

EFEITO DO ÁCIDO POLIFOSFÓRICO NO DESEMPENHO DOS LIGANTES RODOVIÁRIOS

Leni Figueiredo Mathias Leite
Cristina Pontes Bittencourt
Luis Alberto Hermann do Nascimento
Petrobras/CENPES/PDAB/LPE

RESUMO

A utilização de ácido polifosfórico na modificação de ligantes betuminosos é uma prática que vem sendo feita nos EUA há cinco anos. Vários estudos de laboratório têm mostrado as vantagens da modificação química por ácido, confirmando que é possível melhorar o desempenho dos ligantes. Existem várias patentes para o processo aplicado em betume puro ou modificado por SBS. Esse estudo mostrou ser possível a produção de um ligante através de modificação por ácido com características superiores quando comparado ao resíduo de vácuo. O produto da reação com ácido apresenta melhor susceptibilidade térmica, grau de desempenho *Superpave* e faixa de plasticidade.

ABSTRACT

The use of polyphosphoric acid in the modification of bituminous binders is a practice that has been used in the United States for five years. Several laboratory studies have showed the advantages of acid chemical modification, confirming that it is possible to improve the performance of the binders. There are several patents to the process applied to pure bitumen or SBS modified asphalt. This study showed it to be possible the production of acid modified binder with superior characteristics when compared to the vacuum residue. The product of the acid reaction presents better thermal susceptibility, *Superpave* performance grade and plasticity range.

1. INTRODUÇÃO

O aumento do volume de tráfego e da carga por eixo, a necessidade de menos intervenções e de maior durabilidade dos revestimentos betuminosos demandam especificações de desempenho mais exigentes dos agregados, do ligante e da mistura betuminosa. No caso específico de ligantes rodoviários, os mesmos precisam ter desempenho adequado dentro de uma faixa ampla de temperatura, que corresponda às temperaturas de serviço, de modo a propiciar flexibilidade a baixas temperaturas e rigidez a altas temperaturas para evitar, respectivamente, trincas por fadiga e deformação permanente. A busca constante de novos materiais que melhorem o desempenho dos pavimentos asfálticos levou ao desenvolvimento e uso de asfaltos modificados que visam ampliar a faixa de utilização dos ligantes rodoviários. Os processos mais comuns para melhorar o desempenho à alta temperatura, são (Herrington, *et al.*, 1999):

- sopragem de ar através do ligante em temperaturas de 200 a 300°C, que resulta em um ligante com melhor susceptibilidade térmica;
- modificação do ligante com polímeros, como SBS, SBR e EVA;
- modificação de asfalto por ácidos, como anidrido maleico, ácido fumárico, furfural e ácido polifosfórico.

As vantagens e desvantagens de cada um destes processos de modificação estão abaixo relatadas (Orange, 2004):

4. Sopragem de ar melhora rigidez a altas temperaturas mas piora a flexibilidade a baixa temperatura;

5. Incorporação de polímero melhora propriedades a frio e a quente mas pode acarretar problemas de instabilidade à estocagem e envelhecimento precoce;
6. Modificadores ácidos, em especial com ácido polifosfórico, melhoram a susceptibilidade térmica dos ligantes e têm sido empregados nos EUA nos últimos cinco anos com sucesso. Há indícios de que este produto apresenta dificuldade de recobrir certos agregados e que não pode ser misturado com melhoradores de adesividade (Reinke 2004).

O presente trabalho visa avaliar a utilização de ácido polifosfórico como modificador de ligante betuminoso proveniente de petróleos brasileiros. O ligante foi submetido aos ensaios das especificações *Superpave* e brasileiras. Além disso, foram realizados testes mecânicos em misturas betuminosas contendo ligante modificado por ácido com, o propósito de avaliar seu desempenho em termos de resistência mecânica e recobrimento dos agregados.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Herrington *et al.* (1999) estudaram as propriedades reológicas de ligantes modificados pelas seguintes substâncias: anidrido maleico, anidrido succínico e vários outros ácidos dicarboxílicos de pequena cadeia. Preparava-se uma amostra com 400 g de ligante, que era aquecida na temperatura de 120 e 150°C, sendo os ácidos acrescentados gradualmente durante 1 h com agitação constante. Amostras eram removidas, seis horas após a completa adição dos reagentes e estocadas em recipientes herméticos a 4°C. Observou-se um aumento na elasticidade dos ligantes modificados por anidrido maleico. Através de análises cromatográficas e de espectrômetro de massa, constatou-se que mais de 40 a 50% do anidrido maleico adicionado reagiu irreversivelmente com compostos presentes no ligante, provavelmente por reação de *Diels Alder*.

Masad *et al.* (2002) estudaram o uso de furfural como agente modificador de ligante betuminoso. O estudo se dividiu em duas fases. A primeira estudou o efeito da porcentagem de furfural nas propriedades reológicas, utilizando os procedimentos *Superpave*. Nesta etapa, os resultados indicaram que concentrações superiores a 1% em peso não traziam benefícios ao ligante, pois se verificou por N.M.R. que o excesso não reagia quimicamente com o ligante, reduzindo a resistência do ligante à deformação permanente. Na segunda etapa, as temperaturas de mistura utilizadas foram 115°C, 135°C e 155°C. Constatou-se que a faixa ideal para a temperatura de mistura estava entre 135 e 155°C. Os resultados mostraram que o furfural melhorou as propriedades reológicas do ligante modificado a altas temperaturas, significando melhoria na resistência à deformação permanente.

O efeito da adição de ácido polifosfórico a resíduos de vácuo é similar ao efeito induzido pelo processo de sopragem (Filippis *et al.*, 1995). Acarreta aumento de ponto de amolecimento, de viscosidade e da resistência ao envelhecimento e propicia ainda a redução da penetração. O

efeito pode ser comparado à oxidação branda, levando a uma estrutura gel, sem efeito nas propriedades a baixa temperatura e sem destruição da estrutura coloidal, ao contrário do que acontece quando os ácidos utilizados são os ácidos perclórico, sulfúrico e nítrico. A modificação por ácido é um processo de menor custo, quando comparado a sopragem e introduz menor influência negativa no comportamento a baixa temperatura.

Orange *et al.* (2004) utilizaram o ácido polifosfórico como modificador químico de ligante asfáltico puro e com SBS. Os ligantes selecionados apresentavam naturezas químicas e reológicas diferentes: um parafínico (70/100) e outro naftênico (50/70), ambos classificados como PG 64-22. Adicionou-se ácido polifosfórico (PPA) a ligantes asfálticos, a 160°C, por 30 minutos com agitação branda. Misturas com SBS (linear da Kraton) foram preparadas com e sem ácido polifosfórico (PPA). Neste último caso, o polímero foi misturado por mais de duas horas no ligante modificado por ácido a 160°C.

Observou-se um decréscimo na penetração e um acréscimo no ponto de amolecimento. Após modificação com ácido, estes passaram em termos de classificação *Superpave* para grau de desempenho PG 70-22 e PG 82-22, respectivamente. Verificou-se que o ácido não exerceu influência no desempenho em ligantes modificados por SBS, entretanto houve melhoria na elasticidade do ligante, evidenciado pelo decréscimo no valor do ângulo de fase (Orange *et al.*, 2004).

Os resultados indicaram que ocorre reação química entre o ácido polifosfórico e o ligante asfáltico. Os produtos de reação são compostos insolúveis em meio polar, o que explica o alto conteúdo de asfaltenos, após adição do ácido polifosfórico. As aminas, piridinas e pirróis são sítios básicos que reagem preferencialmente com a acidez do PPA, contribuindo para o consumo da sua acidez. Ocorre aumento do teor de asfaltenos que ficam desaglomerados devido à neutralização das interações polares existentes dentro das micelas aglomeradas ou pela protonação de sítios básicos que destroem as pontes de hidrogênio pré-existentes. O sistema organomineral modifica a estrutura do ligante e como consequência tem-se aumento da dispersão e da estabilização das micelas asfálticas, conforme mecanismo proposto na Figura 1 (Orange *et al.*, , 2004).

Estudos efetuados com teores de 0,25 a 5 % em peso de ácido polifosfórico no ligante asfáltico, mostram que, quanto maior o teor de ácido, maior a fluidez do produto final, podendo alcançar inclusive fluidez de óleo combustível. Ocorre precipitação de material insolúvel que pode ser separado por sedimentação a 140°C por 24 horas ou, por centrifugação, a 3000 rpm a 140°C. Ácido fosfórico pode ser recuperado do material insolúvel por extração com água. Tratamento leve com baixo teor de ácido, resulta em produtos estáveis de alto ponto de amolecimento e resistência à oxidação melhorada (Filipis, *et al.*, 1994; Filipis, *et al.*, 1996) .

Puzic *et al.* (2002) relataram um método para preparo de ligante modificado por polímero e ácido polifosfórico ou superfosfórico. Em um dos ensaios, preparou-se uma amostra de ligante PG 46-34 modificado por 3,0% em peso de SBS. Esta foi carregada em um reator com as seguintes condições: aquecimento a 160°C, adição gradual de 0,5% em peso de ácido superfosfórico, a mistura continuou nessa temperatura por mais 30 minutos para garantir uniforme distribuição e após 30 minutos foi analisada. Verificou-se o aumento da temperatura

de desempenho (máxima temperatura do PG) e melhoria da estabilidade durante a estocagem do produto. A patente também relata que o uso de um modificador ácido permite que se utilize menos polímero na mistura para alcançar o mesmo grau de desempenho.

Os compostos básicos do ligante quando interagem com ácidos tendem a formar associações, conforme esquema abaixo (Orange *et al.*, 2004):

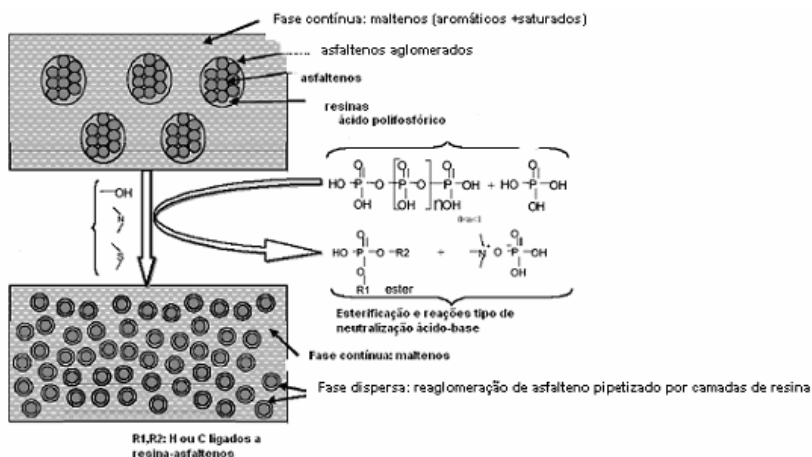


Figura 1: Mecanismo de ação proposto para o ácido polifosfórico no ligante asfáltico (Orange *et al.*, 2004)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais

- Ácido polifosfórico com concentração maior que 100%.
- Resíduo de vácuo de petróleo brasileiro com rendimento de 45,8 % em volume e penetração igual a 142 dmm.
- Agregados de origem granítica, procedente de Juiz de Fora, MG.

3.2. Procedimento reacional

A metodologia descrita por Giavarini para modificação de ligante por ácido fosfórico foi empregada (Giavarini, 1994). Num reator de vidro, com atmosfera inerte realizou-se a reação com três diferentes teores: 0,7, 1 e 1,2% m/m de ácido polifosfórico. A amostra foi previamente aquecida em estufa. O ácido polifosfórico foi adicionado ao ligante sob agitação em baixo cisalhamento.

3.3. Caracterização do ligante

Os ensaios realizados para avaliação do ligante foram os seguintes:

- viscosidade dinâmica a 60°C;
- penetração a 25°C;
- viscosidade a 135 °C;

- estabilidade à estocagem (48 horas);
- ponto de amolecimento;
- ductilidade a 25°C;
- envelhecimento em estufa de filme fino rotativo –RTFOT;
- envelhecimento em vaso de pressão – PAV;
- cisalhamento dinâmico a temperaturas altas e intermediárias – DSR;
- flexão em viga a baixas temperaturas - BBR;
- espectrometria de ressonância magnética nuclear – N.M.R.;
- estimativa da faixa de plasticidade pela subtração do temperatura máximo da mínima do grau de desempenho *Superpave*.

3.4. Caracterização dos agregados

Os ensaios realizados para avaliação dos agregados foram os seguintes:

- densidade real e aparente;
- equivalente de areia;
- abrasão Los Angeles;
- granulometria;

3.5. Caracterização da mistura betuminosa

Os ensaios realizados para avaliação da mistura betuminosa foram os seguintes:

- dosagem *Superpave*;
- densidade máxima teórica;
- densidade aparente;
- teor de vazios;
- RBV;
- VAM;
- teor de ligante;
- resistência à tração indireta;
- razão de finos passantes da peneira #200 por teor efetivo de ligante.

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise no R.M.N.

Os resultados indicam que ocorre uma associação dos asfaltenos com fósforo e que o peso molecular dos asfaltenos aumenta consideravelmente. O tratamento leva a conversão de aromáticos em resinas e de resinas em asfaltenos, reduzindo a aromaticidade e aumentando o teor e o peso molecular dos asfaltenos. Orange *et al.* (2004) explicaram que as duas principais classes de reação envolvidas são: neutralização ácido-base e reação de esterificação. A reação causa desaglomeração dos compostos asfálticos que melhoram a reologia dos ligantes.

Este tipo de modificação é particularmente interessante para ligantes de alguns petróleos brasileiros que apresentam alto teor de nitrogênio básico e maior concentração de componentes aromáticos do que de resinas. O ácido pode modificar a composição química, aumentando o teor de asfaltenos e de resinas através das reações de neutralização e esterificação.

4.2. Resultados do ligante modificado versus resíduo de vácuo

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1, juntamente com os resultados de análise do resíduo de vácuo que serviu de carga para o tratamento ácido.

Tabela 1: Comparação dos resultados de amostra de ligante asfáltico com e sem tratamento com ácido polifosfórico

Ensaio	Resíduo de vácuo	Amostras modificadas por ácido polifosfórico			
Teor de ácido polifosfórico (%m/m)	-	0,7	1	1	1,2
Compatibilidade 48 h ($\Delta^{\circ}\text{C}$)	-	1,2	0,2	0	-
Teor de asfaltenos (%m/m)	6,2	-	-	-	11,2
Nitrogênio básico total (%m/m)	0,25	-	-	-	0,26
Penetração 25°C, 100g, 5s (dmm)	142	118	100	104	90
Viscosidade @ 135°C (cP)	-	-	303	-	-
IST	-1,4	-0,1	-0,5	-0,2	0
Ponto de amolecimento ($^{\circ}\text{C}$)	40	45,3	46	46,6	48,6
Viscosidade @ 60°C, P	530	1101	1987	1482	-
Cisalhamento - G^* /sen δ , $^{\circ}\text{C}$	46	58	-	58	58
Perda em massa, %	0,02	0,08	0,09	0,08	0,069
Ductilidade @ 25°C, cm	> 100	146,5	135	126	-
Viscosidade @ 60°C, P	760	2145	4575	3263	-
Cisalhamento - G^* /sen δ , $^{\circ}\text{C}$	-	58	-	58	58
Cisalhamento - G^* sen δ , $^{\circ}\text{C}$	-	10	-	16	16
Fluência - BBR, $^{\circ}\text{C}$	-18	-18	-	-12	-12
TIPO DE CAP - ANP	nenhum	CAP 7	85/100	CAP 7	CAP 7
Grau de Desempenho, PG X – Y	46-28	58-28	-	58-22	58-22
Faixa de plasticidade (X-Y), $^{\circ}\text{C}$	74	86		80	80

O efeito do acréscimo do teor de ácido polifosfórico na penetração, no ponto de amolecimento, na viscosidade e no IST pode ser visto nas Figuras 2, 3, 4 e 5. Como se esperava, a penetração decresce com o acréscimo do teor de ácido, o ponto de amolecimento aumenta e o ligante asfáltico torna-se mais viscoso e a susceptibilidade térmica melhora. Pelos resultados, observou-se que com as concentrações de 0,7 e 1,0% em peso de ácido polifosfórico o ligante passou de PG 46-22 para respectivamente, PG 52-28 e PG 58-22.

O tratamento com ácido polifosfórico, efetuado com resíduo de vácuo, foi relativamente repetitivo e resultou em CAP com grau de desempenho PG – *Superpave*, com faixa de temperatura 6 a 12°C mais larga que a do resíduo de vácuo original. Uma das amostras se enquadrou como CAP 7 nas especificações ANP e a outra amostra se enquadrou nas especificações como CAP 85/100.

A susceptibilidade térmica - IST do produto tratado melhorou consideravelmente, resultando em IST superior a -1. Quando o Resíduo de vácuo foi tratado com 1,2% de ácido o IST passou a zero, mostrando que o aumento do teor de ácido na reação melhora a susceptibilidade térmica e, conseqüentemente amplia a faixa de plasticidade do betume modificado.

Após o tratamento, a relação “penetração a 25°C versus viscosidade a 60°C do produto”, melhorou bastante, e o estudo mostrou que a otimização das condições operacionais do tratamento, seja através do aumento do teor de concentração do ácido polifosfórico, ou ainda, pelo emprego de um resíduo de vácuo mais duro, devem conduzir à relações de viscosidade versus penetração semelhantes às obtidas em resíduos de petróleos venezuelanos naftênicos do tipo Boscan e Bachaquero, que apresentam IST da ordem de zero e faixa de plasticidade *Superpave* da ordem de 86°C. Os gráficos mostrados a seguir mostram a variação da consistência do betume pela reação com diferentes teores de ácido.

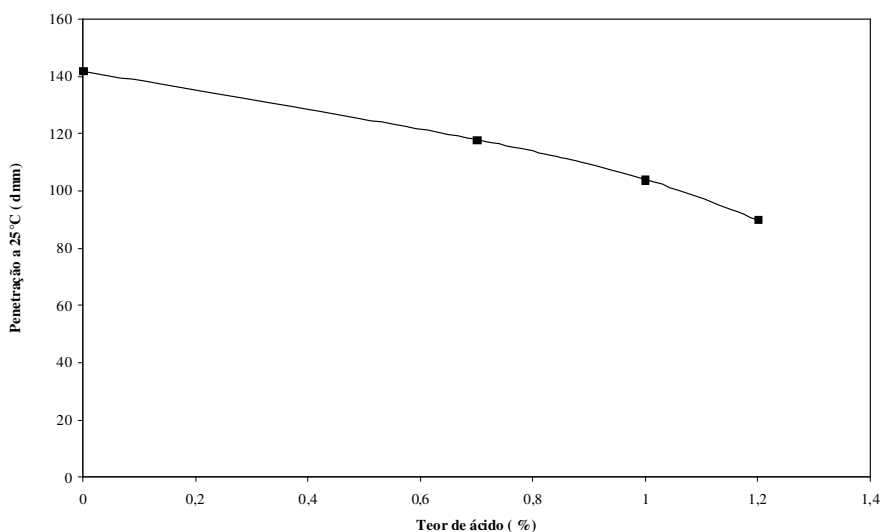


Figura 2 : Efeito do teor de ácido na penetração das amostras modificadas por ácido polifosfórico

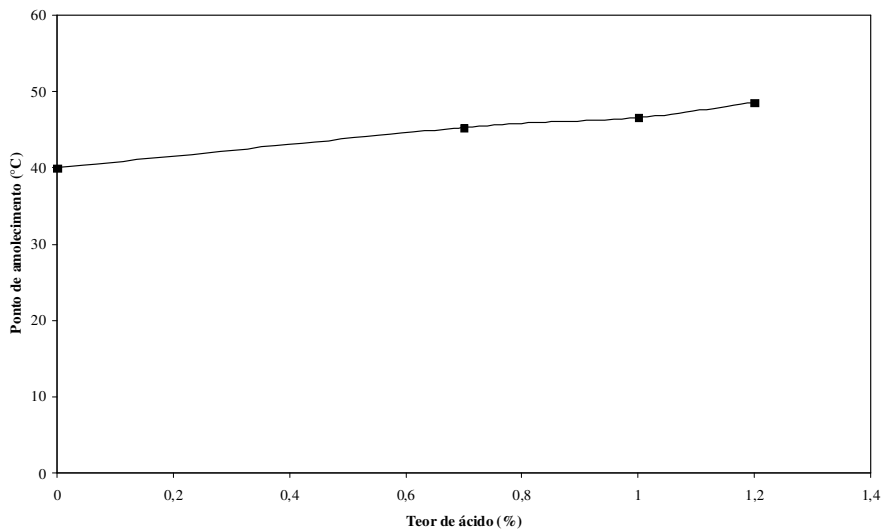


Figura 3: Efeito do teor de ácido no ponto de amolecimento das amostras modificadas por ácido polifosfórico

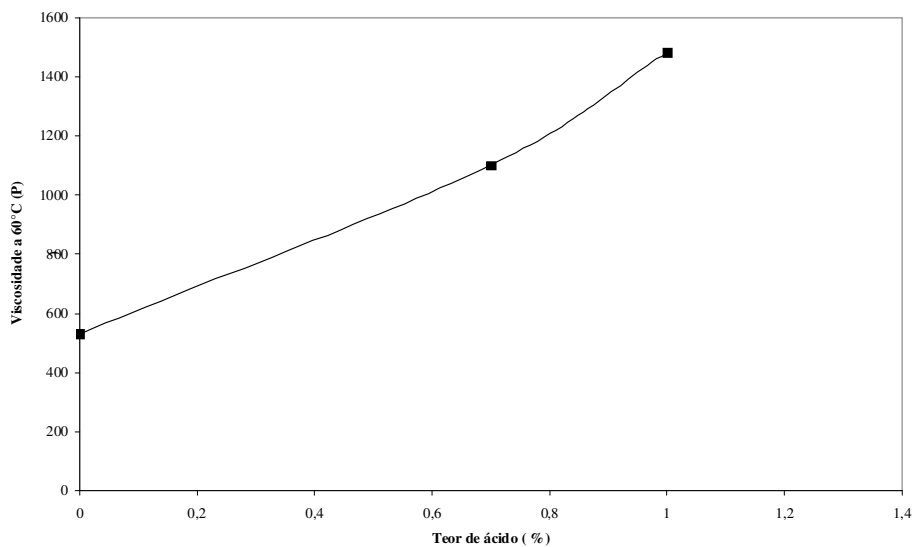


Figura 4 : Efeito do teor de ácido na viscosidade a 60°C das amostras modificadas por ácido polifosfórico

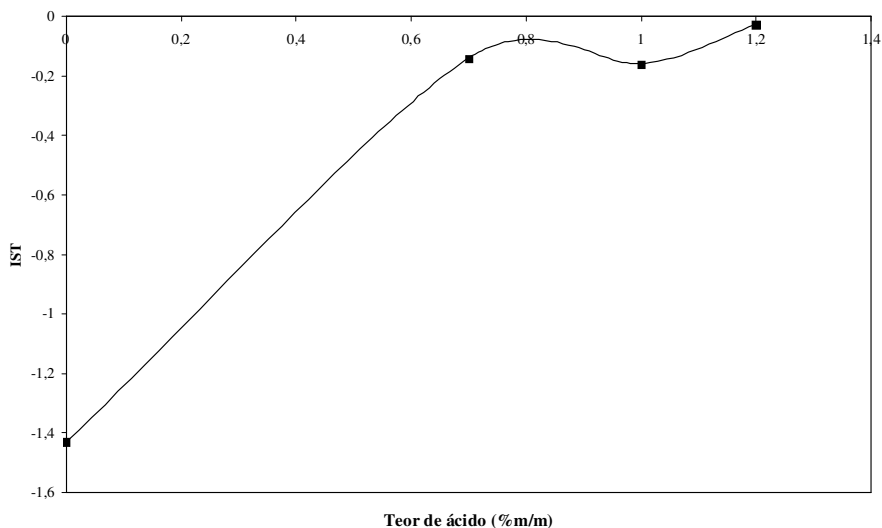


Figura 5: Efeito do teor de ácido no IST das amostras modificadas por ácido polifosfórico

4.1. Análise da mistura betuminosa

Os agregados utilizados no preparo da mistura betuminosa, em laboratório, são de origem granítica com baixa resistência à abrasão. Porém, têm sido utilizados na pavimentação apresentando desempenho satisfatório. A granulometria adotada se enquadra na faixa B do DNER, com tamanho máximo nominal de 12,5 mm. A Tabela 2 a seguir apresenta as principais características dos agregados.

Tabela 2: Principais características dos agregados utilizados

Equivalente de areia, %	Abrasão Los Angeles, %	Densidade Aparente (mistura)	Densidade Real (mistura)
78	58	2,725	2,740

O estudo de dosagem utilizou o ligante modificado por ácido. A metodologia utilizada foi a *Superpave*, tomando-se como referência os requisitos para temperaturas máximas médias do ar inferiores a 39°C e número de passagens do eixo padrão (ESALs) na faixa 10 – 30 milhões de passagens. A Tabela 3 a seguir apresenta os critérios estabelecidos pela metodologia *Superpave* para estas condições.

Tabela 3: Requisitos *Superpave* para dosagem de misturas betuminosas nas condições de temperatura e tráfego assumidas

Propriedades	Valor
$N_{ini} / N_{des} / N_{max}$	8 / 109 / 174
VAM Mínimo, %	14
RBV, %	65 – 75
% $G_{mm} N_{ini}$	89
% $G_{mm} N_{max}$	98
Vazios, %	4,00
Razão Passante #200 - ligante efetivo	0,6 – 1,6

Na dosagem, tendo em vista que já estava definida a granulometria de projeto, partiu-se diretamente para a determinação do teor de ligante, pulando-se a etapa de determinação da estrutura ótima dos agregados, conforme preconiza a metodologia *Superpave*. Com isso, adotou-se inicialmente um teor de ligante de 5,6% na mistura de teste, que foi excessivo, conferindo à mistura um teor de vazios, extremamente baixo e relação betume vazios (RBV) elevada, além de apresentar resistência à tração abaixo da esperada.

Logo, conforme metodologia e tendo em vista as propriedades volumétricas obtidas, partiu-se para a estimativa do teor de ligante ótimo (Vazios = 4,0 %), encontrando-se um teor de 4,75% de ligante, sendo que, nestas condições, as outras propriedades volumétricas também foram satisfatórias. A Tabela 4 a seguir apresenta as propriedades das misturas betuminosas avaliadas no estudo de dosagem.

A ausência do índice % $G_{mm} N_{max}$ se deve à pouca disponibilidade do ligante, optando-se por compactar as misturas de teste até o número de giros de projeto (N_{des}), visando a determinação da resistência à tração nesta condição. Pela mesma razão, não puderam ser avaliadas as misturas no teor de ligante ótimo estimado. Contudo, a expectativa é que a resistência à tração aumente significativamente nas misturas com o teor ótimo estimado.

Tabela 4: Propriedades das misturas betuminosas utilizadas na dosagem

Propriedades	5,6% de ligante (mistura de teste)	4,75% de ligante (mistura estimada)
$N_{ini} / N_{des} / N_{max}$	8 / 109 / 174	8 / 109 / 174
VAM, %	14,8	15,0
RBV, %	87,3	71,6
% $G_{mm} N_{ini}$	86,9	84,5
% $G_{mm} N_{max}$	-	-
Vazios, %	1,87	4,25
Razão Passante #200 - ligante efetivo	1,02	1,20
Resistência à tração, MPa	0,62	-
Densidade máxima teórica	2,507	2,540

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo com ácido polifosfórico no Resíduo de vácuo mostrou ser possível a obtenção de ligante com características superiores ao ligante betuminoso original, ou seja, de um produto de melhor susceptibilidade térmica, melhor grau de desempenho *Superpave* e relação “viscosidade – penetração” mais adequada.

A mistura betuminosa preparada com ligante modificado por ácido mostrou recobrimento dos agregados e resultou em valor de resistência à tração da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos, com ligantes oriundos de cru naftênico (petróleo venezuelano) tipo CAP 85/100. Contudo, a expectativa é que a resistência à tração aumente significativamente nas misturas com o teor ótimo estimado.

Podem-se citar as seguintes recomendações:

- Investigar a modificação química obtida através da reação com diferentes teores de ácido. Este processo parece promissor para modificação dos ligantes e resíduos de vácuo oriundos de alguns petróleos brasileiros, devido à presença de produtos nitrogenados e bases fracas.
- Prosseguir os estudos com cimentos asfálticos modificados por polímero, no sentido de otimizar as condições operacionais do tratamento com ácido polifosfórico para produção de ligantes de qualidade superior;
- Estudar a sensibilidade à água de misturas betuminosas, preparadas com ligante resultante de tratamento por ácido polifosfórico, de modo a avaliar a adesividade do par ligante tratado com ácido polifosfórico – agregados, empregando, também, melhorador de adesividade nitrogenado.
- Avaliar propriedades mecânicas das misturas betuminosas, tais como vida de fadiga e resistência à deformação permanente empregando APA ou LPC de modo a avaliar a influência do aumento da susceptibilidade térmica do ligante nas propriedades da mistura betuminosa.

Agradecimentos

Este trabalho contou com a valiosa colaboração dos técnicos Luiz Rosa da Silva Filho, Áurea Canuto da Silva, Adriana Tinoco Martins, Mariana Guarany de Oliveira Macedo e Flávio Lima do Laboratório de Asfaltos da Gerência de Lubrificantes e Produtos Especiais do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello da Petrobras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASPHALT INSTITUTE SPRING MEETING (2004) *Rutting and Moisture Resistance of Asphalt Mixtures Containing Polymer and Polyphosphoric Acid Modified Bitumen*.
- Bonemazzi, F. e Giavarini, C. (1995) Application of Rheometric Tests to the Study of Oxidized Asphalts. *La Rivista dei Combustibili*, v. 49, n. 6, p. 173-180.
- Filipis, D.; Giavaarini, C.; Scarsella, M. (1996) An Integrated Process for Stabilization and Upgrading of Residues and Bitumens. *Fuel Science & Technology International*, v. 14, n. 6, p. 821-838.
- Filipis, D.; Giavarini, C.; Scarsella, M. (1994) Stabilization and Partial Deasphalting of Thermal Residues by Chemical Treatment. *Energy & Fuels*, v. 8, n.1, p. 141-146.
- Herrington, P.R.; Wu, Y.; Forbes, M.C. (1999) Rheological Modification of Bitumen with Maleic Anhydride and Dicarboxylic Acids. *Fuel*, v. 78, p.101-110.
- Masad, E.; Papagiannakis, T.; Kherghehoush, R.; Ali, N. (2002) Rheological and Nuclear Magnetic Resonance Testing of Furfural-Modified Binders. *Journal of Applied Asphalt Binder Technology*, v. 2, n. 1, p. 4 -20.
- Orange, G.; Dupuis, D.; Martin, J.V.; Farcas, F.; Such, C e Marcant, B (2004) Chemical Modification of Bitumen Through Polyphosphoric Acid: Properties- Microstructure Relationship. *Anais do 3rd Euraspalt & Eurobitume Congress Vienna 2004*, Vienna, Áustria, p. 733-745.
- Pulzic, O.; Williamson, K.E. (2002) Asphalt Compositions and Method for Making – US 6414056B1.
- Reinke G. (2004) Discussions on Use and Impact of Acid Modification in Asphalt at Rocky Mountain - Asphalt Institute Spring Meeting April 28.

Leni Figueiredo Mathias Leite (leniml@cenpes.petrobras.com.br)

Cristina Pontes Bittencourt (crispontes@petrobras.com.br)

Luis Alberto Hermann do Nascimento (luisnascimento@petrobras.com.br)

Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello – CENPES / PETROBRAS – Rio de Janeiro – RJ
Ilha do Fundão Quadra 7 – Cidade Universitária – CEP 21949-900

