada a distribuição dos tipos de viscosímetros de acordo com a classificação descrita anteriormente.

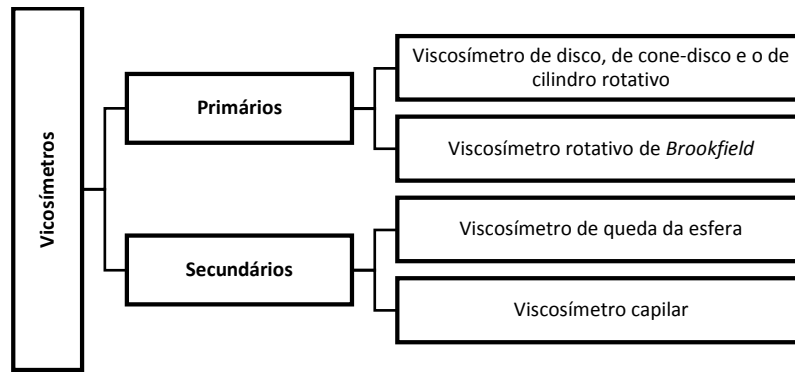


Figura 15: Viscosímetros Primários e Secundários
 Adaptado de: (Ferreira, 2009)

Por fim a forma mais utilizada de classificar os viscosímetros é quanto ao modo de realizar a medição da viscosidade, na figura 16 é possível ver um esquema com esta mesma classificação.

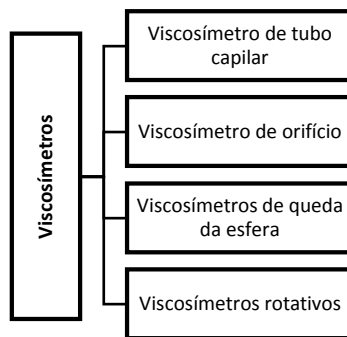


Figura 16: Esquema da classificação de viscosímetros segundo a sua forma de executar a medição

Assim serão detalhados cada um dos tipos de viscosímetros existentes, conforme a última classificação apresentada, mencionando a metodologia de medição da viscosidade e os seus campos de aplicação.

2.5.1. Viscosímetro de tubo capilar

Os viscosímetros de tubo capilar são conhecidos por serem um equipamento com forma aproximada de U, onde um dos ramos deste viscosímetro é composto por um tubo capilar fino que está ligado a um reservatório superior (Hernández, 2008).

Este ensaio é realizado deixando uma quantidade conhecida de fluido escoar pelo capilar sob a ação da gravidade e assim permite determinar vários parâmetros relacionados com a fricção que um fluido desenvolve ao deslocar-se dentro de um capilar.

A viscosidade é obtida através do conhecimento do tempo que o fluido demora a deslocar-se entre duas marcas realizadas no reservatório, sendo medida a viscosidade cinemática do material.

Este tipo de estudos podem ser demorados, e quanto maior for a viscosidade de um fluido maior será o tempo do ensaio pois este é realizado tendo em consideração o deslocamento por gravidade do fluido. Outro fator importante a ter em conta com os viscosímetros de tubo capilar é que é necessário calibrar estes medidores de viscosidade com recurso a um fluido de viscosidade conhecida, pois não se conhecem com exatidão as dimensões da secção capilar e da tensão superficial, que também é necessária ser tida em conta (Autor Desconhecido).

Existem vários tipos de viscosímetros de tubo capilar, contudo os mais utilizados são: o viscosímetro de *Ostwald* (figura 17 A), este funciona com base na Lei de *Poiseulle*; quanto ao viscosímetro de *Ubbelohde* (figura 17 B), este é usado para determinar viscosidades cinemáticas de fluidos Newtonianos transparentes e de lubrificantes hidráulicos; por fim o viscosímetro de *Cannon-Fenske* (figura 17 C) é utilizado para determinar a viscosidade de fluidos Newtonianos (Autor Desconhecido).

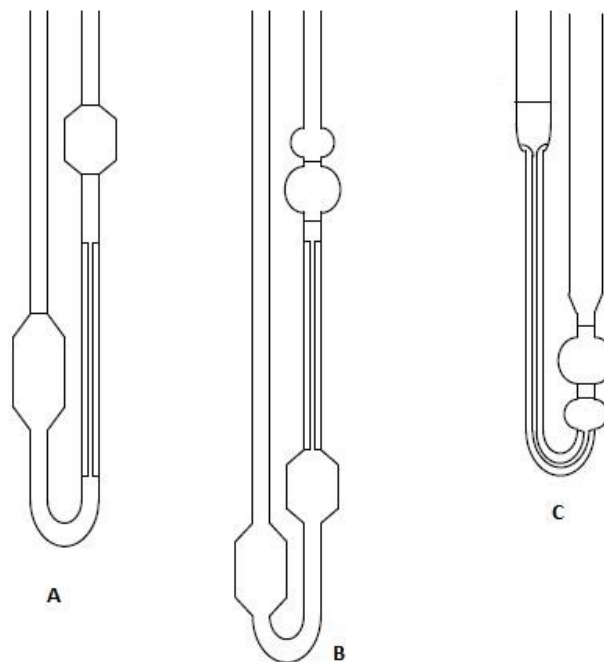


Figura 17: Viscosímetros capilares, A – Ostwald B – Ubbelohde C – Cannon-Fenske
Adaptado de: (Hernández, 2008)

2.5.2. Viscosímetros de orifício

Os viscosímetros de orifício permitem determinar a viscosidade cinemática dos fluidos de forma idêntica à forma apresentada anteriormente nos viscosímetros capilares. Os capilares que constituem os viscosímetros de orifício são de pequenas dimensões e muitas vezes assemelham-se apenas a um orifício, por essa razão são assim chamados. Ou seja, o funcionamento destes medidores de viscosidade baseia-se em provocar a saída por gravidade de um fluido, cujo volume de ensaio é conhecido, pelo orifício ou capilar de um recipiente e medir o tempo de escoamento. Quanto maior for o tempo de escoamento de determinado fluido maior a viscosidade desse mesmo fluido (Barros, 2012).

Nestes viscosímetros é necessário recorrer a um fluido de viscosidade conhecida para se obter a equivalência “tempo de escoamento - viscosidade” do equipamento permitindo assim através do tempo de escoamento, conhecer a viscosidade de qualquer fluido (Autor Desconhecido).

Os viscosímetros de orifício mais utilizados são: o viscosímetro de Saybolt, o viscosímetro de Engler, o viscosímetro de Redwood (viscosímetro *standard* britânico), e ainda o viscosímetro de Copo Ford (figura 18).



Figura 18: Viscosímetro Copo Ford
Adaptado de: (Ferreira, 2009)

2.5.3. Viscosímetros de queda de esfera

O viscosímetro de Stokes ou viscosímetro de queda de esfera (figura 19) mede o tempo que uma esfera sólida de massa conhecida demora a percorrer a distância entre dois pontos marcados num recipiente cheio de um fluido estacionário e desta forma determina-se a viscosidade (Hernández, 2008). Além do conhecimento do tempo sucessivo, é possível obter a viscosidade cinemática do fluido.

A esfera ao partir do repouso, num fluido viscoso, ganhará velocidade até atingir uma velocidade final constante, sendo a soma das forças atuantes na esfera, nesse ponto, igual a zero e assim pode ser calculada a viscosidade do fluido (Autor Desconhecido).



Figura 19: Viscosímetro de queda de esfera
Adaptado de: (Hernández, 2008)

2.5.4. Viscosímetros rotativos

Os viscosímetros rotativos permitem quantificar a viscosidade dinâmica de um fluido onde está imerso um objeto em rotação, com auxílio do valor da força de torque que é necessária realizar para manter o objeto interior em rotação e do conhecimento da velocidade que é necessário aplicar para atingir aquela força (Autor Desconhecido).

Os viscosímetros mais conhecidos dentro dos rotativos são: o viscosímetro de Stormer que mede a viscosidade de fluidos à temperatura ambiente, o viscosímetro de cone-placa que é muito utilizado

em laboratórios de controlo de qualidade, o viscosímetro de cilindro concêntrico que é usado na determinação de viscosidades absolutas e o viscosímetro de Brookfield (figura 20) cujo modo de funcionamento será apresentado de uma forma mais desenvolvida, pois foi este o equipamento utilizado para a realização do presente trabalho.



Figura 20: Viscosímetro de Brookfield

Este viscosímetro rotacional é muito utilizado, pois é de simples utilização, pouco subjetivo, onde a interferência do operador é praticamente nula e os custos dos ensaios são baixos. Mais uma vantagem deste ensaio é que uma única amostra permite realizar todas as medições, sendo um procedimento rápido, há uma maior estabilidade da temperatura e não há variáveis desconhecidas, pois os dados pertencem à mesma amostra e a curva resultante é traçada com esses mesmos valores de uma única amostra.

O viscosímetro *Brookfield* funciona por rotação, medindo a força de torque (binário) necessária para fazer uma agulha, também conhecida como *spindle*, rodar quando está submersa no fluido que se pretende determinar a viscosidade. A agulha move-se a uma velocidade constante, conhecida e pré-definida e a força de torque é medida em percentagem de esforço que uma mola calibrada necessita de fazer para que a agulha se mova a essa mesma velocidade (Santos, 2011).

Este medidor de viscosidade tem diferentes agulhas, sendo que cada uma tem um leque de aplicação específica. As de menor diâmetro são aplicadas em fluidos com maiores viscosidades, enquanto as de maiores diâmetros são usadas na determinação de fluidos com menores viscosidades (Ferreira, 2009).

O viscosímetro utilizado no trabalho mede a viscosidade dinâmica dos fluidos tendo em consideração as fórmulas teóricas apresentadas de seguida na tabela 2 e fornece os resultados em *Centipoise (cP)*, sendo necessário fazer a conversão das unidades dadas para o sistema internacional (*Pa.s*), utilizando a fórmula apresentada (equação 5).

Taxa de corte (s^{-1})	$\dot{\gamma} = \frac{2\omega R_c^2 R_b^2}{x^2 (R_c^2 - R_b^2)}$
Tensão de corte (dynes/cm ²)	$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^{2l}}$
Viscosidade (Poise)	$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$
ω = Velocidade angular da agulha (rad/s) $\omega = \frac{2\pi}{50} N$ (RPM) R_c = Raio da camara da amostra (cm) R_b = Raio da agulha (cm) X = raio onde é calculada a taxa de corte (cm) L = Comprimento efetivo da agulha (cm)	

Tabela 2: Formulação teórica do viscosímetro de Brookfield

Adaptado de: (Brookfield Engineering Laboratories)

$$\eta(Pa.s) = \eta(cP) \times 0,001$$

[5]

$$\eta(Pa.s) = \text{Viscosidade dinâmica } (Pa.s)$$

$$\eta(cP) = \text{Viscosidade dinâmica } (cP)$$

Equação 5: Fórmula de conversão da viscosidade de centipoise para Pascal segundo

Adaptado de: (Visawanath, et al., 2007)

3. Os ligantes betuminosos, o filer e a viscosidade

3.1. Introdução

Neste capítulo são descritos os tipos de ligantes betuminosos, as suas propriedades e campos de aplicação. São indicados os tipos de aditivos mais comuns e as propriedades melhoradas por esses aditivos. Para finalizar, é feita uma ligação entre os dois capítulos redigidos até então.

O estudo da viscosidade dos ligantes betuminosos é bastante importante pois a viscosidade deste componente das misturas betuminosas varia com a temperatura a que está sujeito, sendo este fator importante na aplicação das misturas para uma obtenção de melhores resultados ao longo do tempo.

Existem diversos tipos de ligantes betuminosos, todos têm diferentes funções e são aplicados em diferentes situações, sendo de vital importância escolher o que mais se adequa à obra em questão, sendo pois necessário conhecer as propriedades dos ligantes.

No segundo subcapítulo são descritos os diferentes tipos de ligantes betuminosos, assim como os seus campos de aplicação, devendo o tipo de ligante ser escolhido conforme o tipo de obra em que serão aplicados.

No subcapítulo 3.3. estão apresentados os diferentes aditivos que podem melhorar determinadas características dos betumes, e são mencionadas as suas origens e as propriedades que esses diferentes aditivos melhoram.

No último subcapítulo é realizado um elo de ligação entre o betume e a viscosidade, mostrando quão importante é analisar esta propriedade dos betumes.

3.2. Ligantes betuminosos

A ligação entre os agregados que compõe as misturas betuminosas é realizada pelos ligantes betuminosos que para além deste objetivo, promovem também a coesão e a estabilidade da mistura. Esta substância adesiva contém betume que pode estar em diversas formas como por exemplo, não modificado, modificado, oxidado, fluidificado, fluxado ou emulsionado.

Os ligantes betuminosos têm um comportamento mais tenaz e flexível que outros materiais coesivos aplicados em pavimento, como acontece com os ligantes hidráulicos que são mais rígidos

e resistentes que o tipo de ligantes falados anteriormente. Este comportamento dos ligantes betuminosos ocorre por causa do comportamento viscoelástico do betume, permitindo a este material comportar-se como um material elástico ou como um material viscoso (Cepsa, 2006).

Os ligantes betuminosos comportam-se como um material estável e aderente, com elevado módulo quando submetido às ações do tráfego, este comportamento ocorre enquanto está sob a conduta elástica. Este material coesivo também tem um comportamento flexível, “com baixo módulo de rigidez e muito deformável, que se adapta às deformações e assentamentos das camadas do pavimento e que absorve as tensões devidas à retração térmica das camadas do pavimento e da fundação, sem se fendilhar” (Cepsa, 2006).

Como já foi mencionado anteriormente, existem diversos tipos de ligantes betuminosos, que devem ser escolhidos consoante a sua futura utilização, sendo de grande importância escolher o ligante betuminoso mais adequado para a obra (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009).

Os ligantes betuminosos existentes no mercado e são:

- Betumes de pavimentação;
- Betumes duros;
- Betumes modificados;
- Betumes fluidificados;
- Betumes especiais anti-querosene;
- Emulsões betuminosas tradicionais;
- Emulsões betuminosas modificadas.

Uma vez que existe um largo leque de ligantes betuminosos, este agente coesivo deve ser definido no projeto de execução da obra, sendo o motivo da escolha de determinado tipo de ligantes justificada.

3.2.1. Betumes de pavimentação

O betume de pavimentação (figura 21) é usado para envolver agregado mineral utilizado essencialmente, na produção de misturas betuminosas tradicionais. É o mais utilizado de todos os tipos de betume, até porque é usado muitas vezes como betume-base de outros ligantes betuminosos, como betumes modificados, betumes coloridos, betumes fluidificados, entre outros tipos de ligantes (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009).

Este betume é usado principalmente em misturas betuminosas fabricadas a quente, para serem aplicadas em camadas de base, camadas de ligação, camadas de regularização e camadas de desgaste. Os betumes de pavimentação são utilizados, também, para fabricar mastiques betuminosos, para revestimentos superficiais, e na ligação de gravilhas duras para incrustação no final do acabamento da camada de desgaste (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009).



Figura 21: Betume de pavimentação
Adaptado de: (SOCl, 2014)

Este tipo de ligante betuminoso deve cumprir os requisitos apresentados na Norma Europeia EN 12591 *Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens*. Esta norma descreve as propriedades e os métodos de ensaio utilizados para caracterizar este tipo de betumes. Uma vez que existe uma gama bastante alargada de betumes usados quer na produção quer na aplicação dos materiais para pavimentação, esta norma (EN 12591) divide os betumes em três quadros distintos, onde avalia as diferentes técnicas de produção e aplicação, e divide os betumes de pavimentação em grupos que têm como medida de distinção a gama de penetração do betume, em décimas de milímetro. Cada um destes quadros tem uma subdivisão que reparte a informação em propriedades obrigatórias a cumprir e em propriedades necessárias (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009).

Dos três quadros apresentados no documento, em Portugal são usados essencialmente, os betumes apresentados no quadro 1 da norma em questão; os betumes detalhados no quadro 2 da mesma norma são utilizados principalmente nos países nórdicos, pois o clima exige misturas betuminosas menos rígidas.

As informações apresentadas na norma a nível europeu são “filtradas” para cada país, consoante os betumes mais utilizados no mesmo país; a tabela 3, apresentada de seguida, é a tabela onde é possível ver na versão portuguesa da norma (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009).

Propriedades	Método de ensaio	Unidade	Grupo de betume			
			35/50	50/70	70/100	160/220
Penetração a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	35-50	50-70	70-100	160-220
Temperatura de amolecimento	EN 1427	°C	50-58	46-54	43-51	35-43
Resistência ao endurecimento a 163 °C		-	-	-	-	-
Penetração retida		%	≥53	≥50	≥46	≥37
Aumento da temperatura de amolecimento, Severidade 1	EN 12607-1	°C	≤8	≤9	≤9	≤11
Varição em massa ^a (valor absoluto)		%	≤0,5	≤0,5	≤0,8	≤1,0
Ponto de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥240	≥230	≥230	≥220
Solubilidade	EN 12592	%	≥99,	≥99,0	≥99,0	≥99,0
Índice de penetração	EN 12591 – Anexo A	-	AR ^b	AR ^b	AR ^b	AR ^b
Ponto de fragilidade Fraass	EN 12593	°C	AR ^b	AR ^b	AR ^b	AR ^b
Viscosidade cinemática a 135 °C	EN 12595	mm ² /s	≥370	≥295	≥230	≥135

^a A variação de massa pode ser positiva como negativa

^b Nível ou intervalo a reportar pelo fornecedor

Tabela 3: Especificações recomendadas em Portugal para betumes de pavimentação
Adaptado de: (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009)

Os dois primeiros betumes apresentados na tabela 3 (35/50 e 50/70) são os mais utilizados na produção de misturas betuminosas convencionais.

3.2.2. Betumes duros

Este tipo de betumes, idêntico aos betumes apresentados anteriormente, com origem na refinação de petróleos brutos é também classificado tendo em consideração a gama de penetração, mas usado apenas na produção de misturas betuminosas de alto módulo a quente.

Este tipo de betume é utilizado na realização de camadas base, de ligação e de regularização, e pontualmente usado em camadas de desgaste.

Uma vez que os betumes são idênticos, apesar dos betumes duros cumprirem a norma europeia 13924 – *Bitumes and bituminous binders, Specifications for hard paving grade bitumens*, esta norma está intimamente ligada com a EN 12591, sendo que a primeira permite selecionar a especificação mais adequada para as condições climáticas a que o betume estará sujeito.

3.2.3. Betumes modificados

Os betumes modificados são alterados com diferentes materiais, com o objetivo de melhorar determinadas propriedades reológicas. Os materiais mais usados como agentes modificadores de betumes são os polímeros orgânicos e a borracha proveniente de pneus usados de caminhões, incorporada no betume sob a forma de granulado.

Os betumes modificados quer sejam modificados com polímeros ou borracha são usados no fabrico de betão betuminoso drenante, betão e microbetão betuminoso rugoso, e até em camadas de desgaste realizadas com misturas betuminosas de desgaste ou abertas. Estes ligantes são ainda utilizados para fabricar mastiques betuminosos, em revestimentos superficiais, ou membranas anti-fissura, e na regularização de tabuleiros de viadutos e pontes. Podem ainda ser a base do fabrico de emulsões betuminosas modificadas.

Este tipo de betumes são escolhidos quando se pretende que o produto final tenha baixa suscetibilidade térmica, maior flexibilidade, sendo que estes aditivos ainda melhoram as características de adesão e de aptidão ao endurecimento. Estas últimas características podem também ser melhoradas com a adição de fibras, aditivos ou outros produtos. A substituição de betumes modificados por betumes tradicionais com adição de fibras deve ser devidamente justificada.

Um betume modificado deve cumprir a norma Europeia EN 14023 *Bitume and bituminous binders – Framework Specifications for polymer modified bitumens*, esta norma apresenta um quadro com as características e os métodos de ensaio apropriados para este betume ser utilizado. Mais uma vez esta norma está intimamente ligada à norma EN 12591, pois o betume base dos betumes modificados é o betume de pavimentação (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009).

3.2.4. Betumes fluidificados

Os betumes fluidificados são betumes aos quais foi adicionado um fluxante relativamente volátil, para que a sua viscosidade fosse reduzida.

Este tipo de betumes têm vindo a ser substituídos por emulsões betuminosas pois estas últimas não apresentam problemas ambientais, como acontece com os primeiros. As emulsões betuminosas chegam até a ter melhores resultados funcionais que os betumes fluidificados (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009).

3.2.5. Betumes especiais anti-querosene

Os betumes especiais anti-querosene são usados essencialmente nas zonas próximas de portagens ou em parques, pois este betume é indicado para o fabrico de misturas betuminosas para camadas de desgaste, usadas em locais onde se observem derrames de óleo e combustíveis (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009).

3.2.6. Emulsões betuminosas tradicionais

Este ligante betuminoso é usado no fabrico de misturas betuminosas a frio, para revestimentos superficiais, ou microaglomerados betuminosos a frio, também usados em regas de colagem entre camadas de misturas betuminosas, regas de impregnação de camadas em materiais granulares, antes da colocação da camada em mistura betuminosa e até colagem de geotêxtil ou grelha, na regularização de materiais granulares em regas de cura de materiais granulares com ligantes hidráulicos.

A *Norma Europeia* que as emulsões devem cumprir é a EN 13804 *Bitume and bituminous binders, Framework for specifying cationic bituminous emulsions*. Esta norma descreve as especificações, das emulsões betuminosas tradicionais, catiónicas e até das emulsões modificadas (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009).

3.2.7. Emulsões betuminosas modificadas

As emulsões também podem ser alteradas com polímeros, de forma a melhorar algumas características e como já foi mencionado devem estar de acordo com a Norma europeia EN 13808. As emulsões modificadas são usadas em microaglomerados betuminosos a frio, revestimentos superficiais, lamas asfálticas, colagens e impregnações e tal como as emulsões tradicionais são usadas na colagem de geotêxtil ou grelha (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009).

3.3. Aditivos betuminosos

Os aditivos betuminosos são usados para melhorar propriedades mecânicas e reológicas do betume, possibilitando que o betume tenha uma resposta melhor perante solicitações impostas, aumentando a vida útil da camada de desgaste, pois esta, com a junção de aditivos passa a ter uma drenagem mais facilitada, melhor comportamento a mudanças ambientais, entre outras melhorias observadas (Bardini, et al., 2009).

Existem diversos tipos de aditivos para o betume. Todos com características bem distintas, que aperfeiçoam propriedades diferentes e são usados em pavimentos de obras distintas (Pereira, 2010).

Os polímeros são aditivos que podem ter diversas origens e consoante a sua origem melhoram diferentes propriedades do betume, mas em geral este aditivo melhora as propriedades reológicas do betume (Pereira, 2010).

As fibras fazem uma ligação com o betume de forma física, melhorando a resistência dos betumes e o tempo de vida útil dos mesmos (Pereira, 2010).

Os aditivos químicos melhoram as características de misturas betuminosas armazenadas e são utilizados em betumes para preenchimento de covas. O aditivo químico mais utilizado é o enxofre (Pereira, 2010).

Ultimamente muito utilizada, a borracha com origem em pneus de camiões usados, tem a capacidade de reduzir a fadiga do betume, aumentando a resistência ao fendilhamento e pode ainda diminuir a viscosidade dos betumes (Pereira, 2010).

Os fileres são pós inorgânicos também usados para melhorar o betume, mas estes não são considerados modificadores de ligantes betuminosos (Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias (InIR), 2009).

“O filer é todo o material granular, de origem natural, artificial ou reciclada, cuja maior parte passa no peneiro 0,063 mm, que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades.” (NP EN 13043:2004)

Os fileres melhoram as propriedades reológicas, mecânicas e térmicas do betume, melhoram ainda a sensibilidade à água por parte do ligante betuminoso (Bardini, et al., 2009).

O filer tem origem em rocha, esta é moída de forma a que as partículas que constituem este aditivo sejam de granulometria fina. Ao ser misturado com betume, o filer forma uma pasta uniforme mais viscosa que tem como objetivo completar o esqueleto da mistura betuminosa, preenchendo os vazios para que a mistura seja mais compacta, impermeável e mais trabalhável (Bardini, et al., 2009).

A utilização de filer tem ainda como objetivo aumentar a resistência do pavimento à degradação e aumentar a rigidez, sendo que a relação filer-betume e as características do filer têm grande influência no comportamento final da mistura, pois o filer necessita de obedecer a limites de granulometria e plasticidade (Bardini, et al., 2009).

Os fileres podem ter duas origens: os fileres comerciais produzidos em unidades próprias com metodologias e processos controlados, e os fileres recuperados em centrais de misturas betuminosas. (Matos, 2012)

Em Portugal os tipos de filer mais utilizados são os fileres calcários, que têm um formato esférico e têm menor resistência estrutural. Apesar de não ser muito utilizados em Portugal, os fileres graníticos são caracterizados por terem partículas mais alongadas e tem maior resistência (Peralta). À mistura de filer e betume dá-se o nome de mástique betuminoso. Esta é uma mistura que serve para envolver os agregados de maiores dimensões, completando o esqueleto da mistura betuminosa e melhorando as suas características. Geralmente entre outras propriedades caracteriza-se o filer, para avaliar o comportamento do mástique e das misturas betuminosas.

3.4. Comportamento viscoelástico do betume

A ligação entre o betume e a viscosidade, ambos estudados até agora, é bastante importante, como já foi mencionado por diversas vezes ao longo deste trabalho.

Este estudo é importante pois o betume tem um comportamento viscoelástico e este tipo de fluido é de difícil estudo, devido ao seu duplo comportamento.

3.4.1. Comportamento reológico do betume

Como já foi mencionado o betume tem um comportamento viscoelástico, podendo ter um comportamento viscoso ou elástico, em função do tempo de carregamento, valor da carga aplicada e da temperatura a que está sujeito. Esta diferença de comportamentos tem como variáveis a temperatura a que o betume se encontra, o tempo de carregamento deste e o valor da tensão de carregamento.

Pela ação da temperatura, isoladamente, o betume pode se comportar como um fluido viscoso ou como um fluido elástico; mas principalmente sob a ação da temperatura e do tempo de carregamento é onde se observam mais variações destes comportamentos. No caso de baixas

temperaturas e pequenos tempos de carregamento o betume cumpre a lei de *Hooke*, ou seja, tem um comportamento elástico; já com um aumento da temperatura, que pode variar de intermedia a alta, e com um tempo de carga maior o comportamento do betume torna-se viscoelástico (Santos, 2011).

Na figura 22 é possível observar um gráfico da variação da viscosidade com o aumento da temperatura, e pode-se observar que há uma diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura (Yildirim, et al., 2000).

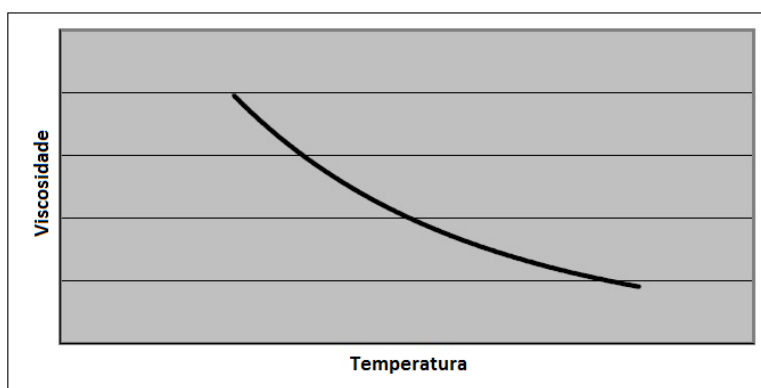


Figura 22: Variação da viscosidade para betumes puros
Adaptado de: (Yildirim, et al., 2000)

3.4.2. Importância da medição da viscosidade

A medição da viscosidade das misturas betuminosas é essencial para determinar qual o valor ideal desta propriedade, pois este valor é importante quer no fabrico da mistura betuminosa, quer na aplicação, mais concretamente na compactação da mistura betuminosa.

O conhecimento do valor ideal da viscosidade conduz a uma otimização do tempo de trabalho, dos custos do mesmo, assim como da energia gasta na execução da mistura betuminosa e consequente aplicação.

A viscosidade da mistura betuminosa não deve ser demasiado alta nem deve ter um valor baixo pois esta propriedade compromete a qualidade da camada executada. A mistura betuminosa deve ter uma estrutura compacta, com bastante resistência e a coesão ideal, nestas características o valor da viscosidade tem elevada importância.

No fabrico é importante que o valor da viscosidade não seja demasiado baixo para que não ocorra o escorrimento da mistura betuminosa, pois se esta estiver muito fluida pode escoar, levando a um

fabrico deficiente. Pelo contrário, se a viscosidade for demasiado alta, a mistura estará demasiado viscosa levando a um incorreto cobrimento dos agregados constituintes da mistura betuminosa.

Na compactação o ligante betuminoso funciona como um lubrificante da mistura, por esse motivo, o valor da viscosidade tem mais uma vez elevada importância.

Na aplicação da mistura betuminosa, se o valor da viscosidade for demasiado baixo, a mistura não terá coesão suficiente e assim não suportará a pressão executada na compactação. Também se a viscosidade for demasiado alta, a mistura estará densa, de forma que o movimento das partículas será dificultado, levando a uma incorreta compactação (Santos, 2011).

3.4.3. Viscosímetros e os ligantes betuminosos

Os equipamentos de medir a viscosidade apresentados anteriormente são aplicados em diversas ciências, pois como já foi mencionado o estudo da viscosidade é bastante importante em vários sectores industriais.

Na indústria dos ligantes betuminosos são aplicados apenas alguns dos viscosímetros existentes, em que cada equipamento tem o seu próprio campo de aplicação e as suas normas de ensaio.

Na tabela 4 estão mencionados os equipamentos usados para determinar a viscosidade dos betumes e quais as normas de ensaios que esta determinação deve cumprir.

Na execução deste trabalho será utilizada como auxiliar de estudo a Norma Europeia 13302:2010, que descreve o modo de determinação a viscosidade dinâmica recorrendo a um viscosímetro rotativo, como se pode ver na tabela 4.

Tipo de viscosímetro	Tipo de viscosidade	Norma europeia
Viscosímetro capilar	Viscosidade dinâmica	EN 12596
	Viscosidade cinemática	EN 12595
Viscosímetro rotativo	Viscosidade dinâmica	EN 13302

Tabela 4: Tabela resumo dos viscosímetros utilizados em betumes

4. Metodologia experimental

4.1. Introdução

Neste capítulo serão descritos os métodos de preparação do ensaio, assim como a metodologia de ensaio para a determinação da viscosidade, baseado como referido na norma EN13302:2010.

Com a colaboração do Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Publicas do Norte (CICCO PN), que disponibilizou as instalações e todo o material necessário para realizar os ensaios pretendidos, e ainda com a colaboração da empresa Brisa que cedeu o viscosímetro rotativo de *Brookfield* foi possível realizar os ensaios pretendidos.

Em 4.2. é relatado o tipo de betume utilizado, a sua origem, e a forma de preparação desse mesmo betume, para a execução do ensaio.

No subcapítulo 4.3. são mencionados os tipos de fileres utilizados nos diferentes ensaios, e algumas das suas particularidades. Ainda dentro deste subcapítulo é indicado o modo de produção do mastique betuminoso.

Em 4.4. é descrita a preparação do provete de ensaio, uma vez que a moldagem deste tem bastante importância para os bons resultados do ensaio.

Para finalizar, em 4.5. é redigida a realização do ensaio, com todos os passos descritos e justificados.

4.2. Betume utilizado

A realização dos ensaios de viscosidade foram feitos com recurso a um betume tradicional puro, com origem na refinaria da GALP em Matosinhos, do tipo 35/50. Os diferentes tipos de mastique foram obtidos em laboratório.

Este betume foi proveniente de latas de 1 l, com a origem da mesma refinaria e do mesmo lote, garantindo assim a menor variabilidade possível na origem do betume.

A lata do betume foi dividida em porções menores. Cada porção foi aquecida apenas uma vez, de forma a diminuir o sobreaquecimento do betume procurando evitar a alteração das suas propriedades.

Depois de produzido o mastique procedeu-se ao ensaio para determinar a viscosidade com recurso ao viscosímetro rotativo.

4.3. Fileres utilizados

Neste estudo são usados seis fileres, com origem em agregados graníticos e agregados calcários. Pretendeu-se observar os valores de viscosidade dos mastiques realizados com esses mesmos fileres, com diferentes taxas de incorporação.

Na tabela 5 estão apresentadas as diferentes origens dos fileres utilizados, e respectivas massas volúmicas; na figura 23 são apresentados os fileres utilizados neste estudo.

A escolha destes fileres está relacionada com a sua utilização em Portugal, pois estes fileres são os mais utilizados neste país.

Filer	Origem	Massa volúmica do filer (Mg/m ³)
A	Cal hidráulica	2,70
B	Cal hidratada	2,24
C	Cimento portland	3,06
D	Filer granítico recuperado em central de misturas betuminosas	2,62
E	Filer calcário recuperado em central de misturas betuminosas	2,71
F	Pó calcário	2,74

Tabela 5: Fileres usados neste estudo



Figura 23: Fileres usados; A – Cal hidráulica B – Cal hidratada, C – Cimento Portland, D – Filer granítico recuperado, E – Filer calcário recuperado, F – Pó calcário

A cal hidráulica, filer A, é obtida em unidades próprias através do aquecimento da rocha calcária margosa, esta é reduzida a pó através de hidratação parcial e é seguida de moagem de forma a originar a cal hidráulica. Este filer não deve ser armazenado com água pois endurece.

A cal hidratada, filer B, tem origem, na cozedura em fornos apropriados, de rocha calcária. No processo o carbonato de cálcio é transformado em óxido de cálcio. O hidróxido de cálcio (cal hidratada) é obtido pela hidratação do óxido de cálcio.

O cimento Portland tem também origem calcária, sendo resultado do aquecimento de rocha de calcário margoso. O clínquer obtido é moído e é corrigido quimicamente através de algumas adições.

Os fileres D e E, têm origem em agregados distintos, contudo a forma de serem obtidos é idêntica, pois estes são recuperados em centrais de misturas betuminosas; após o aquecimento do agregado para a produção de misturas, as partículas mais finas são recuperadas em filtros de mangas e posteriormente são produzidos fileres com origem nesses mesmos finos.

O filer F tem origem em rocha calcária moída, sem qualquer cozedura.

Neste trabalho utilizaram-se três fileres de origem artificial (cal hidráulica, cal hidratada e cimento Portland), pois estes são tratados antes de serem produzidos; os fileres recuperados em centrais de misturas betuminosas podem também ser denominados por fileres reciclados e o filer com origem natural é o pó calcário, pois este não sofre qualquer alteração.

4.3.1. Produção do mastique

A produção do mastique com filer foi realizada em laboratório, recorrendo-se a um procedimento simples para que a temperatura do mastique tivesse a menor diminuição possível.

Sabendo que os ensaios de viscosidade dinâmica foram realizados em dois mastiques que teriam diferentes percentagens volumétricas de filer, ou seja, foram realizados ensaios em mastiques com 20% de filer, assim como mastiques com 30% do mesmo material.

Com recurso à equação 6 é possível calcular a massa volúmica dos diferentes mastiques produzidos, pois este parâmetro é importante para outros cálculos.

$$\rho_{mastique} = \left(\rho_{bet} \times \frac{\%bet}{100} \right) + \left(\rho_{filer} \times \frac{\%filer}{100} \right)$$

[6]

$\rho_{mastique}$ = Massa volúmica do mastique (Mg/m³)

ρ_{bet} = Massa volúmica do betume (Mg/m³)

$\%bet$ = Percentagem de betume no volume do mastique

ρ_{filer} = Massa volúmica do filer (Mg/m³)

$\%filer$ = Percentagem de filer no volume do mastique

Equação 6: Fórmula de cálculo da massa volúmica do mastique betuminoso

Filer	Taxa de incorporação (%/volume)	Massa volúmica do mastique (Mg/m ³)
A	20	1,364
	30	1,531
B	20	1,272
	30	1,393
C	20	1,436
	30	1,639
D	20	1,348
	30	1,507
E	20	1,366
	30	1,534
F	20	1,372
	30	1,543

Tabela 6: Valores das massas volúmicas dos mastiques produzidos

Para realizar os mastiques foi preciso conhecer a massa necessária quer de filer quer de betume. Recorrendo à equação 7 foi possível determinar a massa de filer necessário para as diferentes taxas de incorporação. E assim foram obtidos os valores apresentados na tabela 7, sabendo que a massa total de mastique era de 100 g.

$$M_{filer} = \frac{(M_p \times (\rho_{filer} \times \%filer))}{((\rho_{bet} \times \%bet) + (\rho_{filer} \times \%filer))}$$

[7]

M_{filer} = Massa de filer do mastique (g)

M_p = Massa total de mastique pretendido (g)

ρ_{filer} = Massa volúmica do filer (Mg/m³)

%filer = Percentagem de filer no volume do mastique

ρ_{bet} = Massa volúmica do betume (Mg/m³)

%bet = Percentagem de betume no volume do mastique

Equação 7: Fórmula de cálculo da massa de filer

Filer	Taxa de incorporação (%/volume)	Massa de filer a usar (g)
A	20	39,59
	30	52,91
B	20	35,22
	30	48,24
C	20	42,6
	30	56,0
D	20	38,9
	30	52,2
E	20	39,7
	30	53,0
F	20	39,9
	30	53,3

Tabela 7: Massas de filer a utilizar nos diferentes mastiques

Após conhecidas as massas necessárias de cada um dos componentes do mastique foi possível criar o mastique betuminoso, da seguinte forma:

- Aquecer do betume, filer e todos os recipientes intervenientes na realização do mastique (figura 24) a 130°C (80°C a mais em relação à temperatura de amolecimento do betume utilizado), durante 1h, segundo a norma EN13302:2010;



Figura 24: Aquecimento dos recipientes necessários para a execução do ensaio

- Pesar a massa de betume e filer necessário para realizar o mastique betuminoso, como se pode ver na figura 25;



Figura 25: Pesagem da massa de betume e filer

- Realizar a mistura do betume com o filer num recipiente colocado numa manta de aquecimento, como se pode ver na figura 26;



Figura 26: Realização da masticu

Este procedimento foi realizado para cada um dos mastiques produzidos, com os diferentes fileres e as diferentes taxas de incorporação.

Os mastiques foram concebidos na sua totalidade, ou seja, todo o masticu foi realizado ao mesmo tempo e aquando da moldagem dos provetes o masticu foi misturado de novo para que não houvesse sedimentação do filer durante o tempo de espera. O tempo de aquecimento do masticu pronto não ultrapassa as 4h estabelecidas na norma EN13202:2010.

4.4. Preparação dos provetes de ensaio

Como já foi mencionado, os ensaios foram realizados com recurso ao viscosímetro de *Brookfield* e teve como procedimento a norma de determinação de viscosidade do betume usando um viscosímetro rotativo, ou seja, a norma EN 13302:2010.

Após a realização do mastique foi preparado o provete de ensaio, sendo que segundo a norma, a agulha deve estar totalmente submersa no provete a ser ensaiado, como se pode ver na figura 27. Assim a quantidade de mastique colocada no recipiente de ensaio deve ser determinada para que essa condição seja cumprida.

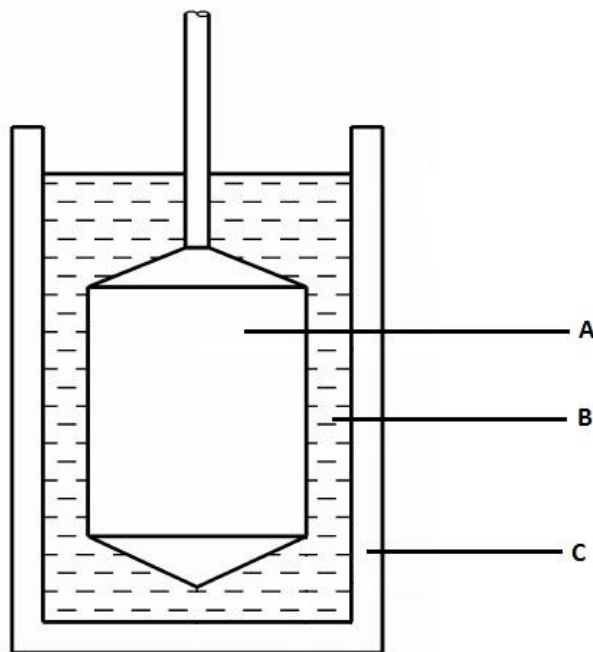


Figura 27: Esquema do provete de ensaio, A – Agulha B – Fluido C – Cápsula de ensaio
Adaptado de: (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 13302:2010, 2010)

Para um betume de massa volúmica igual a $1,03 \text{ m/cm}^3$ é necessário moldar o provete de ensaio com 9 g de betume para que a agulha 21 (agulha utilizada) esteja imersa de forma correta. Assim foi determinada a quantidade de mastique necessária para um provete de ensaio bem elaborado, recorrendo à massa volúmica do mastique que já era conhecida. Na tabela 8 é possível observar os valores de ensaio para os diferentes fileres e as suas taxas de incorporação.

Assim o volume correto de ensaio, foi garantido em todos os ensaios, pois a massa volúmica do mastique é superior à massa volúmica do betume puro.

Filer	Taxa de incorporação (%/volume)	Massa de mastique (g)
A	20	11,9
	30	13,4
B	20	11,1
	30	12,2
C	20	12,5
	30	14,3
D	20	11,8
	30	13,2
E	20	11,9
	30	13,4
F	20	12,0
	30	13,5

Tabela 8: Valores de massa do provete para que o volume de ensaio seja o correto

4.5. Realização do ensaio

Os ensaios foram realizados com recurso ao viscosímetro de *Brookfield (modelo DV-II+)*, acompanhado por um equipamento exterior de controlo de temperatura. Na figura 28 é possível ver os equipamentos e acessórios utilizados na realização dos ensaios.

Foi utilizada a agulha 21 pois esta é a agulha mais indicada para realizar o ensaio nos betumes utilizados em Portugal, uma vez que a classificação das agulhas é realizada de acordo com as temperaturas de ensaio.

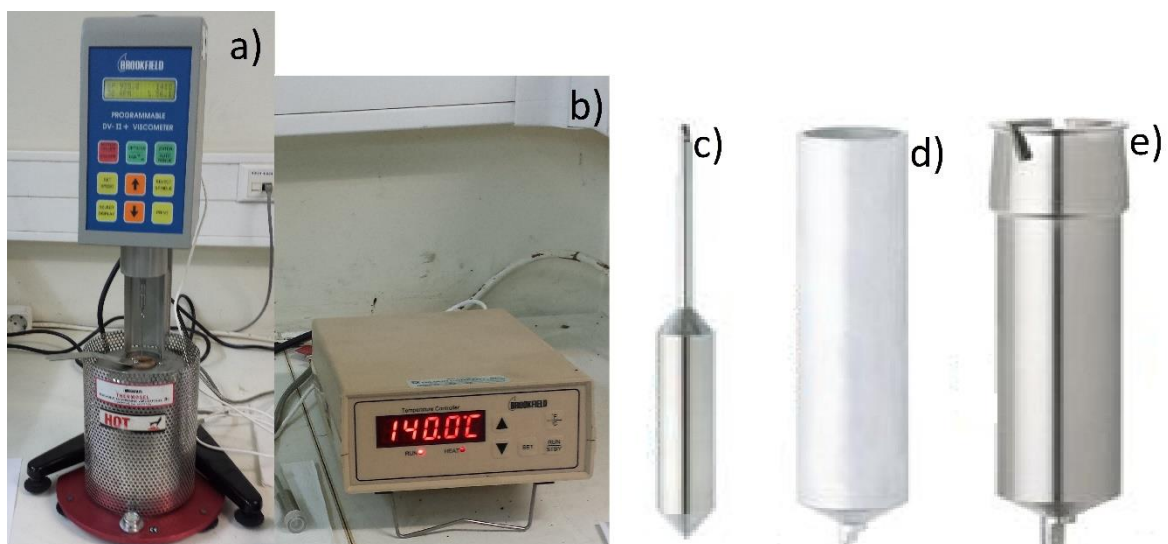


Figura 28: Equipamento utilizado. a) Viscosímetro *Brookfield*, b) equipamento de controlo de temperatura, c) agulha 21, d) cápsula de ensaio, e) cápsula de fechar o equipamento

Recorrendo ao viscosímetro de *Brookfield* foi possível realizar o ensaio. A forma de o executar foi a seguinte:

- Preparação do equipamento e montagem da agulha, com um tempo de pré-aquecimento de cerca de 1h, como é pedido em EN13302:2010;
- Elaboração do mastique betuminoso, como mencionado anteriormente;
- Moldagem do provete de ensaio (figura 29), com a massa necessária de mastique, de acordo com os valores apresentados anteriormente, para que a agulha utilizada esteja imersa da forma correta, de acordo com a norma de ensaio;

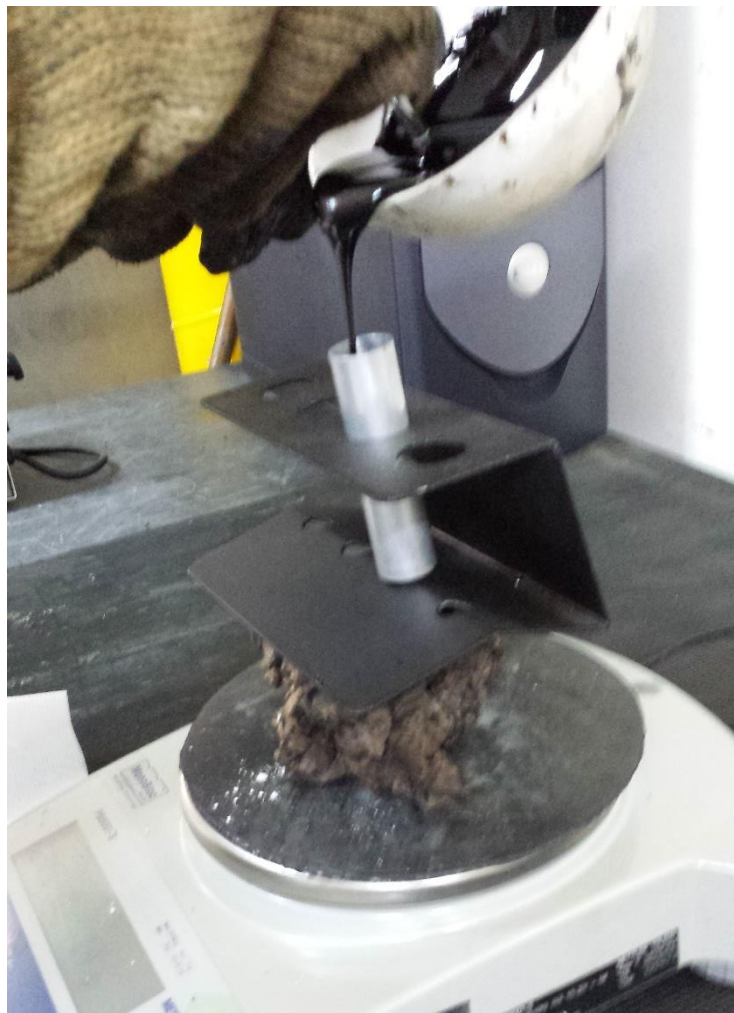


Figura 29: Moldagem do provete de ensaio

- Colocação do provete no equipamento, o viscosímetro de *Brookfield* deve estar a uma rotação baixa, durante o tempo de pré-aquecimento definido na norma 13302:2010 (cerca de 15 min);

- Após o tempo de pré-aquecimento (15 min), há um aumento da rotação para que a percentagem de esforço da mola esteja o mais perto de 50% possível, como se pode ver na figura 30;



Figura 30: Viscosímetro de Brookfield

- Registo do valor da viscosidade, após um período de estabilização de 60 segundos, depois do aumento da rotação.

As leituras foram feitas para cada temperatura, em patamares de 10°C, tendo-se iniciado aos 120°C, até ao máximo de 170°C; isto para cada um dos mastiques produzidos. Foram executados estes patamares de ensaio pois o leque de temperaturas de produção da mistura betuminosa anda pelos 130°C a 150°C, tendo sido aberta a amplitude dessas temperaturas para 120°C até 170°C.

Para cada patamar de temperatura foi moldado um novo provete de ensaio, onde foi repetida toda esta metodologia, para não prolongar em demasia o tempo de ensaio do provete no recipiente que poderia provocar sedimentação.

5. Resultados experimentais

5.1. Introdução

No capítulo 4 são descritas as metodologias de ensaio, já neste são apresentados os resultados obtidos no ensaio para os diferentes mastiques, observando os distintos aumentos da viscosidade quando ao betume puro são adicionados diferentes tipos de fileres.

No subcapítulo 5.2. são apresentados os resultados dos ensaios do betume puro.

Em 5.3. são analisados os valores obtidos nos ensaios, consoante a taxa de incorporação, para todos os mastiques.

No subcapítulo 5.4. são mais uma vez analisados os resultados obtidos, mas desta feita consoante a origem dos fileres.

Já no subcapítulo 5.5. são analisados os resultados para as diferentes taxas de incorporação de filer no mastique em comparação ao betume puro.

5.2. Resultados betume puro

Inicialmente, como modo de comparação, foram encontrados os valores da viscosidade do betume puro, para os mesmos patamares de temperatura.

Na tabela 9 é possível observar os resultados da viscosidade obtidos para os diferentes patamares de temperatura. A tabela 9 faz-se acompanhar por um gráfico, figura 31, onde é possível observar os resultados.

Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)	Viscosidade (Pa.s)
120	1175	1,175
130	650	0,650
140	393	0,393
150	244	0,244
160	162	0,162
170	110	0,110

Tabela 9: Resultados de ensaio do betume puro

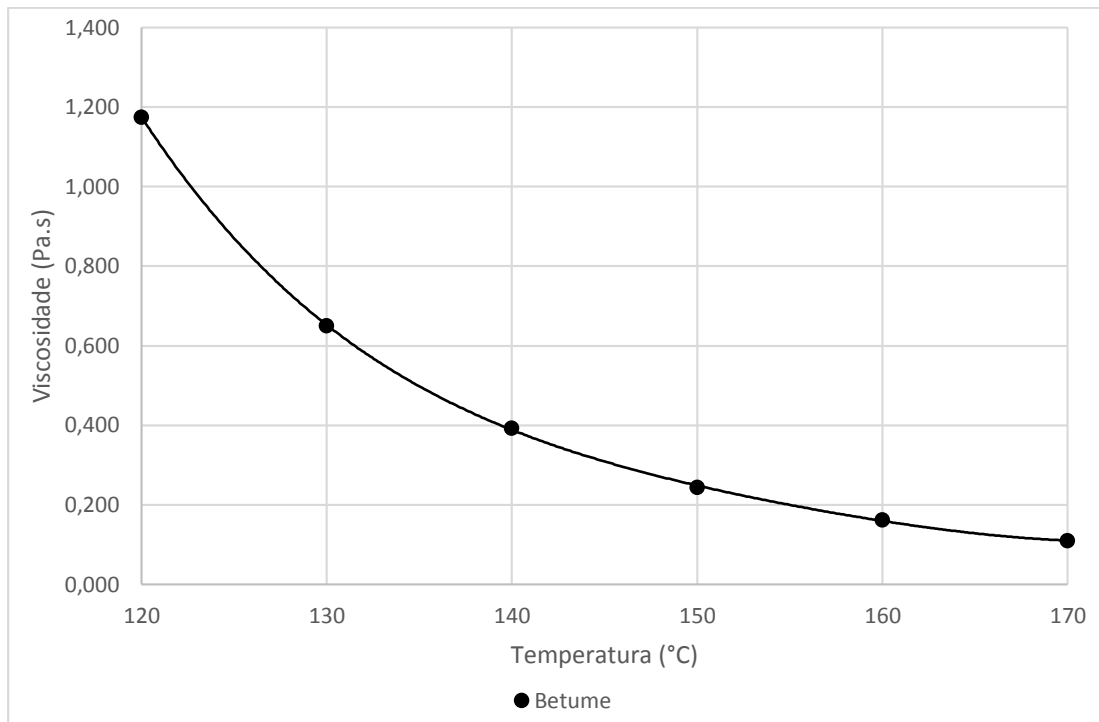


Figura 31: Resultados de ensaio do betume puro

O comportamento do betume observado é idêntico ao comportamento viscoso teórico do betume, baixando a viscosidade com o aumento da temperatura.

5.3. Resultados tendo em conta a taxa de incorporação

5.3.1. Mastiques com taxa de incorporação de 20%

Os valores da viscosidade dinâmica obtidos nos ensaios realizados estão apresentados na tabela 10, e no gráfico apresentado na figura 32, para uma leitura mais fácil.

É possível observar no gráfico presente na figura 32 que os resultados obtidos para taxas de incorporação de 20% não diferem significativamente, independentemente da sua origem. Somente o filer com origem em cal hidratada tem um valor da viscosidade bastante mais alto, isto para temperaturas mais baixas, já para temperaturas mais altas, o valor da viscosidade tende a igualar ao valor da viscosidade do betume puro. O mesmo acontece com todos os outros fileres, em que os valores da viscosidade tendem para o mesmo valor, ou seja, tendem a igualar o valor da viscosidade do betume.

Temperatura (°C)	Betume (Pa.s)	A (20%) (Pa.s)	B (20%) (Pa.s)	C (20%) (Pa.s)	D (20%) (Pa.s)	E (20%) (Pa.s)	F (20%) (Pa.s)
120	1,175	3,567	5,780	3,442	3,492	2,890	4,300
130	0,650	1,783	2,810	1,630	1,804	1,675	1,500
140	0,393	1,033	1,592	0,935	0,997	0,905	0,830
150	0,244	0,647	1,018	0,583	0,605	0,548	0,520
160	0,162	0,438	0,664	0,384	0,415	0,349	0,340
170	0,110	0,321	0,453	0,265	0,283	0,230	0,250

Tabela 10: Resultados dos mastiques com 20% de taxa de incorporação

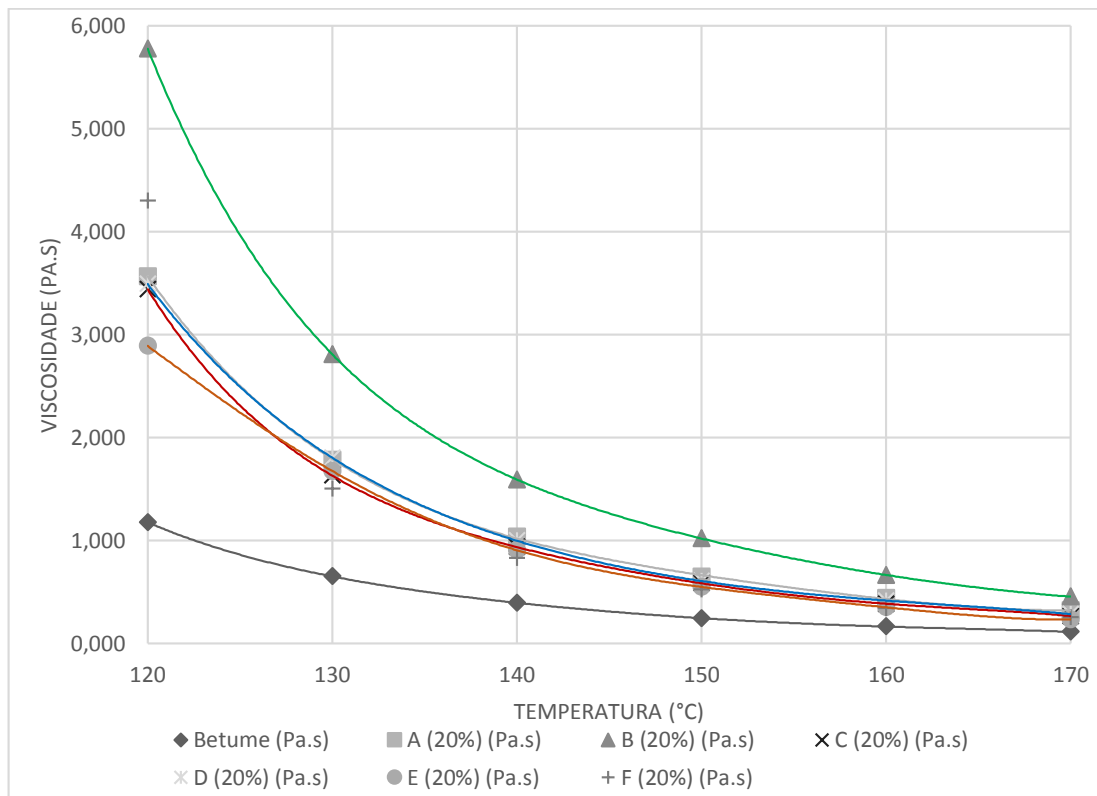


Figura 32: Resultados dos mastiques com 20% de taxa de incorporação

5.3.2. Mastiques com taxa de incorporação de 30%

Nos ensaios dos mastiques com uma taxa de 30% de filler do volume total do mástico, é possível observar na tabela 11 e na figura 33 que têm valores bastantes díspares. Nesta taxa de incorporação, os valores de viscosidade dinâmica obtidos para os diferentes mastiques são bastante diferentes quer do betume puro quer dos restantes mastiques.

Tal como acontece na taxa de incorporação de 20% os valores da viscosidade dinâmica para mastiques com 30% do volume de filler e temperaturas muito elevadas tendem para o valor do betume, ou seja, tendem a formar uma curva da viscosidade idêntica à curva de um betume puro.

Temperatura (°C)	Betume (Pa.s)	A (30%) (Pa.s)	B (30%) (Pa.s)	C (30%) (Pa.s)	D (30%) (Pa.s)	E (30%) (Pa.s)	F (30%) (Pa.s)
120	1,175	14,700		8,400	10,700	4,760	6,550
130	0,650	7,883		3,750	5,525	2,570	3,125
140	0,393	4,260		2,146	2,990	1,513	1,883
150	0,244	2,325		1,310	1,750	0,920	1,057
160	0,162	1,440	4,700	0,838	1,173	0,592	0,674
170	0,110	0,998	3,486	0,562	0,818	0,394	0,482

Tabela 11: Resultados dos mastiques com 30% de taxa de incorporação

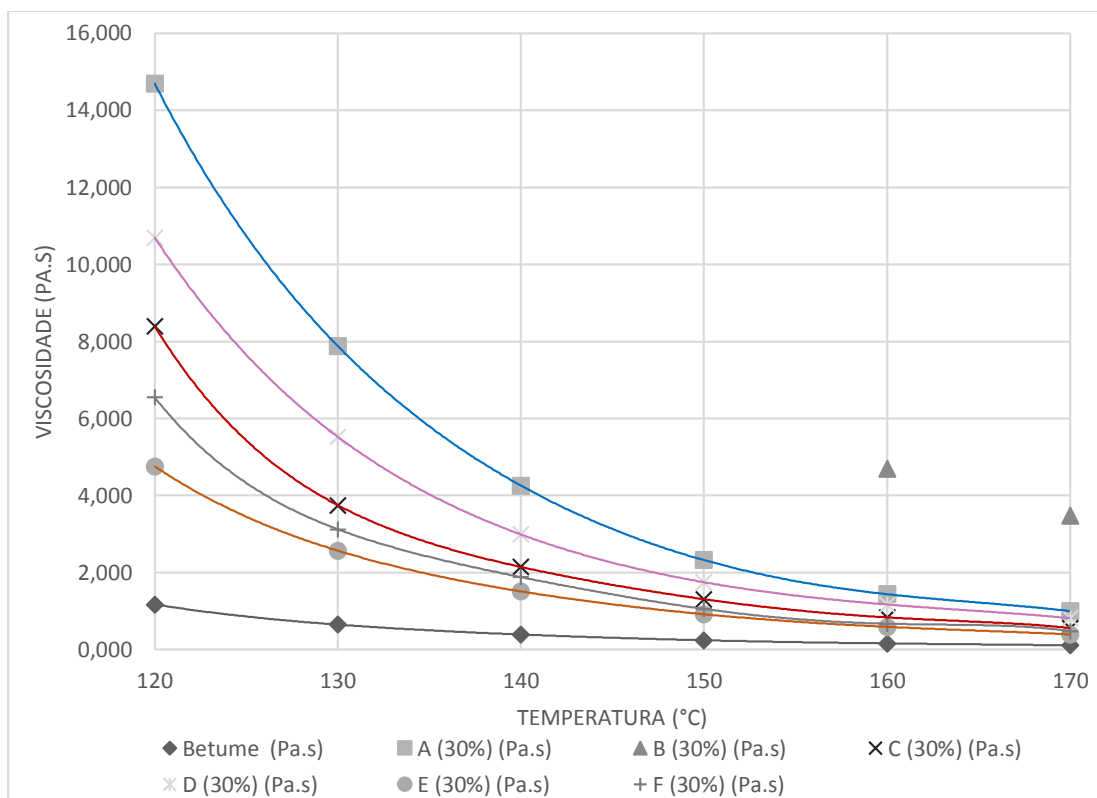


Figura 33: Resultados dos mastiques com 30% de taxa de incorporação

5.4. Resultados tendo em conta a origem do filer

5.4.1. Mastique com cal hidráulica

Na tabela 12 é possível observar os valores obtidos nos ensaios feitos com o mastique produzido com o filer com origem em cal hidráulica, para facilitar a análise é apresentado o gráfico, presente na figura 34. Com a análise deste gráfico é possível concluir que os valores da viscosidade dinâmica do mastique produzido com o filer A, para um volume de 20% de filer, até 140°C são bastante diferentes dos valores do betume puro, mas quando há um aumento da temperatura os valores quase se igualam. Já quando é analisado o mastique com uma taxa de incorporação de 30% percebe-se que os valores da viscosidade do mastique aumentam, sendo bem distintos dos valores do betume puro e até do mastique com 20% de filer.

No anexo A é possível observar as tabelas completas que deram origem à tabela 12 e ao gráfico presente na figura 34, para os mastiques com 20% de filer A e 30% de filer A, respetivamente.

Temperatura (°C)	Betume (Pa.s)	A (20%) (Pa.s)	A (30%) (Pa.s)
120	1,175	3,567	14,700
130	0,650	1,783	7,883
140	0,393	1,033	4,260
150	0,244	0,647	2,325
160	0,162	0,438	1,440
170	0,110	0,321	0,998

Tabela 12: Resultados obtidos com o filer A

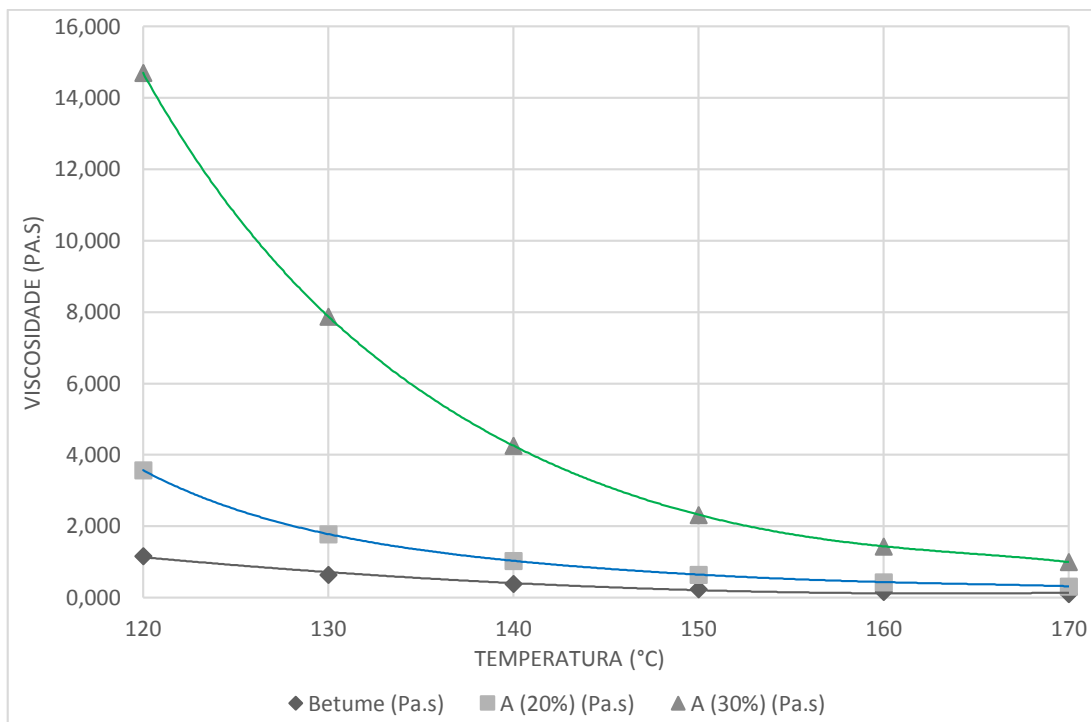


Figura 34: Resultados obtidos com o filer A

5.4.2. Mastique com cal hidratada

Na tabela 13 é possível observar os valores obtidos nos ensaios realizados com o mastique produzido com filer B.

Recorrendo ao gráfico da figura 35 é possível observar que a cal hidratada provoca um aumento da viscosidade bastante elevado, para temperaturas menores, isto quando a taxa de incorporação é de 20%.

Para uma taxa de incorporação de 30%, existem resultados apenas a partir de 160°C, pois para temperaturas inferiores não foi possível moldar o provete de ensaio, devido ao mastique produzido com a cal hidratada ser demasiado viscoso, isto porque o filer tem uma granulometria muito fina e as partículas que o constituem têm elevada porosidade. Já com o aumento da temperatura o mastique fica mais fluido, permitindo determinar valores de viscosidade.

As tabelas completas que derem origem à tabela 13 e ao gráfico (figura 35) seguem em anexo (Anexo B), para 20 e 30% de incorporação respetivamente.

Temperatura (°C)	Betume (Pa.s)	B (20%) (Pa.s)	B (30%) (Pa.s)
120	1,175	5,780	
130	0,650	2,810	
140	0,393	1,592	
150	0,244	1,018	
160	0,162	0,664	4,700
170	0,110	0,453	3,486

Tabela 13: Resultados obtidos com o filer B

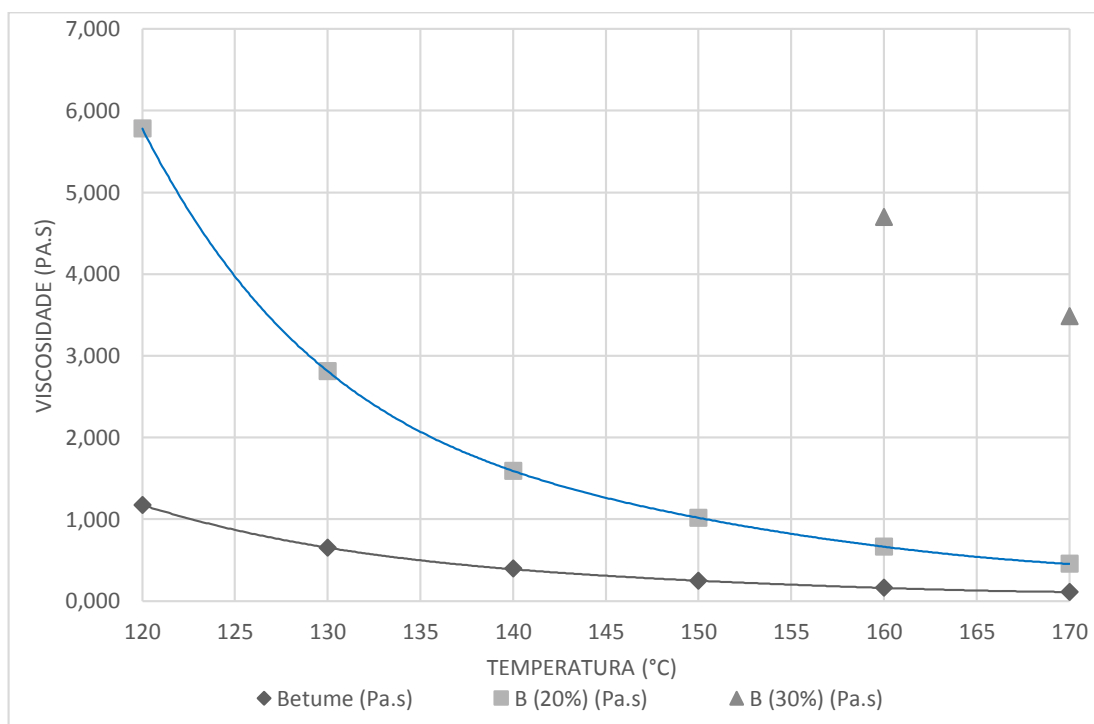


Figura 35: Resultados obtidos com o filer B

5.4.3. Mastique com cimento portland

Realizado a partir da tabela 14, no gráfico da figura 36 é possível observar que os mastiques realizados com cimento portland provocam um aumento elevado da viscosidade, para temperaturas mais baixas, mas quando se observa os valores para 170°C, conclui-se que estes são análogos, para qualquer uma das variáveis apresentadas.

No caso da taxa de incorporação de 30%, na temperatura de 120°C, há um aumento acentuado da viscosidade dinâmica, em comparação com o valor dessa mesma viscosidade do betume puro.

Em anexo, Anexo C para os mastiques com 20% e 30% de filer C, respetivamente, estão os resultados obtidos nos ensaios realizados, e que deram origem ao gráfico apresentado na figura 36.

Temperatura (°C)	Betume (Pa.s)	C (20%) (Pa.s)	C (30%) (Pa.s)
120	1,175	3,442	8,400
130	0,650	1,630	3,750
140	0,393	0,935	2,146
150	0,244	0,583	1,310
160	0,162	0,384	0,838
170	0,110	0,265	0,562

Tabela 14: Resultados obtidos com o filer C

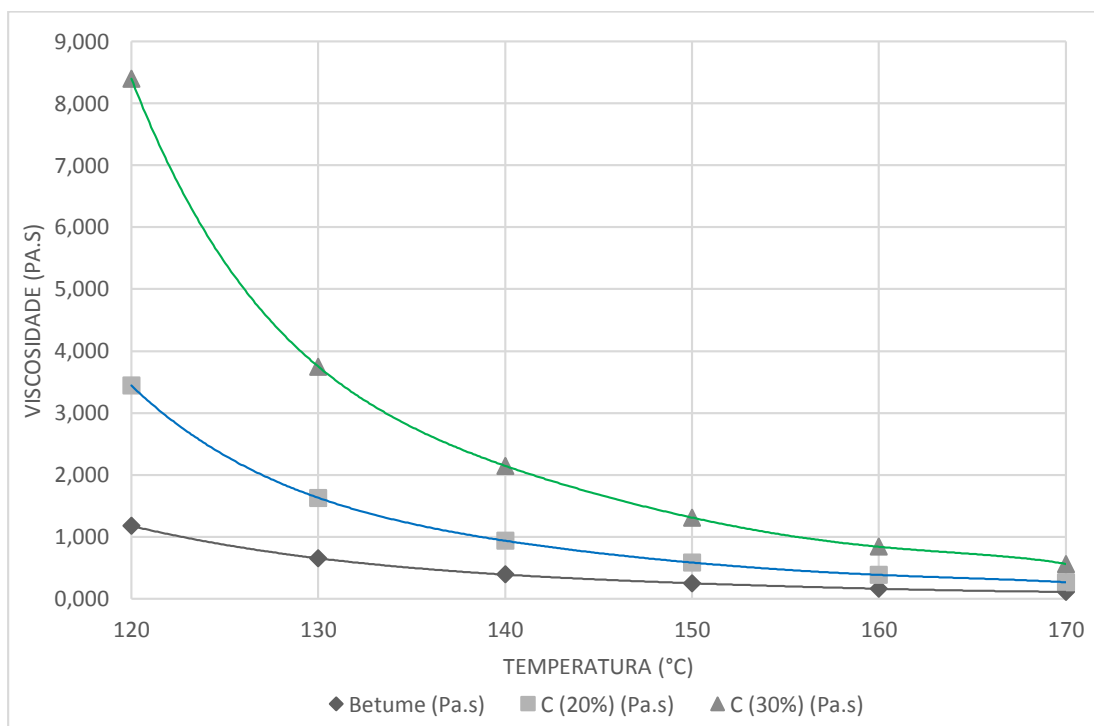


Figura 36: Resultados obtidos com o filer C

5.4.4. Mastique com filer granítico recuperado

Na tabela 15 é possível observar os valores obtidos no mastique produzido com filer com origem em granito recuperado em centrais de misturas betuminosas.

No caso do mastique produzido com o filer D quando o mastique tem 30% de filer, tem um valor de viscosidade muito elevado para os 120°C, seguido de uma redução acentuada desse mesmo valor, como é possível observar no gráfico presente na figura 37.

Quanto ao mastique com 20% de filer os valores de viscosidade dinâmica sofrem um leve aumento nas temperaturas baixas, mas quando há um aumento da temperatura este mastique tem valores idênticos aos do betume puro.

No anexo D estão as tabelas completas com os valores dos ensaios, que deram origem à tabela 15, para uma taxa de incorporação de 20% e de 30%, respetivamente.

Temperatura (°C)	Betume (Pa.s)	D (20%) (Pa.s)	D (30%) (Pa.s)
120	1,175	3,492	10,700
130	0,650	1,804	5,525
140	0,393	0,997	2,990
150	0,244	0,605	1,750
160	0,162	0,415	1,173
170	0,110	0,283	0,818

Tabela 15: Resultados obtidos com o filer D

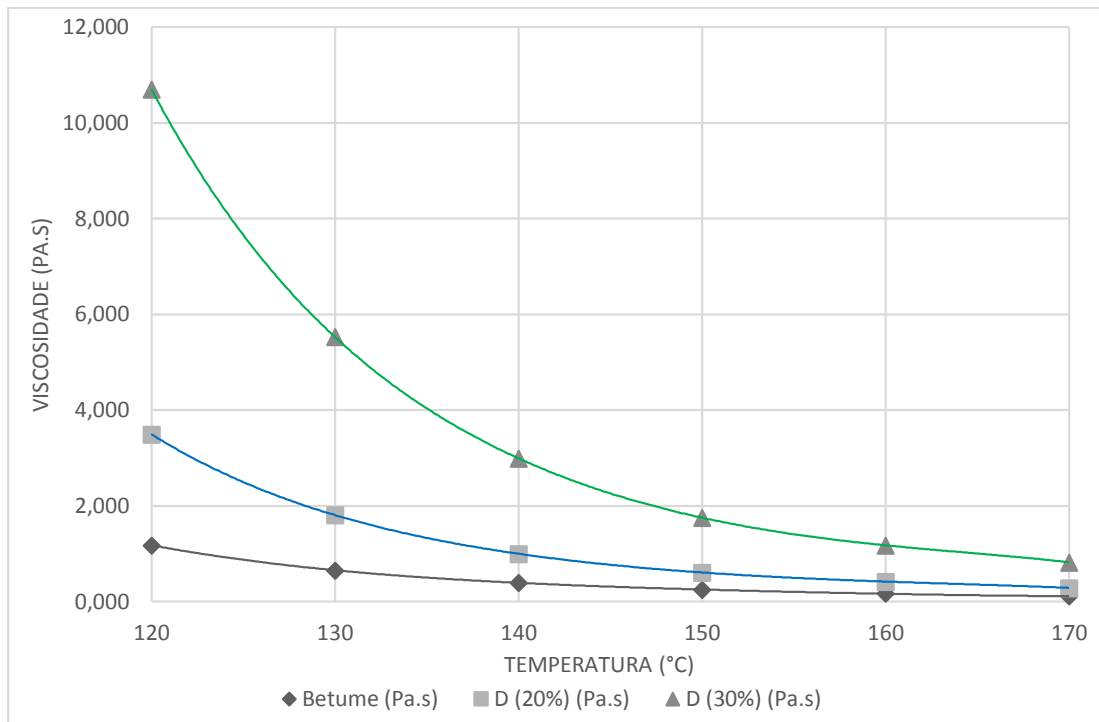


Figura 37: Resultados obtidos com o filer D

5.4.5. Mastique com filer calcário recuperado

A tabela 16 mostra os valores de viscosidade dinâmica obtidos para o mastique criado com o filer calcário com origem em centrais de misturas betuminosas (filer E).

Este é o mastique que tem os valores de viscosidade mais parecidos com os valores do betume, havendo um ligeiro aumento nas temperaturas baixas, mas uma tendência a igualar a viscosidade do betume quando há um aumento da temperatura. No fundo é o observado em praticamente todos os mastiques, mas este com a particularidade deste comportamento também ser observado no mastique com 30% de filer (figura 38).

O gráfico presente na figura 38 foi desenhado tendo como inspiração as tabelas presentes no Anexo E.

Temperatura (°C)	Betume (Pa.s)	E (20%) (Pa.s)	E (30%) (Pa.s)
120	1,175	2,890	4,760
130	0,650	1,675	2,570
140	0,393	0,905	1,513
150	0,244	0,548	0,920
160	0,162	0,349	0,592
170	0,110	0,230	0,394

Tabela 16: Resultados obtidos com o filer E

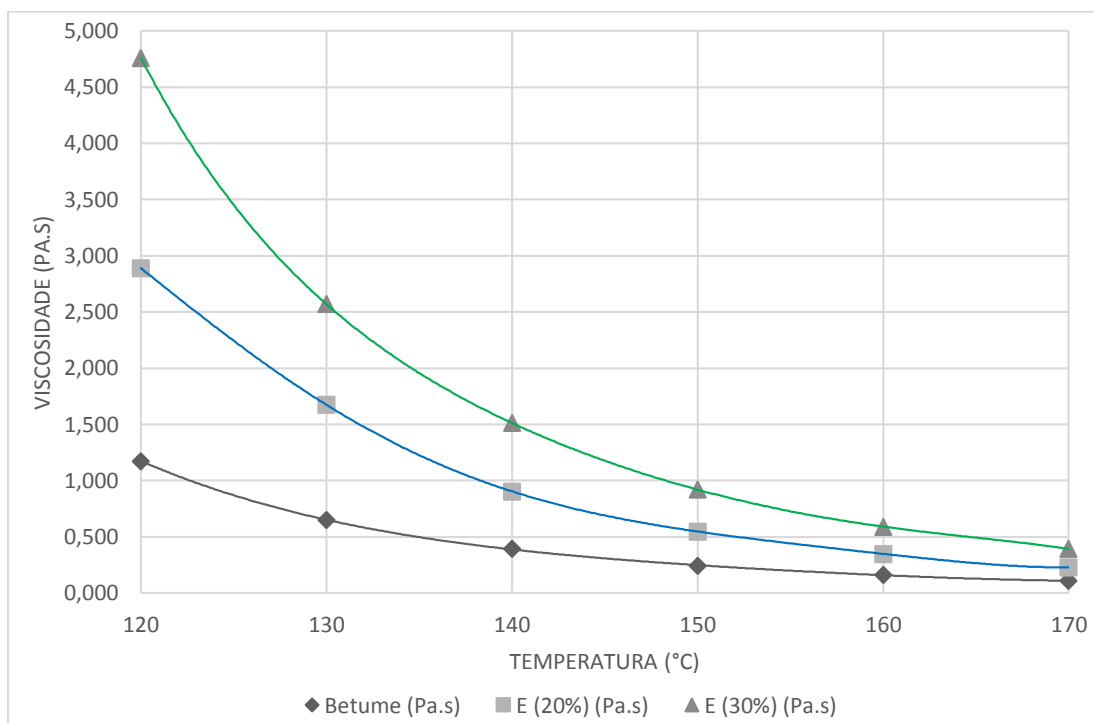


Figura 38: Resultados obtidos com o filer E

5.4.6. Mastique com pó calcário

O filer F com origem em pó calcário tem um comportamento idêntico ao dos fileres anteriores, como se pode ver na tabela 17, que se faz acompanhar pelo gráfico presente na figura 39.

Com recurso ao gráfico (figura 39) é possível observar que o aumento da viscosidade do mastique produzido com o filer F, para as temperaturas mais baixas foi bastante grande, enquanto que para temperaturas mais elevadas a viscosidade deste mastique tende a igualar o valor da viscosidade dinâmica do betume puro.

No anexo F é possível ver as tabelas completas que deram origem à tabela 17 e ao gráfico apresentado na figura 39.

Temperatura (°C)	Betume (Pa.s)	F (20%) (Pa.s)	F (30%) (Pa.s)
120	1,175	4,300	6,550
130	0,650	1,500	3,125
140	0,393	0,830	1,883
150	0,244	0,520	1,057
160	0,162	0,340	0,674
170	0,110	0,250	0,482

Tabela 17: Resultados obtidos com o filer F

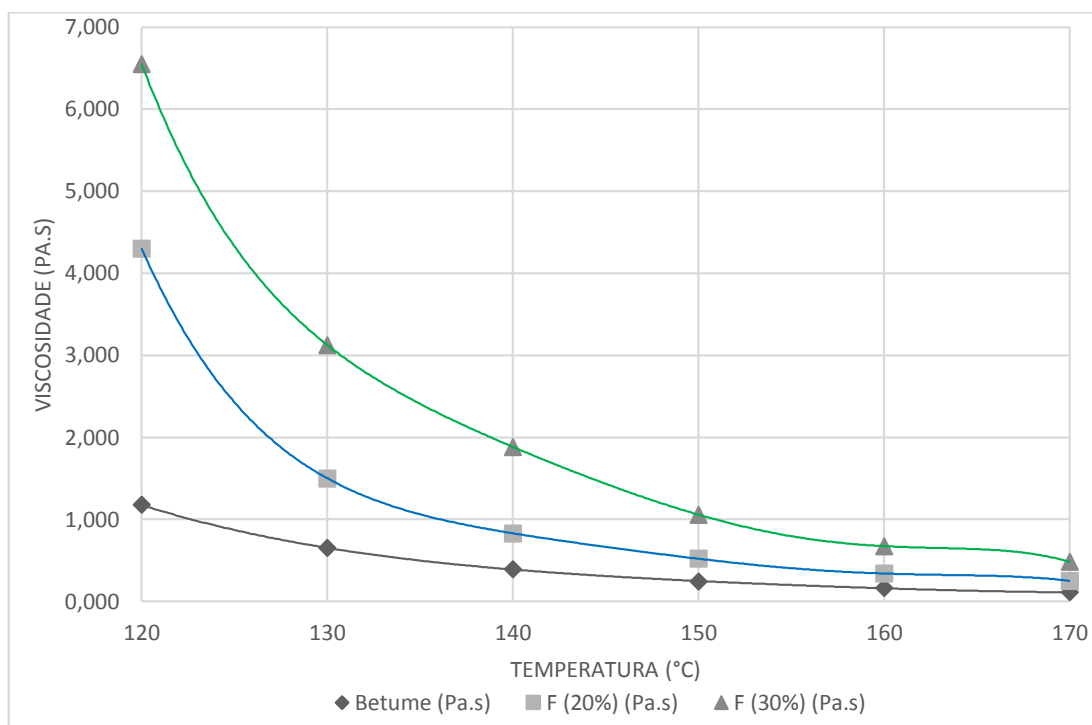


Figura 39: Resultados obtidos com o filer F

5.5. Variação da viscosidade betume/mastique

O incremento da viscosidade observado entre o mastique e o betume é bastante importante para que mais facilmente seja observado qual o aumento da viscosidade dinâmica dos mastiques em relação à mesma viscosidade do betume puro. A fórmula de cálculo da viscosidade relativa está apresentada de seguida na equação 8.

$$\text{Viscosidade relativa} = \frac{Vm}{Vb}$$

[8]

Vm = Viscosidade do mastique (Pa.s)

Vb = Viscosidade do betume (Pa.s)

Equação 8: Fórmula de cálculo da viscosidade relativa

5.5.1. Taxa de incremento betume/mastique com 20% de incorporação

Na tabela 18 é possível observar o acréscimo do valor da viscosidade do mastique em relação à viscosidade dinâmica do betume puro.

No gráfico presente na figura 4 é possível observar que no geral todos os mastiques aumentaram entre duas a três vezes o valor da viscosidade, exceto no mastique produzido com cal hidratada para o qual se observa um aumento da viscosidade de quatro vezes.

Temperatura (°C)	A (20%)	B (20%)	C (20%)	D (20%)	E (20%)	F (20%)
120	3,036	4,919	2,929	2,972	2,460	3,660
130	2,743	4,323	2,508	2,775	2,577	2,308
140	2,628	4,051	2,379	2,536	2,303	2,112
150	2,652	4,172	2,389	2,480	2,246	2,131
160	2,701	4,099	2,372	2,562	2,156	2,099
170	2,914	4,114	2,409	2,568	2,086	2,273

Tabela 18: Viscosidade relativa dos mastiques para uma taxa de incorporação de 20%

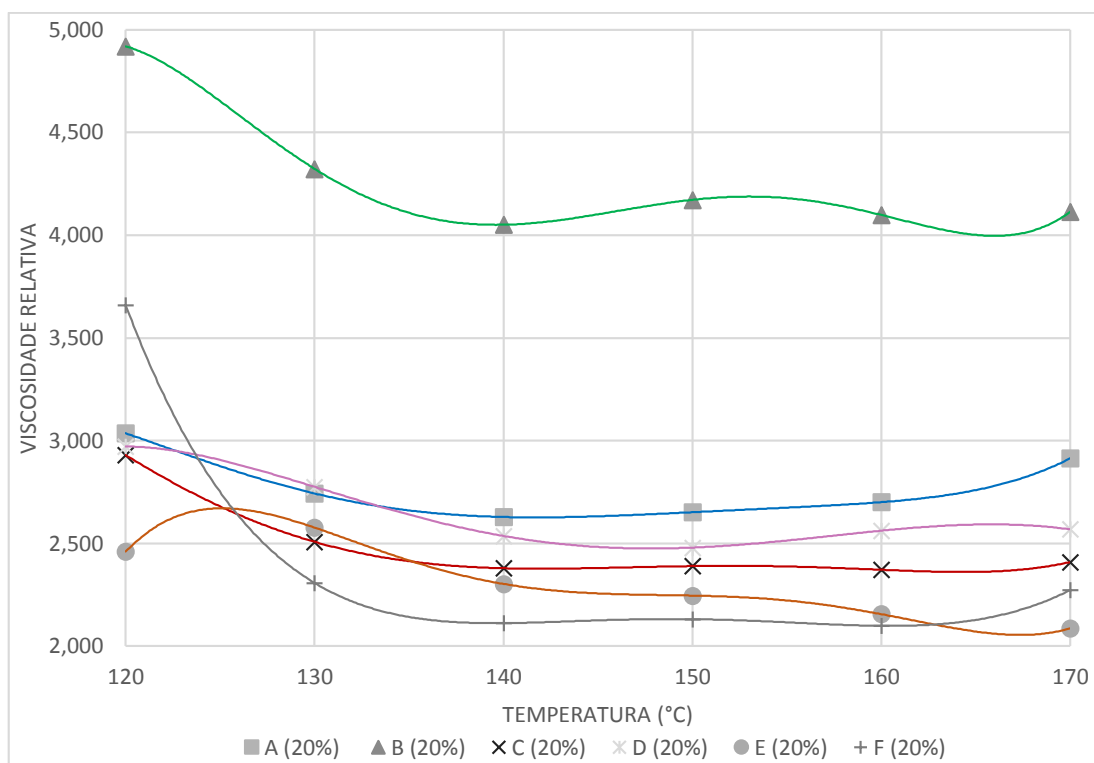


Figura 40: Viscosidade relativa dos mastiques para uma taxa de incorporação de 20%

5.5.2. Taxa de incremento betume/mastique com 30% de incorporação

Para a taxa de incorporação de 30% os valores são bastante díspares em comparação com os valores do betume puro (tabela 19).

Na figura 41 é possível observar o gráfico da viscosidade relativa dos mastiques com 30% de filer, e pode-se ver que mais uma vez o mastique composto com o filer calcário recuperado é o que tem o valor mais parecido com o valor do betume. Os restantes mastiques têm valores de viscosidade dinâmica bastante mais altos que a viscosidade do betume.

Temperatura (°C)	A (30%)	B (30%)	C (30%)	D (30%)	E (30%)	F (30%)
120	12,511		7,149	9,106	4,051	5,574
130	12,128		5,769	8,500	3,954	4,808
140	10,840		5,461	7,608	3,850	4,791
150	9,529		5,369	7,172	3,770	4,332
160	8,889	29,012	5,175	7,241	3,652	4,160
170	9,075	31,691	5,109	7,439	3,582	4,379

Tabela 19: Viscosidade relativa dos mastiques para uma taxa de incorporação de 30%

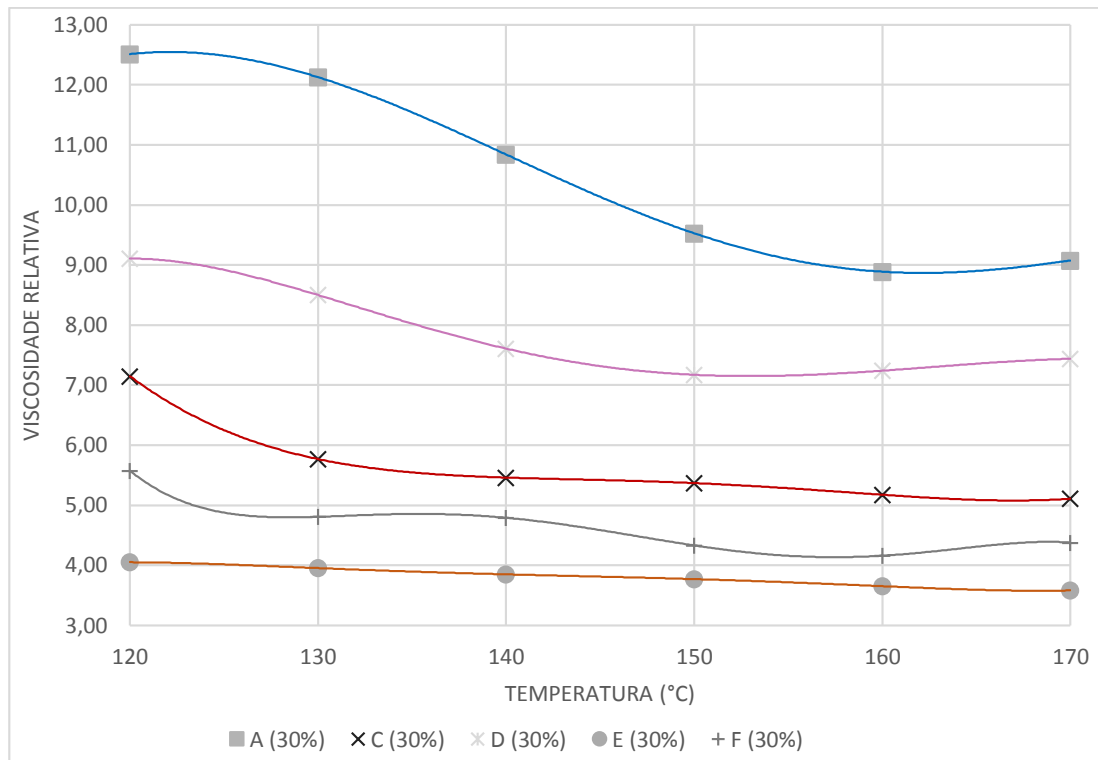


Figura 41: Viscosidade relativa dos mastiques para uma taxa de incorporação de 30%

Os resultados conseguidos do mastique com o filer B (cal hidratada) foram excluídos do gráfico, apresentado na figura 41, pois não era possível observar a curva completa, pois como já foi mencionado, o mastique realizado com a cal hidratada era tão viscoso que não permitiu a determinação de valores, para temperaturas mais baixas.

6. Considerações finais

6.1. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi o de estudar as alterações sofridas pela viscosidade, do mesmo betume, quando a este são adicionados fileres de diferentes origens, e avaliar as alterações que os fileres provocam no masticue, quando têm diferentes taxas de incorporação.

Para além de todo o trabalho e o estudo laboratorial sobre a adequabilidade do equipamento e do método de ensaio ao caso dos fileres, foi realizado um trabalho experimental que permitiu retirar diversas conclusões, que são indicadas de seguida:

- O equipamento e o método de ensaio foram estabelecidos para a quantificação da viscosidade dos betumes, não sendo regularmente empregue em ensaios realizados a masticues. Quer o equipamento quer o método de ensaio mostram-se adequados para gamas de temperaturas entre os 120 e os 170°C e para taxas de incorporação até 0,3, relação volumétrica entre o filer e o masticue, para a generalidade dos fileres ensaiados. Apenas para o masticue no qual foi utilizada a cal hidratada se verificaram limitações não tendo sido possível obter resultados para a taxa de incorporação de 0,3 e para temperatura abaixo dos 160°C;
- A viscosidade quer do betume quer do masticue é fortemente influenciada pela temperatura;
- O método não é adequado para taxas de incorporação elevadas, principalmente nos patamares de temperaturas mais baixas, dada a elevada viscosidade do masticue;
- Desaconselha-se a realização de ensaios com variação de temperatura realizados no mesmo provete pois pode ocorrer a sedimentação do filer durante o ensaio, nomeadamente nos patamares de temperatura mais elevados, comprometendo os resultados obtidos;
- Quanto maior a taxa de incorporação de filer maior o valor da viscosidade para a mesma temperatura, independentemente da origem do filer;
- O filer com origem em cal hidratada provoca grandes aumentos da viscosidade, comparando com os valores obtidos nos masticues das outras origens, para a mesma taxa de incorporação e temperatura;

- O cimento Portland e o filer calcário recuperado têm valores análogos para a viscosidade, com valores de 20% do volume de filer no mastique;
- Apesar de terem origem em calcário, os fileres C e E, para taxas de incrementação de 30%, o filer calcário recuperado (filer C) tem valores de viscosidade bastante inferiores ao do filer com origem em cimento Portland (filer E);
- Para uma taxa de incorporação de 20%, apesar de terem origens distintas os fileres D e E, granítico e calcário, respetivamente, conduzem a um aumento idêntico nos valores da viscosidade, para as mesmas temperaturas;
- Para taxas de incorporação de 20% os valores de viscosidade aumentam cerca de duas a três vezes em relação ao valor da viscosidade do betume puro, isto para praticamente todos os mastiques, com exceção do filer produzido com mastique com cal hidratada;
- Para taxas de incorporação de 30%, os valores da taxa de incremento betume-mastique variam a origem do filer;
- Quando 30% do volume do mastique é filer, conclui-se que os fileres de origem calcária provocam um menor aumento dos valores da viscosidade, já quando a origem é granítica o aumento da viscosidade é maior, isto comparando com o betume puro.

6.2. Futuros desenvolvimentos

Para futuros desenvolvimentos são sugeridos ensaios a mastiques diferentes, ou seja, são propostos ensaios a mastiques produzidos com fileres de origens diferentes dos fileres ensaiados, assim como é sugerida a utilização de betumes de diferentes tipos, como por exemplo betumes de pavimentação 50/70, betumes modificados e betumes borracha.

Sugere-se igualmente um estudo procurando determinar se a suspeita de sedimentação do filer se observa realmente, a partir de que temperatura existe esse risco e em que fileres a sedimentação é mais observada.

Será também importante avaliar de que forma a variação da viscosidade do mastique em função do filer se repercute na maior ou menor trabalhabilidade da mistura betuminosa, procurando prever da maior ou menor dificuldade no espalhamento e compactação da mistura durante a execução da camada de mistura betuminosa.

Referências Bibliográficas

Autor desconhecido. Conceitos básicos relacionados com a mecânica dos fluidos. Universidade Técnica de Lisboa. In: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779576341609/Capitulo%20I.pdf>

Bardini V. S. S, Klinsky L. M. G. & Fernandes Jr. J. L., 2009. A importância do filer para o bom desempenho de misturas asfálticas. Departamento de transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo. (Relatório técnico)

Barnes H. A., Hutton J. F. & Walters F. R. S., 1989. An introduction to Rheology. Elsevier Science Publisherb. b. v., Amsterdam.

Barros E.S.S., 2012. Comportamento dos betumes em função da temperatura. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. (Tese de mestrado).

Brookfield Engineering Laboratories. More Solutions to Sticky Problems. Middleboro

Catriel G., 2008. Reologia em ligantes asfálticos. Faculdade Regional La Plata, Universidade Tecnológica Nacional.

Cavadas, A. M. S, 2008. Hidrodinâmica de jactos de impacto confinados escoamento de fluidos newtonianos e não-Newtonianos. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. (Tese de Douturamento).

CEPSA, 2006. Manual de Pavimentação. Barcelona

Ferreira, F., 2009. Reologia dos fluidos.

Hernández, B. E. S., 2008. Viscosímetro de Bola. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica do Instituto Politécnico Nacional. (Tese de Mestrado)

InIR, 2009. Construção e Reabilitação de Pavimentos - Ligantes Betuminosos.

InIR. Directivas para a Concepção de Pavimentos.

Matos, P. G. S., 2012. Temperaturas de Fabrico e Compactação de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados: Interação Agregado-Betume. Universidade Nova de Lisboa. (Tese de Mestrado)

Moser, G., 2011. Reologia. Centro de Ciencias Rurais, Universidade Federal de Santa Maria.

Nunes, V. M. B, 2010. Química das Superfícies e Interfaces – Reologia. Departamento de Engenharia Química e do Ambiente, Instituto Politécnico de Tomar.

Peralta, E., Silva, H. R. D., 2008. Avaliação da interação entre o betume, a borracha e o filer em misturas betuminosas. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.

Pereira, R. X. L., 2010. Misturas Betuminosas Temperadas: Estudo da Interação aditivo-ligante. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. (Tese de Mestrado).

Santos, A. F. R., 2011. Temperaturas de Fabrico e Compactação de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados. Faculdade de Ciencias e Tecnolia da Universidade Nova de Lisboa. (Tese de Mestrado).

Silva, H. M. R. D., 2005. Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique. Escola de Engenharia da Universidade do Minho. (Tese de Doutoramento).

Viswanath, D. S., Ghosh, T. K., Prasad, D. H. L., Dutt, N. V. K. & Rani, K. Y., 2007. Viscosity of Liquids - Theory, Estimation, Experimente, and Data. Springer, Dordrecht.

Yildirim, Y. Solaimanian, M. & Kennedy, T. W., 2000. Mixing and Compaction Tempereatures for hot Mix Asphart Concrete. Austin.

Normas

CEN – European Commitee for Standardization, 2005. Bitume and bituminous binders, Framework for specifying cationic bituminous emulsions, EN13808:2005. Brussels.

CEN – European Commitee for Standardization, 2006. Bitumes and bituminous binders, Specifications for hard paving grade bitumens, EN 13924:2006. Brussels.

CEN – European Commitee for Standardization, 2007. Bitumen and bituminous binders - Determination of dynamic viscosity by vacuum capillary, EN 12596:2007. Brussels.

CEN – European Commitee for Standardization, 2010. Bitume and bituminous binders – Framework Specifions for polymer modified bitumens, EN14023:2010. Brussels,

CEN – European Commitee for Standardization, 2010. Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens, EN 12591:2010. Brussels.

CEN – European Commitee for Standardization, 2010. Bitumen ande bituminous binders - Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using spindle apparatus, EN 13302:2010. Brussels.

NP – Norma portuguesa, 2004. Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação, NP EN 13043:2004.

Web References

ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014. Breve Introdução à Reologia. In:
<http://www.isel.pt/fisica/labreologia.html>

Porto Editora, 2003-2014. Infopédia - Enciclopédia e Dicionário Porto Editora. In:
<http://www.infopedia.pt/>.

SOCI. In: <http://www.soci.org/>

Wildman. In: <http://www.widman.biz/>.

Anexo A: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique
produzido com o filer A

Resultados obtidos no ensaio do mastique com o filer A para 20% de incorporação

Referência do betume utilizado	35/50 Betume 1 GALP	
Referência do Filer utilizado	Filer A	
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	2,70
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	20
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,364
Massa de mastique pretendida	g	100
Volume de mastique correspondente	cm ³	73,31
Massa do betume a utilizar	g	60,41
Massa do Filer a utilizar	g	39,59
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	11,92
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	3567
Viscosidade	Pa.s	3,567
Rotações por minuto	RPM	6
Taxa de esforço	%	42,80
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1783
Viscosidade	Pa.s	1,783
Rotações por minuto	RPM	12,00
Taxa de esforço	%	42,80
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1033
Viscosidade	Pa.s	1,033
Rotações por minuto	RPM	20
Taxa de esforço	%	41,3
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	647
Viscosidade	Pa.s	0,647
Rotações por minuto	RPM	50
Taxa de esforço	%	64,7
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	437,5
Viscosidade	Pa.s	0,438
Rotações por minuto	RPM	60
Taxa de esforço	%	52,5
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	320,5
Viscosidade	Pa.s	0,321
Rotações por minuto	RPM	100
Taxa de esforço	%	64,1

Resultados obtidos no ensaio do mastique com o filer A para 30% de incorporação

Referência do betume utilizado	35/50 Betume 1 GALP	
Referência do Filer utilizado	Filer A	
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	2,70
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	30
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,531
Massa de mastique pretendida	g	100
Volume de mastique correspondente	cm ³	65,32
Massa do betume a utilizar	g	47,09
Massa do Filer a utilizar	g	52,91
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	13,38
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	14700
Viscosidade	Pa.s	14,700
Rotações por minuto	RPM	2
Taxa de esforço	%	58,80
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	7883
Viscosidade	Pa.s	7,883
Rotações por minuto	RPM	3,00
Taxa de esforço	%	47,30
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	4260
Viscosidade	Pa.s	4,260
Rotações por minuto	RPM	5
Taxa de esforço	%	42,6
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	2325
Viscosidade	Pa.s	2,325
Rotações por minuto	RPM	10
Taxa de esforço	%	46,5
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1440
Viscosidade	Pa.s	1,440
Rotações por minuto	RPM	20
Taxa de esforço	%	57,6
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	998,3
Viscosidade	Pa.s	0,998
Rotações por minuto	RPM	30
Taxa de esforço	%	59,9

Anexo B: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique
produzido com o filer B

Resultados obtidos ensaio do mastique com o filer B para 20% de incorporação

Referência do betume utilizado	35/50 Betume 1 GALP	
Referência do Filer utilizado	Filer B	
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	2,24
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	20
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,272
Massa de mastique pretendida	g	100
Volume de mastique correspondente	cm ³	78,62
Massa do betume a utilizar	g	64,78
Massa do Filer a utilizar	g	35,22
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	11,11
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	5780
Viscosidade	Pa.s	5,780
Rotações por minuto	RPM	5
Taxa de esforço	%	57,80
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	2810
Viscosidade	Pa.s	2,810
Rotações por minuto	RPM	10,00
Taxa de esforço	%	56,20
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1592
Viscosidade	Pa.s	1,592
Rotações por minuto	RPM	20
Taxa de esforço	%	63,7
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1018
Viscosidade	Pa.s	1,018
Rotações por minuto	RPM	30
Taxa de esforço	%	61,1
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	664
Viscosidade	Pa.s	0,664
Rotações por minuto	RPM	50
Taxa de esforço	%	66,4
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	452,5
Viscosidade	Pa.s	0,453
Rotações por minuto	RPM	60
Taxa de esforço	%	54,3

Resultados obtidos ensaio do mastique com o filer B para 30% de incorporação

Referência do betume utilizado	35/50 Betume 1 GALP	
Referência do Filer utilizado	Filer B	
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	2,24
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	30
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,393
Massa de mastique pretendida	g	100
Volume de mastique correspondente	cm ³	71,79
Massa do betume a utilizar	g	51,76
Massa do Filer a utilizar	g	48,24
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	12,17
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	Erro
Viscosidade	Pa.s	
Rotações por minuto	RPM	
Taxa de esforço	%	
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	Erro
Viscosidade	Pa.s	
Rotações por minuto	RPM	
Taxa de esforço	%	
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	Erro
Viscosidade	Pa.s	
Rotações por minuto	RPM	
Taxa de esforço	%	
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	Erro
Viscosidade	Pa.s	
Rotações por minuto	RPM	
Taxa de esforço	%	
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	4700
Viscosidade	Pa.s	4,700
Rotações por minuto	RPM	5
Taxa de esforço	%	47
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	3485
Viscosidade	Pa.s	3,486
Rotações por minuto	RPM	6
Taxa de esforço	%	41,8

Anexo C: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique
produzido com o filer C

Resultados obtidos no ensaio do mastique com o filer C para 20% de incorporação

Referência do betume utilizado	35/50 Betume 1 GALP	
Referência do Filer utilizado	Filer C	
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	3,06
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	20
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,436
Massa de mastique pretendida	g	100
Volume de mastique correspondente	cm ³	69,64
Massa do betume a utilizar	g	57,4
Massa do Filer a utilizar	g	42,6
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	12,5
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	3442
Viscosidade	Pa.s	3,442
Rotações por minuto	RPM	6
Taxa de esforço	%	41,30
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1630
Viscosidade	Pa.s	1,630
Rotações por minuto	RPM	20,00
Taxa de esforço	%	65,20
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	935
Viscosidade	Pa.s	0,935
Rotações por minuto	RPM	30
Taxa de esforço	%	56,1
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	583
Viscosidade	Pa.s	0,583
Rotações por minuto	RPM	50
Taxa de esforço	%	58,3
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	384,2
Viscosidade	Pa.s	0,384
Rotações por minuto	RPM	60
Taxa de esforço	%	46,1
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	265
Viscosidade	Pa.s	0,265
Rotações por minuto	RPM	100
Taxa de esforço	%	53

Resultados obtidos no ensaio do mastique com o filer C para 30% de incorporação

Referência do betume utilizado	35/50 Betume 1 GALP	
Referência do Filer utilizado	Filer C	
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	3,06
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	30
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,639
Massa de mastique pretendida	g	100
Volume de mastique correspondente	cm ³	61,01
Massa do betume a utilizar	g	44,0
Massa do Filer a utilizar	g	56,0
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	14,3
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	8400
Viscosidade	Pa.s	8,400
Rotações por minuto	RPM	3
Taxa de esforço	%	50,40
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	3750
Viscosidade	Pa.s	3,750
Rotações por minuto	RPM	6,00
Taxa de corte	%	45,00
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	2146
Viscosidade	Pa.s	2,146
Rotações por minuto	RPM	12
Taxa de esforço	%	51,5
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1310
Viscosidade	Pa.s	1,310
Rotações por minuto	RPM	20
Taxa de esforço	%	52,4
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	838,3
Viscosidade	Pa.s	0,8383
Rotações por minuto	RPM	30
Taxa de esforço	%	50,3
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	562
Viscosidade	Pa.s	0,562
Rotações por minuto	RPM	50
Taxa de esforço	%	56,8

Anexo D: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique produzido com o filer D

Resultados obtidos no ensaio do mastique com o filer D para 20% de incorporação

Referência do betume utilizado	35/50 Betume 1 GALP	
Referência do Filer utilizado	Filer D	
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	2,62
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	20
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,348
Massa de mastique pretendida	g	100
Volume de mastique correspondente	cm ³	74,18
Massa do betume a utilizar	g	61,1
Massa do Filer a utilizar	g	38,9
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	11,8
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	3492
Viscosidade	Pa.s	3,492
Rotações por minuto	RPM	6
Taxa de esforço	%	41,90
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1804
Viscosidade	Pa.s	1,804
Rotações por minuto	RPM	12,00
Taxa de esforço	%	43,30
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	996,7
Viscosidade	Pa.s	0,997
Rotações por minuto	RPM	30
Taxa de esforço	%	59,8
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	605
Viscosidade	Pa.s	0,605
Rotações por minuto	RPM	50
Taxa de esforço	%	60,5
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	415
Viscosidade	Pa.s	0,415
Rotações por minuto	RPM	60
Taxa de esforço	%	49,9
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	282,5
Viscosidade	Pa.s	0,283
Rotações por minuto	RPM	100
Taxa de esforço	%	56,5

Resultados obtidos no ensaio do mastique com o filer D para 30% de incorporação

Referência do betume utilizado	35/50 Betume 1 GALP	
Referência do Filer utilizado	Filer D	
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	2,62
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	30
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,507
Massa de mastique pretendida	g	100
Volume de mastique correspondente	cm ³	66,36
Massa do betume a utilizar	g	47,8
Massa do Filer a utilizar	g	52,2
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	13,2
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	10700
Viscosidade	Pa.s	10,700
Rotações por minuto	RPM	1
Taxa de esforço	%	35,90
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	5525
Viscosidade	Pa.s	5,525
Rotações por minuto	RPM	4,00
Taxa de esforço	%	44,20
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	2990
Viscosidade	Pa.s	2,990
Rotações por minuto	RPM	10
Taxa de esforço	%	57
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1750
Viscosidade	Pa.s	1,750
Rotações por minuto	RPM	12
Taxa de esforço	%	42
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1173
Viscosidade	Pa.s	1,173
Rotações por minuto	RPM	20
Taxa de esforço	%	46,9
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	818,3
Viscosidade	Pa.s	0,818
Rotações por minuto	RPM	30
Taxa de esforço	%	49,1

Anexo E: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique
produzido com o filer E

Resultados obtidos no ensaio do mastique com o filer E para 20% de incorporação

Referência do betume utilizado	35/50 Betume 1 GALP	
Referência do Filer utilizado	Filer E	
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	2,71
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	20
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,366
Massa de mastique pretendida	g	100
Volume de mastique correspondente	cm ³	73,21
Massa do betume a utilizar	g	60,3
Massa do Filer a utilizar	g	39,7
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	11,9
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	2890
Viscosidade	Pa.s	2,890
Rotações por minuto	RPM	10
Taxa de esforço	%	57,80
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1675
Viscosidade	Pa.s	1,675
Rotações por minuto	RPM	12,00
Taxa de esforço	%	40,20
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	905
Viscosidade	Pa.s	0,905
Rotações por minuto	RPM	30
Taxa de esforço	%	54,3
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	548
Viscosidade	Pa.s	0,548
Rotações por minuto	RPM	50
Taxa de esforço	%	54,8
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	349,2
Viscosidade	Pa.s	0,349
Rotações por minuto	RPM	60
Taxa de esforço	%	41,9
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	229,5
Viscosidade	Pa.s	0,230
Rotações por minuto	RPM	100
Taxa de esforço	%	45,9

Resultados obtidos no ensaio do mastique com o filer E para 30% de incorporação

Referência do betume utilizado	35/50 Betume 1 GALP	
Referência do Filer utilizado	Filer E	
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	2,71
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	30
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,534
Massa de mastique pretendida	g	100
Volume de mastique correspondente	cm ³	65,19
Massa do betume a utilizar	g	47,0
Massa do Filer a utilizar	g	53,0
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	13,4
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	4760
Viscosidade	Pa.s	4,760
Rotações por minuto	RPM	5
Taxa de esforço	%	47,60
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	2570
Viscosidade	Pa.s	2,570
Rotações por minuto	RPM	10,00
Taxa de esforço	%	51,40
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1513
Viscosidade	Pa.s	1,513
Rotações por minuto	RPM	20
Taxa de esforço	%	60,5
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	920
Viscosidade	Pa.s	0,920
Rotações por minuto	RPM	30
Taxa de esforço	%	55,2
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	591,7
Viscosidade	Pa.s	0,592
Rotações por minuto	RPM	30
Taxa de esforço	%	35,5
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	394
Viscosidade	Pa.s	0,394
Rotações por minuto	RPM	50
Taxa de esforço	%	39,4

Anexo F: Resultados obtidos no ensaio realizados com o mastique
produzido com o filer F

Resultados obtidos no ensaio do mastique com o filer F para 20% de incorporação

Referência do betume utilizado		35/50 Betume 1 GALP
Referência do Filer utilizado		Filer F
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	2,74
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	20
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,372
Massa de mastique pretendida	g	40
Volume de mastique correspondente	cm ³	29,15
Massa do betume a utilizar	g	24,0
Massa do Filer a utilizar	g	16,0
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	12,0
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	4295
Viscosidade	Pa.s	4,300
Rotações por minuto	RPM	10
Taxa de esforço	%	65,90
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1500
Viscosidade	Pa.s	1,500
Rotações por minuto	RPM	20,00
Taxa de esforço	%	60,00
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	833,3
Viscosidade	Pa.s	0,830
Rotações por minuto	RPM	30
Taxa de esforço	%	50
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	519
Viscosidade	Pa.s	0,520
Rotações por minuto	RPM	50
Taxa de esforço	%	51,9
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	340,8
Viscosidade	Pa.s	0,340
Rotações por minuto	RPM	60
Taxa de esforço	%	40,9
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	249,5
Viscosidade	Pa.s	0,250
Rotações por minuto	RPM	100
Taxa de esforço	%	49,9

Resultados obtidos no ensaio do mastique com o filer F para 30% de incorporação

Referência do betume utilizado		35/50 Betume 1 GALP
Referência do Filer utilizado		Filer F
Massa volúmica do betume	g/cm ³	1,03
Massa volúmica do Filer	g/cm ³	2,74
Taxa de incorporação do Filer em volume	%	30
Massa volúmica do mastique	g/cm ³	1,543
Massa de mastique pretendida	g	100
Volume de mastique correspondente	cm ³	64,81
Massa do betume a utilizar	g	46,7
Massa do Filer a utilizar	g	53,3
Massa do mastique a utilizar para termos um volume igual ao ocupado por 9 g de betume	g	13,5
Temperatura do betume e do Filer na preparação do mastique (80 °C acima da temperatura de amolecimento do betume)	°C	130
Temperatura	°C	120
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	6550
Viscosidade	Pa.s	6,550
Rotações por minuto	RPM	5
Taxa de esforço	%	65,50
Temperatura	°C	130
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	3125
Viscosidade	Pa.s	3,125
Rotações por minuto	RPM	10,00
Taxa de esforço	%	62,50
Temperatura	°C	140
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1883
Viscosidade	Pa.s	1,883
Rotações por minuto	RPM	12
Taxa de esforço	%	45,2
Temperatura	°C	150
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	1057
Viscosidade	Pa.s	1,057
Rotações por minuto	RPM	30
Taxa de esforço	%	63,4
Temperatura	°C	160
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	674
Viscosidade	Pa.s	0,674
Rotações por minuto	RPM	50
Taxa de esforço	%	67,4
Temperatura	°C	170
Tempo	min	15+1
Viscosidade	cP	481,7
Viscosidade	Pa.s	0,482
Rotações por minuto	RPM	60
Taxa de esforço	%	57,8