

Joe Arnaldo Villena Del Carpio

**USO DE PIGMENTOS DE ÓXIDOS DE METAIS MISTOS  
NA PAVIMENTAÇÃO PARA A MITIGAÇÃO DA ILHA DE  
CALOR URBANA**

Tese submetida à Universidade Federal  
de Santa Catarina como requisito  
parcial exigido pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil -  
PPGEC, para a obtenção do Título de  
DOUTOR em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Glicério Trichês  
Coorientador: Prof. Dr. Deivis Luis  
Marinoski

Florianópolis  
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Villena Del Carpio, Joe Arnaldo

Uso de pigmentos de óxidos de metais mistos na  
pavimentação para mitigação da Ilha de Calor Urbana / Joe  
Arnaldo Villena Del Carpio ; orientador, Glicério Trichês  
; coorientador, Devis Luis Marinoski. - Florianópolis,  
SC, 2014.  
437 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Ilha de calor urbana. 3.  
Pavimentação. 4. Pigmentos de óxidos de metais mistos . 5.  
Misturas asfálticas. I. Trichês, Glicério. II. Marinoski,  
Devis Luis . III. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Joe Arnaldo Villena Del Carpio

**USO DE PIGMENTOS DE ÓXIDOS DE METAIS MISTOS NA  
PAVIMENTAÇÃO PARA A MITIGAÇÃO DA ILHA DE CALOR  
URBANA**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 16 de maio de 2014.

---

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Dr.  
Coordenador do PPGEC

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Glicério Trichês, DR. – ECV/UFSC  
Orientador

---

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr. – EGR/UFSC  
Coorientador



---

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti, Dr. – PPGEC/UFGRS

---

Prof<sup>ª</sup>. Léa Cristina Lucas de Souza, Dr<sup>ª</sup>. – PPGCiv/UFSCar

---

Prof. Roberto Lamberts, Dr. – ECV/UFSC

---

Prof. Antonio Fortunato Marcon, Dr. – ECV/UFSC

---

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr. – ECV/UFSC



Dedico este trabalho a David, Rosa  
e Fernando, que sempre me  
apoiaram e animaram, amo-os.





## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela ajuda e pela força nas horas difíceis.

À minha família, David, Rosa e Fernando, pelo amor, apoio, compreensão e ajuda durante todo o tempo de estudos.

Ao professor Glicério Trichês, meu orientador, e ao professor Deivis Luis Marinowski, meu coorientador, que me ajudaram para concretar este projeto tanto na área acadêmica como fora dela.

A João Victor, Ramon e Yader, que além de colegas de estudos e de laboratório, são amigos que estão sempre dispostos a ajudar. Obrigado pela amizade!

A Jonathan Guimarães, técnico do laboratório de pavimentação. Muito obrigado por estar comigo durante os ensaios, moldagens e medições. Sem a sua ajuda este projeto não teria decolado.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa Rodovias Verdes, Rafaelle, Augusto, Priscila, Marianna, Renata, Alexandre, Paulo e Bruno, e aos colegas de laboratório de Pavimentação e Mecânica dos Solos pelo apoio prestado durante a pesquisa.

Ao programa CNPq por ter fornecido a bolsa de doutorado durante o tempo de duração dos estudos.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Santa Catarina que direta ou indiretamente colaboraram na minha formação acadêmica e que me ajudaram com a realização dos ensaios que foram apresentando-se no decorrer desta pesquisa.

Finalmente a todas as pessoas que de uma ou outra forma me ajudaram a tornar este sonho uma realidade.

Gracias!



## RESUMO

A concentração de pessoas em grandes metrópoles e o consequente revestimento do terreno natural por materiais artificiais tem levado ao aparecimento de um fenômeno denominado de Ilha de Calor Urbana, caracterizado pelo incremento das temperaturas urbanas em comparação com as áreas rurais. Uma das melhores opções para combater este fenômeno consiste em incrementar a refletância solar dos materiais utilizados nos revestimentos urbanos. No entanto na área da pavimentação esta tecnologia ainda é incipiente. O presente trabalho tem como objetivo a avaliação do uso de pigmentos de óxidos metálicos mistos (com alta refletância infravermelha) em misturas asfálticas quanto à sua capacidade de mitigar a Ilha de Calor Urbana. Adicionalmente às misturas asfálticas foram estudados outros materiais (concreto Portland e pedra *petit pavê*) utilizados cotidianamente na pavimentação de ruas, calçadas, estacionamentos e pátios. Ensaio em laboratório e campo foram realizados para identificar os materiais com melhor desempenho quanto à refletância solar e menor absorção de radiação solar. Os ensaios de refletância solar mostraram que as misturas asfálticas coloridas se destacaram frente às misturas asfálticas sem adições. Os ensaios de temperatura em campo mostraram que as misturas asfálticas coloridas atingem temperaturas até 3,7 °C menores do que as misturas sem pigmentos. A influência da adição de pigmentos nas características mecânicas das misturas asfálticas foi avaliada mediante ensaios de resistência à tração, módulo resiliente, Cântabro e deformação permanente. Os resultados mostraram que a adição de pigmentos permite incrementar a vida útil das misturas. Para avaliar a influência do uso de revestimentos mais refletivos em um ambiente real, foi realizada a simulação de um micro clima urbano com o software Envi-met. Os resultados mostraram que a temperatura superficial dos revestimentos diminui em até 1,5 °C quando se utilizam superfícies mais refletivas ao invés da mistura asfáltica convencional ou das superfícies envelhecidas encontradas no local. As simulações mostraram, que a diminuição de temperatura promovida pelo uso de revestimentos mais refletivos afeta a sensação térmica do espaço externo e pode afetar, também, a sensação do espaço interno das edificações próximas ao local simulado.

**Palavras-chave:** Ilha de calor urbana. Pavimentação. Pigmentos de óxidos de metais mistos.

## ABSTRACT

The concentration of people in cities and the consequent coating by artificial materials has led to the emergence of a phenomenon called Urban Heat Island, characterized by increased urban temperatures compared with rural areas. One of the best options to combat this phenomenon is to increase the solar reflectance of the materials used in urban coatings. This study evaluate the use of pigments mixed metal oxides (with high infrared reflectance) in asphalt mixtures for their ability to mitigate the Urban Heat Island. In addition to asphalt mixtures, other materials (Portland concrete and stone petit pavé) routinely used in paving streets, sidewalks, parking lots and courtyards were studied. Tests in laboratory and field experiments were conducted to identify materials with best performance for solar reflectance and lower absorption of solar radiation. The solar reflectance tests showed that the colored asphalt mixtures are better than asphalt mixtures without additions. The temperature field tests showed that the colored asphalt mixtures reach temperatures up to 3.7 ° C lower than the mixes without pigments. The influence of the addition of pigments on mechanical characteristics of asphalt mixtures was evaluated by testing the tensile strength, resilient modulus, Cantabrian and permanent deformation. The results showed that the addition of pigments allows increasing the useful life of the mixtures. To evaluate the influence of using more reflective coatings in a real environment, the simulation of an urban micro climate with the Envi-met software was performed. The results showed that the surface temperature of the coating decreases by 1.5 ° C when using more reflective surfaces rather than the conventional asphalt mixture or aged surfaces found on the place. The simulations showed that the decrease in temperature promoted by the use of more reflective coatings affects the thermal sensation from outer space and can also affect the feel of the internal space of the building next to the simulated place.

**Keywords:** Urban heat island. Paving. Mixed metal oxides pigments.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Metodologia utilizada no estudo.....	40
Figura 2.1 – Espectro eletromagnético extraterrestre.....	46
Figura 2.2 – O comprimento de onda é a distância entre dois pontos correspondentes na mesma localização desde um ciclo até outro ciclo.....	47
Figura 2.3 – Processo de múltiplas dispersões.....	51
Figura 2.4 – Componentes da radiação solar dispersos e absorvidos pela atmosfera e refletidos pela superfície.....	53
Figura 2.5 - Azimute e altitude solar para os hemisfério norte.....	54
Figura 2.6 – Variação do coeficiente AM segundo o valor do ângulo zênite solar.....	56
Figura 2.7 – Espectro de radiação solar AM 0 e AM 1,5.....	58
Figura 2.8 – Interação das ondas eletromagnéticas com uma superfície.....	59
Figura 2.9 – Pirheliômetro.....	62
Figura 2.10 – Piranômetro.....	63
Figura 2.11 – Espectrofotômetro.....	64
Figura 2.12 – Espectrofotômetro: esfera integradora (a) e mecanismo de medição (b).....	65
Figura 3.1 - Perfil geral da ilha de calor urbana.....	75
Figura 3.2 - Temperaturas anuais médias mais altas do centro de Los Angeles, CA, entre 1882 e 1984. Com o incremento das irrigações e dos pomares, a cidade esfriou a uma taxa de, aproximadamente, 2°C/ano até a década de 1930. Após este período, as vias asfaltadas substituíram as árvores e a temperatura aumentou 3°C até 1984.....	77
Figura 3.3 - Principais parâmetros que influem no desenvolvimento da ICU.....	81
Figura 3.4 - Uso do solo nos bairros de Tóquio, %.....	82
Figura 3.5 - Efeito do albedo na temperatura da superfície.....	83
Figura 3.6 - Relação entre a diferença de temperatura da superfície e o ar com o albedo do material.....	91
Figura 3.7 - Canyon urbano.....	93
Figura 3.8 - Aparência no teste do túnel de vento. O vento flui da direita para esquerda.....	96
Figura 3.9 - Relação entre o número de pessoas tratadas por doenças relacionadas ao calor e as temperaturas máximas nos bairros de Tóquio.....	100
Figura 3.10 - Relação entre o volume de ozônio troposférico na atmosfera e a temperatura do meio ambiente na cidade de Atenas.....	104

Figura 3.11 - Relação entre a demanda de eletricidade nos bairros comerciais de Tóquio e a temperatura do ar. ....	106
Figura 3.12 - Níveis de ozônio troposférico e demanda máxima de energia no sul da Califórnia versus a temperatura em Los Angeles, CA às 4 pm. ....	107
Figura 3.13 - White Sands National Monument .....	115
Figura 3.14 - Modelagem gráfica de um ambiente urbano. ....	119
Figura 3.15 - Temperatura simulada ao redor de dois prédios.....	120
Figura 4.1 - Imagens dos filmes pintados. Para cada filme é mostrada a aparência sobre um fundo branco seguido da sua aparência sobre um fundo preto.....	136
Figura 4.2 - Absorptâncias e trasmitâncias NIR das 87 películas de pigmentos estudadas. A cor de cada círculo interior indica a transmitância visível: preto (menos que 0,1); cinza (entre 0,1 e 0,3); e, branco (maior que 0,3). ....	140
Figura 4.3 - Energia diária utilizada para condicionamento de ar em uma casa em Sacramento, CA e temperatura diária média do ar externo...	144
Figura 4.4 - Aplicação do tratamento para teto frio sobre a estrutura de uma escola.....	145
Figura 4.5 - Características e processos térmicos no pavimento.....	151
Figura 4.6 - Variação da refletância solar no concreto asfáltico convencional e no concreto de cimento Portland com o tempo de uso. ....	155
Figura 4.7 - Temperaturas superficiais e albedo para alguns tipos de revestimentos em Phoenix, Arizona.....	156
Figura 4.8 - Temperatura superficial e horário das medições de dois pavimentos de concreto Portland de diferentes albedos.....	159
Figura 4.9 - Exemplo da relação entre albedo e temperatura da superfície do pavimento.....	161
Figura 4.10 - Refletância espectral da mistura asfáltica convencional (nova e envelhecida) e fria (verde e branca). ....	165
Figura 4.11 - Amostras de mistura asfáltica colorida (1 bege, 2 branco, 3 verde, 4 vermelho, 5 amarelo). ....	167
Figura 4.12 - Refletância espectral das amostras de mistura asfáltica colorida (a. bege, b. branco).....	168
Figura 4.13 - Refletância espectral das amostras de mistura asfáltica colorida .....	169
Figura 4.14 - Refletância espectral das amostras de mistura asfáltica colorida .....	170

Figura 4.15 - Distribuição da temperatura média horária das misturas coloridas testadas e da temperatura do ar durante o período experimental (julho de 2008). .....	172
Figura 4.16 - Temperatura do ar a 1,5 m de altura do microclima simulado com uso de mistura asfáltica (A) preta convencional, SR = 0,04.....	174
Figura 4.17 - Temperatura do ar a 1,5 m de altura do microclima simulado com uso de mistura asfáltica (B) branca, SR = 0,55. ....	175
Figura 4.18 - Efeito da temperatura do ar no endurecimento do ligante como uma função do tempo. ....	177
Figura 4.19 - Afundamento e número de ciclos de um eixo de carga padrão para uma superfície de pavimento com temperatura de 42 e 53°C. ....	178
Figura 5.1 – Diagrama de potência 0,45 da metodologia Superpave. .	192
Figura 5.2 – Prensa compactadora giratória Superpave. ....	194
Figura 5.3 – Curva de compactação de uma amostra na PCG. ....	197
Figura 5.4 – Curva de compactação de duas misturas com estruturas de agregados diferentes. ....	199
Figura 5.5 – Mecanismo de interação da água com o ligante asfáltico. ....	201
Figura 5.6 – Simulador de tráfego do LCPC.....	205
Figura 6.1 – Pigmentos utilizados na pesquisa: Amarelo (a), Marrom A (b). ....	214
Figura 6.2 – Pigmentos utilizados na pesquisa: Marrom B (c), Marrom C (d). ....	215
Figura 6.3 – Pigmentos utilizados na pesquisa: Preto (e), Verde (f)...	216
Figura 6.4 – Pigmentos utilizados na pesquisa: Vermelho A (g) e Vermelho B granulado(h).....	217
Figura 6.5 – Ligantes coloridos utilizados no ensaio de refletância em laboratório. ....	220
Figura 6.6 - Espectrofotômetro PERKIN ELMER (a) e esfera integradora (b). ....	222
Figura 6.7 – Diagrama da Etapa de Refletância dos Ligantes Coloridos .....	224
Figura 6.8 – Diagrama da Etapa de Caracterização dos Materiais Empregados (Etapa II). ....	226
Figura 6.9 – Diagrama da Etapa de Dosagem das Misturas Asfálticas	227
Figura 6.10 – Processo de compactação da mistura asfáltica: mistura no molde cilíndrico (a); cilindro pronto para compactação dentro da PCG (b). ....	229
Figura 6.11 –Extração do corpo de prova (c); aparência dos corpos de prova após compactação (d). ....	230

Figura 6.12 – Processo de usinagem da mistura Vermelho B: pesagem do pigmento (a).....	231
Figura 6.13 – Processo de usinagem da mistura Vermelho B: pesagem do ligante (b); adição do agregado graúdo (c). .....	232
Figura 6.14 – Processo de usinagem da mistura Vermelho B: adição do agregado miúdo (d); mistura sem pigmento (e). .....	233
Figura 6.15 – Processo de usinagem da mistura Vermelho B: adição do pigmento (f); mistura colorida pronta (g).....	234
Figura 6.16 – Processo de usinagem da mistura Vermelho B: mistura na bandeja para envelhecimento a curto prazo (h).....	235
Figura 6.17 – Corpos de prova com 100 mm de diâmetro, de esquerda para a direita mistura: Referência, Verde, Vermelho A, Vermelho B e Amarelo-albino. ....	235
Figura 6.18 – Compactação (a) e aparência final (b) da mistura Vermelho B CPA. ....	237
Figura 6.19 – Mistura Amarelo-albino: passagem do ligante albino (a), usinagem do agregado com o ligante (b). ....	239
Figura 6.20 – Mistura Amarelo-albino: mistura usinada e pronta para compactação (c) e placa para ensaio de refletância em campo (d).....	240
Figura 6.21 – Construção da área experimental: limpeza do local (a). 241	
Figura 6.22 – Construção da área experimental: nivelamento da superfície (b), disposição das formas (c). ....	242
Figura 6.23 – Construção da área experimental: execução da placa de paver vermelho (d). ....	243
Figura 6.24 – Revestimentos construídos na área experimental: <i>petit pavê</i> branco (a). ....	243
Figura 6.25 – Revestimentos construídos na área experimental: <i>petit pavê</i> vermelho (b), paver vermelho (c). ....	244
Figura 6.26 – Revestimentos construídos na área experimental: paver amarelo (d), concreto Portland denso (e). ....	245
Figura 6.27 – Revestimentos construídos na área experimental: concreto Portland poroso (f). ....	246
Figura 6.28 – Placas de mistura asfáltica densa: disposição da mistura para compactação (a), mistura de Referência (b). ....	247
Figura 6.29 – Placas de mistura asfáltica densa: Verde (c), Vermelho A (d).....	248
Figura 6.30 – Placas de mistura asfáltica densa: Vermelho B (e) e Amarelo-albino (f). ....	249
Figura 6.31 – Curva granulométrica da mistura de concreto Portland Vermelho denso. ....	250



Figura 6.32 – Moldagem das placas de mistura de concreto Portland Vermelho denso. ....	251
Figura 6.33 – Diagrama da Etapa de Construção da Área Experimental .....	252
Figura 6.34 – Piranômetro (a) e a disposição do mesmo (b) durante os ensaios de refletância em campo. ....	255
Figura 6.35 – Aparência da superfície das placas de 4 x 4 metros: <i>petit pavê</i> branca (a), <i>petit pavê</i> vermelha (b), <i>paver</i> amarelo (c), <i>paver</i> vermelho (d), concreto Portland denso (e) e concreto Portland poroso(f). ....	256
Figura 6.36 – Medição da refletância das placas de 100 x 108 cm: colocação das placas (a), medição da refletância com a membrana de papel branco (b).....	259
Figura 6.37 – Medição da refletância das placas de 100 x 108 cm: disposição e medição da refletância com a membrana de papel preta (c) e medição da refletância da placa sem uso de membranas (d). ....	260
Figura 6.38 – Medição da refletância dos revestimentos envelhecidos: mistura asfáltica convencional (a). ....	261
Figura 6.39 – Medição da refletância dos revestimentos envelhecidos: pedra <i>petit pavê</i> branca (b), pedra <i>petiti pavê</i> preta (c). ....	262
Figura 6.40 – Medição da refletância dos revestimentos envelhecidos: pedra <i>petit pavê</i> vermelha (d). ....	263
Figura 6.41 – Ensaio de mancha de areia: disposição da areia (a) e formação do círculo para medição do diâmetro(b).....	264
Figura 6.42 – Ensaio de drenabilidade. ....	265
Figura 6.43 – Diagrama da Etapa de Avaliação da Refletância Solar dos Revestimentos em Campo (Etapa V). ....	266
Figura 6.44 – Termistores (a) e termômetro infravermelho (b) utilizados na medição de temperatura das misturas. ....	268
Figura 6.45 – Diagrama da Etapa de Medição da Temperatura Superficial e Interna dos Revestimentos.....	269
Figura 6.46 – Ensaio de resistência à tração da mistura Vermelho A. ....	271
Figura 6.47 – Ensaio de modulo de resiliência da mistura Verde. ....	271
Figura 6.48 – Aparência da misturas CPA de Referência após o ensaio Cântabro. ....	272
Figura 6.49 – Medição da trilha de roda durante o ensaio de deformação permanente. ....	272
Figura 6.50 – Diagrama da Etapa de Ensaios Mecânicos nas Misturas Asfálticas (Etapa VII).....	273
Figura 6.51 – Pátio da Reitoria da UFSC. ....	274

Figura 6.52 – Sensores de temperatura e umidade no pátio da Reitoria da UFSC. ....	275
Figura 6.53 – Pátio da Reitoria da UFSC: modelo no Envi-met. ....	276
Figura 7.1 – Curvas granulométricas dos agregados utilizados. ....	284
Figura 7.2 – Curva viscosidade – temperatura do ligante CAP 50/70, Verde, Vermelho A e Vermelho B com <i>dop</i> . ....	287
Figura 7.3 – Curva viscosidade – temperatura do ligante albino vegetal e do ligante Amarelo-albino. ....	288
Figura 7.4 – DRX do pigmento Amarelo. ....	292
Figura 7.5 – DRX do pigmento Verde. ....	293
Figura 7.6 – DRX do pigmento Vermelho A. ....	294
Figura 7.7 – DRX do pigmento Vermelho B. ....	295
Figura 7.8 – Microscopia do pigmento Amarelo. ....	297
Figura 7.9 – Microscopia do pigmento Marrom A. ....	298
Figura 7.10 – Microscopia do pigmento Marrom B. ....	299
Figura 7.11 – Microscopia do pigmento Marrom C. ....	300
Figura 7.12 – Microscopia do pigmento Preto. ....	301
Figura 7.13 – Microscopia do pigmento Verde. ....	302
Figura 7.14 – Microscopia do pigmento Vermelho A. ....	303
Figura 7.15 – Refletância espectral do ligante Amarelo-albino. ....	305
Figura 7.16 – Refletância espectral do ligante Amarelo. ....	306
Figura 7.17 – Refletância espectral do ligante Marrom A. ....	307
Figura 7.18 – Refletância espectral do ligante Marrom B. ....	308
Figura 7.19 – Refletância espectral do ligante Marrom C. ....	309
Figura 7.20 – Refletância espectral do ligante Preto. ....	310
Figura 7.21 – Refletância espectral do ligante Verde. ....	311
Figura 7.22 – Refletância espectral do ligante Vermelho A. ....	312
Figura 7.23 – Refletância espectral do ligante Vermelho B. ....	313
Figura 7.24 – Refletância espectral do ligante puro – CAP 50/70. ....	314
Figura 7.25 – Refletância espectral da amostras Amarelo-albino, Amarelo, Verde, Vermelho A, Vermelho B e de Referência. ....	316
Figura 7.26 – Refletância espectral da amostras Marrom A, Marrom B, Marrom C, Preto e de Referência. ....	317
Figura 7.27 – Refletância solar do espectro padronizado, da amostra Amarelo-albino e da amostra de Referência. ....	321
Figura 7.28 – Refletância solar da amostra Amarelo-albino, Amarelo, Verde, Vermelho A, Vermelho B e da amostra de Referência. ....	322
Figura 7.29 – Refletância solar da amostra Marrom A, Marrom B, Marrom C, Preto e da amostra de Referência. ....	323
Figura 7.30 – Refletância espectral do ligante Amarelo-albino com porcentagens variáveis de pigmento. ....	326

Figura 7.31 – Refletância espectral do ligante Amarelo com porcentagens variáveis de pigmento.....	327
Figura 7.32 – Refletância espectral do ligante Verde com porcentagens variáveis de pigmento.....	328
Figura 7.33 – Refletância espectral do ligante Vermelho A com porcentagens variáveis de pigmento.....	329
Figura 7.34 – Refletância espectral do ligante Vermelho B com porcentagens variáveis de pigmento.....	330
Figura 7.35 – Refletância dos ligantes Amarelo-albino 3 e Amarelo 2. ....	334
Figura 7.36 – Refletância dos ligantes Amarelo-albino 6 e Amarelo 4. ....	335
Figura 7.37 – Curvas granulométricas selecionadas para a dosagem Superpave.....	337
Figura 7.38 – Curvas granulométricas selecionadas para a dosagem Superpave na escala semi logarítmica.....	338
Figura 7.39 - Curva de compactação da mistura asfálticas coloridas com 100 mm de diâmetro.....	341
Figura 7.40 - Curva de compactação da misturas asfálticas coloridas com <i>dop</i> .....	345
Figura 7.41 – Mistura Vermelho A sem <i>dop</i> (a), e com <i>dop</i> (b). ....	348
Figura 7.42 – Granulometria da mistura asfáltica CPA.....	350
Figura 7.43 - Curva de compactação da misturas asfálticas com ligante albino vegetal. ....	353
Figura 7.44 – Refletância solar em campo dos revestimentos asfálticos. ....	358
Figura 7.45 – Mecanismo de reflexão da radiação solar por parte das superfícies com superfície: lisas (a), grosseira (b) e porosa (c).....	360
Figura 7.46 – Refletância solar em campo dos revestimentos de concreto Portland. ....	362
Figura 7.47 – Refletância solar em campo dos revestimentos de pedra <i>petit pavê</i> . ....	364
Figura 7.48 – Temperatura superficial dos revestimentos no horário crítico.....	366
Figura 7.49 – Temperatura a 1 cm de profundidade dos revestimentos no horário crítico. ....	367
Figura 7.50 – Temperatura a 3 cm de profundidade dos revestimentos no horário crítico. ....	368
Figura 7.51 – Temperatura superficial dos revestimentos de pedra <i>petit pavê</i> . ....	370

Figura 7.52 – Temperatura a 1 cm de profundidade dos revestimentos de pedra <i>petit pavé</i> .	370
Figura 7.53 – Temperatura a 3 cm de profundidade dos revestimentos de pedra <i>petit pavé</i> .	371
Figura 7.54 – Temperatura superficial dos revestimentos de concreto Portland.	373
Figura 7.55 – Temperatura a 1 cm de profundidade dos revestimentos de concreto Portland.	373
Figura 7.56 – Temperatura a 3 cm de profundidade dos revestimentos de concreto Portland.	374
Figura 7.57 – Temperatura superficial das misturas asfálticas densas.	376
Figura 7.58 – Temperatura a 1 cm de profundidade das misturas asfálticas densas.	376
Figura 7.59 – Temperatura a 3 cm de profundidade das misturas asfálticas densas.	377
Figura 7.60 – Temperatura superficial das misturas asfálticas CPA.	379
Figura 7.61 – Temperatura a 1 cm de profundidade das misturas asfálticas CPA.	380
Figura 7.62 – Temperatura a 3 cm de profundidade das misturas asfálticas CPA.	380
Figura 7.63 – Refletância solar e temperatura superficial dos revestimentos.	381
Figura 7.64 – Refletância solar e temperatura a 1 cm de profundidade dos revestimentos.	382
Figura 7.65 – Refletância solar e temperatura a 3 cm de profundidade dos revestimentos.	382
Figura 7.66 – Deformação na trilha de roda, a 60°C, das misturas asfálticas densas, %.	389
Figura 7.67 – Deformação na trilha de roda, a temperatura inferior a 60°C, das misturas asfálticas densas, %.	390
Figura 7.68 – Deformação na trilha de roda, a 60 °C das misturas asfálticas CPA, %.	393
Figura 7.69 – Deformação na trilha de roda, a temperatura variável, das misturas asfálticas CPA, %.	394
Figura 7.70 – Pátio da Reitoria da UFSC.	396
Figura 7.71 – Mapa de temperatura superficial do local simulado. Primeira situação (a), segunda situação (b), terceira situação (c), quarta situação (d), quinta situação (e) e legenda de temperatura valida para todas as situações (f). Cada unidade no mapa corresponde a 4 m de comprimento na escala real.	400

Figura 7.72 – Mapa de temperatura a diferentes alturas do local simulado. Primeira situação (a), segunda situação (b), terceira situação (c), quarta situação (d) e quinta situação (e). ..... 406



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Frequências e comprimentos de onda das cores constituintes do espectro visível.....	48
Tabela 3.1 - Temperatura média da estrutura das cidades gregas e intensidade da ilha de calor urbana, entre parêntese. Valores em °C....	78
Tabela 3.2 - Estrutura Urbana de algumas cidades americanas. ....	82
Tabela 3.3 - Valores do albedo por região de radiação solar dos materiais estudados.....	85
Tabela 3.4 - Valores do albedo por região de radiação solar dos materiais estudados.....	86
Tabela 3.5 - Temperatura superficial dos materiais para condições climáticas de acordo com a Norma ASTM 1980-98; albedo = $\alpha$ ; emitância = $e$ ; temperatura superficial = $T_s$ .....	89
Tabela 3.6 - Temperatura superficial dos materiais para condições climáticas de acordo com a Norma ASTM 1980-98; albedo = $\alpha$ ; emitância = $e$ ; temperatura superficial = $T_s$ .....	90
Tabela 4.1 - Resumo das características químicas predominantes dos pigmentos com estrutura de rutilo, hematita, espinela e espinela inversa. ....	133
Tabela 4.2 - Propriedades ópticas dos pigmentos estudados. Refletância NIR sobre fundo branco (ROWnir), refletância NIR sobre fundo preto (ROBnir) e transmitância visível ( $T_{vis}$ ) das películas pigmentadas para cada categoria do pigmento.....	137
Tabela 4.3 - Composição das tintas.....	142
Tabela 4.4 – Valores de albedo e emissividade dos materiais frios mencionados neste trabalho. ....	147
Tabela 4.5 - Porcentagem da área pavimentada por tipo de uso .....	149
Tabela 4.6 - Valores de albedo de os materiais de pavimentação convencionais e frios.....	157
Tabela 4.7 - Albedo dos componentes e do concreto Portland endurecido. O peso da água, não mostrada, corresponde à porcentagem faltante. .	158
Tabela 4.8 - Temperatura superficial de quatro revestimentos: CBUQ, AAUQ, PR e GR.....	162
Tabela 4.9 - Temperatura ambiental de quatro revestimentos: CBUQ, AAUQ, PR e GR.....	162
Tabela 4.10 - Albedo de quatro revestimentos: CBUQ, AAUQ, PR e GR. ....	163
Tabela 4.11 - Refletância solar das amostras de mistura asfáltica colorida testadas. ....	170

Tabela 4.12 - Temperatura superficial diurna e noturna média e máxima das misturas coloridas ensaiadas.....	173
Tabela 5.1 - Requisitos de dosagem de mistura asfáltica do DNIT-ES 031/2004 .....	189
Tabela 5.2 - Pontos de controle da metodologia Superpave. ....	193
Tabela 5.3 - Zona restrita da metodologia Superpave.....	193
Tabela 5.4 - Esforço de compactação giratório Superpave.....	196
Tabela 5.5 – Critérios de aceitação das misturas Superpave.....	200
Tabela 6.1 – Proporção do ligante e dos pigmentos das amostras de ligantes coloridos. ....	219
Tabela 6.2 – Ligante coloridos com proporções variáveis de pigmento ou ligante.....	220
Tabela 6.3 – Proporções dos ligantes Amarelo e Amarelo-albino. ....	221
Tabela 6.4 – Proporção dos materiais utilizados na mistura de concreto Portland denso Vermelho.....	251
Tabela 7.1 – Características físicas dos agregados minerais.....	283
Tabela 7.2 – Características do ligante CAP 50/70 e do ligante albino vegetal.....	285
Tabela 7.3 – Ensaio de viscosidade rotacional do ligante CAP 50/70 (com <i>dop</i> ), Verde, Vermelho A, Vermelho B e do ligante Amarelo-albino. ....	286
Tabela 7.4 – pH mínimo e máximo dos pigmentos Amarelo, Verde, Vermelho A e Vermelho B. ....	304
Tabela 7.5 – Refletância solar dos ligante coloridos.....	324
Tabela 7.6 – Refletância solar do ligante Amarelo-albino com porcentagens variáveis de pigmento. ....	331
Tabela 7.7 – Refletância solar do ligante Amarelo com porcentagens variáveis de pigmento. ....	331
Tabela 7.8 – Refletância solar do ligante Verde com porcentagens variáveis de pigmento. ....	331
Tabela 7.9 – Refletância solar do ligante Vermelho A com porcentagens variáveis de pigmento. ....	332
Tabela 7.10 – Refletância solar do ligante Vermelho B com porcentagens variáveis de pigmento. ....	332
Tabela 7.11 – Refletância solar dos ligantes Amarelo e Amarelo-albino. ....	333
Tabela 7.12 – Granulometrias selecionadas para a dosagem Superpave. ....	339
Tabela 7.13 – Propriedades volumétricas das misturas de prova.....	340
Tabela 7.14 – Proporção dos materiais utilizados na dosagem e compactação das misturas asfálticas densas. ....	340



Tabela 7.15 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura de Referência.....	342
Tabela 7.16 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Verde.....	342
Tabela 7.17 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Vermelho A.....	342
Tabela 7.18 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Vermelho B.....	343
Tabela 7.19 – Dados de compactação da mistura asfálticas com 100 mm de diâmetro com <i>dop</i> .....	344
Tabela 7.20 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura de Referência com <i>Dop</i> .....	346
Tabela 7.21 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Verde com <i>Dop</i> .....	346
Tabela 7.22 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Vermelho A com <i>Dop</i> .....	346
Tabela 7.23 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Vermelho B com <i>Dop</i> .....	347
Tabela 7.24 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida nas misturas sem e com <i>dop</i> .....	347
Tabela 7.25 – Granulometria da mistura asfáltica CPA.....	349
Tabela 7.26 – Proporção dos materiais utilizados nas misturas CPA.....	351
Tabela 7.27 – Proporção dos materiais utilizados nas misturas albinas.....	352
Tabela 7.28 – Dados de compactação da mistura asfálticas com ligante albino vegetal.....	352
Tabela 7.29 – Altura média da macrotextura dos revestimentos.....	354
Tabela 7.30 – Drenabilidade dos revestimentos.....	355
Tabela 7.31 – Refletância solar em campo dos revestimentos.....	356
Tabela 7.32 – Refletância solar dos ligantes coloridos em laboratório e das misturas asfálticas densa e CPA em campo.....	359
Tabela 7.33 – Temperatura superficial e interna dos revestimentos de pedra <i>petit pavê</i> .....	369
Tabela 7.34 – Temperatura superficial e interna dos revestimentos de concreto Portland.....	372
Tabela 7.35 – Temperatura superficial e interna dos revestimentos de mistura asfáltica densa.....	375
Tabela 7.36 – Temperatura superficial e interna dos revestimentos de mistura asfáltica CPA.....	378
Tabela 7.37 – Resistência à tração das misturas asfálticas.....	384
Tabela 7.38 – Resistência à desagregação das misturas asfálticas.....	385

Tabela 7.39 – Módulo resiliente das misturas asfálticas. ....	386
Tabela 7.40 – Temperatura de ensaio das misturas coloridas densas. ....	387
Tabela 7.41 – Deformação permanente das misturas asfálticas densas. .....	388
Tabela 7.42 – Temperatura de ensaio das misturas coloridas CPA. ....	391
Tabela 7.43 – Deformação permanente das misturas asfálticas CPA. ....	392

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Efeitos ambientais da ilha de calor urbana.....	98
Quadro 3.2 - Efeitos ambientais da ilha de calor urbana.....	99
Quadro 5.1 - Classes de Macrotextura .....	206
Quadro 6.1 - Refletância solar dos revestimentos utilizados na modelagem climática.....	276
Quadro 6.2 - Revestimentos simulados no pátio da Reitoria da UFSC. ....	277
Quadro 7.1 – Características físicas e químicas dos pigmentos estudados. ....	290
Quadro 7.2 - Refletância solar dos revestimentos utilizados na modelagem climática.....	396
Quadro 7.3 - Revestimentos simulados no pátio da Reitoria da UFSC. ....	397



## LISTA DE ABREVIATURAS

cm	Centímetro
K	Grau Kelvin
g	grama
nm	nanômetro
$\mu\text{m}$	micrômetro
AU	Unidade Astronômica
W	Watt
Hz	Hertz
m	metro
J	Joule
TJ	tera-Joule
s	segundo
EHz	exa-Hertz
PHz	peta-Hertz
mm	milímetro
MHz	mega-Hertz
GHz	giga-Hertz
km	quilometro
THz	tera-Hertz
eV	elétron-volt
keV	quilo elétron-volt
meV	mili elétron-volt
$\mu\text{eV}$	micro elétron-volt
feV	femto elétron-volt



## SUMÁRIO

1	Introdução.....	37
1.1	Objetivos.....	38
1.1.1	Geral.....	38
1.1.2	Específicos.....	38
1.2	Estrutura do trabalho .....	39
2	Energia Solar .....	45
2.1	Radiação Solar.....	45
2.2	Espectro Eletromagnético.....	45
2.2.1	Radiação visível.....	48
2.2.2	Região do infravermelho.....	48
2.2.3	Radiação UV.....	49
2.2.4	Dispersão da radiação na atmosfera.....	50
2.3	Radiação eletromagnética na Terra .....	52
2.4	Coefficiente de massa de ar .....	55
2.5	Interação da radiação e a matéria.....	59
2.6	Albedo .....	61
2.7	Medição da irradiância Solar.....	61
2.7.1	Pirheliômetro .....	61
2.7.2	Piranômetro.....	62
2.7.3	Espectrofotômetro.....	63
2.8	Resumo do Capítulo .....	66
3	Ilha de Calor Urbana .....	73
3.1	Introdução.....	73
3.2	Causas do Fenômeno de Ilha de Calor Urbana.....	79
3.2.1	Mudança no Tipo de Uso do Solo.....	81
3.2.2	Albedo.....	83
3.2.3	Geometria Urbana.....	92
3.2.4	Emissões de Calor Antropogênico.....	96
3.3	Consequências da Ilha de Calor Urbana.....	97
3.3.1	Efeitos na Saúde.....	99
3.3.2	Efeitos Ecológicos .....	102
3.3.3	Efeitos no Clima e na Atmosfera .....	102

3.3.4	Efeitos no Consumo de Energia .....	105
3.3.5	Pegada Ecológica.....	107
3.4	Ilha de Calor Noturna.....	108
3.5	Adaptação e Medidas de Mitigação Contra as Ilhas de Calor Urbano .....	111
3.5.1	Adaptação.....	111
3.5.2	Mitigação.....	111
3.6	Modelo de Simulação Climática Envi-met.....	117
3.7	Resumo do Capítulo.....	120
4	Materiais Frios .....	129
4.1	Introdução .....	129
4.2	Pigmentos Frios.....	130
4.2.1	Fabricação.....	132
4.2.2	Uso dos Pigmentos Frios .....	132
4.2.3	Propriedades Ópticas no Espectro Solar de Alguns Tipos de Pigmentos.....	135
4.3	Tintas Frias.....	141
4.4	Pavimentos Frios .....	148
4.4.1	Mecanismo de Formação da ICU pelos Pavimentos Urbanos .....	149
4.4.2	Tipos de Pavimentos Frios.....	152
4.4.3	Incremento do Albedo dos Pavimentos .....	154
4.4.4	Efeito da Temperatura no Envelhecimento do Ligante .....	176
4.4.5	Efeito da Temperatura no Desempenho da Mistura Asfáltica .....	177
4.5	Resumo do Capítulo.....	178
5	Misturas Asfálticas.....	185
5.1	Introdução .....	185
5.2	Agregados .....	185
5.3	Ligante asfáltico .....	186
5.4	Metodologia de Dosagem Marshall .....	188
5.5	Metodologia de Dosagem Superpave.....	189
5.5.1	O Strategic Highway Research Program .....	189



5.5.2	Seleção do Ligante Asfáltico .....	190
5.5.3	Estrutura Granulométrica das Misturas.....	191
5.5.4	Ensaio de Compactação na Prensa de Compactação Giratória .....	193
5.5.5	Preparação e Moldagem das Misturas asfálticas	195
5.5.6	Requisitos da Mistura asfáltica .....	198
5.6	Ensaio de Caracterização das Misturas Asfálticas .....	202
5.6.1	Ensaio de Resistência à Tração.....	202
5.6.2	Módulo de Resiliência .....	203
5.6.3	Ensaio de Deformação Permanente .....	203
5.6.4	Ensaio Cântabro.....	205
5.7	Ensaio de Caracterização da Textura das Misturas Asfálticas .....	206
5.7.1	Ensaio de Mancha de Areia .....	206
5.7.2	Ensaio de Drenabilidade .....	207
5.8	Resumo do Capítulo .....	207
6	Método da Pesquisa.....	213
6.1	Etapa 1 – Refletância dos ligantes coloridos .....	213
6.1.1	Influência do Tipo de Pigmento na Refletância dos Ligantes .....	218
6.1.2	Influência da Porcentagem de Pigmento na Refletância dos Ligantes .....	219
6.1.3	Influência do Tipo de Ligante na Refletância Solar. .....	221
6.2	Etapa 2 – Caracterização dos Materiais Empregados.....	225
6.3	Etapa 3 – Dosagem das misturas asfálticas .....	226
6.4	Etapa 4 – Construção da Área Experimental.....	241
6.4.1	Construção dos Revestimentos Não Asfálticos..	241
6.4.2	Moldagem das Placas de Mistura Asfáltica .....	246
6.4.3	Concreto Portland com Pigmento Vermelho .....	250
6.5	Etapa 5 – Avaliação da refletância solar dos revestimentos em campo .....	252
6.5.1	Medição Refletância das Placas Maiores.....	253

6.5.2	Medição Refletância das Placas Menores.....	256
6.5.3	Medição da Refletância de Revestimentos Envelhecidos .....	261
6.5.4	Ensaio de Mancha de Areia .....	263
6.5.5	Drenabilidade.....	265
6.6	Etapa 6 – Medição da temperatura superficial e interna dos revestimentos .....	267
6.7	Etapa 7 – Ensaios Mecânicos nas misturas asfálticas.....	269
6.8	Etapa 8 – Modelagem Climática .....	273
6.9	Etapa 9 – Resultados e análise dos resultados.....	277
7	Resultados e Análise .....	283
7.1	Caracterização dos Materiais Empregados.....	283
7.1.1	Agregados.....	283
7.1.2	Ligante .....	285
7.1.3	Pigmentos .....	289
7.2	Pré-Seleção dos Pigmentos .....	304
7.2.1	Influência do Tipo de Pigmento na Refletância dos Ligantes .....	304
7.2.2	Influência da Porcentagem de Pigmento na Refletância dos Ligantes.....	325
7.2.3	Influência do Tipo de Ligante na Refletância Solar .....	333
7.3	Dosagem Das Misturas Asfálticas Densas .....	336
7.3.1	Seleção da Estrutura de Agregados .....	336
7.3.2	Seleção do Teor de Ligante de Dosagem.....	339
7.3.3	Proporção dos Materiais das Misturas Asfálticas .... .....	340
7.3.4	Avaliação da Sensibilidade à Água das Misturas Asfálticas sem <i>Dop</i> .....	342
7.4	Dosagem das Misturas Asfálticas CPA.....	349
7.5	Dosagem da Mistura Asfálticas com Ligante Albino Vegetal .....	351
7.6	Refletância Solar em Campo.....	354

7.6.1	Avaliação da Textura Superficial dos Revestimentos .....	354
7.6.2	Avaliação da Refletância Solar .....	355
7.7	Temperatura dos revestimentos em Campo.....	365
7.7.1	Temperatura Superficial.....	366
7.7.2	Temperatura a 1 cm de Profundidade .....	367
7.7.3	Temperatura a 3 cm de Profundidade .....	368
7.7.4	Temperatura dos Revestimentos de Pedra <i>Petit Pavê</i> .....	369
7.7.5	Temperatura dos Revestimentos de Concreto Portland .....	371
7.7.6	Temperatura dos Revestimentos de Mistura Asfáltica Densa .....	374
7.7.7	Temperatura dos Revestimentos de Mistura Asfáltica CPA .....	377
7.7.8	Relação entre Temperatura e Refletância Solar .	380
7.8	Ensaio Mecânicos .....	383
7.8.1	Resistência à Tração .....	383
7.8.2	Ensaio Cântabro.....	384
7.8.3	Módulo Resiliente.....	385
7.8.4	Deformação Permanente.....	386
7.9	Modelagem Climática.....	395
8	Conclusões e Recomendações .....	409
8.1	Conclusões.....	409
8.2	Recomendações .....	414
ANEXO	.....	415



## 1 INTRODUÇÃO

A falta de controle e o deficiente planejamento da urbanização está causando diversos efeitos indesejados a sociedade, que se não forem tratados a tempo poderão causar dano permanente à saúde da população e do planeta. Um exemplo disso é o fenômeno climático conhecido como “Ilha de Calor Urbana”, caracterizado pelo incremento da temperatura dos centros urbanos em relação às áreas rurais circundantes. Estima-se que durante a temporada de verão esta diferença pode chegar a ser de 3 a 5 °C. O fenômeno tem a sua origem no crescimento das grandes metrópoles o qual se acelerou desde a Segunda Guerra Mundial (Mirzaei e Haghghat, 2010). Atualmente, 50% da população mundial vive em áreas urbanas e estima-se que no ano 2030 esta porcentagem seja de 60%. Além do desconforto térmico, as principais consequências da elevação da temperatura do meio urbano são o aumento do consumo de energia para refrigeração de ambientes, a formação de poluentes atmosféricos e, inclusive, a morte de grupos de pessoas sensíveis às mudanças térmicas (Ashie, 2008).

Existem múltiplos fatores que contribuem direta ou indiretamente para o aumento excessivo do calor nas cidades. No entanto, o uso de materiais com baixa refletividade e a carência de áreas verdes são os mais importantes. A prática mais utilizada para mitigar a Ilha de Calor Urbana consiste no uso de materiais mais refletivos (Solecki *et al.* 2005; Rosenfeld *et al.*, 1995; Mirzaei e Haghghat, 2010). Estes materiais apresentam superfícies de cores claras ou superfícies escuras que conseguem refletir mais efetivamente a radiação solar, tanto a visível como a invisível (infravermelha) (Bauxbaum e Pfaff, 2005). Nas edificações, esta prática conta com maior número de estudos realizados e já é muitas vezes usada. Na área da pavimentação, porém, ainda é incipiente.

As áreas pavimentadas podem representar até 45% da superfície de uma cidade e tem efeitos ambientais importantes nas áreas urbanas, sendo um deles a formação da Ilha de Calor Urbana. Durante o dia, a temperatura dos revestimentos asfálticos pode atingir valores de até 65 °C e o calor armazenado é irradiado ao ambiente durante o dia ou à noite. Além do incremento da temperatura do ar, os pavimentos aquecem, também, a água das chuvas que atingem a superfície urbana criando um desequilíbrio ecológico devido à mudança de temperatura da mesma. Devido à grande porção da área urbana coberta pelos revestimentos (tanto

nas rodovias e vias como nos estacionamentos e calçadas), estes são elementos importantes para serem considerados na mitigação da Ilha de Calor Urbana (Cambridge Systematics, 2005).

A presente pesquisa avalia o uso de revestimentos com refletividade elevada na mitigação da Ilha de Calor Urbana. Os revestimentos estudados foram misturas asfálticas, concreto Portland, peças pré modadas de concreto Portland (*pavers*) e de pedra *petit pavé*. Todos estes materiais são amplamente empregados no Brasil na pavimentação de ruas, calçadas e estacionamentos. Nas misturas asfálticas, foram adicionados pigmentos a base de óxidos metálicos mistos, os quais apresentam uma alta refletividade da radiação infravermelha do espectro solar.

Os ensaios realizados tiveram como finalidade caracterizar a refletância solar, a temperatura superficial e interna e a resistência mecânica dos materiais utilizados. Adicionalmente aos ensaios em laboratório e em campo, foram modelados, em computador, um microclima urbano para se avaliar a influência da mudança ou da implantação de alguns dos revestimentos estudados na temperatura superficial e ambiental do local.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o uso de pigmentos de óxidos metálicos mistos em misturas asfálticas, quanto à sua capacidade de mitigar a Ilha de Calor Urbana.

### 1.1.2 Específicos

- Realizar a dosagem de misturas asfálticas de granulometria densa e camada porosa de atrito (CPA), abrangendo o uso de pigmentos de óxidos metálicos mistos e avaliando a influência dos mesmos nos parâmetros de compactação das misturas asfálticas.
- Medir, mediante ensaios em laboratório, o valor da refletância solar de ligantes asfálticos coloridos elaborados a partir da

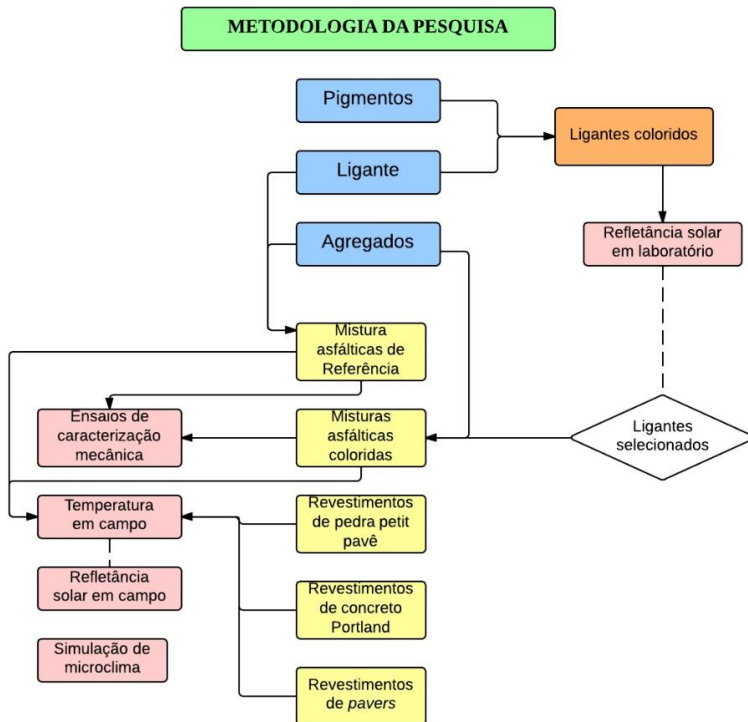
mistura de pigmentos com ligante CAP 50/70 e ligante albino vegetal.

- Medir, mediante ensaios em campo, o valor da refletância solar de revestimentos utilizados no Brasil na pavimentação de vias urbanas, estacionamentos e calçadas, fabricados à base dos seguintes materiais: mistura asfáltica com e sem pigmentos, concreto Portland com e sem pigmentos, blocos de concreto Portland (*pavers*) e pedra *petit pavê* de diversas cores.
- Coletar e analisar os valores de temperatura superficial e interna a 1 e 3 cm de profundidade dos revestimentos mediante ensaios em campo.
- Caracterizar as misturas asfálticas mediante ensaios mecânicos de resistência à tração, ensaio de Cântabro, módulo resiliente e deformação permanente. Neste último, os ensaios foram realizados tanto à temperatura padrão quanto a uma temperatura reduzida variável dependendo do tipo de mistura.
- Modelar, no software Envi-met, um microclima urbano com a finalidade de avaliar a influência das possíveis mudanças na temperatura ambiental em função do tipo de revestimento utilizado no local.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A revisão bibliográfica do presente trabalho foi desenvolvida através da coleta de informações referentes à radiação solar, ao fenômeno de Ilha de Calor Urbana e à metodologia de dosagem Superpave. Os conceitos e dados foram coletados de livros, artigos publicados em jornais de divulgação científica na internet e de Normas referentes aos procedimentos de ensaios.

Com base na bibliografia foi definida a metodologia da pesquisa assim como as variáveis do estudo que incluem os tipos de revestimentos a serem estudados, os materiais que conformam as misturas asfálticas e os ensaios realizados para coleta de dados. O esquema da metodologia utilizada nesta pesquisa é mostrada na Figura 1.1.



**Figura 1.1** – Metodologia utilizada no estudo.

Na dosagem das misturas asfálticas foram utilizados agregados de origem granítica provenientes do sul do Estado de Santa Catarina, dois tipos de ligante (CAP 50/70 e albino vegetal) e oito tipos de pigmentos. Foram formuladas dois tipos de granulometrias, densa e CPA (camada porosa de atrito). A dosagem da mistura densa foi realizada segundo a metodologia Superpave. As misturas CPA foram dosadas tomando como base nas diretrizes de Knabben (2012) e Meurer Filho (2001).

Inicialmente os pigmentos passaram por uma etapa de pré-seleção com a finalidade de identificar aqueles com maiores valores de refletância infravermelha. Uma vez selecionados, os pigmentos foram utilizados na dosagem de misturas asfálticas coloridas com granulometria densa e CPA.

Para a realização dos ensaios em campo, foi projetada uma área experimental onde foram construídas placas (4x4 m) de sete tipos de



revestimentos com os seguintes materiais: pedra *petit pavé* nas cores branca, preta e vermelha; *pavers* nas cores amarela e vermelha; e concreto Portland com granulometrias densa e porosa. No caso das misturas asfálticas, placas de tamanho reduzido (1x1 m) foram dispostas, também na área experimental, para a realização dos ensaios.

A refletância solar e temperatura interna e superficial em campo foi medida para todos os revestimentos construídos e para as misturas asfálticas, densas e CPA, com e sem adição de pigmentos. Os ensaios foram realizados durante a temporada correspondente ao verão no hemisfério sul e em dias ensolarados sem a presença de nuvens (janeiro a março de 2013).

Corpos de prova cilíndricos e placas das misturas asfálticas foram moldados com a finalidade de caracterizar a influência da adição de pigmento no comportamento mecânico mediante o ensaio de resistência à tração, módulo resiliente, ensaio Cântabro e deformação permanente.

Finalmente, foi modelado um microclima urbano em uma área localizada no pátio da Reitoria da UFSC. O software utilizado foi alimentado com os dados de refletância solar coletados durante os ensaios em campo para os diferentes tipos de revestimentos. A finalidade do modelamento foi avaliar a influência da mudança do tipo de revestimento na temperatura ambiental do local.

A pesquisa foi dividida em oito capítulos descritos a seguir:

O Capítulo 1 de Introdução apresenta a pesquisa ao leitor, indicando a importância da mesma, os objetivos e a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 2 de Energia Solar são apresentados os conceitos básicos da radiação emitida pelo Sol, do espectro eletromagnético e das regiões que o conformam. É feita uma revisão dos fenômenos da interação entre a matéria e a energia; sobretudo dos conceitos de refletância e absorção. Na última parte são apresentados os métodos para a medição da refletância solar tanto em laboratório como em campo.

No Capítulo 3 de Ilha de Calor Urbana, se faz uma revisão do fenômeno. São descritas as principais causas da sua formação e as consequências para a população de grupos de risco (idosos > 75 anos e

crianças < 5 anos) e o meio ambiente, assim como as técnicas de adaptação e as medidas estudadas e implementadas para a sua mitigação.

O Capítulo 4 de Materiais Frios compreende uma revisão bibliográfica dos materiais utilizados na mitigação da Ilha de Calor Urbana. Neste capítulo se dá ênfase especial aos pigmentos, tintas e pavimentos frios. Os conceitos estão acompanhados de dados que correlacionam o uso destes materiais com os benefícios econômicos e ambientais obtidos em pesquisas realizadas até a presente data.

No Capítulo 5 de Misturas Asfáltica são apresentados os conceitos básicos das misturas utilizadas na pavimentação e é feita uma descrição da metodologia de dosagem Superpave. Esta metodologia foi escolhida devido à disponibilidade dos equipamentos necessários para a sua implementação, além da comprovada eficiência na dosagem de misturas. Na parte final do capítulo são apresentados alguns dos ensaios de caracterização mecânica utilizados no estudo. Estes ensaios foram escolhidos tendo-se em consideração que as misturas coloridas estudadas serão utilizadas como camadas de rolamento de pequena espessura (viabilidade econômica).

No Capítulo 6 de Método da Pesquisa explica-se as Etapas e os procedimentos utilizados no presente trabalho. São descritos os materiais, as granulometrias, proporções de dosagem, critérios de seleção e os ensaios utilizados na pesquisa. O conteúdo do capítulo está acompanhado do registro fotográfico dos materiais elaborados e dos ensaios realizados.

No Capítulo 7 de Resultados e Análise são apresentados os resultados da caracterização dos materiais, dosagem das misturas asfálticas, refletância em laboratório e em campo, temperatura em campo, ensaios mecânicos e simulação numérica da Ilha de Calor Urbana. A partir dos dados coletados, é realizada a análise e a determinação da influência do uso dos pigmentos nas misturas asfálticas. São apresentados, também, os resultados da simulação realizada no software Envi-met para determinar os benefícios do uso de pavimentos refletivos na temperatura ambiente no meio urbano.

O Capítulo 8 de Conclusões e Recomendações apresenta as principais conclusões obtidas no estudo e as recomendações para trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHIE, Yasunobu. **Management of Urban Heat Environment**. *In*: HANAKI, Keisuke (Org.). *Urban Environmental Management and Technology*. [s.l.]: Springer, 2008. p. 215–238.

BAUXBAUM, G.; PFAFF, G. **Industrial Inorganic Pigments**, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Germany, 2005. p. 313.

Cambridge Systematics, Inc. **Cool Pavement Report**. Maryland: [s.n.], 2005.

MIRZAEI, Parham a.; HAGHIGHAT, Fariborz. **Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations**. *Building and Environment*, v. 45, n. 10, 2010. p. 2192–2201.

ROSENFELD A.H. et al, **Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, and updates**, *Energy and Buildings* 22, 1995. p. 255–265.

SOLECKI, William D. *et al*. **Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey**. *Environmental Hazards*, v. 6, n. 1, 2005. p. 39–49.



## 2 ENERGIA SOLAR

### 2.1 RADIAÇÃO SOLAR

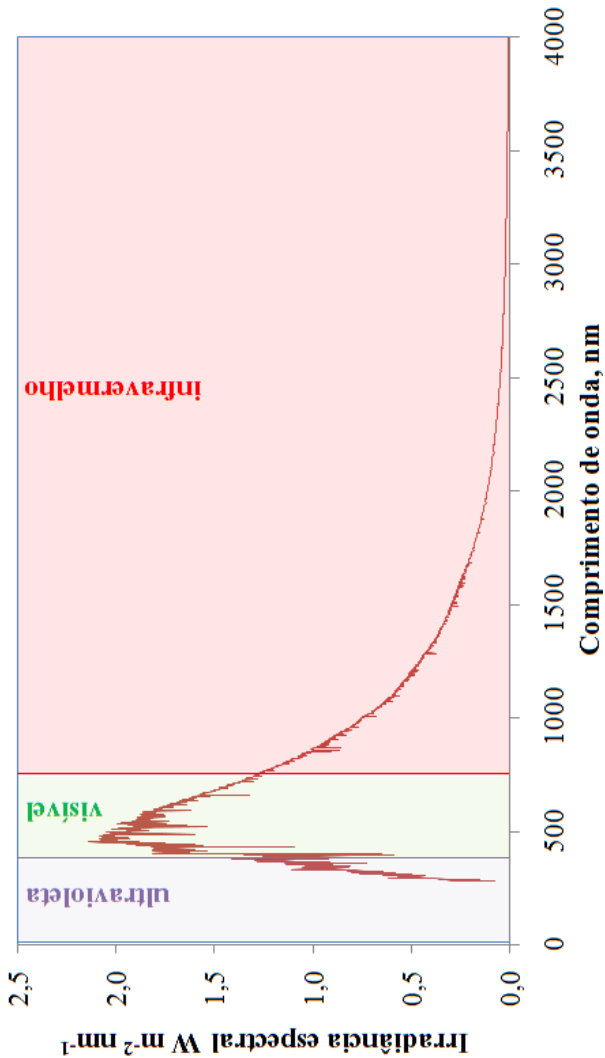
A radiação solar é o termo comum para se referir à radiação eletromagnética emitida pelo Sol. Virtualmente, toda a energia radiante recebida pela Terra emana do Sol como radiação solar. A quantidade e a natureza espectral da radiação solar é função da temperatura de emissão do disco solar, a qual é de 5800 K. Menos de 0,2% da energia do Sol é emitida nos comprimentos de onda menores que 250 nm (nanômetros) e uma quantidade similar é irradiada nos comprimentos de onda longos maiores que 6  $\mu\text{m}$ . A região de comprimento de onda de maior emissão é a porção visível do espectro, entre os 400 e 700 nm. O pico da distribuição da irradiância começa aos 465 nm (Figura 2.1) (Hoyt e Schatten, 1997 – Mc Arthur, 2005, 2005). A irradiância total solar, às vezes chamada de constante solar, é o fluxo de energia recebido pela Terra proveniente do Sol e que tem um valor aproximado de  $1367 \text{ W m}^{-2}$ , a 1 AU (Unidade Astronômica), que corresponde a uma temperatura solar efetiva de 5800 K (Brasseur e Solomon, 2005) (Badescu, 2008).

A quantidade de energia no topo da atmosfera em qualquer localização acima da Terra é também afetada pela inclinação do eixo terrestre com relação ao plano da sua órbita ao redor do Sol (o plano eclíptico). Como a Terra orbita o Sol, a aparente localização do astro se move de norte a sul do equador devido à mudança no ângulo entre o Sol e a Terra. A declinação solar é uma medida angular da variação da inclinação do eixo de rotação da Terra, a qual oscila entre  $+23^{\circ}27'$  (norte) no solstício de verão no hemisfério norte e  $-23^{\circ}27'$  (sul) no solstício de inverno. Nos equinócios, quando o Sol está diretamente sobre o equador, a declinação do Sol é zero (Mc Arthur, 2005).

### 2.2 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

O processo mais importante responsável pela transferência de energia na atmosfera é a radiação eletromagnética. Esta radiação viaja na forma de onda e todas as ondas eletromagnéticas viajam à mesma velocidade, que é a velocidade da luz,  $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$  no vácuo, que é muito próxima à velocidade no ar. A luz visível (VIS), que pode ser detectada pelo olho humano, junto com os raios gama, os Raios-X, a radiação ultravioleta (UV), a radiação infravermelha (IR), as micro-ondas, os sinais de televisão e as ondas de rádio formam o espectro eletromagnético

(Liou, 2002). Este espectro (Figura 2.1) representa a irradiância espectral (intensidade da radiação solar) segundo o comprimento de onda da radiação.



**Figura 2.1** – Espectro eletromagnético extraterrestre.

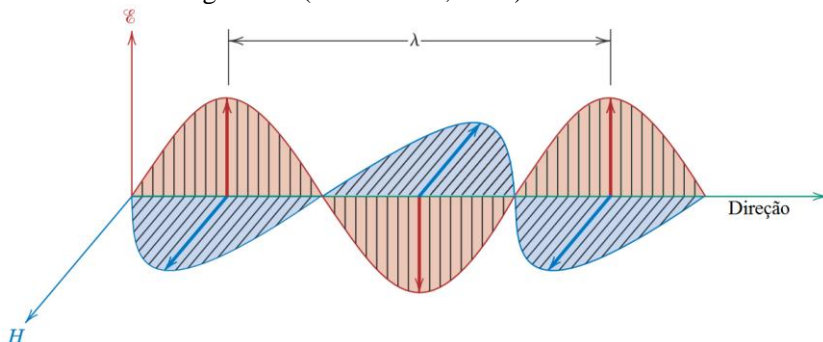
Para descrever qualquer onda, existem três parâmetros básicos: a frequência, o comprimento de onda e a velocidade de propagação. Como

todas as ondas eletromagnéticas viajam na velocidade da luz,  $c$ , a relação fundamental é (Liou, 2002) (Ghetti *et al.*, 2001):

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

### Equação 2.1

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda, em metros (m), e  $\nu$  é a frequência em Hertz (Hz), ou ciclos por segundo. O comprimento de onda se mede entre dois pontos correspondentes ao longo da onda como se mostra na Figura 2.2. A fórmula é válida para qualquer tipo de onda e não só para as ondas eletromagnéticas (Ghetti *et al.*, 2001).



**Figura 2.2** – O comprimento de onda é a distância entre dois pontos correspondentes na mesma localização desde um ciclo até outro ciclo.

**Fonte:** Callister, 1997 (adaptado).

A região de Raios-X do espectro eletromagnético consiste em ondas com comprimento entre 0,01 a 10 nm e com frequências entre 30 EHz (exa-hertz) a 30 PHz (peta-hertz) e são adjacentes à região ultravioleta do espectro. A região de raios gama do espectro tem comprimento de onda menor a 0,01 nm e frequências maiores aos 30 EHz. Do outro lado do espectro se encontra a região das micro-ondas com comprimentos de onda entre 1 mm a 1 m e frequência entre os 300 MHz (mega-hertz) a 300 GHz (giga-hertz). As ondas de rádio tem as menores frequências do espectro, começando nos 300 GHz até os 3 Hz (hertz) e comprimentos de onda entre 1 mm a 100 000 km (Liou, 2002). A região IR (infravermelha) tem comprimentos de onda desde os 750 nm até 1 mm e frequência entre 400 THz (terá-hertz) a 300 GHz. A região VIS (visível) tem frequências entre os 750 a 400 THz e comprimentos de onda entre os 380 a 750 nm. Finalmente a radiação UV (ultravioleta) tem comprimentos de onda entre os 10 a 380 nm e frequências entre os 750 THz a 30 PHz.

### 2.2.1 Radiação visível

O espectro visível da luz é a região do espectro eletromagnético que pode ser detectado pelo olho humano. A radiação eletromagnética nesta faixa de comprimento de onda é chamada de luz visível ou simplesmente luz. Um olho humano típico reage aos comprimentos de onda desde aproximadamente 380 nm a 750 nm. Esta região representa entre 43% da energia do espectro que chega na Terra. Em termos de frequência, corresponde a 400 a 789 THz.

Cada comprimento de onda individual, dentro do espectro dos comprimentos de onda da luz visível, representa uma cor em particular. A dispersão da luz visível produz as cores vermelha (R), laranja (O), amarela (Y), verde (G), azul (B), e violeta (V). Quando todos os comprimentos de onda do espectro da luz visível incidem no olho ao mesmo tempo, o branco é percebido. A sensação de branco não é resultado de uma cor de luz. Pelo contrário, a sensação de branco resulta da mistura de duas ou mais cores da luz. Se todos os comprimentos de onda da luz visível dão a aparência de branco, a falta destes comprimentos de onda dá a aparência de preto. A Tabela 2.1 mostra as frequências e comprimentos de onda das cores constituintes do espectro visível. No entanto, as faixas de cor indicadas são uma aproximação porque, na verdade, o espectro é contínuo sem um limite claro entre uma cor e a seguinte.

**Tabela 2.1** – Frequências e comprimentos de onda das cores constituintes do espectro visível.

Cor	Frequência	Comprimento de onda
<b>Violeta</b>	667 – 789 THz	380 – 450 nm
<b>Azul</b>	606 – 668 THz	450 – 495 nm
<b>Verde</b>	526 – 606 THz	495 – 570 nm
<b>Amarelo</b>	508 – 526 THz	570 – 590 nm
<b>Laranja</b>	484 – 508 THz	590 – 620 nm
<b>Vermelho</b>	400 – 484 THz	620 – 750 nm

### 2.2.2 Região do infravermelho

A radiação infravermelha é a região do espectro eletromagnético que compreende os comprimentos de onda desde os 750 nm até os 1000  $\mu\text{m}$ . Esta região possui 52% da energia que chega na Terra. A faixa da



região infravermelha está dividida em três sub-regiões: o infravermelho próximo (NIR), entre os 750 a 2500 nm; o infravermelho médio (MIR), entre 2500 a 5000 nm; e infravermelho distante (FIR), entre 5000 nm a 1000  $\mu\text{m}$  (Figura e Teixeira, 2007). A sub-região NIR é a que possui a maior quantidade de energia dentro da região IR. É nesta região que serão realizados os ensaios de medida de refletância solar dos materiais estudados no presente trabalho.

### 2.2.3 Radiação UV

Os raios UV que constituem aproximadamente 5% da radiação terrestre. É muito comum falar de luz ultravioleta ou UVL. No entanto, este termo é incorreto. O termo luz deve ser reservado para aquela radiação nos comprimentos de onda de 380 a 750 nm, que alcançam a retina e resultam na sensação de visão (Diffey, 2002). A radiação UV cobre uma pequena parte do espectro eletromagnético ocupando a região com comprimentos de onda entre 380 a 100 nm.

Devido à absorção pelo oxigênio e pelo ozônio na atmosfera superior, nada da radiação UVC e somente uma pequena fração da radiação UVB (aproximadamente 10%) atinge a superfície terrestre (Roy *et al.*, 1998).

Os fótons, que compõem a luz, apresentam variações de energia entre os 0,5eV a 4eV. Aproximadamente 5% desta energia está na forma de fótons ultravioletas com energia maior a 3eV. Estes fótons energéticos podem quebrar muitas ligações químicas, especialmente em materiais orgânicos. Por exemplo, plásticos, madeira ou ligante asfáltico, são materiais orgânicos compostos principalmente por átomos de carbono e hidrogênio unidos em correntes, anéis e estruturas mais complexas. A maioria destes materiais são alterados pela radiação ultravioleta, geralmente seguida pela oxidação (Berdahl *et al.*, 2008).

O efeito da radiação solar, particularmente da radiação UV no envelhecimento do ligante asfáltico tem sido pouco pesquisado devido ao fato que a radiação afeta somente a camada superior do revestimento. O envelhecimento devido aos raios ultravioleta representa menos do 20% do ligante durante a sua vida útil; o 80% restante se dá na usina e durante a aplicação da mistura em campo. No entanto, o envelhecimento do ligante asfáltico devido à radiação ultravioleta deve ser considerado no estudo do desempenho do pavimento asfáltico com revestimento de

pequena espessura, especialmente em regiões geográficas onde a intensidade da radiação solar é alta (Cong *et al.*, 2012).

Desta forma, o envelhecimento do ligante asfáltico devido à radiação ultravioleta é relevante no Brasil e em países tropicais visto que a alta intensidade da radiação solar junto com as altas temperaturas e a umidade são responsáveis, principalmente, pela oxidação do ligante e a evaporação de voláteis, reduzindo o tempo de vida útil do revestimento asfáltico (De Sá Araujo *et al.*, 2013).

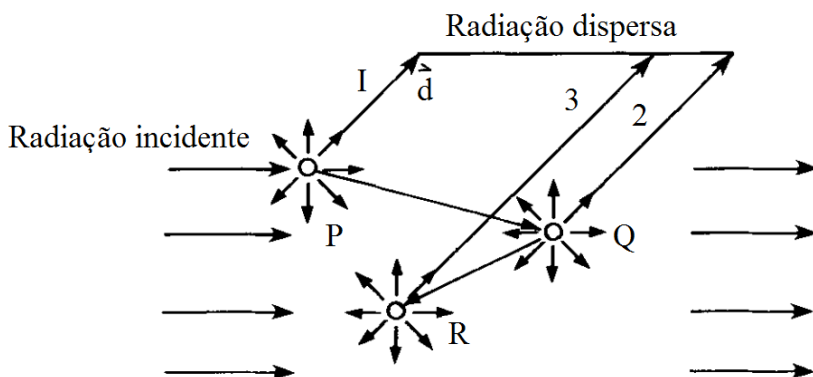
#### **2.2.4 Dispersão da radiação na atmosfera**

A maior parte da luz que atinge nossos olhos não chega diretamente desde sua fonte. Ela chega indiretamente mediante o processo de dispersão. Os seres humanos percebem a luz solar difusamente dispersa quando olham para as nuvens ou para o céu. As superfícies de terra, água e os objetos que nos rodeiam são visíveis através da luz que os mesmos dispersam. Uma lâmpada elétrica não envia luz diretamente desde o filamento luminoso, mas sim ela é resultado da dispersão pelo vidro do bulbo. A menos que uma fonte como o sol, uma chama, ou um filamento incandescente, com um bulbo transparente, seja percebida, os seres humanos percebem a luz que tem sido dispersa pela atmosfera. Na atmosfera, existem muitos exemplos coloridos de dispersão causadas pelas moléculas, aerossóis, e nuvens que contem gotas de água e cristais de gelo. O céu azul, as nuvens brancas, e os arco-íris e halos, são exemplos de fenômenos ópticos devidos à dispersão da luz. A dispersão é um processo físico fundamental associado com a luz e sua interação com a matéria. Ocorre em todos os comprimentos de onda que cobrem o espectro eletromagnético completo (Liou, 2002).

No processo de dispersão, uma partícula no tamanho de uma onda eletromagnética continuamente abstrai energia de uma onda incidente e re-irradia esta energia em todas as direções. Portanto, a partícula pode ser considerada como uma fonte pontual da energia dispersa. Na atmosfera, as partículas responsáveis pela dispersão cobrem tamanhos que vão desde moléculas de gás ( $\sim 10^{-8}$  cm) a grandes gotas de água e partículas de granizo ( $\sim 1$ cm).

Em um volume disperso, que contenha muitas partículas, cada partícula é exposta, e também dispersa, à luz a qual tem sido dispersa por outras partículas. Para demonstrar este conceito pode-se utilizar a Figura

2.3. Uma partícula na posição P remove a luz incidente mediante dispersão somente uma vez, ou seja, dispersão única, em todas as direções. Uma porção da luz dispersa atinge uma partícula na posição Q, a qual é dispersa novamente em todas as direções. Este processo é chamado de dispersão secundária. Em continuação, uma dispersão subsequente de terceira ordem envolvendo uma partícula na posição R toma lugar. O processo de mais de uma dispersão é chamado de *dispersão múltipla*. Na Figura 2.3, é aparente que uma parte da luz incidente que tenha sido primeiro dispersa desde a direção d, pode reaparecer nesta direção pelo fenômeno da dispersão múltipla. A dispersão múltipla é um processo importante para a transferência de energia radiante na atmosfera, especialmente quando existe a presença de aerossóis e nuvens (Liou, 2002).



**Figura 2.3** – Processo de múltiplas dispersões.

Fonte: Liou, 2002 (adaptado).

A dispersão é geralmente acompanhada da *absorção*. A grama apresenta a cor verde porque ela dispersa o comprimento de onda correspondente à luz verde mais eficientemente que a luz vermelha ou azul. Aparentemente, a luz vermelha e azul que incide na grama é absorvida. A energia absorvida é convertida em outra forma de energia, e não está mais presente como luz vermelha ou azul. No espectro visível, a absorção de energia é praticamente ausente em atmosferas moleculares. As nuvens também absorvem muito pouco da luz visível. Tanto a dispersão como a absorção removem energia do feixe de luz que atravessa o meio. O raio de luz é atenuado e esta atenuação é chamada de extinção. A extinção é resultado da dispersão mais a absorção. Num meio não absorvente, a dispersão é o único processo de extinção (Liou, 2002).

A absorção dos fótons nos sólidos depende do número de elétrons que podem aceitar uma transferência de energia por parte de um fóton. Nem todos os elétrons cumprem com este critério. Alguns elétrons estão tão bem ligados à sua órbita ao redor do núcleo atômico que a energia do fóton é incapaz de quebrar esta ligação. Outros elétrons estão envolvidos na ligação entre átomos e não podem ser liberados pela energia dos fótons incidentes. Por exemplo, o vidro de uma janela é transparente para os fótons visíveis, mas é fortemente absorvente da radiação ultravioleta onde os fótons têm energias poucas vezes maiores aos da luz visível. Por este motivo, as pessoas não se queimam ou se bronzem quando estão sentadas dentro de um carro (Beeson e Mayer, 2008).

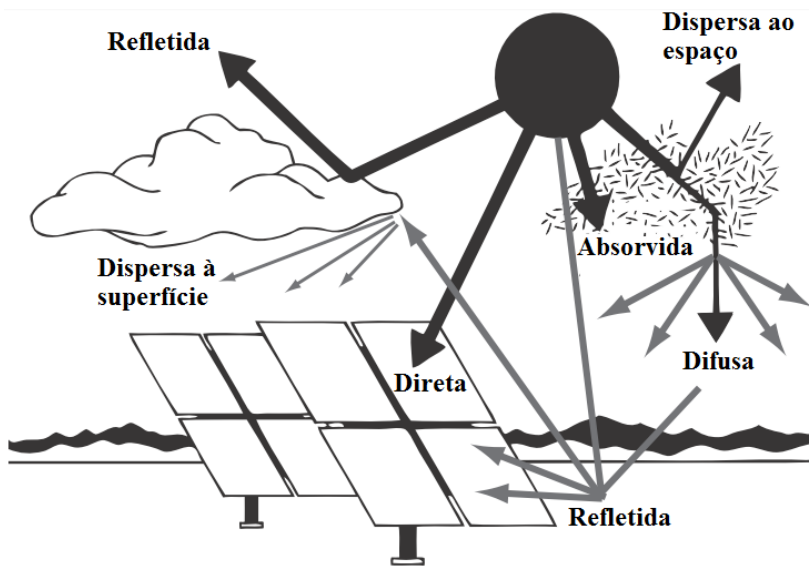
## 2.3 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA TERRA

Após a passagem da radiação solar pela atmosfera e a absorção e dispersão da mesma, os fótons dispersos, a maioria nos comprimentos de onda curta, produzem radiação difusa no céu, a qual é nomeada com a letra D. Os fótons não absorvidos ou não dispersos, ainda paralelos, constituem a radiação direta de feixe, nomeados de B. O fluxo de radiação total na superfície horizontal na presença de radiação difusa e de feixe é geralmente chamada de irradiância “total” ou “global”. Esta irradiância global solar numa superfície horizontal é denominada de G e cuja unidade é  $W m^{-2}$ . O termo “global” refere-se ao conceito de que a radiação em uma superfície horizontal é recebida desde um ângulo completo sólido de  $2\pi$  da esfera celeste. A irradiância global monocromática é denotada como  $G_\lambda$ , suas unidades são  $W m^{-2} \mu m$  ou  $mW m^{-2} nm$ , e é a irradiância hemisférica correspondente a uma faixa estreita de comprimento de onda, onde a faixa é possível de medir (por exemplo: 1 nm, 0,5 nm, 0,1 nm, etc) (Eltbaakh *et al.* 2011). A diferença entre G no nível do solo e o seu correspondente valor no topo da atmosfera é o que tem sido absorvido ou refletido pela atmosfera. Em média, a Terra reflete quase 29% da irradiância solar incidente de volta para o espaço (Badescu, 2008).

No espectro de radiação solar, os comprimentos de onda curtos são absorvidos, principalmente, pela ionosfera e a ozoniosfera, enquanto que os mais longos, pelo vapor de água atmosférico e dióxido de carbono. O Sol, cuja fotosfera está a 5800 K, emite 99,9% da sua energia dentro do intervalo do comprimento de onda de 0,15 a 40  $\mu m$ , com uma intensidade pico na região visível, próxima aos 0,47  $\mu m$ . Ainda que a radiação ultravioleta seja a mais energética, ela é composta de um pequeno fluxo de

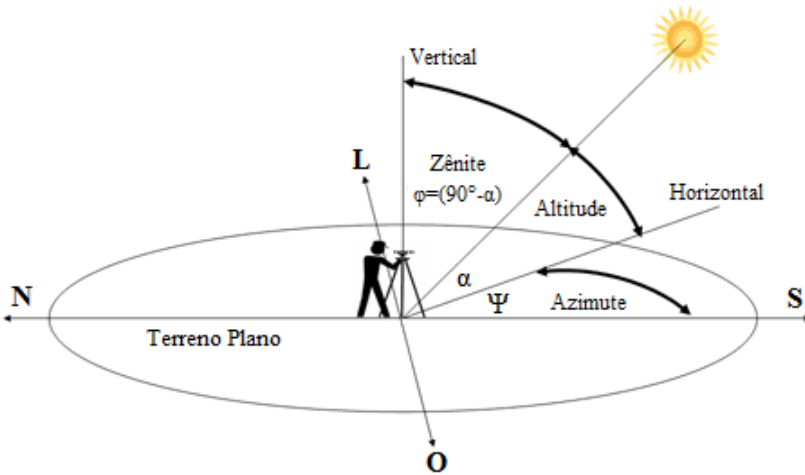
fótons e a sua energia emitida é muito baixa. Aproximadamente metade da energia do Sol está na luz visível e a maioria da segunda metade, no infravermelho próximo (Camuffo, 1998).

Quando a radiação solar entra na atmosfera terrestre, uma parte da energia incidente é removida por dispersão ou absorção pelas moléculas de ar, nuvens e outros materiais particulados, geralmente denominados de aerossóis. A radiação que não é refletida ou dispersa e que atinge a superfície diretamente desde o Sol é chamada de radiação direta. A radiação dispersa que atinge o solo é chamada de radiação difusa. Uma parte da radiação pode atingir um material após refletida pelo superfície terrestre e é chamada de irradiação refletida pelo solo. A irradiância total consistente de três componentes (direta, difusa e refletida) é e chamada radiação global ou total, como mostrado na Figura 2.4. A radiação total solar recebida por uma superfície inclinada, é uma combinação da radiação direta, difusa e radiação adicional refletida pelo solo, denominado como R, e chamada de radiação hemisférica total sobre uma superfície inclinada (Badescu, 2008).



**Figura 2.4** – Componentes da radiação solar dispersos e absorvidos pela atmosfera e refletidos pela superfície.

Os raios da radiação direta, em combinação com as mudanças constantes da altitude e do azimute do Sol durante o dia, produzem mudanças constantes no ângulo da radiação direta incidente nas superfícies horizontais ou inclinadas. A lei do co-seno de Lambert estabelece que o fluxo de um raio paralelo numa superfície plana é proporcional ao ângulo de incidência deste feixe com a superfície (Badescu, 2008). O azimute e a elevação solar para as latitudes nortes são mostrados na Figura 2.5.



**Figura 2.5** - Azimute e altitude solar para os hemisfério norte.

O ângulo incidente do feixe solar sobre uma superfície horizontal é igual ao ângulo do zênite solar ( $\varphi$ ), isto é, o complemento da elevação solar ( $\alpha$ ). A relação básica entre a radiação global horizontal  $G$ , a radiação direta de feixe  $B$  e a radiação difusa  $D$  numa superfície horizontal pode ser descrita mediante a Equação 2.2 (Badescu, 2008):

$$G = B\cos(\varphi) + D = B\sin(\alpha) + D$$

**Equação 2.2**

A Equação 2.2 é fundamental para a calibração de instrumentos solares. Para superfícies inclinadas, a equação precisa ser escrita da seguinte forma:

$$G = B\cos(\theta) + R_d D + R$$

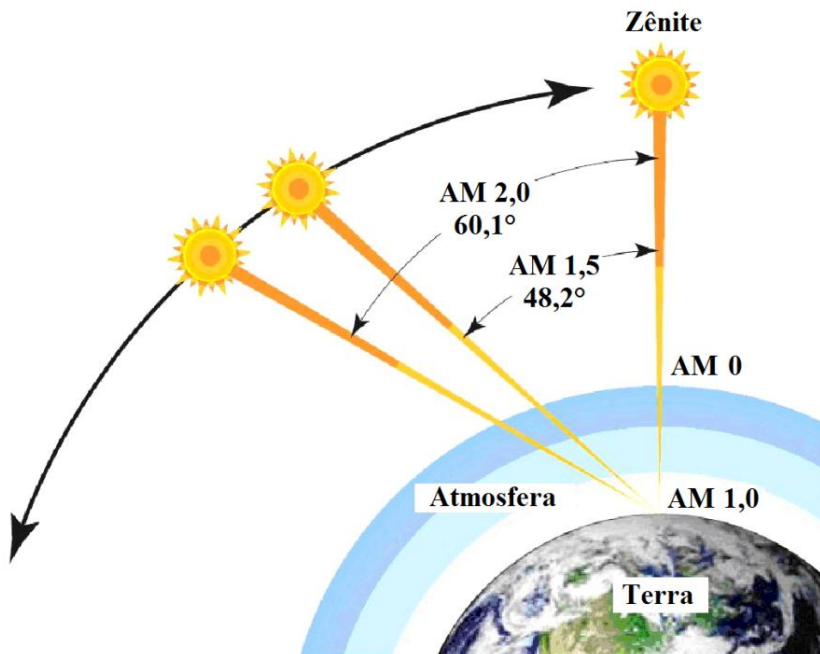
**Equação 2.3**

onde:  $\theta$  é o ângulo de incidência com respeito à normal da superfície inclinada;  $R_d$  é o fator de conversão que toma em conta a redução do fator de visão de céu e a dispersão anisotrópica; e  $R$  é a radiação refletida pelo solo que é interceptada pela superfície inclinada (Iqbal, 1983; Badescu, 2008).

## 2.4 COEFICIENTE DE MASSA DE AR

A integração espectral do espectro solar extraterrestre de todas as comprimentos de onda possíveis (0 ao infinito) é referida usualmente como a “constante solar” ou espectro de *massa de ar zero* (AM0). Em um ciclo típico solar de 11 anos, existe uma variação de  $\pm 1 \text{ W m}^{-2}$  na constante solar. Pequenas variações, de aproximadamente  $\pm 4 \text{ W m}^{-2}$  devido a manchas solares, explosões solares e outros fenômenos têm sido observadas. A melhor estimativa, atual da irradiância total média, com base na análise de dados de 25 anos, é  $1366,1 \text{ W m}^{-2}$  (ASTM 2000; Gueymard 2004; Badescu 2008). No entanto, medições recentes utilizando diversos tipos de satélites indicam um valor inferior de aproximadamente  $1361 \text{ W m}^{-2}$  (Rottman, 2005; Badescu, 2008).

O coeficiente de massa de ar define o comprimento do caminho óptico direto da radiação solar através da atmosfera terrestre, expresso como uma razão relativa ao comprimento do caminho óptico diretamente acima do observador, ou seja, no zênite. A variação do valor do coeficiente AM (massa de ar) se deve em grande parte aos fenômenos de absorção e dispersão da radiação solar que ocorrem no percurso da mesma pela atmosfera até atingir a superfície terrestre. O coeficiente de massa de ar pode ser utilizado para caracterizar o espectro solar depois que a radiação percorreu a atmosfera e é geralmente nomeado com a sintaxe AM seguido de um número, por exemplo, AM 1,5. A Figura 2.6 mostra a variação do coeficiente AM segundo o valor do ângulo zênite solar.



**Figura 2.6** – Variação do coeficiente AM segundo o valor do ângulo zênite solar.

- AM 0

Refere-se ao espectro no topo da atmosfera, o qual se aproxima do espectro irradiado por um corpo negro a 5800 K. AM 0 significa zero atmosferas. Os painéis solares utilizados pelos satélites no espaço se caracterizam pelo uso deste coeficiente.

- AM 1

É o espectro depois que a radiação percorreu a atmosfera até o nível do mar com o Sol localizado acima do observador. AM 1 significa uma atmosfera. Este coeficiente é utilizado para estimar o desempenho das células solares nas regiões tropicais e equatoriais.



- AM 1,5

Significa 1,5 atmosferas e corresponde a um ângulo solar zênite de 48,2°. Durante o verão, porém, o coeficiente do AM pode ser menor que 1,5 para os locais nas latitudes médias. No entanto, valores mais elevados que 1,5 se aplicam de manhã e à noite e em outras épocas do ano. É por este motivo que o coeficiente AM 1,5 é útil para representar o espectro médio anual para as latitudes médias. Este coeficiente corresponde ao espectro de referência padrão adotado pela norma ASTM G173-03.

- AM 2-3

AM 2 (60°) a AM 3 (70°) é um intervalo útil para se estimar o desempenho médio total das células solares instaladas nas altas latitudes, como no norte Europeu.

- AM 38

Refere-se a um coeficiente de massa de ar na direção horizontal (90°) no nível do mar.

A intensidade solar na superfície terrestre se reduz com o incremento do coeficiente de massa de ar. A Equação 2.4 mostra o valor aproximado da intensidade solar o qual é dependente do valor de AM que esteja trabalhando:

$$I = 1,1xI_0x0,7^{AM^{0,678}}$$

**Equação 2.4**

onde:  $I_0$  é a intensidade solar no topo da atmosfera, 1367 W m<sup>-2</sup>; AM é o valor do coeficiente de massa de ar. A intensidade solar para AM 1,5 segundo a Equação 2.4 é de 940,3 W m<sup>-2</sup>. O valor padronizado na norma ASTM G173-03, porém, é de 1000,4 W m<sup>-2</sup>.

Os espectros dos coeficientes AM 0 e AM 1,5 são mostrados na Figura 2.7.

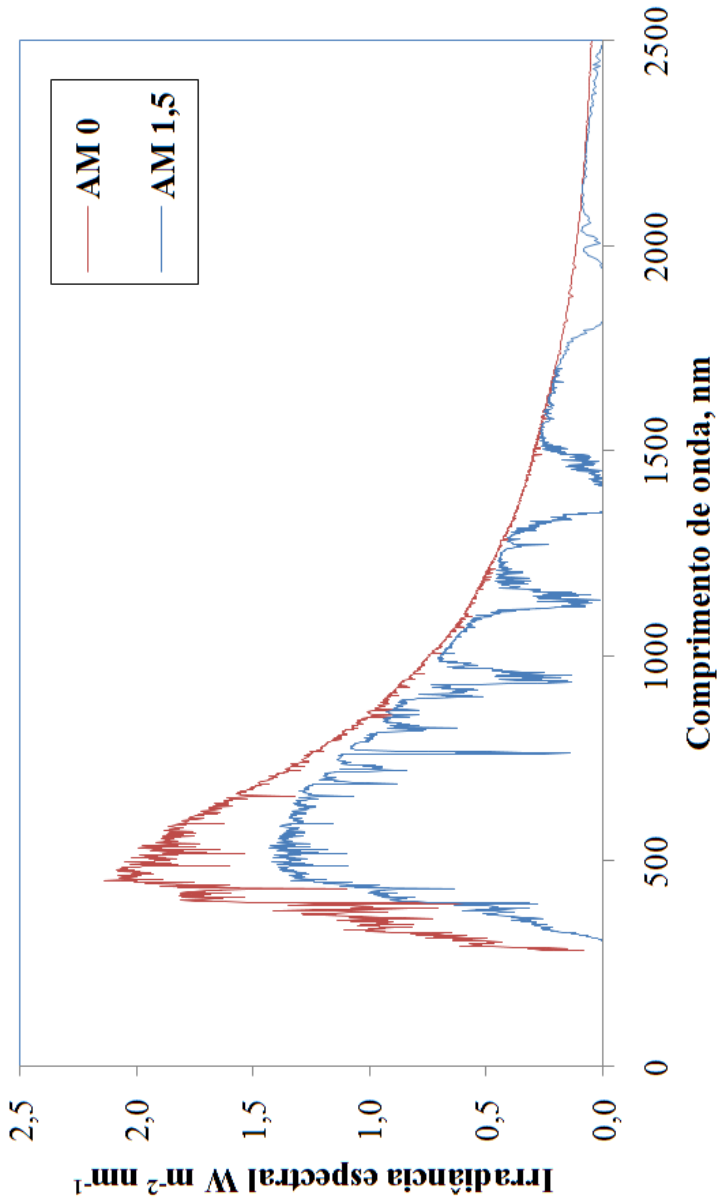
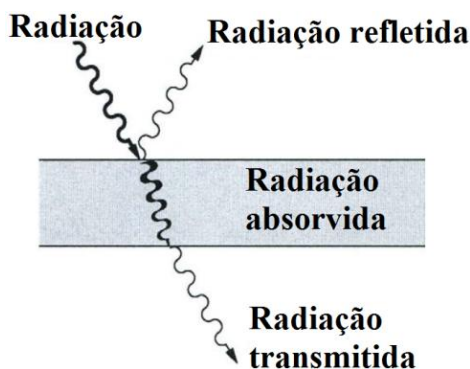


Figura 2.7 – Espectro de radiação solar AM 0 e AM 1,5.

## 2.5 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO E A MATÉRIA

A energia do espectro eletromagnético que atinge a Terra pode ser total ou parcialmente transferida para a matéria. Esta transferência se dá a níveis atômicos e envolve a interação dos fótons da radiação e os elétrons dos átomos do material onde a onda está incidindo. Os materiais que são capazes de transmitir luz com pouca absorção e reflexão são *transparentes*, ou seja, pode-se ver através deles. Materiais *translúcidos* são aqueles pelos quais a luz é transmitida de forma difusa, ou seja, a luz é dispersa no seu interior ao ponto dos objetos não serem distinguíveis claramente quando se vê através do material. Os materiais que são incapazes de transmitir a luz visível são chamados de opacos (Callister, 1997). Em uma linguagem simples, as três propriedades fundamentais radiativas a nível macroscópico ou de superfície são apresentadas a seguir (Figura 2.8):



**Figura 2.8** – Interação das ondas eletromagnéticas com uma superfície.

**Fonte:** Modest, 2003 (adaptado).

$$\text{Refletância, } \rho = \frac{\text{parte refletida da radiação incidente}}{\text{radiação incidente total}}$$

**Equação 2.5**

$$\text{Absorptância, } \alpha = \frac{\text{parte absorvida da radiação incidente}}{\text{radiação incidente total}}$$

**Equação 2.6**

$$\text{Transmitância, } \tau = \frac{\text{parte transmitida da radiação incidente}}{\text{radiação incidente total}}$$

**Equação 2.7**

Como toda a radiação deve ser refletida, absorvida ou transmitida, conclui-se que:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

**Equação 2.8**

Se o meio é suficientemente grosso para ser opaco então,  $\tau = 0$  e:

$$\rho + \alpha = 1$$

**Equação 2.9**

Estas três propriedades são adimensionais e podem variar em magnitude entre os valores de 0 a 1. Como uma superfície negra absorve toda a radiação incidente, para esta superfície  $\alpha = 1$  e  $\rho = \tau = 0$  (Modest, 2003).

Todas as superfícies também emitem radiação térmica (ou, um pouco da energia radiativa é emitida dentro do meio, a qual escapa pela superfície). Desde que, a uma temperatura dada, a máxima radiação possível é emitida por uma superfície negra, pode-se definir uma quarta propriedade adimensional.

$$\text{Emitância, } \varepsilon = \frac{\text{energia emitida pela superfície}}{\text{energia emitida por uma superfície negra à mesma temperatura}}$$

**Equação 2.10**

A emitância pode, também, variar entre valores entre 0 a 1, e para superfícies negras, a emitância  $\varepsilon=1$  (Modest, 2003).

Todas estas quatro propriedades podem estar em função da temperatura assim como do comprimento de onda (ou frequência). A absorptância pode ser diferente para diferentes direções de irradiação, enquanto que a emitância pode variar com a direção de saída. Finalmente, a magnitude da refletância e da transmitância pode depender tanto da direção de incidência ou de saída. Então, pode-se distinguir entre propriedades espectrais e totais (ou seja, um valor médio ao longo do

espectro), e entre propriedades direcionais e hemisféricas (ou seja, um valor médio ao longo de todas as direções) (Modest, 2003).

## 2.6 ALBEDO

O termo albedo é geralmente usado como sinônimo do termo refletância. Monteith (1959) aponta que o termo albedo se refere ao coeficiente de reflexão da luz na faixa visível do espectro, enquanto que refletância denota a fração refletida da energia de onda curta (radiação solar dispersa ao longo da faixa de comprimento de onda entre 380 a 3000 nm). Superfícies diferentes têm albedos diferentes. Os oceanos, lagos e florestas refletem, relativamente, pequenas frações da radiação incidente e têm pouco albedo. A neve, o gelo do mar e os desertos refletem frações relativamente grandes da luz solar incidente e têm alto albedo.

O albedo das superfícies urbanas varia entre 0,05 para a mistura asfáltica e 0,4 para os tijolos coloridos claros (Mc Arthur, 2005, 2005). Uma maior descrição do albedo das superfícies terrestres e, sobretudo, urbanas será mostrada no Capítulo de Ilha de Calor Urbana.

## 2.7 MEDIÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR

### 2.7.1 Pirheliômetro

São instrumentos que medem a radiação direta. Instrumentos que medem a radiação direta usualmente incluem radiação que chega num ângulo de aproximadamente  $3^\circ$  desde o disco solar. O instrumento está orientado de forma que a radiação direta do Sol é paralela ao eixo do tubo colimador. O Pirheliômetro é mostrado na Figura 2.9.

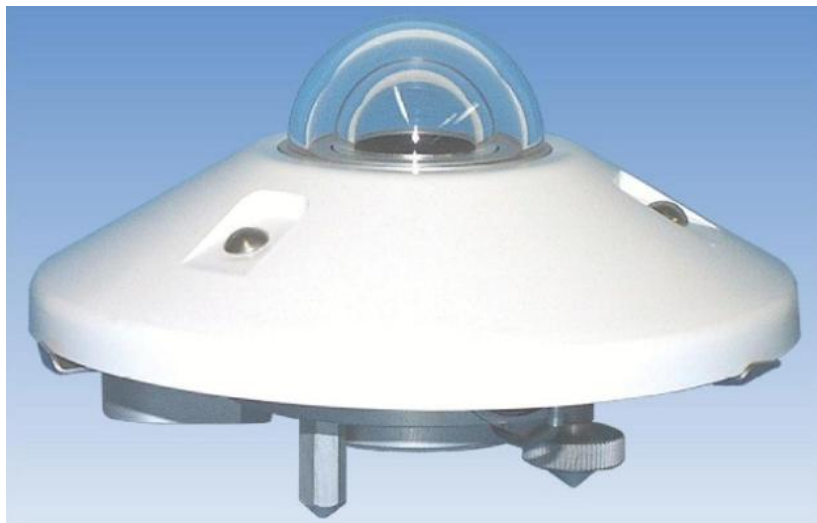


**Figura 2.9 – Pirheliômetro**

### **2.7.2 Piranômetro**

São instrumentos que medem a radiação global e difusa. Estes instrumentos têm um disco de sombreamento para prevenir que a radiação solar direta atinja o sensor. O piranômetro (Figura 2.10) é instalado em uma posição com o sensor nivelado para cima em direção ao céu.

O piranômetro é utilizado no ensaio de refletância solar, ensaio padronizado pela norma ASTM E 1918 06.



**Figura 2.10** – Piranômetro

### **2.7.3 Espectrofotômetro**

O espectrofotômetro é um instrumento utilizado para medir as propriedades ópticas de uma amostra em laboratório. A variável de medição é na maioria das vezes a intensidade luminosa, mas também pode ser o estado de polarização. A variável independente é geralmente o comprimento de onda da radiação ou uma unidade diretamente proporcional à energia do fóton, tal como o eletro volt, o qual tem uma relação recíproca com o comprimento de onda. A maioria dos espectrofotômetros é utilizada, geralmente, na identificação de amostras mediante a medição da radiação absorvida pelas mesmas. Estes equipamentos tem capacidade para medir o espectro das regiões espectrais próximas à região visível, principalmente as regiões UV, VIS e NIR.

Todos os espectrofotômetros possuem uma fonte estável de energia radiante (luz), um seletor de comprimento de onda para isolar o comprimento de onda desejado da fonte (filtro ou monocromador), um detector de radiação que permite converter a energia radiante recebida em um sinal medível, um sistema coletor de dados e um recipiente para a amostra.

A fonte estável de energia emite radiação eletromagnética (luz) a qual é separada pelo monocromador no comprimento de onda desejado. A radiação passa pela amostra (a qual está geralmente dissolvida) e a quantidade de energia que chega ao detector é medida e quantificada para o comprimento de onda analisado.

O espectrofotômetro pode ser utilizado, também, na medição das propriedades ópticas de superfícies através do uso de uma esfera integradora. Este componente óptico consiste em uma esfera oca com o interior coberto com um material branco altamente refletivo difuso tendo um orifício para a entrada da luz e outro para colocar a amostra a ser medida.

Para medir a refletância de um material, o espectrofotômetro emite uma feixe de radiação que é separado pelo monocromador nos diversos comprimentos de onda. A radiação incide na esfera e é refletida pela amostra em todas as direções. A radiação refletida incide, por sua vez, nas paredes da esfera onde é multiplamente dispersa. Finalmente, o detector dentro da esfera mede a quantidade de radiação dispersa dentro da esfera. O benefício do uso da esfera consiste em que não importa o ângulo de reflexão do feixe de radiação incidente, já que o mesmo será disperso, detectado e finalmente medido. A norma que padroniza o ensaio de refletância com uso da esfera integradora é a ASTM E903-96. O espectrofotômetro é mostrado nas Figura 2.11 e Figura 2.12.

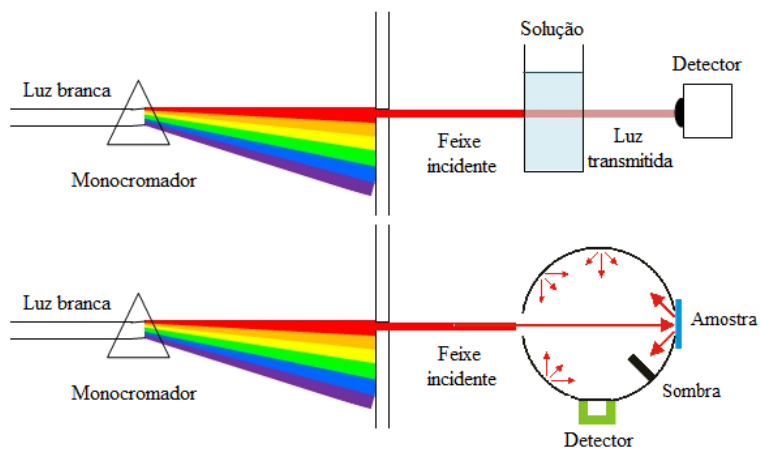


**Figura 2.11** – Espectrofotômetro.





(a)



(b)

**Figura 2.12** – Espectrofotômetro: esfera integradora (a) e mecanismo de medição (b).

O uso do espectrofotômetro permite a medição da radiação refletida ou absorvida por uma amostra para cada comprimento de onda selecionado, diferentemente do pirheliometro e do piranômetro, os quais só permitem calcular um valor total de radiação detectada.

## 2.8 RESUMO DO CAPÍTULO

No presente capítulo foram apresentados os conceitos fundamentais sobre a radiação solar. A radiação viaja, através do espaço, na forma de ondas e pode ser descrita por três parâmetros básicos: velocidade, frequência e comprimento de onda. Como a velocidade é homogênea, cada frequência da radiação tem seu correspondente comprimento de onda expresso em metros, milímetros, micrómetros ou nanômetros.

Graficamente, a radiação pode ser representada mediante o espectro eletromagnético o qual relaciona a intensidade da radiação com o comprimento de onda. O espectro está dividido em sete regiões com intervalos de comprimento de onda diferentes: os raios Gama ( $< 0,01$  nm); os raios-X (0,01 nm a 10 nm); a radiação ultravioleta (10 nm a 380 nm); a luz visível (380 nm a 750 nm); a radiação infravermelha (750 nm a 1mm); as microondas (1 mm a 1 m); e as ondas de rádio (1 m – 100 000 km).

A energia do fóton da radiação é inversamente proporcional ao comprimento de onda. Desta forma, quanto menor é o comprimento da onda, maior é a energia correspondente. De toda a radiação que atinge a Terra, a região da radiação infravermelha, é a que possui a menor quantidade de energia (52%) comparada, proporcionalmente, com a da região visível (43%). A radiação ultravioleta está dividida em três sub-regiões, UVA, UVB e UVC. No entanto, nada da radiação UVC e somente uma pequena fração da radiação UVB atinge a superfície terrestre. Por este motivo, a energia ultravioleta que a chega na Terra é só de 5%.

O fluxo de energia solar recebido na Terra tem um valor aproximado de  $1367 \text{ W m}^{-2}$ . No entanto, os processos de absorção por parte das partículas presentes na atmosfera diminuem este valor a, aproximadamente,  $1000,4 \text{ W m}^{-2}$ . Este valor corresponde à intensidade solar na superfície terrestre para um coeficiente de massa de ar (AM) de 1,5. Os valores do espectro eletromagnético, para o coeficiente AM 1,5,

estão padronizados pela norma ASTM G173-03 e foram utilizados para realizar os cálculos de refletância solar em laboratório no presente estudo.

Na Terra, a energia solar atinge as superfícies sob a forma de radiação direta e difusa. Esta energia pode ser transferida total ou parcialmente para a matéria. A transferência se dá a níveis atômicos e envolve a interação dos fótons da radiação e os elétrons dos átomos do material onde a radiação está incidindo. As três principais interações da radiação com a matéria são a refletância, absorptância e transmitância.

A intensidade solar pode ser medida através de instrumentos uniformemente sensitivos aos comprimentos de onda do espectro eletromagnético. No campo, a radiação global e difusa que atinge ou reflete uma superfície pode ser medida com o piranômetro. O piranômetro mede a intensidade solar combinada de todos os comprimentos de onda. No laboratório, a refletância ou transmitância de uma amostra pode ser medida com o espectrofotômetro., o qual é utilizado para varrer o espectro das regiões ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Os resultados do ensaio permitem a identificação, de forma independente, da radiação refletida por uma amostra para cada comprimento de onda do espectro. Estes dois instrumentos foram utilizados para realizar os ensaios de refletância solar no campo e no laboratório dos materiais estudados nesta pesquisa



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM Standard E903, 1996 **Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1996, DOI: 10.1520/E0903-12, www.astm.org.

ASTM Standard G173, 2003 **Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/G0173-03R12, www.astm.org.

BADESCU, Viorel. **Modeling Solar Radiation at the Earth 's Surface Recent Advances**. Romania: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

BEESON, Steven; MAYER, James, W. **Patterns of Light**. New York, NY, USA: Springer Science+Bussines Media, LLC, 2008.

BERDAHL, Paul *et al.* **Weathering of roofing materials – An overview**. Construction and Building Materials, v. 22, n. 4, 2008. p. 423–433.

BRASSEUR, Guy P., SOLOMON Susan. **Aeronomy of the Middle Atmosphere**. Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere, 3. ed. p. 650, 2005, ISBN 978-1-4020-3824-1

Camuffo, Dario. **Microclimate for Cultural Heritage**. in Developments in Atmospheric Science vol 23, 1998 ISBN 978-0-444-82925-2. pp 1-416.

COAKLEY, J. A. **Reflectance and Albedo, Surface**. In: Encyclopedia of the Atmosphere. [s.l.]: Academic Press., 2003, p. 1914–1923.

COMISO, Josefino. **Polar Oceans from Space**. In: Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Springer New York Dordrecht Heidelberg London. Vol. 41, 2010. p. 512.

CONG, Peiliang *et al.* **Physical and rheological properties of asphalt binders containing various antiaging agents**. Fuel, v. 97, 2012, p. 678–684.

DE SÁ ARAUJO, Maria De Fátima Amazonas *et al.* **Weathering aging of modified asphalt binders.** Fuel Processing Technology, v. 115, 2013. p. 19–25.

DIFFEY, Brian L. **Sources and measurement of ultraviolet radiation.** Methods (San Diego, Calif.), v. 28, n. 1, 2002. p. 4–13.

ELTBAAKH, Yousef A *et al.* **Measurement of total and spectral solar irradiance: Overview of existing research.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, 2011. p. 1403-1426.

FIGURA, Ludger O.; TEIXEIRA, Arthur A. **Food Physics Physical Properties – Measurement and Applications.** Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Geidelberg, 2007.

GARG, H. P., DATTA, Gouri; **Fundamentals and Characteristics of Solar Radiation.** Renewable Energy, Vol. 3, No. 4/5, 1993. p. 305-319.

GHETTI, Francesco; CHECCUCCI, Giovanni; BORNMAN, Janet F. **Environmental UV Radiation : Impact on Ecosystems and Human Health and Predictive Models.** In: SPRINGER (Org.). Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Environmental UV Raditaion: Impact on Ecosystems and Human Healt and Predictive Models. Pisa, Italy: Proceedings, 2001, p. 287.

GRENFELL, Thomas C. **Encyclopedia of snow, ice and glaciers,** Encyclopedia of Earth Sciences Sries 2011, pp 23-35.

JHA, Shyam N. **Nondestructive Evaluation of Food Quality.** Ludhiana, India: Springer Berlin Heidelberg London New York, 2010.

KLEIN, Georg A. **Industrial Color Physics.** Herrenberg, Germany: Springer New York Dordrecht Heeidelberg London, 2010.

LAZARIDIS, Mihalis. **First Principles of Meteorology and Air Pollution.** Dordrecht: Springer Netherlands, 2011.

LENOBLE, J., **Atmospheric Radiative Transfer.** Hampton, VA:A. Deepak. 1993.

- LIU, Kuo-Nan. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. International Geophysics, 2. ed. v. 84, 2002, ISBN: 978-0-12-541541-5. p. 1–583.
- LIU, LiBo *et al.* **Solar activity effects of the ionosphere: A brief review**. Chinese Science Bulletin, v. 56, n. 12, 2011. p. 1202–1211.
- MALITSON, Harriet H. **The Solar Electromagnetic Radiation Environment**. Solar Energy, v. 12, n. February, 1968. p. 197–203.
- MC ARTHUR, L. J. Bruce, 2005 **Solar Radiation Encyclopedia of world Climatology** Encyclopedia of Earth Sciences Series, 2005. pp 667-673
- MODEST, Michael F. **Radiative heat transfer (2da edição)**. ISBN 978-0-12-503163-9. 2003. p. 822.
- NEWMAN, Jay. **Physics for the Life Sciences**. New York, NY, USA: Springer Science+Bussines Media, LLC, 2008.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2nd ed. [s.l.]: Taylor & Francis, 2012.
- ROBAA, S. M. **A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt**. Solar Energy, v. 77, n. 2, 2004. p. 251–259.
- ROY, C. R. *et al.* **The measurement of solar ultraviolet radiation**. Mutation research, v. 422, n. 1, 1998. p. 7–14.
- SOWA, Paweł; RUTKOWSKA-TALIPSKA, Joanna; SULKOWSKA, Urszula *et al.* **Electromagnetic radiation in modern medicine: Physical and biophysical properties**. Polish Annals of Medicine, v. 19, n. 2, 2012. p. 139–142.
- SANTBERGEN, Rudi. **Optical Absorption Factor of Solar Cells for PVT Systems**. Eindhoven: [s.n.], 2008.
- VÁZQUEZ, M.; HANSLMEIER, A. **Astrophysics and Space Science Library-Ultraviolet Radiation in the Solar System**. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2006.

WILLIAM, D. **Callister Materials Science and Engineering An Introduction, 7th ed.**, JohnWiley & Sons Inc. 1997, pp. 852.

ZHANG, H L *et al.* **Effect of aging on the morphology of bitumen by atomic force microscopy.** Journal of microscopy, v. 246, n. 1, 2012. p. 11–9.



### 3 ILHA DE CALOR URBANA

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial tem se incrementado desde o fim da segunda guerra mundial. De acordo com a Population Reference Bureau, 50% (3,4 bilhões) da população mundial mora nas áreas urbanas. Para 2030 esta porcentagem pode atingir o 60% (5,0 bilhões) a qual significa que aproximadamente dois bilhões de pessoas se mudarão para as cidades nos próximos anos. Este crescimento, muitas vezes mal planejado da urbanização tem causado efeitos indesejados ao redor do mundo. A Ilha de Calor Urbana (ICU) é uma destas consequências e foi documentada pela primeira vez em 1818 (Mirzaei e Haghghat, 2010).

O fenômeno de ICU, o qual é caracterizado por altas temperaturas do ar em áreas densamente construídas e habitadas em comparação com as temperaturas mais frias das áreas rurais circundantes, pode ser considerado como a mais representativa e documentada manifestação da modificação climática (Landsberg 1981; Romeo e Zinzi, 2011; Solecki *et al.* 2005). Este fenômeno pode ocorrer durante o dia ou à noite, e é espacialmente e temporalmente controlado pelas características únicas de cada área urbana. A ICU usualmente se desenvolve durante dias claros e calmos piorando tanto as condições térmicas internas como as externas das residências favorecendo, sobretudo, um maior consumo de energia para condicionamento térmico de espaços (Giridharan *et al.*, 2004).

A principal causa da ICU é a modificação da superfície na área urbana, onde a vegetação tem sido substituída pelas superfícies artificiais (tipicamente vias pavimentadas e superfícies de concreto de cimento Portland), caracterizadas pela alta absorção solar, baixa permeabilidade e propriedades térmicas favoráveis para acúmulo de energia e irradiação de calor (Romeo e Zinzi, 2011). A grande quantidade de tijolos, concreto Portland, asfalto, pedra e outras superfícies similares típicas das áreas urbanas absorvem uma maior porção da radiação solar de onda curta durante o dia mais do que as superfícies encontradas, com mais frequência, nas áreas sub-urbanas de baixa densidade e áreas rurais tais como árvores e grama (Solecki *et al.* 2005). Outras causas estão relacionadas com a liberação de calor antropogênico por parte do sistema de exaustão dos veículos e dos sistemas de ar condicionado às características térmicas das fábricas urbanas, à poluição urbana, e à geometria urbana (Oke *et al.* 1991; Park 1986). No geral, três tipos de

ICU podem ser identificados (Stathopoulou e Cartalis, 2007; Weng *et al.*, 2004):

- Ilha de calor da camada de dossel;
- Ilha de calor da camada da fronteira; e
- Ilha de calor da superfície urbana.

As duas primeiras são ilhas de calor atmosféricas produzidas pela urbanização e se referem ao aquecimento da atmosfera urbana. A camada do dossel urbano é a camada mais próxima das superfícies nos centros urbanos, que consiste no ar contido entre os elementos de rugosidade urbana (principalmente construções) com um limite superior abaixo do nível dos tetos ou coberturas. A camada da fronteira urbana é a camada da atmosfera situada acima da camada de dossel urbano. Estas duas camadas distintas de ilhas de calor estão governadas por processos diferentes (Stathopoulou e Cartalis, 2007; Weng *et al.*, 2004). A camada da fronteira urbana está dominada pelo processo que atua a uma escala local ou meso-escala (com dimensões horizontais que oscilam entre um a centenas de quilômetros), enquanto que a camada de dossel urbano é um conceito de micro-escala (dimensões horizontais menor que um quilômetro) e seu clima é afetado pela natureza da sua localização.

Finalmente a ilha de calor da superfície urbana se refere ao aquecimento relativo das superfícies urbanas comparadas com as superfícies não urbanizadas circundantes (Stathopoulou e Cartalis, 2007; Weng *et al.*, 2004). As informações deste Capítulo tratarão exclusivamente dos casos relacionados com este último tipo de ilha de calor.

A altura total da ICU pode chegar a, aproximadamente, 3 a 5 vezes da altura dos edifícios urbanos (Figura 3.1). Em Hong Kong, por exemplo, isso significa que a ICU alcança alturas na ordem dos 300 a 500 m acima da camada de dossel nas zonas residenciais. A extensão exata da ICU depende, em tempo e espaço, da meteorologia, localização e das características urbanas (Giridharan *et al.*, 2004).

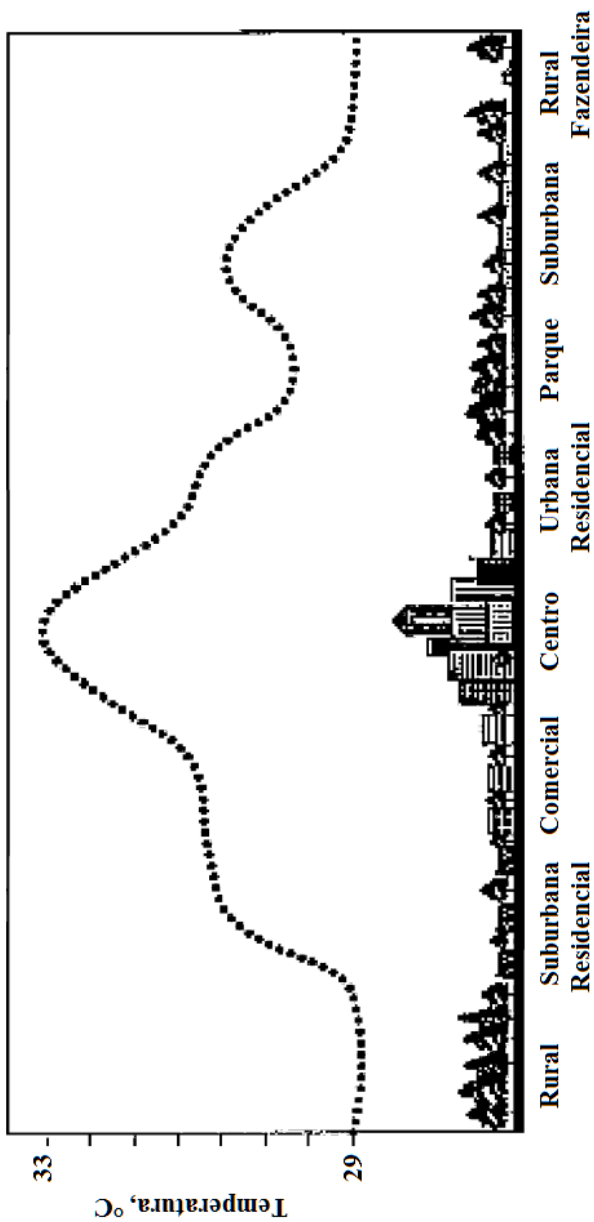
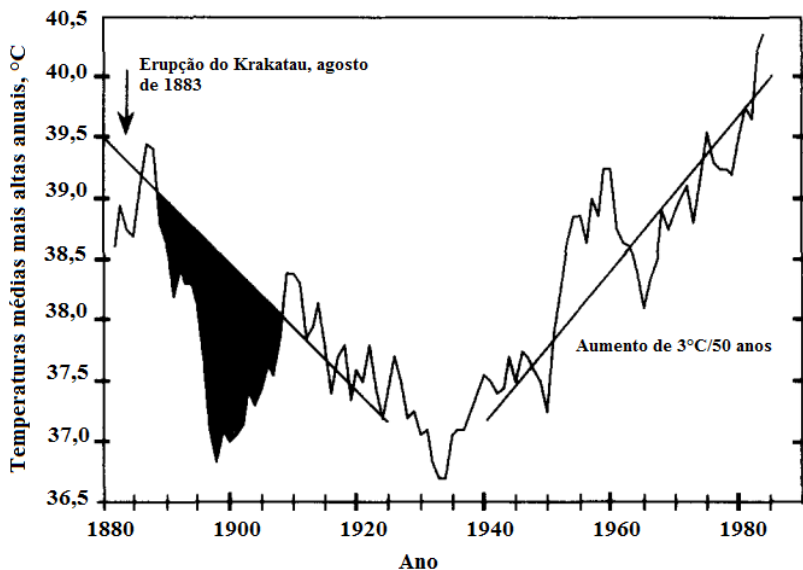


Figura 3.1 - Perfil geral da ilha de calor urbana.  
 Fonte: Giridharan *et al.*, 2004 (adaptado).

A intensidade da ICU é um conceito que se refere ao valor da diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre a área urbana quente e a área rural fria e é proporcional ao grau de urbanização, da densidade populacional, do desenvolvimento industrial, da topografia, do *layout* físico da cidade, do clima regional e das condições meteorológicas (Giridharan *et al.*, 2004; Stathopoulou e Cartalis, 2007). Diversos estudos realizados sobre este fenômeno em diferentes latitudes confirmam que a intensidade da ICU pode chegar aos 12 °C, enquanto que outros estudos realizados nas áreas urbanas mostram que a ICU diária e noturna pode variar entre 2 e 6 °C (Romeo e Zinzi, 2011).

Kim *et al.* (1999), analisaram o aquecimento urbano e de efeito estufa, medido a partir de 12 estações na Coreia, num período de 40 anos, entre 1954 a 1993. Os resultados mostraram que a taxa de aquecimento (urbano e de efeito estufa) é de 0,6°C/40 anos, sendo que o valor correspondente devido à urbanização é de aproximadamente 0,4°C/40 anos. Na cidade de Tóquio, os registros climáticos mostram que, nos últimos 100 anos, a temperatura sofreu um aumento de aproximadamente 2°C devido, principalmente, à ilha de calor (Dhakal e Hanaki, 2002). ICU diárias durante o verão com valores de temperatura de 2 a 3°C maiores que as áreas circundantes são encontradas ao longo dos Estados Unidos. Na cidade de Los Angeles, os picos de temperaturas são aproximadamente 3°C maiores que os níveis de 1940, e aumentam a uma taxa de 3°C para cada 50 anos (Figura 3.2). O incremento abrupto de temperatura entre os anos 1880 e 1890 corresponde à erupção do vulcão Krakatau (Rosenfeld *et al.*, 1995). Todos estes resultados confirmam que a ICU é um fenômeno progressivo e que está piorando com o passar dos anos.



**Figura 3.2** - Temperaturas anuais médias mais altas do centro de Los Angeles, CA, entre 1882 e 1984. Com o incremento das irrigações e dos pomares, a cidade esfriou a uma taxa de, aproximadamente,  $2^{\circ}\text{C}/\text{ano}$  até a década de 1930. Após este período, as vias asfaltadas substituíram as árvores e a temperatura aumentou  $3^{\circ}\text{C}$  até 1984.

**Fonte:** Rosenfeld *et al.*, 1995 (adaptado).

Dentro de uma mesma cidade a geometria urbana é variada, podendo existir centros com grande concentração de edifícios, praças, parques, lagos e rios. Por este motivo, a intensidade da ICU não é homogênea e apresenta variações de temperatura segundo o local analisado. Stathopoulou e Cartalis (2007) estudaram a intensidade da ICU mediante a análise das imagens de satélite da densidade urbana das cinco cidades mais populosas da Grécia: Atenas, Testalónica, Volos, Patra e Heraklion. A Tabela 3.1, mostra os resultados da temperatura média superficial destas cidades, segundo a sua densidade de construção, e a intensidade média da ICU. O valor entre parêntese da Tabela 3.1 corresponde à diferença entre a temperatura analisada e a temperatura da área rural ( $\Delta T$ ).

**Tabela 3.1** - Temperatura média da estrutura das cidades gregas e intensidade da ilha de calor urbana, entre parêntese. Valores em °C.

Cidade	Atenas	Testalónica	Patra	Volos	Heraklion
Urbana/ Densamente construída	33,5 (3,3)	33,4 (2,7)	33,8 (3,0)	36,5 (0,4)	39,9 (1,9)
Suburbana/ Medianamente construída	32,5 (2,3)	32,2 (1,5)	32,1 (1,3)	35,3 (-0,8)	38,3 (0,3)
Área urbana mista	35,4 (5,2)	34,0 (3,3)	35,4 (4,6)	38,4 (2,3)	45,3 (7,3)
Área rural	30,2	30,7	30,8	36,1	38,0
Superfície de água	18,3	19,9	20,7	24,4	25,2
Data da medição (d/m/a)	20/02/ 2000	30/05/ 2001	28/06/ 2000	24/08/ 2000	09/07/ 2000

**Fonte.** Stathopoulou e Cartalis, 2007 (adaptado).

Os resultados da Tabela 3.1 mostraram que a intensidade da ICU para as áreas centrais da cidade de Atenas foi 3,3°C mais quente que a área rural, enquanto que as áreas suburbanas são aproximadamente 2,3°C mais quentes. As áreas mistas, que correspondem às áreas industriais, comerciais e de unidades de transportes, minas e canteiros de obras, apresentam os valores de temperatura superficial mais altos em todas as cidades. Em Atenas, estas áreas mistas são 1,9°C mais quentes que a área central e 5,2°C mais quentes que as áreas verdes circundantes. Isso pode ser atribuído ao incremento da proporção de superfícies cobertas com mistura asfáltica ou concreto Portland nas áreas industriais, comerciais e unidades de transportes como também aos materiais superficiais e de construções utilizados nestas áreas. Outro motivo é o aquecimento solar das áreas abertas e com solo descoberto, associado com as minas e os canteiros de obras assim como as áreas de construção das obras para os Jogos Olímpicos de 2004 (Stathopoulou e Cartalis, 2007).

No caso de Testalónica, a intensidade da ICU é de 2,7°C entre a área central e as áreas rurais. As áreas suburbanas são 1 °C mais frias que as áreas urbanas e 1,5°C mais quentes que as áreas rurais circundantes. As áreas mistas têm as temperaturas superficiais mais altas na ordem de 34°C. No entanto, a diferença com as áreas urbanas é de, aproximadamente, 0,5°C (Stathopoulou e Cartalis, 2007). Todos estes resultados mostram que, efetivamente, a intensidade das ICU é maior nas

áreas construídas do que nas áreas rurais ou que nas áreas com presença de aquíferos.

Lombardo (1985) determinou um modelo computacional para o tratamento de imagens termais e estudou o fenômeno ilhas de calor para a metrópole de São Paulo. A autora salientou que, por exemplo, os dados do satélite NOAA-7 permitiram uma leitura da estratificação térmica horizontal, e no dia 16/07/81 o centro da cidade, zona leste e sudeste, na marginal do Tietê e em Santo Amaro as temperaturas registradas foram de 33 °C. Na serra da Cantareira, a temperatura registrada foi de 23 °C e no Parque do Estado, 24 °C, salientando o efeito da altitude e da presença de vegetação. Em Cubatão, que nesta época já apresentava elevada concentração de poluentes neste mesmo dia, registrou 30 °C. Segundo os resultados, a temperatura do centro da cidade foi, aproximadamente, 10 °C maior do que nas áreas verdes.

### 3.2 CAUSAS DO FENÔMENO DE ILHA DE CALOR URBANA

Adicionalmente aos fatores já mencionados que contribuem para o incremento da temperatura nos espaços urbanos, existem outras causas que, indiretamente, favorecem o aquecimento da atmosfera do meio urbano. Para Giridharan *et al.*, 2004; Stathopoulou e Cartalis, 2007; Landsberg, 1981; e, Oke, 1987, o efeito da ilha de calor é influenciado pelos seguintes propriedades físicas e fenômenos no ambiente urbano:

- Geometria radiativa de cânion;
- Propriedades térmicas dos materiais;
- Calor antropogênico;
- Efeito de estufa urbana;
- Redução do albedo devido à geometria de cânion;
- Redução da superfície de evaporação; e
- Redução da transferência turbulenta.

Os fatores devido ao *design* das construções que contribuem para os fenômenos e propriedades físicas mencionadas acima são (Bottyan e Unger, 2003; Giridharan *et al.*, 2004):

- Estrutura urbana;
- Tamanho da cidade, população e densidade da área construída;
- Relação entre a altura das construções e a distância entre elas;

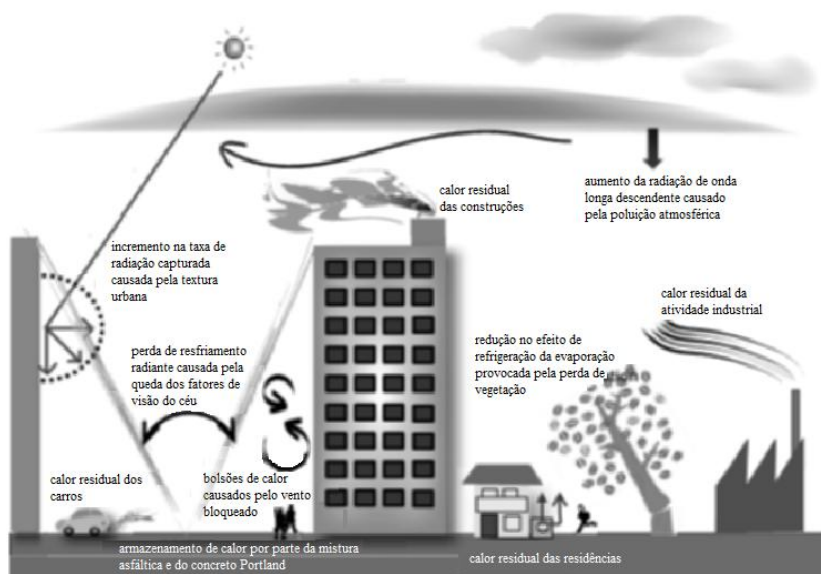
- Largura das cidades;
- Materiais de construção;
- Materiais da superfície; e
- Fator de visão do céu.

Os fatores meteorológicos que influem na criação e desenvolvimento do efeito de ilha de calor tem sido objeto de muitas pesquisas (Johnson *et al.* 1991; Shahgedanova *et al.* 1997; Montavez *et al.* 2000; Morris *et al.* 2001). Estes estudos revelaram que os parâmetros mais importantes são:

- Velocidade do vento;
- Quantidade de nuvens; e,
- Circulação sinótica predominante.

Embora a lista seja grande, muitos destes fatores estão relacionados entre si, como por exemplo: albedo com propriedades térmicas da superfície; geometria de cânion com formato da estrutura urbana, relação entre altura das construções com o fator de visão do céu, etc. Cada região terá predominância de certos fatores na formação e na intensidade da ICU como mostra a Figura 3.3. Contudo, considerando que a radiação solar que incide numa cidade não apresenta maior variação com o passar dos anos, os principais parâmetros dentre os já mencionados e que têm maior influência no desenvolvimento do fenômeno de ICU numa metrópole são: mudança do tipo de uso do solo, geometria urbana e emissões de calor antropogênico.





**Figura 3.3** - Principais parâmetros que influenciam no desenvolvimento da ICU.

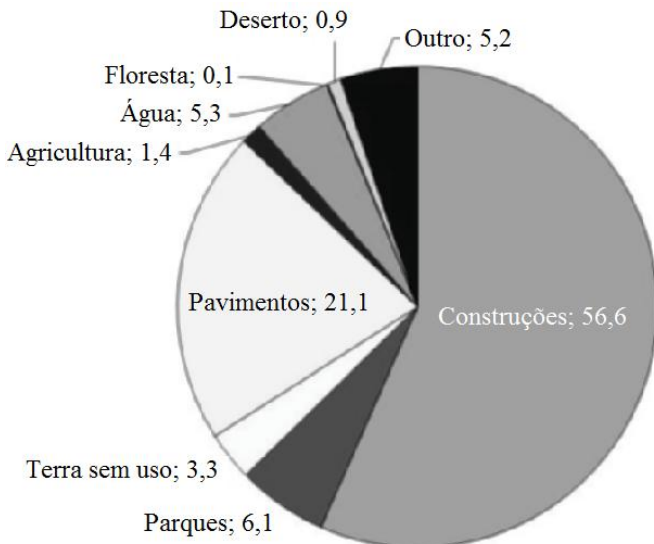
**Fonte:** Ashie, 2008 (adaptado).

### 3.2.1 Mudança no Tipo de Uso do Solo

A diminuição dos terrenos naturais e das áreas verdes e sua substituição por áreas construídas com materiais industrializados favorecem a formação da ICU. Na maioria das vezes estes novos materiais têm um baixo valor de albedo e uma capacidade de absorver e armazenar uma grande quantidade de calor além de ser menos permeáveis que o solo natural. O baixo valor de albedo contribui para que uma menor quantidade de radiação solar seja refletida e a baixa impermeabilidade evita que a água das chuvas penetre nas superfícies para esfriá-las não permitindo que, depois, o vapor de água ajude a diminuir a temperatura do ar.

A Figura 3.4 mostra a distribuição do uso de solo nos bairros de Tóquio. As construções ocupam 56,6% do espaço e as vias de comunicação 21,1%. Os materiais constituintes destas superfícies, quando expostos à luz solar no meio dia, podem atingir temperaturas de até 50 ou 60°C. A massa adicional térmica das residências e rodovias podem propiciar que durante a noite superfícies urbanas não consigam esfriar significativamente. As porcentagens do espaço ocupado por

florestas, massas de água, terrenos destinados à agricultura, desertos e parques, somam somente 13,8% da área disponível na cidade. Desta forma, existe apenas uma pequena chance para que a vaporização proveniente destas superfícies possa ajudar a resfriar o solo e as superfícies urbanas (Ashie, 2008).



**Figura 3.4** - Uso do solo nos bairros de Tóquio, %.

**Fonte:** Ashie, 2008

Situação similar se apresenta em outros países como desenvolvidos, por exemplo, nos Estados Unidos, onde em algumas grandes cidades os pavimentos e as coberturas dos prédios constituem mais do 60% das superfícies urbanas construídas (Tabela 3.2) (Akbari *et al.*, 2008).

**Tabela 3.2** - Estrutura Urbana de algumas cidades americanas.

Áreas metropolitanas	Vegetação	Coberturas	Pavimentos	Outros
Salt Lake City	33,3	21,9	36,4	8,5
Sacramento	20,3	19,7	44,5	15,4
Chicago	26,7	24,8	37,1	11,4
Houston	37,1	21,3	29,2	12,4

**Fonte:** Akbari *et al.*, 2008 (adaptado).

A energia acumulada nas áreas urbanas é re-irradiada como energia de onda longa menos eficientemente que nas áreas rurais durante a noite. A reduzida vegetação das áreas urbanas acentua o processo devido à falta de sombra, o que expõe uma maior área de superfície absorptiva ao aquecimento solar. A escassez da cobertura vegetal também limita o potencial para a refrigeração evaporativa em comparação às áreas sub-urbanas e rurais tipicamente mais verdes. As ICU tendem a ser mais proeminente durante os dias e as noites com limitada cobertura de nuvens e ventos fracos. Sob estas condições, as diferenças de temperatura entre as áreas urbanas e as sub-urbanas tende a ser máxima (Solecki *et al.* 2005).

### 3.2.2 Albedo

Como já foi mencionado, o albedo, ou refletância solar, é a habilidade que tem a superfície de um material de refletir a radiação solar. Esta propriedade refere-se à refletância total da superfície, considerando a refletância hemisférica da radiação integrada no espectro solar e incluindo a reflexão especular e a difusa. A refletância solar, ou albedo, é medida na escala de 0 a 1 (ou 0 a 100%).

Para o Natural Stone Council (2009), o albedo de um material é influenciado, inicialmente, pelos seguintes fatores: composição, textura da superfície e orientação da radiação solar. Com o passar do tempo, a refletância solar pode ser alterada como resultado do envelhecimento, desgaste e descoloração da superfície. A Figura 3.5 mostra como a simples mudança da refletância solar pode alterar significativamente a temperatura das superfícies. Na Figura, a região de cor branca tem uma diferença de 3 a 5 °C (mais fria) em relação à parede de tijolos circundante.



**Figura 3.5** - Efeito do albedo na temperatura da superfície.

**Fonte.** Cambridge Systematics (2005)

Prado e Ferreira (2005) mediram o albedo dos materiais de construção mais populares das coberturas das construções no Brasil: cerâmicas brancas e vermelhas, fibra cimento sem asbesto, alumínio pintado e sem pintar, aço inox pintado e sem pintar, coberturas de alumínio e zinco pintado e peças de cimento nas cores cinza claro, cinza escuro, vermelho ou ocre, com ou sem resinas. O propósito da pesquisa foi medir as características espectrais (UV, VIS e NIR) das telhas antes de instalá-las. As Tabela 3.3 e Tabela 3.4 mostra os valores do albedo dos materiais estudados.

As medições mostraram que os materiais metálicos não pintados têm o melhor desempenho de refletância da luz solar na região UV, com valores próximos aos 70%. Os mesmos materiais metálicos pintados mostraram os piores desempenhos evidenciando a baixa capacidade de reflexão da radiação UV por parte das tintas. Esta baixa refletância da região UV das tintas e de alguns outros materiais indicou que existe uma alta suscetibilidade dos mesmos à degradação. A absorção da radiação UV por parte destes materiais pode ocasionar alterações na sua estrutura atômica, causando efeitos negativos tais como a descoloração permanente ou degradação. Um comportamento similar foi observado nos resultados das amostras de cimentos coloridos com ou sem resinas. As amostras com resinas mostraram valores de refletância para a região UV entre 7 a 15%, os quais foram menores que aqueles das amostras sem resina, cujos valores estavam entre 11 a 22%. Estes resultados, assim como os mostrados anteriormente, alertam para a alta suscetibilidade das resinas à radiação UV e da possibilidade de maior velocidade de degradação em comparação com outros materiais.

**Tabela 3.3** - Valores do albedo por região de radiação solar dos materiais estudados.

Material	Região, %			
	UV	VIS	NIR	Total
Cerâmica vermelha	9,10	33,10	78,90	67,70
Cerâmica branca	11,50	53,10	74,50	68,00
Asbesto cimento	25,00	36,08	40,87	39,35
Alumínio				
Sem pintar	73,40	72,53	73,74	73,19
Marfim	7,86	64,84	59,83	58,60
Amarelo	6,42	42,42	61,86	56,06
Bege	7,75	54,93	58,55	55,80
Azul celeste	6,86	19,43	60,47	50,82
Cinza platina	7,74	54,68	50,31	49,33
Vermelho	6,26	27,34	52,04	45,69
Azul Santiago	6,01	7,99	42,85	35,02
Verde imperial	6,33	12,58	37,10	31,32
Cerâmica asteca	6,06	17,77	32,97	29,11
Aço inox				
Sem pintar	78,49	69,67	73,03	72,64
Branco	7,95	78,46	59,53	60,82
Amarelo	5,54	43,53	45,76	43,70
Cinza claro	7,78	46,65	37,43	37,88

**Fonte.** Prado e Ferreira, 2005.

**Tabela 3.4** - Valores do albedo por região de radiação solar dos materiais estudados.

Material	Região, %			
	UV	VIS	NIR	Total
Aço inox				
Vermelho	5,90	26,90	41,80	37,60
Azul escuro	6,18	8,01	38,99	32,02
Azul cinza	7,98	32,87	30,00	29,61
Verde	5,29	9,95	25,27	21,67
Cerâmica	5,79	18,23	21,55	20,30
Metal (Al + Zn)				
Sem pintar	74,63	65,17	68,85	68,42
Cimento colorido				
Cinza escuro	13,63	16,61	12,42	13,23
Cinza claro	22,78	32,20	33,42	32,76
Vermelho	14,14	22,78	27,91	22,42
Ocre	11,64	27,87	31,54	30,06
Metal termo acústico				
Branco	63,19	65,92	71,91	69,72
Alumínio	21,38	36,55	71,88	63,39
Verde	8,40	62,61	65,42	62,54
Cerâmica	6,04	17,63	62,75	52,24

**Fonte.** Prado e Ferreira, 2005.

Na região VIS, os materiais metálicos apresentaram o melhor desempenho. As amostras de aço inox pintados de branco, atingiram valores de refletância de, aproximadamente 78% enquanto que nos materiais metálicos sem pigmentos, a refletância foi de, aproximadamente, 70%. Entre os materiais não metálicos, as cerâmicas brancas atingiram valores de refletância de, aproximadamente, 53%

enquanto que nos cimentos cinza claro com resinas os valores foram de, aproximadamente, 11%.

Os materiais metálicos sem tinta e as cerâmicas brancas e vermelhas mostram alta refletância na região NIR com valores de aproximadamente 70% enquanto que os materiais metálicos pintados mostraram valores de refletância menores a 60%, com a exceção das telhas termo acústicas brancas e as cerâmicas coloridas, as quais mostraram valores de aproximadamente 63% para esta faixa. Os outros materiais: como o cimento colorido e a fibra cimento mostraram valores baixos de, aproximadamente, 40% e o cimento de cor cinza escuro com resinas foi o material que mostrou o menor valor de albedo, cerca de 10%.

Com base na análise descrita, Prado e Ferreira (2005) concluíram que as cores claras geralmente apresentam grande refletância na região VIS e também tendem a ter grande refletância na região NIR. No entanto, uma boa refletância na região VIS não implica num alto albedo, já que o desempenho do albedo está diretamente relacionado com a refletância do material na região NIR, a qual representa, aproximadamente, 43% da radiação solar que atinge a superfície terrestre.

O ganho de calor destes materiais é função tanto do albedo como das suas características térmicas. Este ganho de calor pode ser analisado em função da temperatura superficial que as coberturas tetos atingem quando são expostos à radiação solar. Bretz *et al.* (1998) apresentaram a Equação 3.1 que permite determinar a temperatura para um superfície exposta ao Sol. O equilíbrio térmico da superfície ( $T_s$ ) é determinado por:

$$(1 - a)I = \sigma\varepsilon(T_s^4 - T_{sky}^4) + h_c(T_s - T_a)$$

**Equação 3.1**

onde  $a$ : é o albedo ou refletância solar;  $I$  é a radiação solar incidente na superfície ( $W/m^2$ );  $\varepsilon$  é a emitância da superfície;  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ );  $T_s$  é a temperatura de equilíbrio da superfície (K ou °C);  $T_{sky}$  é a temperatura radiativa do céu (K ou °C);  $h_c$  é o coeficiente de convecção ( $W/m^2 K$  ou  $W/m^2 °C$ );  $T_a$  é a temperatura do ar (K ou °C).

Para o cálculo da temperatura superficial, a Comissão de Energia de Califórnia, em 2002, através da Proposta de Mudança do Código de

Título 24, determina que a temperatura do ar ( $T_a$ ), a temperatura do céu ( $T_{sky}$ ), a radiação solar, e o coeficiente de convecção a serem utilizados nos cálculos da temperatura superficial, podem ser tomados das condições padronizadas de vento moderado especificados na norma ASTM 1980-98 (“Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces”):  $I = 1000 \text{ W m}^{-2}$ ;  $h_c = 12 \text{ W m}^{-2} \text{ K}$ ;  $T_{sky} = 300 \text{ K}$ ; e,  $T_a = 310 \text{ K}$  (Prado e Ferreira, 2005).

Com os valores destes parâmetros e aplicando a Equação 3.1, Prado e Ferreira (2005) estimaram a temperatura superficial de cada material em função da sua emitância e do seu albedo envelhecido. A Tabela 3.5 mostra os resultados destes cálculos.

Na Tabela 3.5 os resultados mostram que, efetivamente, as superfícies com elevado albedo e emitância permanecem mais frias quando expostas à radiação solar, devido a pouca radiação que absorvem por emitirem uma maior radiação térmica ao espaço. Em consequência, absorvem menos energia e transmitem pouco calor ao meio ambiente.

A emitância é também uma propriedade muito importante na avaliação do comportamento térmico de um material. No entanto, como pode ser visto nas Tabela 3.5 e Tabela 3.6, salvo algumas exceções, os valores de emitância da maioria dos materiais é alta, próximos a 0,90 ou 0,95. É muito mais fácil, então, mudar o valor do albedo de um material. Por este motivo, a grande maioria das pesquisas sobre a ICU tem concentrado os esforços na melhora da refletividade do que na mudança da emitância.



**Tabela 3.5** - Temperatura superficial dos materiais para condições climáticas de acordo com a Norma ASTM 1980-98; albedo =  $\alpha$ ; emitância =  $e$ ; temperatura superficial =  $T_s$ .

Material	$\alpha$	$e$	$T_s$ , °C
Cerâmica vermelha	0,53	0,9	36,8
Cerâmica branca	0,54	0,9	36,2
Asbesto cimento	0,34	0,9	47,1
<b>Alumínio</b>			
Sem revestimento	0,57	0,05	69,4
Marfim	0,47	0,9	40,1
Amarelo	0,45	0,9	41,2
Bege	0,45	0,9	41,2
Azul celeste	0,42	0,9	42,8
Cinza platina	0,41	0,9	43,3
Vermelho	0,38	0,9	45,0
Azul Santiago	0,31	0,9	48,7
Verde imperial	0,28	0,9	50,3
Cerâmica asteca	0,26	0,9	51,4
<b>Aço inox</b>			
Sem revestimento	0,57	0,25	57,9
Branco	0,49	0,9	39,2
Amarelo	0,37	0,9	45,5
Cinza claro	0,33	0,9	47,6
Vermelho	0,32	0,9	48,2
Azul escuro	0,28	0,9	50,3

**Fonte.** Prado e Ferreira, 2005.

**Tabela 3.6** - Temperatura superficial dos materiais para condições climáticas de acordo com a Norma ASTM 1980-98; albedo =  $\alpha$ ; emitância =  $e$ ; temperatura superficial =  $T_s$ .

Material	$\alpha$	$e$	$T_s$ , °C
Aço inox			
Azul cinza	0,27	0,9	50,8
Verde	0,21	0,9	54,0
Cerâmica	0,20	0,9	54,5
Metal (Al + Zn)			
Sem revestimento	0,54	0,25	60,1
Cimento colorido			
Cinza escuro	0,26	0,9	50,8
Cinza escuro com resina	0,13	0,9	58,1
Cinza claro	0,49	0,9	49,8
Cinza claro com resina	0,27	0,9	50,8
Vermelho	0,37	0,9	53,5
Vermelho com resina	0,28	0,9	50,3
Ocre	0,33	0,9	50,8
Ocre com resina	0,23	0,9	52,9
Metal termo acústico			
Branco	0,32	0,66	46,1
Alumínio	0,28	0,25	59,4
Verde	0,27	0,4	56,3
Cerâmica	0,43	0,66	50,2

**Fonte.** Prado e Ferreira, 2005.

Outros materiais para coberturas de tetos foram pesquisados por Rosenfeld *et al.* (1995). A Figura 3.6 mostra a temperatura ao meio dia de varias superfícies horizontais expostas à luz solar pesquisados. Para superfícies altamente absorptivas (baixo albedo), a diferença entre as temperaturas da superfície e do meio ambiente pode chegar até 50°C,

enquanto que para as superfícies menos absorptivas (alto albedo), tais como a tinta branca, a diferença é de, aproximadamente, 10 °C. Os autores ainda qualificaram a efetividade de esfriamento do material em um intervalo de 0 a 100%, sendo 0% o valor correspondente a um material muito quente e 100% a um material muito frio.

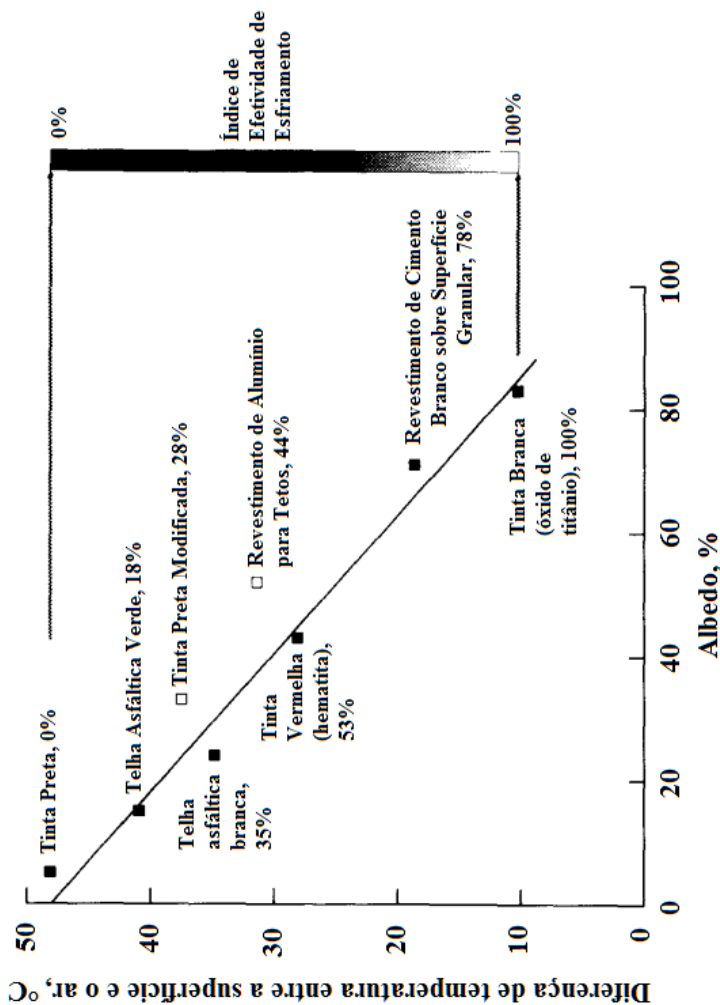


Figura 3.6 - Relação entre a diferença de temperatura da superfície e o ar com o albedo do material.

Fonte: Rosenfeld *et al.*, 1995 (adaptado).

Existem, no entanto, uma imensa quantidade de estudos e pesquisas que avaliam o albedo de diversos materiais para seu uso tanto nas coberturas como na pavimentação. Estes resultados serão mostrados no ítem 3.5.

### **3.2.3 Geometria Urbana**

A geometria de uma cidade, as dimensões das ruas, o espaçamento entre as construções e a altura das construções podem influenciar a quantidade de calor absorvido tanto pelo pavimento como pelas outras estruturas. Os edifícios altos ao longo das ruas estreitas criam o que é chamado de cânion urbano. O cânion urbano tem dois efeitos opostos: pode incrementar o efeito de ilha de calor significativamente reduzindo o resfriamento noturno radiativo, e ao mesmo tempo, a sombra dos edifícios cobre a superfície do pavimento durante o dia, limitando a absorção de calor dos mesmos.

A habilidade de uma superfície de resfriar à noite pela emissão de radiação de onda curta no céu depende do seu “fator de visão do céu”, o qual é a proporção do hemisfério de visualização que é ocupado pelo céu, ao invés dos edifícios circundantes. Um pavimento rodeado por edifícios altos terá uma menor exposição ao céu e desta forma as construções bloquearão ou absorverão o calor emitido pelo pavimento, evitando que escape da camada de ar do dossel e agravando o efeito de ilha de calor.

Este efeito dos cânions urbanos, porém, depende do ângulo do Sol. Em latitudes menores, quando o Sol está numa posição quase perpendicular, o efeito do fator de visão do céu afetará mais o resfriamento noturno do que o sombreamento diurno (Cambridge Systematics, 2005). O impacto global do cânion urbano dependerá de como a cidade está estabelecida, a latitude, a época do ano, a data, entre outros fatores. A Figura 3.7 mostra dois exemplos de cânion urbano. A imagem da esquerda corresponde a uma rua tradicional com um cânion moderado. Na imagem direita, o efeito de cânion urbano é maior devido à presença dos arranha-céus.



**Figura 3.7 - Canyon urbano.**  
**Fonte:** Cambridge Systematics (2005).

O fator de visão do céu está relacionado com a geometria das ruas e é uma boa representação da densidade construtiva e corresponde à quantidade de abóboda celeste que é visível desde a superfície do pavimento ou do fundo do cânion. Esta quantidade será tanto menor quando maior for a densidade de construções. Uma das primeiras pesquisas sobre ICU, realizada por Oke (1987) mostrou que existe uma correlação forte entre este fator e a ICU.

O fator de visão do céu pode ser aproximado à relação da altura dos edifícios ( $H$ ) e a largura das ruas ( $W$ ). A máxima intensidade da ilha de calor noturna ( $\Delta T_{u-r(\text{máx})}$ ), medida como uma diferença entre a área urbana e a área rural próxima, pode ser expresta como:

$$\Delta T_{u-r(\text{máx})} = 7,45 + 3,97 \left( \ln \frac{H}{W} \right)$$

**Equação 3.2**

Tomando-se como exemplo hipotético uma rua no centro em uma cidade com largura de 10 metros, e com edifícios de 22 metros de altura a cada lado, a intensidade de ilha de calor, calculado pela Equação 3.2, será de 10,6°C. Se a altura dos edifícios for de 11 metros, a intensidade da ilha de calor seria somente de 7,8°C. Existe, desta forma, a hipótese de que as cidades com predominância de edifícios de baixa altura e cidades que crescem horizontalmente apresentem uma menor intensidade de ilha de calor do que aquelas onde os edifícios são mais altos ou que crescem verticalmente (Cambridge Systematics, 2005).

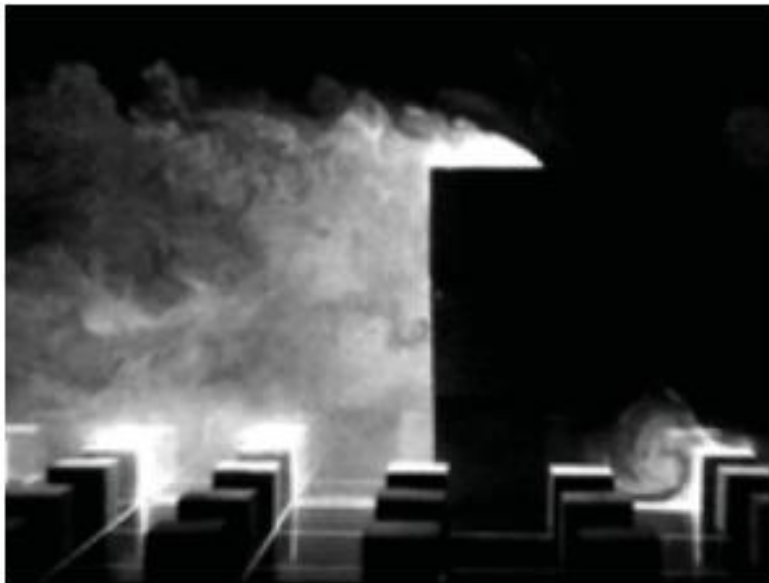
Recentemente um grande número de pesquisas relacionadas com o efeito de cânion urbano foram realizadas nas capitais ou nas cidades mais populosas dos Estados Unidos, Europa, Israel, Japão, Singapura, Índia e Hong Kong, etc. Em Hong Kong, Giridharan *et al.* (2004), estudaram o impacto das variáveis relacionadas com o *design* das residências das cidades de Belchers, Wah Fu 1 e Wah Fu 2 na formação do fenômeno de ICU. A cidade de Belchers tem uma geometria urbana aberta com presença de alguns edifícios com alturas superiores ao circundantes enquanto que Wah Fu 1 é uma estrutura mais fechada e Wah Fu 2 é uma combinação de ambas.

Na pesquisa, a cidade de Belchers mostrou os melhores resultados de mitigação da ICU, comparada com Wah Fu 1 e Wah Fu 2, devido a seu alto nível de albedo e cobertura de vegetação. Um fator decisivo para este resultado foi o baixo fator de visão do céu decorrente das modificações bruscas nas alturas dos edifícios a qual permite uma boa circulação de ar. Em outras palavras, a atual estrutura de Belchers atua como um arranha céus num ambiente de baixa altura onde a circulação do ar é favorecida pelas modificações bruscas da velocidade e direção do vento pelas diferenças nas altitudes das torres. Nesta cidade, as velocidades dos ventos chegam a ser bastante altas e ocasionalmente maiores a 5 m/s. Com relação ao fator de visão do céu, os pesquisadores concluíram que uma diminuição deste valor em 1%, nas cidades de Belchers e Wah Fu, diminuiria a intensidade da ICU em 2,6%. (Giridharan *et al.*, 2004)

O vento é um grande aliado na mitigação do fenômeno de ICU e seu efeito é maior nas cidades costeiras sob a influência da circulação da brisa marinha. Nestas cidades, a intensidade da ICU pode ser reduzida pela intrusão de um ar relativamente frio na terra ou pelo incremento da velocidade do vento devido à brisa. Kim e Baik (2004) estudaram a

influência do fluxo do vento na intensidade da ICU em algumas cidades da Coreia: Incheon, Busan, Daejeon, Daegu e Gwangju. Eles concluíram que a intensidade anual máxima diária da ICU tende a ser menor nas cidades costeiras, Incheon e Busan, que nas cidades do interior, Daejeon, Daegu, e Gwangju, mesmo se as cidades costeiras são maiores que as do interior. Da mesma forma, a taxa de incremento da intensidade máxima diária anual média da ICU é menor nas cidades do lado do oceano que nas cidades do interior. Este comportamento do vento é de particular importância para as metrópoles brasileiras, visto que a maior parte da população mora nas regiões litorâneas.

O fluxo de vento, porém, pode afetar negativamente o fenômeno da ICU, seja nas regiões costeiras ou do interior. Isso porque a forma e a rugosidade das superfícies urbanas é um elemento importante para a circulação do vento. Na cidade de Tóquio, por exemplo, os edifícios ocupam quase 30% do terreno. Enquanto a altura deles difere por várias razões, os prédios nesta cidade, geralmente, têm três ou mais pisos. Em consequência, as estruturas urbanas combinadas com a forma da topografia local contribuem para criar uma superfície urbana muito rugosa não permitindo uma eficaz circulação do ar e incrementando as temperaturas urbanas em certos locais. Para entender melhor este fenômeno, a Figura 3.8 mostra os resultados da visualização de uma corrente de vento num modelo a escala reduzida de uma porção de uma área urbana com construções de baixa altura e edifícios. Para visualizar melhor o fluxo do vento, foi utilizada fumaça durante o teste. O ensaio permite observar que existe uma área de baixa velocidade de vento que se forma na região à jusante das construções de grande altura. Em uma escala real, num espaço urbano com vários edifícios, estes “redemoinhos” aprestam o calor liberado pelas superfícies urbanas e pelas unidades de ar condicionado e não permitem que o mesmo deixe facilmente a cidade (Ashie, 2008).



**Figura 3.8** - Aparência no teste do túnel de vento. O vento flui da direita para esquerda.

**Fonte.** Ashie, 2008.

### **3.2.4 Emissões de Calor Antropogênico**

A terceira grande causa da ICU são as emissões de calor antropogênico, as quais se referem às emissões de calor produzidas pelas atividades humanas, residenciais ou industriais que geralmente envolvem a queima de combustíveis fósseis. As principais fontes destas emissões são os complexos industriais, as usinas, os equipamentos de ar condicionado, a exaustão dos veículos e o metabolismo humano. O calor gerado por estas fontes é armazenado nas superfícies urbanas e liberado ao meio ambiente gradativamente.

O aquecimento por calor antropogênico tem a sua origem no interior das construções e afeta tanto o ambiente interno como externo do meio urbano. Na cidade de Tóquio, a máxima contribuição do calor antropogênico estimada é de 1,5°C, à noite. Nesta capital, o uso de energia dentro prédios e por parte dos automóveis são a maior fonte do calor antropogênico. Nas grandes cidades, a maior contribuição provém do uso do ar condicionado nas residências, o qual libera o calor durante o verão



(resfriamento do ar) ou durante o inverno (para aquecimento). Os danos relacionados com os efeitos do aquecimento urbano são consideráveis tanto no aspecto econômico como na qualidade do ar e desconforto térmico (Dhakal e Hanaki, 2002).

Ashie (2008) menciona que as emissões totais diárias de calor antropogênico (para um dia médio de agosto) gerado pelas construções pelos sistemas de transportes e pelas fábricas das indústrias nos bairros de Tóquio é de 2 000 TJ (tera-Joule). Quando se compara esta quantidade com a quantidade total de radiação solar recebida em Tóquio em agosto, ela representa cerca de 10% da radiação solar num dia claro, ou 20% da recebida num dia de agosto. A contribuição das áreas construídas para as emissões de calor antropogênico é significativa, fazendo das construções uns dos principais parâmetros que fomentam a formação da ICU.

### 3.3 CONSEQUÊNCIAS DA ILHA DE CALOR URBANA

A temperatura do ar é um fator ambiental crucial para a existência do ser humano. Quando a temperatura excede as limitações naturais, ela torna-se um problema que afeta não só às pessoas como também aos ecossistemas terrestres. Mizraei e Haghghat (2010) comentam que além do aumento da temperatura e do consumo de energia, a ICU também intensifica a concentração de poluentes nas áreas urbanas. Além disso, as ICU também impactam na meteorologia local mediante a alteração dos padrões dos ventos locais, formando nuvens e neblinas, incrementando a umidade e mudando a taxa de precipitação.

Os Quadro 3.1 e Quadro 3.2 fornece uma comparação dos efeitos ambientais durante o verão e o inverno causados pela ICU para os humanos e o meio ambiente relatados pelo Ministério de Ambiente do Japão. A elevação das temperaturas no verão tende a gerar cenários com impactos negativos, tais como a demanda energética para refrigeração de ambiente e alguns casos de doenças relacionadas ao calor excessivo. No inverno, as ilhas de calor podem ter efeitos benéficos para o ser humano, tais como redução da sensação de frio, mas têm também efeitos negativos como a sobrevivência de vírus que se ativam pela mudança climática. No entanto, é necessário considerar as diferenças regionais na formação da ICU (Ashie, 2008).

**Quadro 3.1** - Efeitos ambientais da ilha de calor urbana.

Tipo de efeito	Classificação do efeito	
	Verão	Inverno
<b>Efeitos na saúde</b>		
Efeitos na saúde causados pelas mudanças do estresse devido ao calor.	Aumento do estresse pelo calor para os trabalhadores de ambientes externos (trabalhos na rua, deportes). Incremento de doenças do sistema circulatório.	Redução do impacto térmico nas crianças, idosos e pessoas de baixa renda. Redução nas doenças devidas a invernos severos.
Efeitos na saúde devido ao incremento do uso do ar condicionado.	Efeitos fisiológicos dos ambientes condicionados. Incrementos das moléstias térmicas devido ao deslocamento para dentro e fora dos espaços condicionados.	Redução do choque térmico pelo deslocamento entre os espaços condicionados e não condicionados.
Efeitos na saúde devido a infecções virais.	Maior fertilidade de organismos portadores de doenças. Vírus ativados pelas mudanças climáticas (incremento da temperatura do ar, baixa umidade). Crescimento bacteriano. Rápida deterioração dos alimentos.	Ampliação do habitat e do ciclo de vida dos organismos portadores de doenças (como os mosquitos). Vírus ativados pelas mudanças climáticas (aumento das temperaturas do ar, baixa umidade). Organismos portadores de doenças sobrevivem em espaços subterrâneos.
Outros efeitos na saúde.	Distúrbios do sono.	Incremento das doenças respiratórias causadas pela baixa umidade.

**Fonte.** Ashie, 2008 (adaptado).

**Quadro 3.2** - Efeitos ambientais da ilha de calor urbana.

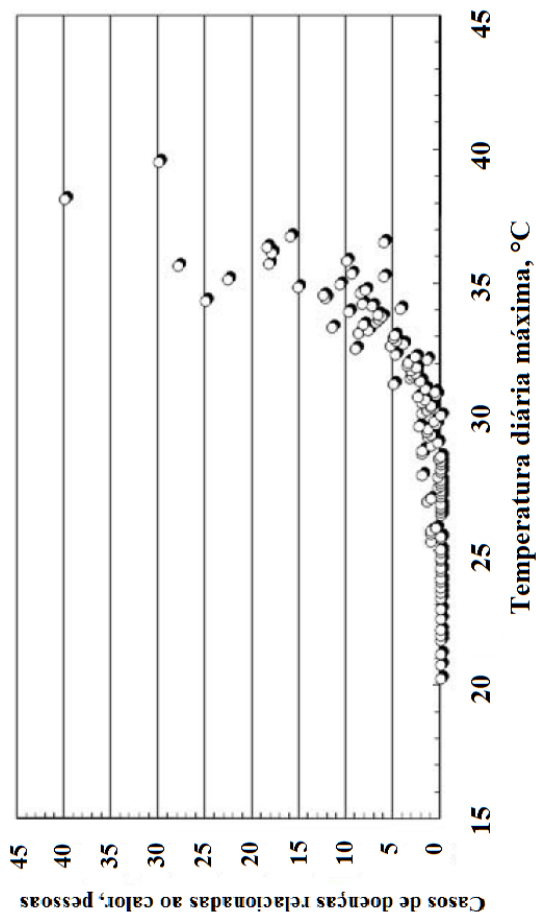
<p><b>Efeitos ecológicos</b></p> <p>Mudanças no habitat (condições climáticas).</p>	<p>Redução no crescimento vegetal causado pelo excesso de calor e a baixa umidade.</p> <p>Deslocamento de ecossistemas para o norte, aumento e diminuição de certas espécies.</p> <p>Efeitos nos organismos aquáticos ao longo das costas urbanas.</p>	<p>Dano aos ciclos de dormência, perturbação da dormência devido ao encolhimento da faixa de temperatura.</p> <p>Deslocamento de ecossistemas para o norte, incremento e diminuição de certas espécies.</p> <p>Efeitos nos organismos aquáticos ao longo das costas urbanas.</p>
<p>Mudança no habitat (interações mútuas entre os organismos).</p>	<p>Mudanças nos períodos de incubação, crescimento e interação entre o predador e a presa.</p>	<p>Mudanças nos períodos de incubação, crescimento e interação entre o predador e a presa.</p>
<p><b>Efeitos no clima e na atmosfera</b></p>	<p>Chuvas torrenciais repentinas localizadas causadas por tempestades de calor.</p> <p>Formação de oxidantes fotoquímicos.</p>	<p>Incremento nas concentrações dos poluentes atmosféricos na camada dossel.</p> <p>Mudanças na qualidade da neve, e na duração dos períodos de gelo e degelo.</p>
<p><b>Efeitos no consumo de energia</b></p>	<p>Aumento das emissões de CO<sub>2</sub> causadas pelas altas demandas de condicionamento das residências.</p> <p>Incremento da demanda de água.</p>	<p>Queda das emissões de CO<sub>2</sub> pelas baixas demandas para aquecimento das residências.</p> <p>Queda das emissões de CO<sub>2</sub> devido à menor energia consumida para aquecimento de água.</p>

Fonte. Ashie, 2008 (adaptado).

### 3.3.1 Efeitos na Saúde

As altas temperaturas durante os meses de verão e o incremento do número de noites tropicais têm implicações para as vidas humanas tais

como o desconforto e doenças relacionadas com o calor excessivo. De acordo com o Departamento de Bombeiros de Tóquio, por exemplo, o número de pessoas tratadas por problemas relacionados com o calor dobrou desde 1980 a 2000. A Figura 3.9 mostra a relação entre a temperatura diária máxima e o número de pessoas tratadas por doenças relacionadas com o calor. Estas doenças tendem a ocorrer a depois que a temperatura atinge 30°C, e pioram quanto maiores são as temperaturas (Ashie, 2008).



**Figura 3.9** - Relação entre o número de pessoas tratadas por doenças relacionadas ao calor e as temperaturas máximas nos bairros de Tóquio.

**Fonte.** Ashie, 2008 (adaptado).

Além das doenças relacionadas ao calor, as altas temperaturas podem também, em casos extremos, causar a morte dos grupos de pessoas sensíveis. O efeito do calor na mortalidade não está limitada à exposição no mesmo dia, mas mostra claramente que existe um efeito de retardo. Muggeo e Hajat (2009) sugerem que as pessoas suscetíveis aos efeitos do calor e com alguma doença avançada podem ter risco de morte num curto período de tempo após a onda de calor.

O efeito de ICU ocorre ao longo do ano, porém, sua ocorrência durante os meses de verão são de extremo interesse porque podem acontecer junto com as ondas de calor. Esta circunstância tem sido associada com a extraordinária onda de calor que atingiu a cidade de Chicago em 1995, resultando na morte de 700 pessoas, e a extensa onda de calor na Europa do Oeste, em 2003, que causou 14 800 mortes somente na França, 475 das quais ocorreram em Paris (Solecki *et al.* 2005). Tradicionalmente, as populações urbanas que tem maior susceptibilidade ao impacto da ICU são os mais velhos, os mais novos, os pobres e as pessoas com algumas doenças.

A população idosa, com idade superior a 75 anos, geralmente tem uma menor resistência contra o desenvolvimento de falha renal e uma diminuída conservação de sódio e água durante os períodos de desidratação. Os fatores agravantes durante as condições de onda de calor ocorrem quando a população adulta utiliza vários medicamentos (por exemplo, anti hipertensivos) e não bebem volumes de água suficientes devido a alguma doença ou deficiência de sede durante os períodos de perda excessiva de fluidos (Morabito *et al.*, 2011).

Atualmente, existe muita informação, por exemplo, na Itália, sobre a dinâmica da mortalidade durante as ondas de calor dos verões que seguiram à desastrosa onda de calor de 2003, onde, aproximadamente, 50 000 morreram na Europa no mês de agosto (Mirzaei e Haghghat, 2010). Existe, também, bastante evidência de que a mortalidade devido às ondas de calor, afetou desproporcionalmente aos adultos mais velhos e em particular às pessoas com idade superior a 75 anos naquela temporada (Conti *et al.*, 2007; Robine *et al.*, 2007).

### 3.3.2 Efeitos Ecológicos

As mudanças de temperatura que ocorrem nas regiões urbanas afetam tanto aos ecossistemas terrestres como os aquáticos. Durante o último século, o incremento de temperatura das zonas urbanas tem favorecido às populações de insetos transmissores de doenças como, por exemplo, o mosquito da dengue (*Aedes aegypti*). Estas populações são mais ativas durante o verão e no inverno os ovos e as larvas vivem dentro das tubulações e dos recipientes com água. Com a formação da ICU e o aumento do calor, a temperatura mínima nas áreas urbanas tem se incrementado, sobretudo no inverno, favorecendo a que os ovos e as larvas do mosquito sobrevivam em temporadas onde normalmente não deveriam (Ashie, 2008).

### 3.3.3 Efeitos no Clima e na Atmosfera

O efeito da ICU no clima atmosférico está relacionado, sobretudo, com a formação de poluentes. Dentre estes, o mais perigoso é sem dúvida o ozônio troposférico. A transformação atmosférica do ozônio ( $O_3$ ) troposférico ou *smogg* se pode dar a partir da contribuição dos poluentes nas grandes cidades, em particular o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), os hidrocarbonetos de chumbo não queimados e, em menores proporções, as partículas em suspensão, o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e os compostos orgânicos voláteis (VOC), os quais os veículos automotores e as indústrias são as principais fontes.

Na estratosfera, o ozônio é chamado de ozônio bom, pois é essencial para a vida na Terra devido à absorção da radiação UV-C. No entanto, na troposfera, o ozônio é chamado de ozônio ruim porque é muito reativo, biologicamente tóxico a certos níveis de exposição, e extremamente fito-tóxico para as plantas a um nível apropriado, sendo o poluente mais prejudicial para as florestas de todo o mundo. Além dos efeitos tóxicos nos organismos vivos, o ozônio é um dos principais contribuintes para o efeito estufa (Karnosky, 2008) (Stathopoulou *et al.*, 2008). Se estima que seja o terceiro maior causador deste efeito, depois do dióxido de carbono,  $CO_2$ , e o metano (Percy, 2003).

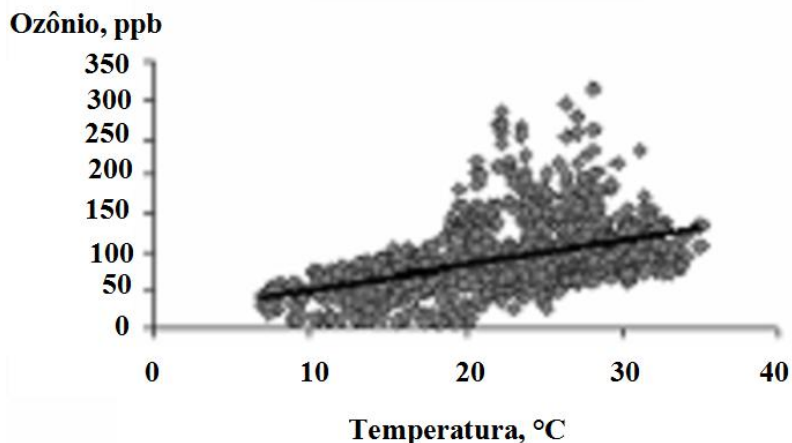
Além das fontes antropogênicas, existem também fontes naturais que favorecem a formação do ozônio troposférico. As fontes naturais incluem: atividade de relâmpagos durante as tempestades (Schwela e Zali, 1999), intrusões descendentes de ozônio naturalmente produzidas na

estratosfera (Stathopoulou *et al.*, 2008), e processos biológicos de oxidação de dois grupos poluentes precursores chave: os VOCs e os NO<sub>x</sub> (Karnosky, 2008; Stathopoulou *et al.*, 2008).

Nas áreas urbanas, as fontes naturais de VOCs e NO<sub>x</sub> são menos importantes que as fontes artificiais. Isso porque os óxidos de nitrogênio são lançados na atmosfera principalmente como NO (óxido nítrico) a partir da queima de combustíveis fósseis. O ozônio é produzido quando o óxido nítrico é convertido rapidamente durante o dia em NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio) pela reação do HO<sub>2</sub> + NO → OH + NO<sub>2</sub>, seguida de uma subsequente fotólise do NO<sub>2</sub> e uma recombinação com as moléculas de oxigênio. (Stathopoulou *et al.*, 2008) A temperatura e o aquecimento urbano de longo prazo aceleram as reações químicas na atmosfera, resultando em altas concentrações de ozônio. Esta alta temperatura muitas vezes é causada pelo efeito da ICU. Rosenfeld *et al.* (1995) indicam que acima de 22°C, a probabilidade de formação de ozônio troposférico se incrementa em 6% por cada 1 °C de temperatura máxima.

Enquanto que a temperatura pode, diretamente, incrementar as concentrações de ozônio mediante a mudança na fotoquímica do ozônio, a velocidade do vento é um fator importante que afeta a dispersão dos poluentes aéreos. Quando altas temperaturas se combinam com baixas velocidades do vento, a formação e acumulação de ozônio troposférico se acelera (Ooka *et al.*, 2011).

A cidade de Atenas, por exemplo, se caracteriza pelo grande efeito da ICU, principalmente causada pela industrialização e urbanização acelerada durante os anos recentes. O efeito aparece durante os períodos de verão e inverno, com uma intensidade de 6 a 12°C para a área central. A área da Grande Atenas concentra aproximadamente 40% da população grega, 50% dos automóveis e 50% das atividades industriais do país. Todos estes fatores, em combinação com o grande número de dias ensolarados e sem nuvens, resultam em altas concentrações de ozônio que, geralmente, excedem o padrão de qualidade estabelecido pelos Estados Unidos, de 120 ppb (partículas por bilhão), especialmente durante os meses de verão. O estudo, realizado por Stathopoulou *et al.* (2008) mostra que a concentração de ozônio em Atenas varia entre 4 e 315 ppb. Destes valores, até 18,1% deles são maiores a 120 ppb. As altas concentrações de ozônio podem ser atribuídas à produção dos NO<sub>x</sub> decorrente do uso de combustíveis fósseis e as altas temperaturas que variaram entre 1,5 a 42,8°C (Figura 3.10).



**Figura 3.10** - Relação entre o volume de ozônio troposférico na atmosfera e a temperatura do meio ambiente na cidade de Atenas.

**Fonte.** Stathopoulou *et al.*, 2008 (adaptado).

Desde 1996, entre 13 a 60% da população urbana na Europa tem sido exposta a concentrações de ozônio que excedem o valor permitido europeu para proteção da saúde humana (80 ppb). O potencial de dano deste excesso para a saúde das florestas urbanas ainda não é claro. No entanto, as plantas são mais sensíveis à contaminação por ozônio do que os seres humanos (Paoletti, 2009).

Os níveis de ozônio no século passado eram de 10 a 15 ppb enquanto que hoje estão entre 30 a 40 ppb. A exposição a 60 ppb é fitotóxica para a vegetação (Percy, 2003). Os efeitos do ozônio nas plantas incluem lesões visíveis nas folhas comprometendo e reduzindo o crescimento das plantas, afetando o rendimento das lavouras e a qualidade das safras (Stathopoulou *et al.*, 2008; Percy, 2003). A exposição crônica, a longo prazo, a baixas concentrações de ozônio causa lesões em plantas de folhas longas, mudanças na pigmentação das mesmas, clorose e senescência prematura das folhas ou flores. Depois de uma exposição de curto prazo a concentrações relativamente altas, os sintomas podem incluir o branqueamento da superfície superior ou inferior das folhas, manchas e ponteados na superfície superior das folhas ou necrose bifacial. A lista de sintomas nas plantas é extensa e depende da espécie, genótipo, idade, fatores meteorológicos e condições de crescimento. A porcentagem mundial de florestas expostas a níveis preocupantes de

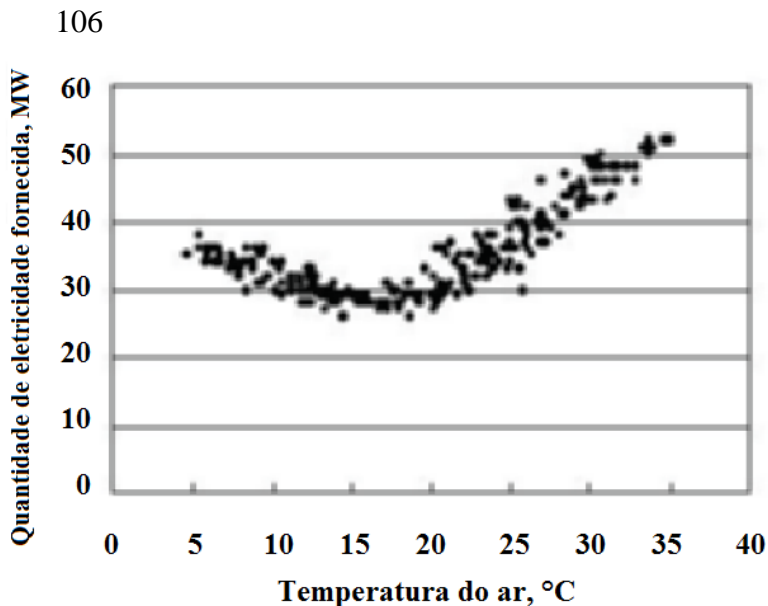


ozônio entre 1990 e 2100 se incrementará de 24% a 49% ou em 17 milhões de km<sup>2</sup> (Percy, 2003).

Para Karnosky (2008), ainda que os níveis de ozônio ao redor das maiores áreas metropolitanas nos Estados Unidos tenham diminuído em relação a 20 anos atrás, os mesmos continuam aumentando em muitos locais ao redor do mundo. Os níveis cresceram rapidamente nas proximidades das grandes cidades dos países em desenvolvimento da Ásia, América Central e América do Sul. É provável que a maior concentração de ozônio ocorra, atualmente, nas redondezas da Cidade do México a qual tem as condições ideais para a produção fotoquímica: grande altitude, alta incidência de radiação solar que não varia significativamente durante o ano, altas temperaturas diurnas e altas emissões de VOCs e NO<sub>x</sub> por parte dos carros e indústrias.

### **3.3.4 Efeitos no Consumo de Energia**

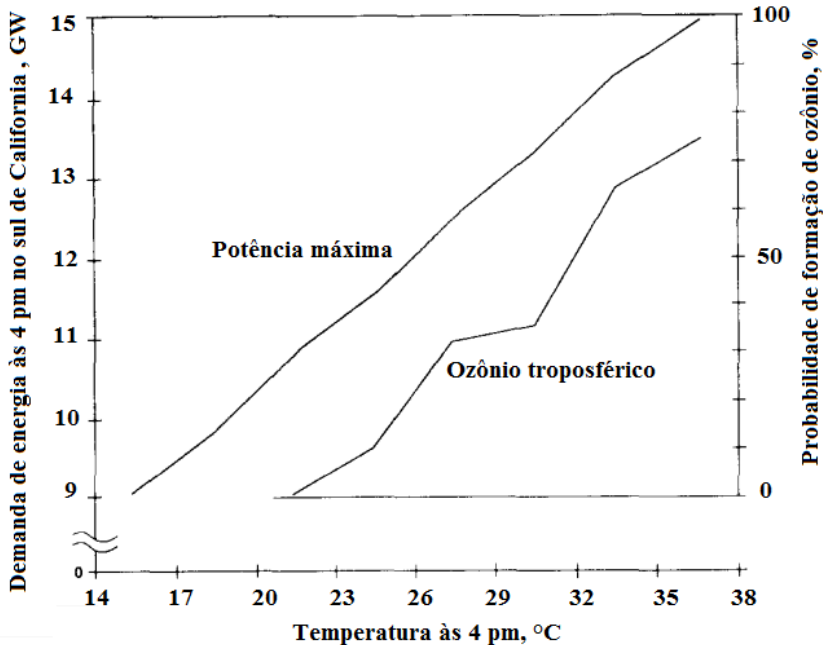
As altas temperaturas nas cidades durante o verão se traduzem, também, em altas demandas energéticas para refrigeração de ambientes. Na região Sul de Kanto, onde se localiza a cidade de Tóquio, o incremento da demanda de eletricidade é de 1,6 milhões de kW por cada 1 °C de incremento de temperatura, o qual corresponde à capacidade energética de dois reatores nucleares de tamanho médio. A Figura 3.11 mostra um exemplo da sensibilidade da demanda energética de Tóquio. Na figura, a sensibilidade durante o verão é muito aparente. Durante o inverno, a demanda de energia se incrementa com a queda de temperatura, mas não é tão pronunciada como a mudança na demanda de energia durante o verão (Ashie, 2008).



**Figura 3.11** - Relação entre a demanda de eletricidade nos bairros comerciais de Tóquio e a temperatura do ar.

**Fonte.** Ashie, 2008 (adaptado).

O uso excessivo de equipamentos de ar condicionado não só afeta a demanda de energia como também a qualidade do ar nas cidades. Ao respeito, Romeo e Zinzi (2011) indicam que só no continente europeu, este setor é responsável por, aproximadamente, 40% do consumo total de energia e 36% das emissões de CO<sub>2</sub>. Nos Estados Unidos, a situação não é diferente. A Figura 3.12 mostra a relação entre o pico de energia da Southern California Edison, a qual fornece três quartos da eletricidade para a Bacia de Los Angeles, e a temperatura do ar. Para cada incremento de 1°C na temperatura acima dos 18°C, a demanda máxima de energia para refrigeração se incrementa em 3,0%. Para o Atlanta's Hartfield International Airport, o incremento é de 6,0% para cada grau centígrado. No geral, as ICU no verão de Los Angeles são responsáveis por 1,4 GW de consumo máximo de energia. A nível dos Estados Unidos, as ICUs incrementam a demanda de ar condicionado em, aproximadamente, 10 GW representando um gasto de vários milhões de dólares por hora e bilhões de dólares anuais (Rosenfeld *et al.*, 1995).



**Figura 3.12** - Níveis de ozônio troposférico e demanda máxima de energia no sul da Califórnia versus a temperatura em Los Angeles, CA às 4 pm.

**Fonte.** Rosenfeld *et al.*, 1995 (adaptado).

O pico de demanda elétrica urbana nas cidades de Los Angeles, Washington, Phoenix, Tucson e Colorado Springs, nos Estados Unidos são de 2 a 4% por cada 1 °C a mais na temperatura máxima diária de 15 a 20°C. Então, o uso adicional de ar condicionado causado pelo incremento da temperatura do ar urbana é responsável por 5 a 10% do pico de demanda elétrica urbana (Rosenfeld *et al.*, 1995).

### 3.3.5 Pegada Ecológica

Cada efeito da ICU causa danos aos seres humanos, ao meio ambiente ou um consumo exagerado de energia. No entanto, deve-se considerar que como estes efeitos se dão ao mesmo tempo e nunca de forma independente, o impacto combinado amplia a agressão ao meio ambiente. Esta agressão pode ser medida mediante o cálculo da pegada ecológica a qual é definida como a área de terra e água que é requerida para suportar indefinidamente os padrões materiais da vida de uma dada

população humana utilizando as tecnologias existentes. Ou seja, o impacto ecológico corresponde à quantidade de natureza que as pessoas ocupam durante o cotidiano.

Para tratar deste tema, Santamouris *et al.* (2007) estimaram a carga adicional no meio ambiente causada pelas altas temperaturas na Grande Atenas através do cálculo da pegada ecológica adicional gerada pelo efeito da ICU. Considerando um custo, em 1998, da energia para mitigação da ICU de 105 a 120 GWh/ano e uma emissão potencial de CO<sub>2</sub> de 0,31 a 0,36 Mtn (megatonelada), a pegada ecológica da ilha de calor em Atenas foi de 60 000 a 70 000 ha. O município de Atenas tem uma área de 40 000 ha. Então, a presença da ICU causa uma pegada ecológica da cidade em 1,5 a 2,0 vezes a área política da cidade.

Na cidade de Toronto no Canadá, a pegada per capita é de 7,6 ha/pessoa. Visto que Toronto tem 2 385 000 residentes, a pegada ecológica total seria de 18 126 000 ha, uma área 288 vezes maior que a área política da cidade. Uma pessoa tinha uma pegada ecológica, em 1999, de 2,3 ha, ou 20% a mais da capacidade biológica da Terra de 1,90 ha/pessoa (Santamouris *et al.*, 2007). De forma similar, a pegada ecológica da população em Vancouver, Canadá, é de 3 634 000 ha, ou 319 vezes sua área nominal. Em 29 cidades da Europa Báltica a pegada ecológica é de 565 a 1 130 vezes maior que a área das cidades.

O custo de energia, o incremento das emissões de CO<sub>2</sub> e o crescimento atual da pegada ecológica na cidade devido à presença de ICU está diretamente relacionada à penetração do ar condicionado na cidade. No ano de 1998, a penetração do ar condicionado era de 11,2% dos edifícios, enquanto que fontes mostravam que o ar condicionado era usado para cobrir 70% das necessidades de refrigeração de ambientes (Santamouris *et al.*, 2007).

### 3.4 ILHA DE CALOR NOTURNA

A ilha de calor noturna (ICN) surge como consequência da liberação das grandes quantidades de calor armazenadas durante o dia as quais aquecem o ar do ambiente a noite. Teoricamente, o efeito ICN se deve à diferença da radiação de onda longa retida e a admissão térmica entre o ambiente urbano e rural. A ICN depende também de configurações e geometria urbanas tais como textura, formato das ruas e orientação. No caso de cidades com cânions urbanos pronunciados o calor armazenado

durante o dia não pode deixar a superfície das cidades pela interferência das grandes construções. Em consequência, o calor armazenado nos pavimentos ou outras construções é transferido para as paredes dos prédios aumentando a temperatura das residências durante a noite.

Como exemplo do impacto da ICN, tem-se a cidade de Hong Kong a qual apresenta um formato de construção urbano compacto. As superfícies dos edifícios residenciais, geralmente construídos em concreto Portland ou com blocos de cimento, têm uma alta capacidade de armazenamento térmico devido ao seu baixo albedo. Depois do pôr do Sol, o fluxo de calor sensível dos prédios não cai rapidamente devido à alta capacidade térmica da massa combinada das construções. Isso leva ao aquecimento do ar e ao incremento da ICN. Este fenômeno se repete em muitas outras cidades parecidas com Hong Kong que possuam as seguintes características de geometria urbana (Giridharan *et al.*, 2005):

- Construção densa;
- Materiais de construção de alta capacidade de armazenamento térmico em superfícies verticais;
- Altíssimo grau de superfícies horizontais impermeáveis (mistura asfáltica, concreto Portland, pavimentos com blocos de cimentos);
- Geometria urbana que geralmente prende a radiação e cria uma estagnação de ar;
- Edifícios com pontas muito altas e agudas;
- Baixíssima densidade de vegetação dentro do micro ambiente; e
- Alta liberação de calor e resíduos por parte dos habitantes.

Kim e Baik (2002) estudaram a intensidade máxima da ICU diurna em Seul, Coréia do Sul, utilizando dados coletados em dois observatórios meteorológicos, sendo um na zona urbana e outro na zona rural, durante 1973 a 1996. Os resultados mostraram que a ICU máxima diária média é mais fraca no verão e mais forte no outono e inverno. De forma similar a outras cidades do mundo, a intensidade máxima da ICU é mais frequentemente observada no período noturno que no diurno, diminuindo quando a velocidade do vento se incrementa e é mais pronunciada com a presença de céus limpos.

Jauregui (1997) realizou uma pesquisa sobre o desenvolvimento da ICU na Cidade do México, comparando as temperaturas das zonas

urbanas e rurais. Os resultados mostraram que a ICN foram mais frequentes (75% do tempo do período examinado) do que a ICU diurna, (25%). A maior intensidade de ICN, 7,8°C foi observada em um mês seco, fevereiro, caracterizado por noites claras e calmas. Isto deve-se ao fato que durante os meses secos, os solos secos combinados com a baixa umidade do ar, permitem taxas de resfriamento mais rápidas nas zonas rurais durante a noite. No caso da ICU diurna, a maior intensidade ocorreu durante a temporada úmida com intensidade de 5 °C. O fator mais significativo que governa a ICU durante a temporada de chuvas são as mudanças na velocidade dos ventos, a presença de nuvens e a chuva, sobretudo na área rural, que estão associadas com o clima turbulento instável.

Em Lisboa, estudos sobre a temperatura do ar noturna com o uso de um termo higrógrafo foram realizado por Alcoforado (1986, 1991, 1992, 1994). Os resultados destes estudos mostraram que a temperatura do ar se incrementa no centro da cidade em 85% nas noites de inverno e 63% nas noites de verão em relação às outras áreas da cidade. As medições realizadas por Alcoforado (1992) confirmam que a intensidade da ICN nas noites de inverno podem atingir 2,5°C. No entanto, as áreas mais quentes não são sempre as mesmas. Quando o vento é forte, a temperatura é maior nos vales centrais. Quando não há vento, o topo das montanhas urbanas são os mais quentes. Em condições calmas de inverno, o fundo dos vales são os pontos mais frios devido à drenagem de ar e às localizações com baixa densidade de construções.

Estudos realizados por Stathopoulou *et al.* (2004), Santamouris *et al.* (2001), Livada *et al.* (2002) e Mihalakakou *et al.* (2004) nas quatro cidades gregas mais populosas, anteriormente já mencionadas, mostram que a intensidade da ICN é pronunciada e pode atingir mais de 8 °C para as cidade de Testalónica e Heraklion, e até 7 °C para as cidades de Patra e Volos, enquanto que a intensidade da ICN para a área central de Atenas pode atingir até 5°C (Stathopoulou e Cartalis, 2007).

A medida de mitigação da ICN deve contemplar primeiro a mitigação da ICU diurna e fazer modificações que melhorem a ventilação nas horas noturnas. O aumento do albedo e da relação entre a altura da cidade e a área do pavimento, ajuda na diminuição da ICN. O incremento no fator de visão do céu piora a intensidade da ICU diurna, mas diminui a intensidade da ICN (Giridharan *et al.*, 2005).

### 3.5 ADAPTAÇÃO E MEDIDAS DE MITIGAÇÃO CONTRA AS ILHAS DE CALOR URBANO

O conceito de adaptação contra a ICU pode ser definido como um ajuste para moderar o dano causado pelo fenômeno enquanto que a mitigação contra a ICU é definida como uma intervenção destinada a reduzir a quantidade ou a extensão da mesma. A adaptação e a mitigação da ICU podem ocorrer a nível predial, de vizinhança, municipal ou regional. Ambas medidas têm como finalidade diminuir os efeitos adversos das ICU, tanto nos seres humanos contra no meio ambiente.

#### 3.5.1 Adaptação

No âmbito predial, as estratégias de adaptação refletem ações tradicionais adotadas em resposta às temperaturas quentes com o objetivo de manter baixas temperaturas. Durante a noite, quando as temperaturas são altas (ligadas à ICU) e próximas ao 37°C, o corpo humano entra num estado de estresse térmico. Se estas circunstâncias persistem por vários dias ou mais, as condições biofísicas associadas com o estresse devido ao calor podem começar a aparecer em populações vulneráveis. As adaptações tradicionais contra a ICU incluem o uso de roupa de cor clara, redução das atividades na área da cozinha dentro de casa ou incremento das mesmas atividades fora dela, uso de ventiladores e escolha de locais mais frios para dormir. Uma outra medida implica no uso dos equipamentos de ar condicionado dentro de casa, os quais foram a alternativa mais utilizada a partir dos anos 40 e 50s, particularmente nos Estados Unidos e em outros países (Solecki *et al.* 2005). Neste caso, o ar condicionado pode ser uma estratégia de adaptação efetiva; no entanto, além de incrementar a demanda elétrica, a compra e o custo do uso do ar condicionado pode ser muito caro para a população de baixa renda, além de causar poluição do ar pelo uso de equipamentos caseiros e pela queima de combustíveis, para geração de energia, por parte das usinas.

#### 3.5.2 Mitigação

Muitas estratégias potenciais de mitigação têm sido revisadas por alguns pesquisadores para determinar a efetividade relativa e monetária (Rosenfeld *et al.*, 1998; Akbari *et al.*, 1997; Taha, 1996). Uma variedade de programas a nível federal, estatal e local foram desenvolvidos na década de 1990 nos Estados Unidos. Entre eles tem-se, o Heat Island Reduction Initiative (HIRI), um programa federal que tem representação

na NASA; o US Department of Energy e o US Environmental Protection Agency. Todos promovem estratégias de redução da ICU através da instalação de tetos e pavimentos refletivos e claros, plantio de árvores para sombra e incremento das áreas verdes nas cidades (Solecki *et al.* 2005; Rosenfeld *et al.*, 1995; Mirzaei e Haghighat, 2010). Adicionalmente, por mais de duas décadas, o Heat Island Group do Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) tem realizado pesquisas para quantificar os efeitos do incremento do albedo urbano na redução do uso de energia de refrigeração, refrigeração de áreas urbanas e melhora da qualidade urbana (Akbari *et al.*, 2008).

A adição de vegetação no ambiente urbano mediante o plantio de árvores ou pela incorporação de vegetação nos tetos pode mitigar o efeito da ICU, reduzir o gasto de energia, e melhorar a qualidade do ar mediante a filtragem de poluentes. A vegetação modera a temperatura através da evaporação da umidade nos solos, transpiração nas plantas e sombreamento. A contribuição relativa de cada um destes processos para o resfriamento do ambiente urbano é de difícil quantificação. Algumas simulações sugerem que o efeito indireto de refrigeração pela evapotranspiração é maior que o efeito direto promovido pela sombra das árvores. Quando o número de árvores numa área se incrementa, a contribuição relativa da evaporação para o resfriamento total também aumenta. Para maximizar a economia de energia associada ao consumo de ar condicionado resultante do plantio de vegetação urbana, as árvores tipicamente devem ser colocadas estrategicamente na frente das janelas das casas ou no lado leste, oeste, ou norte de forma que a radiação solar seja bloqueada tanto pela manhã como de tarde. No entanto, a localização ótima do plantio varia dependendo da latitude. Árvores maiores também tendem a ser mais efetivas já que fornecem uma maior área de sombra. As áreas com cobertura de árvores grandes podem ser 2,7 a 3,3°C mais frias que as áreas sem árvores (Solecki *et al.*, 2005).

No estudo realizado por Giridharan *et al.* (2004) os resultados indicam que o *layout* de Belchers é o melhor, em comparação com Wah Fu 1 e Wah Fu 2, já que tem bolsões de áreas verdes a cada 20 ou 30 metros de distância ao invés de uma grande área verde. Para que as áreas verdes tenham um impacto nas ICU, deveria existir no mínimo entre 600 a 700 m<sup>2</sup> de área verde densa para cada 1000 m<sup>2</sup> de área construída aberta. Pequenas áreas verdes, aproximadamente 30 x 60 m, em áreas urbanas podem ser 3°C mais frias que as áreas não verdes circundantes. Para se



ter uma redução substancial da temperatura do ar, deve haver uma apropriada densidade de vegetação.

As árvores urbanas podem, também, ter uma função importante na melhora da qualidade do ar urbano tanto através da captação dos poluentes, retardando as reações fotoquímicas que promovem a formação do ozônio. No entanto, nem todas as árvores são apropriadas para a mitigação da ICU. Alguns tipos de árvores conhecidas como árvores altamente emissivas, liberam compostos orgânicos voláteis (VOCs), precursores do ozônio na atmosfera. O plantio de árvores pouco emissivas em áreas urbanas poderia resfriar o ar, reduzir a concentração dos poluentes e diminuir as emissões biogênicas da vegetação altamente emissiva. Existem espécies de árvores que emitem pouca ou quase nenhuma quantidade destes compostos. O Olmo, a Murta de Crepe, o Cedro e a Árvore de Judas são alguns exemplos (Taha, 1996).

Existem, porém, certas dificuldades na aplicação desta política de mitigação, sobretudo em regiões sem ou com pouco espaço para plantio de áreas verdes. A instalação de tetos e pavimentos refletivos custam pouco se as mudanças de cor são incorporadas nas rotinas de manutenção dos prédios e das vias urbanas. Também, os resultados das implantação das superfícies coloridas claras são imediatos, enquanto que as mudanças propiciadas pela implantação das áreas verdes podem ser percebidas em dez anos ou menos, que é o tempo necessário para que uma árvore esteja grande o suficiente para produzir uma economia de energia significativa (Rosenfeld *et al.*, 1995). Prado e Ferreira (2005) mencionam que um grande incremento do albedo combinado com o plantio de árvores pode reduzir o uso de energia para ar condicionado em até 40%.

O uso destes “materiais frios”, altamente refletivos, junto com o incremento de espaços verdes, é uma alternativa viável e de baixo custo que pode ser implementada nas áreas urbanas e na construção de novos empreendimentos, como uma estratégia para reduzir os perigosos efeitos da ICU. O primeiro passo para a aplicação prática destes conceitos é a conscientização da importância do uso mais eficiente dos materiais, os quais podem contribuir para a mitigação das altas temperaturas nos centros urbanos e suas consequências, apontando a importância da composição das fachadas dos prédios e das superfícies urbanas para a preservação do meio ambiente, economia de energia e conforto térmico (Prado e Ferreira, 2005).

A mudança do albedo de uma superfície permite que uma maior quantidade de radiação solar seja refletida pelos diversos materiais artificiais nas cidades. Esta estratégia envolve o uso de materiais para tetos, ou tintas e telhas de cores claras. Ao nível do solo, os pavimentos podem ser clareados mediante o uso de agregados de cores claras, revestimentos coloridos, ou concreto Portland ao invés de mistura asfáltica (Davis *et al.*, 1992). Com uma menor quantidade de calor armazenado, as temperaturas da superfície e do ar próximo à superfície diminuem, mitigando o efeito da ICU. O incremento do albedo superficial em 1%, por exemplo, diminuiria a intensidade da ICU em 10,7% e 1,3% para as cidades de Belchers e Wah Fu 1 respectivamente (Giridharan *et al.*, 2004). Akbari *et al.* (2008) indicam que o incremento do albedo do teto de uma edificação, de 10 ou 20% para 60%, pode diminuir a temperatura interna e economizar até 20% da energia destinada para refrigeração do ambiente.

Rosenfeld *et al.* (1995) orientam que o aumento de albedo das superfícies urbanas pode ser implementado adotando certas políticas tais como: (a) a classificação dos materiais de tetos por sua temperatura mínima no meio dia; (b) adotando padrões relativamente moderados (por exemplo, que os novos tetos sejam frios, com temperaturas superficiais entre as superfícies brancas e pretas); e (c) oferecendo descontos para os materiais novos que atinjam os padrões.

Prado e Ferreira (2005) comentam que a eficiência do albedo e a emissividade dos materiais são parâmetros que podem ser adotados pelos fabricantes dos materiais utilizados nas telhas, através de análises sistematizadas dos componentes ou através de processos de melhora contínua. Também podem ser implementados nas construções códigos ou regras específicas que visem a diminuição dos impactos ambientais das ICU na demanda energética nos centros urbanos

Solecki et al (2005) mencionam que a adoção de estratégias que simultaneamente mitiguem o efeito da ICU e se adaptem à mudança climática reduziria as emissões de gás de efeito estufa e também forneceria uma base para estudos e iniciativas adicionais. O investimento de capital associado com a implementação é eventualmente compensado pela economia de energia. Um estudo na cidade de Chicago nos Estados Unidos mostrou que o período de retorno do investimento em áreas verdes estaria entre 9 a 18 anos dependendo da variedade de espécies de árvores

plantadas, a localização, e a manutenção. Os benefícios adicionais são o valor estético da floresta urbana e o impacto positivo na saúde humana.

Um outro estudo de caso, realizados por Rosenfeld *et al.* (1995), consistiu na observação em larga escala do efeito do albedo no ar mediante o estudo do clima no White Sands National Monument, em New Mexico (Figura 3.13). O White Sands National Monument é o deserto de gesso mais extenso do mundo com uma extensão aproximada de 712 km<sup>2</sup>. O albedo da areia de gipsita branca que cobre o terreno tem um valor de albedo de aproximadamente 0,6. O deserto ao redor é coberto por pouca vegetação e tem um albedo de 0,26. A diferença do albedo entre o monumento e o deserto é de aproximadamente 0,35, comparável com uma melhora possível do albedo em grandes proporções numa cidade como Los Angeles. As medições realizadas entre agosto de 1992 e junho de 1993 mostraram que a temperatura do ar sobre o monumento era 3°C mais baixa que o ar sobre a superfície escura durante quase todo o dia.



**Figura 3.13** - White Sands National Monument

Para simular a mudança da refletância das superfícies em uma grande escala, Rosenfeld *et al.* (1995) estudaram, também, o impacto do incremento do albedo superficial na cidade de Los Angeles. A área escolhida tinha uma extensão de 325 km de largura e 200 km de comprimento, aproximadamente 65 000 km<sup>2</sup>. Quase 20% desta área

estava coberta por superfícies artificiais fatíveis de se modificar a refletância, a qual foi incrementada de 0,13 a 0,26. Os resultados da simulação mostraram que a modificação permitiria uma diminuição de 2°C no horário do meio dia. No começo da tarde, aproximadamente às 15h, ocorre a máxima diminuição de temperatura, 3°C. De acordo com estes resultados, a redução do consumo de energia pico em Los Angeles seria de 0,6 a 1,2 GW, o que representaria uma economia de US\$ 100 000/h a US\$ 200 000/h, baseado num custo de 16,5 centavos/kWh (Rosenfeld *et al.*, 1995).

O incremento de 0,13 de albedo considerado nas simulações, não implica que a superfície seja mudada para uma cor predominantemente branca. O incremento do albedo seria possível mediante o abrilhantamento dos tetos beges, dos tetos brancos ou incremento do albedo das rodovias de revestimentos asfálticos e de concreto. Uma mudança de cor da superfície para uma cor branca permitiria um incremento de albedo de mais de 0,3. Os resultados sugerem uma relação para o incremento de albedo na cidade de Los Angeles com a diminuição do pico de consumo de energia na mesma, que é a seguinte:

$$\frac{\Delta T}{\Delta a} = \frac{(-3 \pm 1)^{\circ}\text{C}}{0,16}$$

**Equação 3.3**

Onde:  $\Delta T$  é a mudança da temperatura do ar e  $\Delta a$  é a mudança do albedo. No caso do White Sands National Monument a relação seria um pouco menor:

$$\frac{\Delta T}{\Delta a} = \frac{(-2 \pm 1)^{\circ}\text{C}}{0,35}$$

**Equação 3.4**

A diferença entre os dois modelos, um da cidade e outro do deserto, está relacionada com as características superficiais urbanas. A superfície urbana é mais escura, pouco impermeável e com presença de cânions urbanos. Esta superfície tem uma alta capacidade de armazenamento calorífico e os cânions reduzem a habilidade da superfície de dissipar o calor armazenado. Desta forma, o modelo do White Sands National Monument não pode ser extrapolado diretamente para as áreas urbanas. (Rosenfeld *et al.*, 1995)

Os tetos altamente claros e refletivos têm um benefício adicional devido à redução da energia necessária para refrigeração dos prédios. Contudo, esta estratégia é mais efetiva em construções com grandes valores de relação teto-volume construído, já que em construções menores, o uso de superfícies com maior albedo pode aumentar a quantidade de radiação ultravioleta refletida o que afeta a saúde humana aumentando a frequência de problemas relacionados com moléstias nos olhos ou câncer de pele (Heisler e Grant, 2000). Os materiais que apresentam este problema são, por exemplo, coberturas metálicas não pintadas com alta refletância UV (mostradas na Tabela 3.3) tais como o alumínio, o metal (Al + Zn), o aço inox e o metal termo acústico branco. Para evitar estes riscos à saúde, uma categoria de materiais tem ganhado aceitação nas últimas décadas, os chamados materiais frios. Estes materiais serão discutidos no Capítulo 4.

### 3.6 MODELO DE SIMULAÇÃO CLIMÁTICA ENVI-MET

A simulação dos efeitos da ICU é realizada mediante o emprego de modelos meteorológicos destinados ao estudo dos fenômenos atmosféricos que ocorrem na atmosfera terrestre. O estudo destes fenômenos se dá a diferentes escalas: a microescala, que corresponde ao estudo das condições atmosféricas do espaço físico localizado sob a camada inferior da troposfera junto à superfície; a mesoescala, que corresponde ao estudo da atmosfera localizada na troposfera, podendo alcançar a tropopausa ou até mesmo a camada mais inferior da estratosfera; por fim, a escala sinótica, que corresponde ao estudo da atmosfera em grande escala e de fenômenos atmosféricos como os ciclones.

Os modelos meteorológicos estão em constante desenvolvimento por parte da comunidade científica. Existem modelos simples que estimam, por exemplo, a temperatura da superfície terrestre em qualquer latitude utilizando dados sobre a intensidade da radiação solar, temperatura inicial da superfície e albedo terrestre. Estes modelos são conhecidos como Modelos de Equilíbrio Energético (Energy Balance Models).

Existem, modelos mais precisos que estimam os fenômenos climáticos a uma escala mesométrica, permitindo a modelagem não só da temperatura terrestre mas, também, da pressão, umidade, modelagem de ciclones, tempestades, entre outros. Um destes modelos é o MM5 ou

Modelo de Mesoescala de Quinta geração desenvolvido pela University Corporation for Atmospheric Research. Este modelo é aberto ao público e pode ser baixado gratuitamente do site da MM5 Community Model.

O software utilizado na presente pesquisa foi o ENVI-met, o qual é um modelo microclimático tridimensional que permite simular pequenos sistemas Terra-Atmosfera. A resolução deste modelo vai desde 0,5 a 10 metros. Foi desenvolvido por Michael Bruse e está disponível ao público no seu site na internet.

O ENVI-met permite a simulação dos seguintes parâmetros: fluxo de ar ao redor das construções; intercâmbio de calor e vapor ao nível do solo; turbulência; mudanças nas características das áreas vegetadas; e, dispersão de partículas.

Os dados de entrada do modelo incluem: a umidade relativa; velocidade do vento; albedo das superfícies; umidade do solo, dimensões dos prédios; propriedades térmicas dos prédios; e, presença de nuvens. Para realizar as simulações, é necessária a modelagem da área física a ser avaliada. O ENVI-met permite modelar um grande espaço como ruas e prédios de diversas alturas e extensões (Figura 3.14). Uma vez modelado o espaço físico, o sistema é alimentado com os dados. Como produto ele apresenta os resultados das condições climáticas para o microclima da região simulada. A Figura 3.15 mostra um exemplo da simulação da temperatura ao redor de dois prédios com o programa ENVI-met.

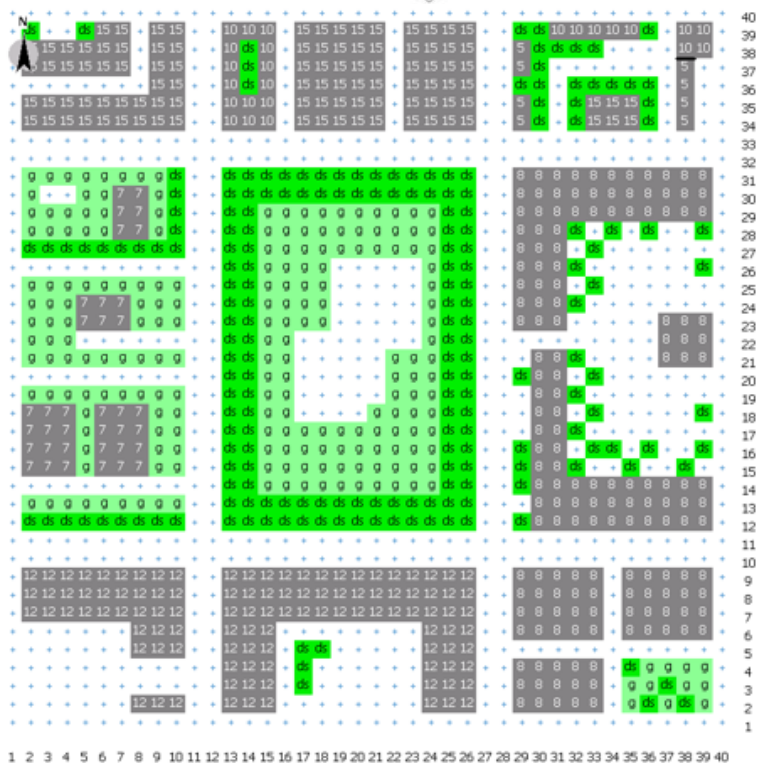
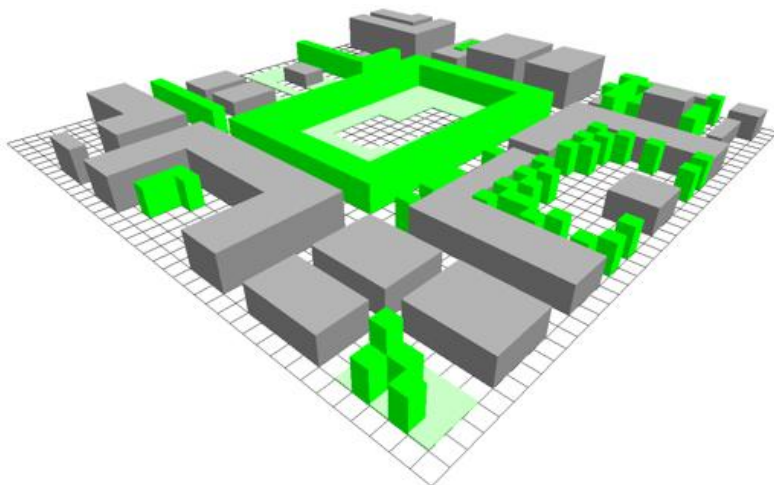
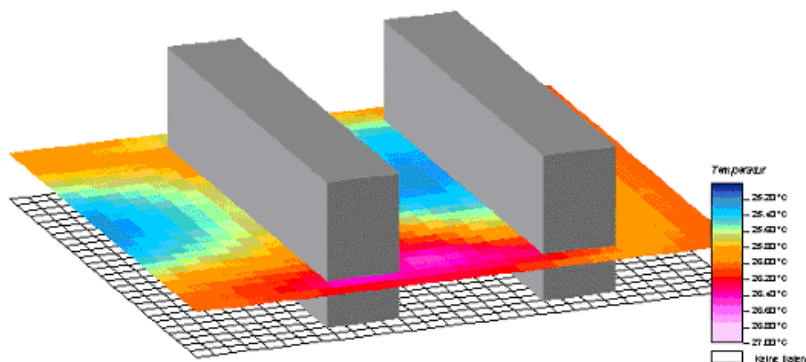


Figura 3.14 - Modelagem gráfica de um ambiente urbano.

Fonte: ENVI-met, 2011.



**Figura 3.15** - Temperatura simulada ao redor de dois prédios.

**Fonte:** ENVI-met, 2011.

### 3.7 RESUMO DO CAPÍTULO

A revisão apresentada neste capítulo tratou do fenômeno de Ilha de Calor Urbana (ICU), suas causas, suas consequências e as medidas adotadas para a sua mitigação. O fenômeno é caracterizado pelo aumento das altas temperaturas do ar em áreas densamente construídas e habitadas em comparação com as temperaturas mais frias das áreas rurais.

ICU diárias durante o verão com valores de temperatura de 2 a 3 °C maiores que as áreas circundantes são encontradas, por exemplo, em várias regiões dos Estados Unidos. Na cidade de Atenas, algumas áreas podem ser até 5,2 °C mais quentes que as áreas vegetadas. Na cidade de São Paulo, a temperatura do centro da cidade pode ser até 10 °C maior do que as áreas verdes.

Os parâmetros que têm maior influência no desenvolvimento da ICU são: o tipo de uso do solo (tipicamente vias pavimentadas e superfícies de concreto de cimento Portland), geometria urbana e emissões de calor antropogênico. Entre estes, a mudança do tipo de uso do solo é, com certeza, a principal causa do incremento da temperatura nas cidades. Na maioria das vezes, os materiais utilizados em substituição do terreno natural tem um baixo valor de albedo e uma capacidade de absorver e armazenar uma grande quantidade de calor além de ser menos permeáveis que o solo natural.



O efeito da ICU é maior nas grandes metrópoles onde as áreas verdes são cada vez menores. No caso da cidade de Tóquio, por exemplo, a área das construções e das vias de comunicação representam 77,7% da área total da cidade. Situação similar se apresentam em algumas cidades dos Estados Unidos, onde as áreas dos pavimentos e das construções constituem mais do 60% da área urbana. A porcentagem que corresponde às áreas pavimentadas, nestas cidades, é 21,1 e 40%, respetivamente.

Tanto a população como o meio ambiente são sensíveis aos efeitos da ICU. O fenômeno causa um incremento do estresse pelo calor e aumento de doenças do sistema circulatório. Nos casos mais cruciais, as ondas de calor podem causar a morte dos grupos sensíveis ao calor, sobretudo dos adultos com mais de 75 anos, como ocorreu na Europa, no ano de 2003, onde mais de 50000 pessoas perderam a vida em incidentes relacionados ao calor excessivo. Entre as consequências ecológicas pode-se mencionar as mudanças dos ciclos de vida de alguns animais e a formação de oxidantes fotoquímicos na atmosfera, em especial dos óxidos de nitrogênio. No aspecto econômico, o calor excessivo favorece um maior consumo de energia causando um gasto monetário adicional com a finalidade de refrigeração de ambientes.

Existem algumas estratégias potenciais para mitigar os efeitos da ICU. As melhores medidas estão relacionadas ao uso de materiais de construção e pavimentos mais claros e refletivos e ao incremento da vegetação nas cidades. No entanto, em cidades sem muito espaço para a implantação de novas áreas verdes, a mudança do tipo de material de construção é a melhor alternativa.

A refletância, ou albedo do material de construção, é influenciado, inicialmente pela composição, textura da superfície e orientação da radiação solar. A composição da superfície influencia a cor do material. Desta forma, superfícies claras tem valores mais altos de albedo em comparação com superfícies escuras. No caso da textura, as superfícies lisas tendem a ser mais frias que as superfícies grossas; nas quais, por causa das irregularidades, existe uma maior área superficial disponível para absorver a radiação solar. A orientação da radiação está associada com o horário do dia durante o qual a radiação solar incide na superfície. A intensidade e absorção desta radiação, será maior nos horários próximos ao meio dia. Estes parâmetros ajudaram a definir as três variáveis, (composição e cor do revestimento, textura superficial e horário

de medição) que foram estudadas nos ensaios de refletância solar e medição de temperatura em campo desta pesquisa.

Entre os benefícios da mitigação da ICU estão a diminuição da temperatura das cidades, a melhora do conforto e economia da população. Alguns estudos apontam que o incremento do albedo superficial em 1% poderia diminuir a intensidade da Ilha de Calor Urbana em até 10,7% no caso de algumas cidades de Hong Kong. Nos Estado Unidos, o incremento do albedo de uma edificação em 40% poderia diminuir a temperatura interna e economizar até 20% da energia destinada para refrigeração do ambiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARI, Hashem *et al.* **Peak power and cooling energy savings of shade trees.** *Energy and Buildings* 25, 1997. p. 139–148.

AKBARI, Hashem; ROSENFELD, Arthur. **Global Cooling : Effect of Urban Albedo on Global Temperature.** 2008.

ARNFIELD A. J. **Review two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island.** *International Journal of Climatology*, 2003.

ASHIE, Yasunobu. **Management of Urban Heat Environment.** *In: HANAKI, Keisuke (Org.). Urban Environmental Management and Technology.* [s.l.]: Springer, 2008. p. 215–238.

ALCOFORADO, Maria João; ANDRADE, Henrique. **Global Warming and the Urban Heat Island.** *Urban Ecology*, 2008. p. 249–262.

ALCOFORADO, Maria João; ANDRADE, Henrique. **Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): main features and modelling attempts.** *Theoretical and Applied Climatology*, v. 84, n. 1-3, 2005. p. 151–159.

ALCOFORADO Maria João. **Contribution to the study of Lisbon's heat island. Analysis from an infra-red image.** *Freiburger Geographische Hefte* 26, 1986. p. 165–176.

ALCOFORADO Maria João. **Influence de l'advection sur les champs thermiques urbains a Lisbonne.** *Pub Ass Int Climatol* 4, 1991. p. 29–35.

ALCOFORADO Maria João **O clima da região de Lisboa. Contrastes e ritmos térmicos (PhD Thesis).** *Memórias do Centro de Estudos Geográficos.* Lisboa: CEG 15, 1992. p. 347.

ALCOFORADO Maria João **L'extrapolation spatiale des donnees thermiques en milieu urbain.** *Pub Ass Int Climatology* 7, 1994. p. 493–502.

AVOL, E.L. *et al.* **Short-term respiratory effects of photochemical oxidant exposure in exercising children**, Journal of the Air Pollution Control Association, 37, 1987. p. 158–162.

BIAS, Edílson de Souza *et al.* **Análise do Fenômeno de Ilhas de Calor Urbanas por Meio da Combinação de Dados Landsat e Ikonos**. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brazil, 05 -10 abril 2003. p. 1741 – 1748.

BOTTYAN Z, Unger J. **A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island**. Theor Appl Climatol 75, 2003. p. 233–243

BRETZ S.; AKBARI, H.; ROSENFELD A. **Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands**, Atmospheric Environment 32 (1), 1998. p.) 95–101.

CONTI, S.; MASSOCO, M.; MELI, P. *et al.* **General and specific mortality among the elderly during the 2003 heat wave in Genoa (Italy)**. Environ Res 103, 1997. p. 267 – 274.

DAVIS, S.; MARTIEN, P.; SAMPSON, N. **Planting and light-colored surfacing for energy conservation in cooling our communities: a guidebook on tree planting and light-colored surfacing**. EPA Guidebook, 1992. p. 93–110.

DHAKAL, Shobhakar; HANAKI, Keisuke. **Improvement of urban thermal environment by managing heat discharge sources and surface modification in Tokyo**. v. 34, 2002.

CAPE, J. N. **Surface ozone concentrations and ecosystem health: past trends and a guide to future projections**. The Science of the total environment, v. 400, n. 1-3, 2008. p. 257–69.

Climate Protection Partnership Division (Cambridge Systematics) **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, Cool Pavements** Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs, 2005. p. 39.

GIRIDHARAN, R.; LAU, S.S.Y.; GANESAN, S. **Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong**. Energy and Buildings, v. 37, n. 9, 2005. p. 964–971.

GIRIDHARAN, R; GANESAN, S; LAU, S.S.Y. **Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong.** *Energy and Buildings*, v. 36, n. 6, 2004. p. 525–534.

HEISLER, G.M., GRANT, R.H. **Ultraviolet radiation in urban ecosystems with consideration of effects on human health.** *Urban Ecosystems* 4, 2000. p. 193–229.

JAUREGUI, Ernesto. **Heat island development in Mexico City.** *Atmospheric Environment*, v. 31, n. 22, 1997. p. 3821–3831.

JOHNSON GT *et al.* **Simulation of surface urban heat islands under “ideal” conditions at night-Part I: theory and tests against field data.** *Bound-Layer Meteor* 56, 1991. p. 275–294

KIM, Y.-H.; BAIK, J.-J. **Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea.** *Theoretical and Applied Climatology*, v. 79, n. 3-4, 2004. p. 151–164.

KIM Y. -H, BAIK J. -J. **Maximum urban heat island. Intensity in Seoul.** *J Appl Meteor* 41, 2002. p. 651–659

KIM, M. K.; KANG, I. S.; KWAK, C. H. **The estimation of urban warming amounts due to urbanization in Korea for the recent 40 years (in Korean).** *J Korean Meteor Soc* 35, 1999. p. 118–126

KARNOSKY, D. F. **Air Pollution, Global Change and Forests in the New Millennium.** Elsevier Ltd, 2008. p. 493.

LIVADA, I. *et al.* **Determination of places in the great Athens area where the heat island is observed.** *Theoretical And Applied Climatology* 71, 2002. p. 219–230.

LANDSBERG H. E. **The urban climate.** Academic Press, 1981. p. 275.

MIRZAEI, Parham a.; HAGHIGHAT, Fariborz. **Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations.** *Building and Environment*, v. 45, n. 10, 2010. p. 2192–2201.

MUGGEO V. M. R.; Hajat S. **Modelling the non-linear multiple-lag effects of ambient temperature on mortality in Santiago and Palermo: a constrained segmented distributed lag approach.** *Occup Environ Med* 66, 2009. p. 584 – 591

MORABITO, Marco *et al.* **Heat-related mortality in the Florentine area (Italy) before and after the exceptional 2003 heat wave in Europe: an improved public health response.** *International journal of biometeorology*, v. 56, n. 5, 2012. p. 801–10.

MIHALAKAKOU, G. *et al.* **Simulation of the urban heat island. Phenomenon in Mediterranean climates.** *Pure and Applied Geophysics* 161, 2004. p. 429–451.

MONTAVEZ, J. P.; RODRIGUEZ, A.; JIMENEZ, J. I. **A study of the urban heat island of Granada.** *Int. J Climatol* 20, 2000. p. 899–911

MORRIS, C. J. G.; SIMMONDS I. **Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia.** *Int J Climatol* 20, 2000. p. 1931–1954.

NUNEZ, M.; OKE T. R. **The energy balance of urban canyon.** *Journal of Applied Meteorology*, 1977.

OOKA, Ryoza *et al.* **Influence of meteorological conditions on summer ozone levels in the central Kanto area of Japan.** *Procedia Environmental Sciences*, v. 4, 2011. p. 138–150.

OKE T. R. *et al.* **Simulation of surface urban heat island under ‘ideal’ conditions at night-Part 2: Diagnosis and causation.** *Bound-Layer Meteor* 56, 1991. p. 339–358.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**, Methuen, USA, 1987.

PARK H. S. **Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities.** *Atmos Environ* 20, 1986. p. 1859–1866

PRADO, Racine Tadeu Araújo; FERREIRA, Fabiana Lourenço. **Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials.** *Energy and Buildings*, v. 37, n. 4, 2005. p. 295–300,

PERCY, K. E. **Tropospheric ozone: A continuing threat to global forests.** v. 8177, n. 03, 2003.

PAOLETTI, Elena. **Ozone and urban forests in Italy.** Environmental pollution (Barking, Essex: 1987), v. 157, n. 5, 2009. p. 1506–12.

ROSENFELD, A. H.; AKBARI, H.; ROMM, J. J.; POMERANTZ, M. **Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction.** Energy and Buildings 28, 1998. p. 51–62.

ROSENFELD A.H. et al, **Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, and updates,** Energy and Buildings 22, 1995. p. 255–265.

ROMEO, C.; ZINZI, M. **Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study.** Energy and Buildings, 2011.

ROBINE J. M. *et al.* **Report on excess mortality in Europe during summer 2003.** EU Canicule Project 2007.

SHAHGEDANOVA, M.; BURT T. P.; DAVIES T. D. **Some aspects of the three-dimensional heat island in Moscow.** Int J Climatol 17, 1997. p. 1451–1465.

STATHOPOULOU, Marina; CARTALIS, Constantinos. **Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece.** Solar Energy, v. 81, n. 3, 2007. p. 358–368.

STATHOPOULOU, M., CARTALIS, C., KERAMITSOGLOU, I. **Mapping micro-urban heat islands using NOAA/AVHRR images and CORINE land cover: an application to coastal cities of Greece.** International Journal of Remote Sensing 25 (12), 2004. p. 2301–2316.

SANTAMOURIS, M. *et al.* **On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings.** Solar Energy 70 (3), 2001. p. 201–216.

SANTAMOURIS, M.; PARAPONIARIS, K.; MIHALAKAKOU, G. **Estimating the ecological footprint of the heat island effect over Athens, Greece.** *Climatic Change*, v. 80, n. 3-4, 2007. p. 265–276.

SOLECKI, William D. *et al.* **Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey.** *Environmental Hazards*, v. 6, n. 1, 2005. p. 39–49.

STEFANOV, William L.; BRAZEL, Anthony J. **Challenges in Characterizing and Mitigating Urban Heat Islands – A Role for Integrated Approaches Including Remote Sensing.** *In: NETZBAND, Maik; STEFANOV, William L.; REDMAN, Charles (Orgs.). Applied Remote Sensing for Urban Planning, Governance and Sustainability.* [s.l.: s.n.], 2007, p. 117–135.

SCHWELA, D.; ZALI, O. **Urban Traffic Pollution**, E & FN Spon, 1999. p. 244.

STATHOPOULOU, E. *et al.* **On the impact of temperature on thropospheric ozone concentration leves in urban environments.** *J. Earth Syst. Sci*, V. 117, n. 3, 2008. p. 227-236.

TAHA, H., **Modeling impacts on increased urban vegetation on ozone air quality in the south coast air basin.** *Atmospheric Environment* 30 (20), 1996. p. 3423–3430.

WENG, Qihao; LU, Dengsheng; SCHUBRING, Jacquelyn. **Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies.** *Remote Sensing of Environment*, v. 89, n. 4, 2004. p. 467–483.



## 4 MATERIAIS FRIOS

### 4.1 INTRODUÇÃO

Os materiais frios (*cool materials*) constituem uma categoria particular de materiais de alto albedo capazes de permanecerem frios sob a incidência da radiação solar. Além da alta refletividade solar, estes materiais também têm a característica de terem altos valores de emitância infravermelha, sendo capazes de emitir a radiação em direção à atmosfera durante a noite e dissipar o calor acumulado sem transferí-lo para o interior das residências. Os sistemas de coberturas residenciais que utilizam estes materiais são chamados de tetos frios (*cool roofs*). As características mencionadas permitem a estes materiais incrementarem a temperatura superficial somente alguns poucos graus acima da temperatura ambiente, reduzindo o calor liberado pela superfície ao meio ambiente mediante convecção e, em consequência, mitigar o efeito de ilha de calor urbana (Romeo e Zinzi, 2011).

As tecnologias de tetos frios e o mercado para os mesmos está bem estabelecido, com padrões de medidas relacionados a estes produtos, sistemas de classificação, comercialização e códigos de desempenho. Porém, as tecnologias de materiais para pavimentos frios, ainda está em desenvolvimento. Ainda não existem normas oficiais e maiores pesquisas no campo são requeridas (Synnefa *et al.*, 2011).

Os sistemas de tetos frios mais difundidos são as tintas brancas. Tetos metálicos, inclusive aqueles com baixos valores de emitância, podem manter-se frios caso tenham alta refletância solar. Recentemente, materiais frios coloridos têm sido produzidos com o uso de pigmentos orgânicos ou inorgânicos com refletância espectral seletiva. Por terem uma alta refletância da região NIR do espectro solar, estes materiais mantem o perfil de refletância dos materiais coloridos convencionais no espectro visível evitando desta forma uma sobre exposição dos usuários a altos níveis de radiação UV. Estes pigmentos têm sido utilizados em tintas e telhas e apresentam uma refletância solar maior do que os materiais coloridos convencionais (Synnefa *et al.*, 2011). As menores temperaturas superficiais reduzem também a transferência de calor do teto para o ambiente construído, reduzindo a carga de refrigeração do ambiente e a poluição atmosférica (Prado e Ferreira, 2005). Os principais materiais dos tetos frios estão disponíveis na forma de azulejos, telhas de asfalto, tetos metálicos, tintas elastoméricas e membranas. A maior parte

destes materiais frios faz uso de tintas ou pigmentos que possuem alta refletância e baixa transmitância do espectro da luz solar.

Os pavimentos frios são uma diversidade de materiais clássicos e novos que tendem a armazenar menos energia e podem ter temperaturas superficiais menores quando comparados com os materiais convencionais. Os possíveis mecanismos para a criação de um pavimento frio que tem sido estudados até o momento são: aumento da refletância superficial, que pode diminuir a quantidade de radiação solar absorvida pelo pavimento; incremento da permeabilidade do revestimento, o qual resfriaria o pavimento através da evaporação da água; e, uma estrutura composta dos dois anteriores para a redução do ruído, a qual também emite menores níveis de calor à noite (Synnefa *et al.*, 2011).

Aumentar o albedo das superfícies pavimentadas as mantém mais frias sob o sol, reduzindo a convecção do calor desde o pavimento para o ambiente, diminuindo a temperatura do ar. Menores temperaturas do ar diminuem a demanda de energia de refrigeração e retardam a formação do ozônio troposférico. Adicionalmente à redução da temperatura do ar, do uso de energia e da melhora da qualidade do ar, tem sido demonstrado que a redução da temperatura superficial dos pavimentos pode resultar no incremento da vida útil (durabilidade) dos pavimentos e reduzir o desperdício durante a manutenção. Os pavimentos refletivos podem, também, melhorar a visibilidade à noite, reduzindo potencialmente os requerimentos de iluminação e economizando dinheiro e energia. (Synnefa *et al.*, 2011).

No entanto, um problema potencial do incremento do albedo dos pavimentos é que podem criar problemas relacionados com o brilho excessivo, quando se dirige, por exemplo, reduzindo inclusive a visibilidade dos sinais de tráfego, ou pode não ser apropriada para locais onde as pessoas não se sintam confortáveis quando expostas à radiação refletida por longos períodos, como em parques para crianças.

#### 4.2 PIGMENTOS FRIOS

Os pigmentos são substâncias orgânicas ou inorgânicas que são insolúveis ou substancialmente insolúveis na água ou no meio aquoso do qual fazem parte. Eles fornecem cor, opacidade, rigidez mecânica e reforçam a fase contínua na qual estão dispersos (Bendiganavale e Malshe, 2008).

Os pigmentos frios são materiais inorgânicos de alto desempenho com propriedades de resistência notáveis que podem ser utilizados sozinhos ou fazendo parte de tintas, plásticos, materiais de construção, revestimentos de vidro e cerâmica. Estes pigmentos são derivados de óxidos metálicos mistos (OMM) o que lhes fornece uma alta opacidade, estabilidade ao calor, refletância NIR, resistência ao clima e resistência a produtos químicos (Bauxbaum e Pfaff, 2005). Além de refletir a região infravermelha da radiação solar, os pigmentos frios podem refletir, também, uma porção da luz visível, seletivamente. A refletividade e absorvidade do pigmento são independentes uma da outra. Por tanto, um pigmento refletivo infravermelho pode ter qualquer cor.

As estruturas dos pigmentos convencionais existentes podem ser modificadas com diversos óxidos metálicos, a fim de apoiar a reação ou alterar as propriedades de cor. Bauxbaum e Pfaff (2005) relatam que, por serem soluções químicas sólidas, a estrutura dos OMM é composta de uma variedade de óxidos metálicos homoganeamente distribuídos na rede cristalina do novo composto químico, como se fosse uma solução, porém no estado sólido. Estes compostos têm estruturas cristalinas diversas tais como rutilo, espinelo, espinelo inverso, hematita, priderite e pseudobrookite. As substituições, particularmente à base de antimônio com tungstênio ou nióbio, em estruturas de rutilo são comuns (Ferro, 1974), resultando em produtos químicos diferentes, como o níquel rutilo amarelo - Pigment Yellow 161 (NiNbTi); Pigment Yellow 162 (NiWTi); o rutilo cromo amarelo - Pigment Yellow 189 (CrNbTi); Pigment Yellow 163 (CrWTi), manganês rutilo castanho - Pigment Brown 37 (MnNbTi), Pigment Brown 45 (MnWTi), entre outros.

Os pigmentos convencionais e frios têm sua identidade química própria, que não deve ser confundida como uma mistura física de seus componentes. Na maioria dos produtos químicos de pigmentos disponíveis, os OMM são compostos químicos altamente inertes, não contendo substâncias relevantes bio disponíveis ou degradáveis. A maioria destes pigmentos é considerada não tóxica e podem entrar em contato com os alimentos ou serem utilizados na fabricação de brinquedos para crianças (CPMA, 1993).

### 4.2.1 Fabricação

Os OMM são fabricados pela reação química em estado sólido a altas temperaturas, aproximadamente, de 800 a 1300°C. A matéria prima inclui óxidos metálicos, nitratos, acetato e sais que podem ser convertidos em outros óxidos após o aquecimento. Durante o processo de calcinação, a mistura dos óxidos metálicos é convertida em um composto novo, que se torna reativo, o qual ainda possui as mesmas propriedades cromáticas. Os íons metálicos e de oxigênio no composto sólido se rearranjam para uma nova e mais estável estrutura cristalina, como a estrutura de espinela e rutilo (Bendiganavale e Malshe, 2008). A última fase da fabricação inclui a pulverização e, na maioria dos casos, a lavagem e secagem do pigmento.

O processo de fabricação a alta temperatura explica a excelente estabilidade térmica dos OMM. A distribuição limitada do tamanho das partículas é normalmente requerida para as propriedades cromáticas desejadas. Devido ao processo de calcinação, grandes aglomerações podem ser facilmente formadas e podem estar presentes de forma isolada como partículas de grandes dimensões que precisam maior tempo de pulverização. Este maior tempo de moagem não influencia somente o custo do processo mas também a estabilidade da cor (Bauxbaum e Pfaff, 2005).

O tamanho de partícula do pigmento é um parâmetro importante que influencia a refletividade ao longo do espectro solar. Para atingir uma alta refletividade, o tamanho da partícula deve ser a metade do comprimento de onda da radiação que vai ser refletida. Por exemplo, para refletir a região infravermelha desde os 700 a 1100 nm de comprimento de onda, o tamanho da partícula deve estar ao menos entre os 0,35 a 0,55 µm. Devido a este detalhe, deve-se ter muito cuidado durante o processo de produção, já que uma moagem excessiva pode ser adversa para o pigmento (Bendiganavale e Malshe, 2008).

### 4.2.2 Uso dos Pigmentos Frios

Os pigmentos de OMM são intensamente utilizados nas fachadas de edifícios devido à sua excelente resistência à intempérie. Por causa da sua alta refletividade NIR, estes pigmentos são utilizados na formulação de tintas escuras que podem minimizar o aquecimento dos prédios. A ferrita de níquel manganês preta (Pigment Black 30) e a cromita de ferro

marrom-preto (Pigment Green 17, Pigment Browns 29 e 35) são alguns dos pigmentos de OMM que são utilizados para fornecer cores escuras, com reduzido aquecimento nas construções (Bendiganavale e Malshe, 2008). A alta refletância de radiação NIR dos pigmentos é importante para aplicações de camuflagem, bem como para aplicações com um valor definido de refletância solar total mínima (Bauxbaum e Pfaff, 2005). A Tabela 4.1 mostra a composição e estrutura cristalina dos principais pigmentos de OMM utilizados na indústria.

**Tabela 4.1** - Resumo das características químicas predominantes dos pigmentos com estrutura de rutilo, hematita, espinela e espinela inversa.

Color Index	Constituintes químicos	Estrutura	Cores
Pigment Yellow 53	Ni(II), Sb(V), Ti(IV)	Rutilo	Verde amarelado
Pigment Brown 24	Cr(III), Sb(V), Ti(IV)	Rutilo	Ocre
Pigment Yellow 162	Cr(III), Nb(V), Ti(IV)	Rutilo	Ocre
Pigment Yellow 164	Mn(II), Sb(V), Ti(IV)	Rutilo	Marrom
Pigment Yellow 119	Zn(II), Fe(II,III)	Espinela	Marrom
Pigment Blue 28	Co(II), Al(III)	Espinela	Vermelho azulado
Pigment Blue 36	Co(II), Cr(III), Al(III)	Espinela	Verde azulado
Pigment Green 26	Co(II), Cr(III)	Espinela	Verde escuro
Pigment Green 50	Co(II), Ti(IV)	Espinela inversa	Verde
Pigment Brown 29/ Pigment Green 17	Fe(II), Cr(III) Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita Hematita	Marrom Marrom
Pigment Brown 35	Fe(II,III), Cr(III)	Espinela	Marrom escuro
Pigment Black 30	Ni(II), Fe(II,III), Cr(III)	Espinela	Preto
Pigment Black 26	Mn(II), Fe(II,III)	Espinela	Preto
Pigment Black 22/ Pigment Black 28	Cu(II), Cr(III) Mn(II), Cu(II), Cr(III)	Espinela Espinela	Preto Preto
Pigment Black 27	Co(II), Cr(III), Fe(II)	Espinela	Preto azulado

**Fonte.** Bauxbaum e Pfaff, 2005 (adaptado).

O pigmento amarelo rutilo é geralmente utilizado em combinação com pigmentos orgânicos de alto desempenho para formular cores brilhantes que não são tóxicas. A principal razão do uso deste pigmento na indústria é a melhora da resistência à intempérie devido às propriedades de absorção UV do amarelo níquel e titanato de cromo.

A ferrita de zinco é um excelente pigmento para produzir cores marrons amareladas. De forma oposta ao que ocorre com os óxidos de ferro amarelos, as ferritas de zinco oferecem maior estabilidade ao calor e podem ser utilizados em plásticos e camadas curadas em temperaturas acima dos 120°C. Este pigmento pode ser levemente magnético.

O pigmento marrom titanato de manganês é utilizado, principalmente, devido à sua resistência à intempérie. Particularmente no PVC rígido, estes pigmentos livres de ferro tem se tornado muito importantes já que os pigmentos que contem ferro são conhecidos por catalisar a degradação do PVC sob radiação UV (Girois, 1999).

O pigmento azul cobalto se apresenta em cores que vão desde o vermelho escuro até o verde turquesa. A opacidade e resistência à intempérie deste pigmento são incrementadas mediante a substituição do alumínio por cromo. O azul e o verde cobalto são usados na indústria de plásticos devido à sua capacidade de prevenir o empenamento das resinas poliolefinas. O Pigmente Green 26 à base de cromito de cobalto, por exemplo, é utilizado na área de camuflagens.

Os pigmentos marrons e pretos, tais como o Pigment Brown 29, Pigment Brown 35 e Pigment Brown 30, têm habilidade para refletir a radiação NIR. Habilidade oposta a outros pigmentos inorgânicos marrons como os óxidos de ferro ou outros pigmentos negros como a cromita de cobre ou negro carbono (Bukhart *et al.*, 2001).

A cromita de cobre negro é um pigmento para propósitos gerais com durabilidade proeminente e alta resistência à temperatura. Este pigmento não apresenta refletância infravermelha. A principal aplicação é na cobertura tanto das cores negras claras como das cores cinzas. As cromitas de cobalto mais caras são utilizadas somente em algumas poucas aplicações que requerem alta estabilidade térmica.

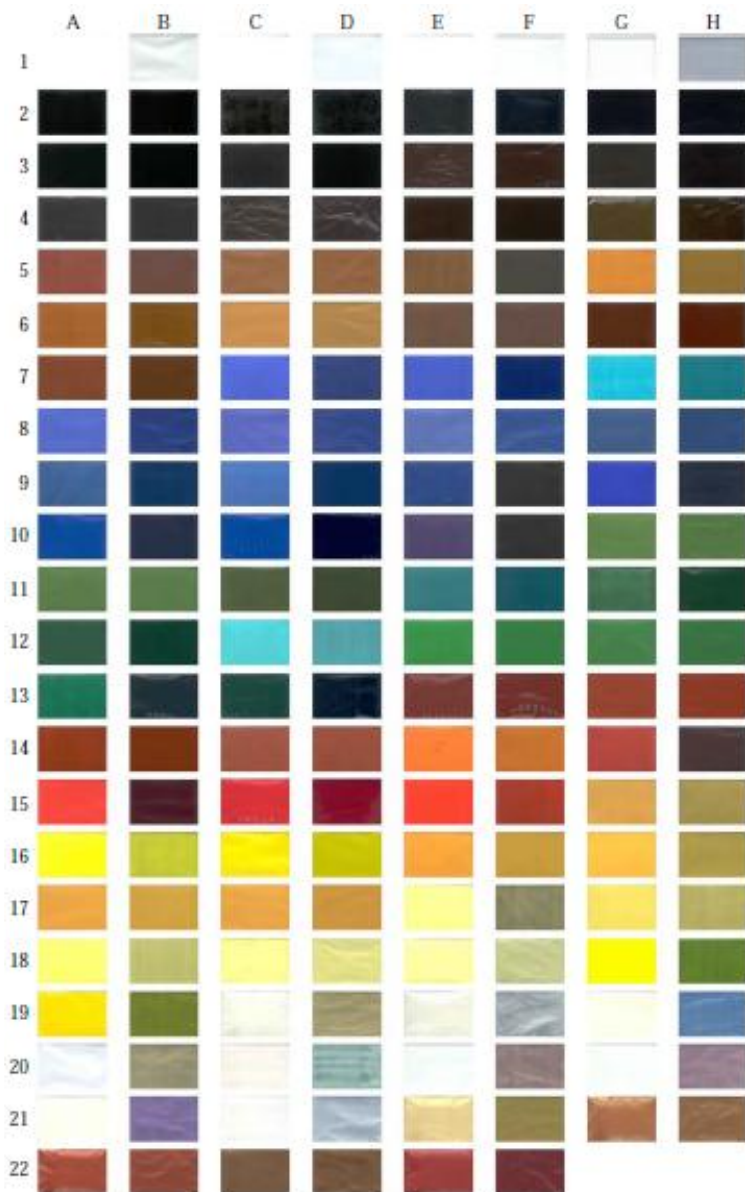
Além das aplicações já mencionadas, a alta refletância NIR, a estabilidade química a altas temperaturas e a estrutura inerte, torna os pigmentos de OMM materiais ideais de serem utilizados na indústria de materiais frios, seja na forma de pigmentos ou tintas, que podem ser adicionados ao concreto Portland ou à mistura asfáltica.

### 4.2.3 Propriedades Ópticas no Espectro Solar de Alguns Tipos de Pigmentos

Levinson *et al.* (2005) pesquisaram e caracterizaram as propriedades ópticas no espectro solar de 87 pigmentos comuns e frios. As propriedades estudadas foram a refletância NIR de películas de pigmentos sobre uma superfície branca (ROW<sub>nir</sub>), a refletância NIR sobre uma superfície preta (ROB<sub>nir</sub>) e a transmitância visível (T<sub>vis</sub>). Estas propriedades determinam quanto um pigmento é frio ou quente. Para realizar os ensaios de caracterização, foi utilizado um espectrômetro Perkin-Elmer Lambda UV/Vis/NIR, equipado com uma esfera integrada de 150 mm.

Os pigmentos estudados foram agrupados por famílias de cores (Figura 4.1) e caracterizados por sua composição química. Algumas famílias apresentam duas cores devido à dificuldade de identificar uma cor baseada em nomes de pigmentos existentes ou em tabelas de cores. Um mesmo pigmento pode estar apresentado em mais de uma película pigmentada. Para diferenciá-los, as variedades são apresentadas com um código de identificação *Xnn*, sendo *X* a abreviação do nome da família e *nn* o número da série (Tabela 4.2). Para o pigmento de cor branca, por exemplo, incluem-se quatro variedades (W01 a W04). A concentração do pigmento, o tamanho das partículas e a fonte do pigmento (fabricante) podem variar de película à película. As superfícies pretas e brancas são opacas e as refletâncias NIR destas superfícies são de 0,04 e 0,87, respectivamente.

A cor da película influi na tonalidade final dos filmes. A película branca confere uma tonalidade mais clara enquanto que a película preta confere uma tonalidade mais escura. Esta diferença pode ser apreciada com mais detalhe, por exemplo, nos filmes 16A e 16B da Figura 4.1.



**Figura 4.1** - Imagens dos filmes pintados. Para cada filme é mostrada a aparência sobre um fundo branco seguido da sua aparência sobre um fundo preto.

**Fonte:** Levinson *et al.* (2005)

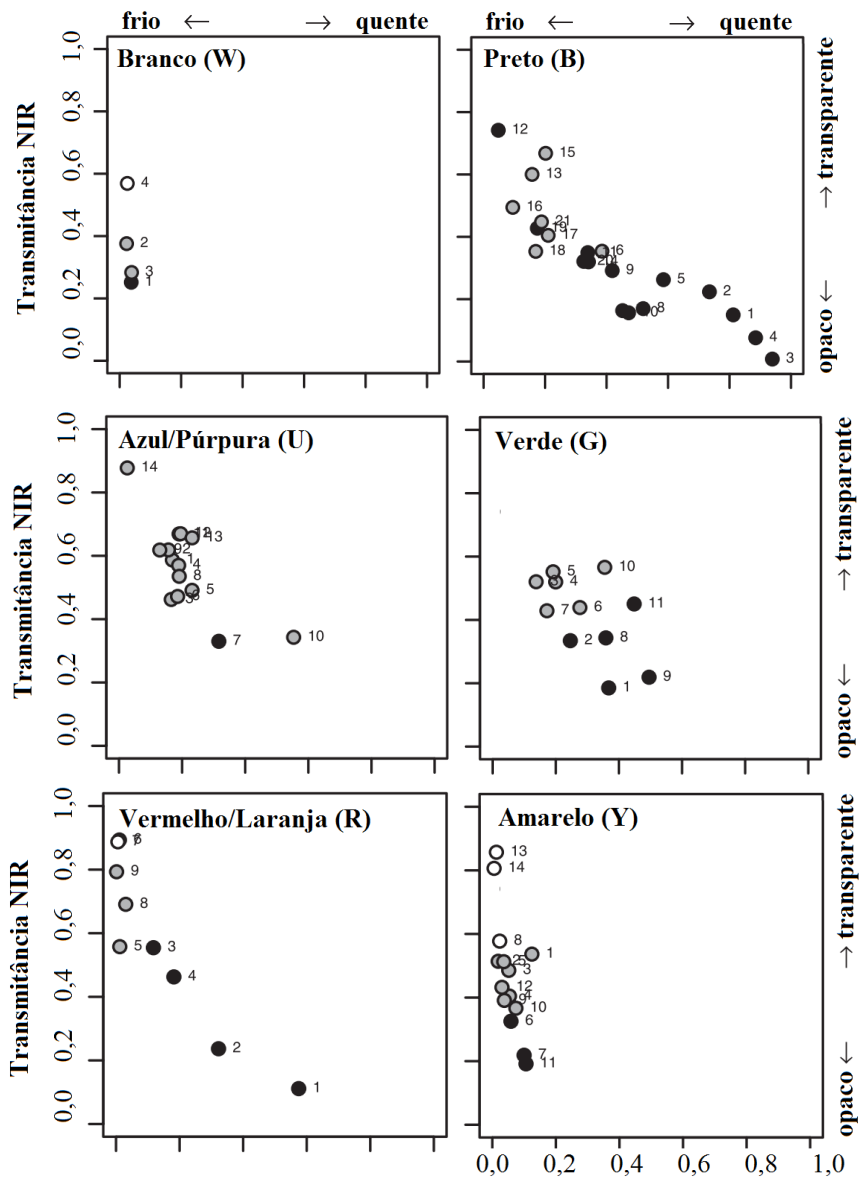


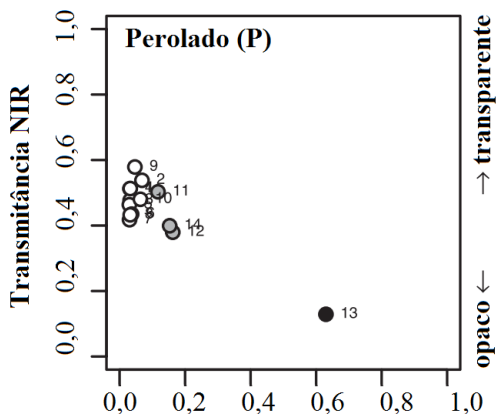
**Tabela 4.2** - Propriedades ópticas dos pigmentos estudados. Refletância NIR sobre fundo branco (ROWnir), refletância NIR sobre fundo preto (ROBnir) e transmitância visível (Tvis) das películas pigmentadas para cada categoria do pigmento.

Cor do pigmento {tipos}	Categoria {tipo}	ROWnir	ROBnir	Tvis
Branco (W) {4}	Dióxido de titânio branco {4}	0,87-0,88	0,24-0,65	0,10-0,42
Preto /marrom (B) {21}	Carbono preto {2}	0,05-0,06	0,04-0,04	0,03-0,07
	Preto {2}	0,04-0,05	0,04-0,05	0,00-0,07
	Oxido de ferro e cromo preto {7}	0,23-0,48	0,11-0,35	0,00-0,15
	Orgânico preto {1}	0,85	0,10	0,01
	Oxido de ferro marrom {3}	0,47-0,61	0,06-0,27	0,03-0,24
	Marrom {6}	0,50-0,74	0,22-0,40	0,01-0,24
Azul /púrpura (U) {14}	Aluminato de cobalto azul {4}	0,62-0,71	0,09-0,20	0,16-0,28
	Cromito de cobalto azul {5}	0,55-0,70	0,10-0,25	0,05-0,28
	Ferro azul {1}	0,25	0,05	0,27
	Ultramarino azul {1}	0,52	0,05	0,20
	Ftalocianina azul {2}	0,55-0,63	0,06-0,08	0,21-0,22
	Dióxazina púrpura {1}	0,82	0,05	0,21
Verde (G) {11}	Óxido de cromo verde {2}	0,50-0,57	0,33-0,40	0,00-0,01
	Óxido de cromo modificado verde {1}	0,71	0,22	0,22
	Cromito de cobalto verde {3}	0,58-0,64	0,14-0,18	0,17-0,28
	Titanita de cobalto verde {3}	0,37-0,73	,21-0,30	0,04-0,22
	Ftalocianina verde {2}	0,42-0,45	0,06-0,07	0,10-0,20
Vermelho /laranja (R) {9}	Óxido de ferro vermelho {4}	0,31-0,67	0,19-0,38	0,00-0,08
	Cádmio laranja {1}	0,87	0,26	0,18
	Orgânico vermelho {4}	0,83-0,87	0,06-0,14	0,15-0,32
Amarelo (Y) {14}	Óxido de ferro amarelo {1}	0,70	0,21	0,16
	Cádmio amarelo {1}	0,87	0,29	0,25
	Cromo amarelo {1}	0,83	0,34	0,18
	Titanato de cromo amarelo {4}	0,80-0,86	0,26-0,62	0,05-0,23
	Titanato de níquel amarelo {4}	0,77-0,87	0,22-0,64	0,09-0,51
	Cromate de estrôncio amarelo + dióxido de titânio {1}	0,86-0,38	0,21	19
	Hansa amarelo {1}	0,87	0,06	0,43
	Diarylíde amarelo {1}	0,87	0,08	0,35
Perolado (P) {14}	Mica + dióxido de titânio {9}	0,88-0,90	0,35-0,54	0,31-0,54
	Mica + dióxido de titânio + óxido de ferro {5}	0,27-0,85	0,25-0,44	0,02-0,42

**Fonte:** Levinson *et al.*, 2005 (adaptado).

Uma outra forma simples de se avaliar a utilidade de um pigmento para aplicações frias é considerar sua absorptância e transmitância NIR. Se a absorptância NIR é baixa, o pigmento é frio. No entanto, se um pigmento frio tem uma alta transmitância NIR precisará de uma superfície de fundo refletiva NIR (no caso de usar o pigmento como base de uma tinta) para produzir tintas refletivas NIR. A absorptância e a transmitância NIR dos 87 pigmentos estudados por Levinson *et al.* (2005) são mostradas na Figura 4.2. Um pigmento frio ideal deve aparecer no canto inferior esquerdo do gráfico, indicando sua baixa absorptância, baixa transmitância e, em consequência, alta refletância NIR.





**Figura 4.2** - Absortâncias e transmitâncias NIR das 87 películas de pigmentos estudadas. A cor de cada círculo interior indica a transmitância visível: preto (menos que 0,1); cinza (entre 0,1 e 0,3); e, branco (maior que 0,3).

**Fonte:** Levinson *et al.*, 2005 (adaptado).

A caracterização das propriedades ópticas do espectro solar dos pigmentos com espessuras entre 10 a 37  $\mu\text{m}$  identificou pigmentos frios nos grupos branco, amarelo, castanho/preto, vermelho/laranja, azul/púrpura, e nos grupos de cores perolizadas com absortâncias NIR menores do que 0,1. Foram identificados, também, pigmentos frios dentre os grupos pretos/castanhos, azul/púrpura, verde, vermelho/laranja, amarelo e grupos de cores perolizadas com absortâncias NIR menores que 0,2.

A maioria dos pigmentos tinha transmitância infravermelha e precisava de um fundo refletivo NIR para conformar uma tinta fria. Quando colocados sobre um fundo branco opaco, alguns dos pigmentos apresentavam refletâncias NIR de no mínimo 0,7, enquanto outros pigmentos tinham refletâncias NIR de no mínimo 0,5. Alguns poucos membros das famílias de pigmentos tiveram uma dispersão suficientemente forte para atingir refletâncias NIR de no mínimo 0,3 (e até 0,64) sobre fundos pretos.

Estas duas conclusões são de particular importância para o presente trabalho; a primeira porque garante que não interessa a cor do pigmento utilizado já que todos eles podem apresentar características frias; e, a segunda, porque limita a refletância de um pigmento segundo o fundo que esteja sob a camada do material, claro ou escuro. Neste sentido,

não existiria restrição a respeito da cor de pigmento que poderia ser utilizada na mistura asfáltica ou no concreto Portland. A mistura do pigmento com o concreto Portland, porém, resultaria em um material com maior refletância do que a mistura do pigmento com a mistura asfáltica. Isso devido à cor clara do concreto Portland em detrimento da cor escura da mistura asfáltica. O uso de pigmento com ligante de cor albina, utilizado neste estudo, tenderia a apresentar um valor de refletância maior do que a mistura do pigmento com ligante asfáltico preto.

### 4.3 TINTAS FRIAS

A tinta é uma dispersão fina de pigmentos em um aglutinante que conta com a presença de solventes e pequenas quantidades de aditivos. As propriedades finais da tinta dependem das propriedades do aglutinante, dos pigmentos e também dos aditivos (Bendiganavale e Malshe, 2008). Tinta e revestimento superficial são muitas vezes usados como sinônimos. O revestimento superficial é a descrição mais geral de qualquer material que possa ser aplicado como uma fina camada contínua sobre uma superfície. No entanto, o termo tem sido amplamente utilizado no Reino Unido e nos Estados Unidos para distinguir a pintura de outras formas de tratamento de superfície, como galvanoplastia, anodização e a laminação de película de polímero sobre uma superfície. A palavra tinta era tradicionalmente usada para descrever materiais pigmentados, distintos de películas claras, que são mais propriamente chamadas de lacas ou vernizes (Lambourne *et al.*, 1999).

O propósito das tintas e dos revestimentos superficiais é duplo. Ambos fornecem soluções para problemas estéticos e de proteção. A tinta do automóvel, por exemplo, é usada para melhorar a aparência do carro em termos de cor e brilho e, se a carcaça for fabricada em aço leve, será necessária para proteger o aço contra a corrosão. Se a carcaça for fabricada a partir de fibra de vidro reforçada, a tinta só será necessária para fins estéticos (Lambourne *et al.*, 1999).

A composição das tintas é mostrada na Tabela 4.3, na qual também se indica a função dos principais componentes. Nem todas as tintas têm todos os ingredientes. As tintas gloss, por exemplo, não contêm extensores, que são materiais inorgânicos de partículas grossas. Estes, são usados em tintas utilizados na indústria automobilística.

**Tabela 4.3 - Composição das tintas**

	Componentes	Função típica
Meio (fase contínua)	Polímero ou resina (ligante)	Fornece a base de película contínua, vedação ou proteção da superfície na qual a tinta é aplicada. Apresenta variações na composição química de acordo com o uso final
	Solvente ou diluente	É a solução na qual a tinta é dissolvida.
Pigmentos (fase descontínua)	Adições	Componentes menores com ampla variedade e efeito, como por exemplo, catalisadores, secadores e agentes de fluxo.
	Pigmentos primários (partículas finas, matéria orgânica ou inorgânica)	Proporcionam opacidade, cor, e outros efeitos ópticos ou visuais. São mais frequentemente usados por razões estéticas. Quanto mais primário o pigmento, melhor será seu uso como anti-corrosivo.
	Extensores (partículas grossas, matéria inorgânica)	Usado para uma ampla gama de efeitos: incluindo opacidade/obliteração (como adjuvante de pigmentos primários) e, também, para facilitar o polimento de superfícies novas.

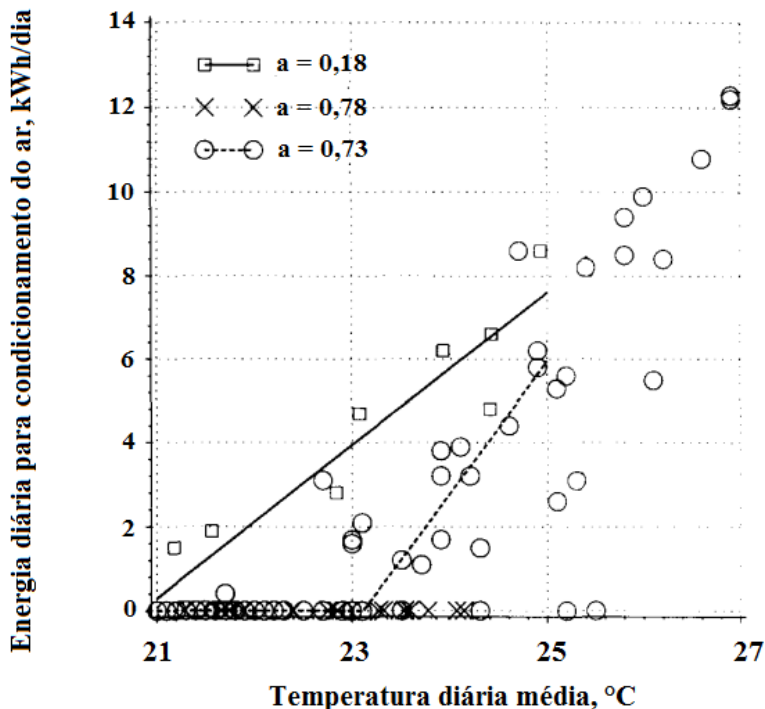
**Fonte:** Lambourne e Strivens, 1999 (adaptado).

Para mitigar o fenômeno da ICU nas construções urbanas, o uso de tintas frias e altamente refletivas, é atualmente o melhor material a se utilizar. O uso das mesmas tem ajudado a manter as superfícies exteriores com baixas temperaturas nas coberturas e nas fachadas dos prédios, melhorando, desta forma, o conforto térmico dentro das edificações.

As tintas frias apresentam uma ampla gama de cores, variando de tonalidades claras até tonalidades escuras. Segundo Kai *et al.* (2010), a necessidade de utilizar produtos frios não brancos surgiu em decorrência do calor absorvido pelas cores escuras, que eram preferidas por motivos estéticos, contribuindo desta forma com a formação da ICU. As cores escuras têm a vantagem de não produzir brilho branco, incômodo para algumas pessoas e potencialmente perigosos para a saúde. Para esta finalidade foram desenvolvidas tintas frias de cores escuras que usam pigmentos especiais que refletem a radiação solar.

Com o tempo de uso, o efeito do clima pode interferir no desempenho térmico das tintas e diminuir a refletância das mesmas. Pesquisas realizadas por Bretz e Akbari (1997) mostram uma diminuição no albedo de algumas amostras de tintas frias de 0,15 durante o primeiro ano, e uma diminuição ainda maior após este período. As mudanças no albedo dependem, com o passar do tempo, da formulação da tinta, da inclinação da superfície e das condições climáticas. O crescimento de micro-organismos e acúmulo de sujeira, frequentemente observados nos climas das cidades industriais e tropicais, é apontado por Uemoto *et al.* (2010) como outro dos principais causadores de alterações do albedo, na coloração na redução no desempenho térmico das tintas.

Um estudo sobre a eficiência das tintas frias nas residências nos Estados Unidos foi realizado por Rosenfeld *et al.* (1995). Como parâmetro de estudo, os pesquisadores monitoraram o uso de energia para refrigeração da casa na sua condição original, e após a modificação da cor dos tetos e das paredes para a cor branca. Na condição original, o teto da casa tinha um albedo de 0,18, o qual foi incrementado para 0,78. Com o tempo, o valor do albedo caiu por causa do pó depositado, mas após uma limpeza o valor foi recuperado para 0,73. A Figura 4.3 mostra o uso da energia para refrigeração diária da casa e a temperatura exterior média diária. Após a modificação inicial, a temperatura exterior média diária diminuiu em 2°C. Para um intervalo de temperaturas exteriores de 23 a 25°C, a economia de energia foi de 15 a 4 kWh, representando uma economia anual de 40% de energia (aproximadamente 330 kWh/ano).



**Figura 4.3** - Energia diária utilizada para condicionamento de ar em uma casa em Sacramento, CA e temperatura diária média do ar externo.

**Fonte.** Rosenfeld *et al.*, 1995 (adaptado).

O estudo foi realizado também para duas unidades pertencentes à estrutura de uma escola. Estas unidades foram monitoradas em três condições diferentes: (a) com tetos de metal não pintados e paredes amarelas; (2) tetos e paredes marrons; e, (3) com tetos e paredes brancos. Nas primeiras duas condições, a economia de energia foi de 40 a 50%, e o pico de redução de energia diária foi de 0,6 kW, ou 35%.

Romeo e Zinzi (2011) estudaram os efeitos positivos da aplicação de tetos frios na redução da demanda de energia para refrigeração e o incremento do conforto térmico de uma escola na área sul do Mediterrâneo. O sistema de teto frio aplicado, 700 m<sup>2</sup>, consistiu em uma camada dupla de tinta com uma emulsão brilhante lavável. O espectro de refletância global, medido em laboratório com um espectrofotômetro equipado com espere integrada de 15 cm, foi medido entre o intervalo de



300 a 2500 nm. A refletância solar calculada foi de 85,9%. A emitância térmica medida foi de 0,88. A Figura 4.4 mostra a aplicação da tinta no teto da escola. A área escura é o teto não tratado. (Romeo e Zinzi, 2011)



**Figura 4.4** - Aplicação do tratamento para teto frio sobre a estrutura de uma escola

**Fonte.** Romeo e Zinzi, 2011.

O efeito da aplicação do teto frio foi monitorado na construção mediante a medição do perfil térmico externo do teto, assim como as mudanças nas condições de conforto interno tomando em consideração a evolução das variáveis climáticas durante a estação. Os dados coletados foram utilizados num modelo numérico detalhado para se estimar o desempenho de conforto térmico e enérgico da construção. Os dados medidos foram utilizados para calibrar e validar os resultados dos cálculos. Os parâmetros coletados foram: temperatura do ar; umidade relativa; radiação solar global; e, temperatura na superfície do teto. O monitoramento demonstrou que, após a aplicação do teto frio, a temperatura superficial do mesmo foi diminuída em até 20 °C, ficando a poucos graus acima da temperatura do ar. O estudo também registrou uma redução de 54% da demanda de energia de refrigeração (Romeo e Zinzi, 2011).

Um outro estudo sobre o impacto do uso de tintas refletivas frias em residências foi realizado nos anos 1991-1993 pelo Florida Solar Energy Center (FSEC). A instituição mediu o impacto destes materiais no uso de energia para ar condicionado em seis casas no centro de Florida. O albedo dos tetos destas casas foi incrementado a 0,61-0,73 desde valores iniciais de 0,08-0,31. A economia de energia nestas seis casas foi de aproximadamente 9,2 kWh/dia, ou 23% em comparação com os valores antes da modificação (Rosenfeld *et al.*, 1995).

Uma compilação dos valores de albedo e emissividade dos materiais frios utilizados em fachadas de prédios é mostrada na Tabela 4.4. Os resultados estão baseados nos dados dos estudos de Bretz e Akbari (1997), Levinson *et al.* (2005a; 2007a, b, 2010a, b), Synnefa *et al.* (2006; 2007), Sthathopoulou *et al.* (2009), Prado e Ferreira (2005), LBNL Cool Roofing Materials Database, Energy Star Roof Products, o Cool Roof Rating Council, e do EU Cool Roofs Project (Santamouris *et al.*, 2011).

**Tabela 4.4** – Valores de albedo e emissividade dos materiais frios mencionados neste trabalho.

Material	Refletância solar	Emitância infravermelha
<b>Revestimento</b>		
Branco	0,70-0,85	0,80-0,90
Alumínio	0,20-0,65	0,25-0,65
Preto convencional	0,04-0,05	0,80-0,90
Preto frio	0,2-0,29	0,80-0,90
Revestimentos coloridos escuros convencionais	0,04-0,20	0,80-0,90
Revestimentos coloridos escuros frios	0,25-0,40	0,80-0,90
<b>Telha asfáltica</b>		
Branca	0,20-0,30	0,80-0,90
Preta	0,04	0,80-0,90
Colorida escura convencional	0,05-0,10	0,80-0,90
Colorida fria	0,18-0,34	0,80-0,90
<b>Cobertura metálica</b>		
Sem pintar	0,20-0,60	0,05-0,35
Pintada branca	0,60-0,75	0,80-0,90
Colorida escura convencional	0,05-0,10	0,80-0,90
Colorida escura fria	0,25-0,70	0,80-0,90
<b>Telhado terminado</b>		
Com asfalto	0,04	0,85-0,90
Com brita escura	0,08-0,20	0,80-0,90
Com brita branca	0,30-0,50	0,80-0,90
Com revestimento branco	0,75-0,85	0,80-0,90
<b>Betume modificado</b>		
Com superfície mineral	0,10-0,20	0,85-0,95
Revestimento branco sobre a superfície mineral	0,60-0,75	0,85-0,95

Na Tabela 4.4 pode se observar que a maioria dos materiais frios de cor clara utilizados em fachadas apresentam valores de albedo médios

e altos. As cores brancas são as mais favorecidas, chegando a atingir valores de até 0,85. A cor preta, incluído o concreto Portland de cor cinza, atinge valores, baixos, de até 0,04. Os materiais asfálticos têm um comportamento parecido, com valores que vão desde 0,04 para um telha asfáltica de cor preta até 0,34 para uma telha colorida fria. No entanto, a mudança de cor da telha asfáltica não traz um benefício tão significativo como, por exemplo, as membranas onde uma mudança de preto para branco incrementa em até 0,8 o valor do albedo.

No caso da telha asfáltica, esta baixa mudança do valor do albedo com a cor pode ser consequência da cor preta do ligante asfáltico, o qual influenciaria na cor final da telha pintada; ou seja, ainda que se pinte uma telha asfáltica de branco, a cor ainda continuara escura. Com relação à emissividade, salvo algumas exceções, os valores se mantiveram entre 0,80 a 0,90 o que quer dizer que a mudança de cor não altera significativamente este valor.

#### 4.4 PAVIMENTOS FRIOS

Os pavimentos, pelo fato de alterar a superfície terrestre, têm efeitos ambientais importantes nas áreas urbanas, sendo um deles a contribuição para a formação da ICU. De forma similar aos materiais de cobertura dos prédios, os materiais de pavimentação podem atingir temperaturas de até 65°C durante o dia, irradiando o calor excessivo ao ar tanto durante o horário diurno como noturno. Os pavimentos aquecem, também, a água das chuvas que atingem a superfície urbana. Devido à grande porção da área urbana coberta com pavimentos, estes são elementos importantes para considerar na mitigação da ICU.

Da área coberta por pavimentos em algumas cidades dos Estados Unidos (Tabela 3.2), as rodovias representam o 33% da área pavimentada em Houston e até 59% em Sacramento, como mostra a Tabela 4.5. A área dos estacionamentos tem porcentagens similares às das cobertas por rodovias nas cidades analisadas, variando de 29% em Sacramento a 60% em Houston. As calçadas são menos significativas, variando entre 7% em Houston a 16% em Salt Lake City (Cambridge Systematics, 2005).

**Tabela 4.5** - Percentagem da área pavimentada por tipo de uso

Áreas metropolitanas	Rodovias (%)	Estacionamentos (%)	Calçadas (%)
Salt Lake City	48	35	16
Sacramento	59	29	12
Chicago	50	42	8
Houston	33	60	7

**Fonte:** Rose *et al.* (2003); Rose e Akbari (2001a); Rose e Akbari (2001b)

Diversos materiais podem ser utilizados nos revestimentos dos pavimentos urbanos. No entanto, existem cinco tipos principais: os revestimentos com mistura asfáltica; os revestimentos de concreto de cimento Portland; e os revestimentos de peças pré-moldadas de concreto (*pavers*), blocos de pedra (paralelepípedo) e pedra tipo “*petit pavê*”. A coloração natural do revestimento das vias urbanas depende do tipo de revestimento, do tipo de rocha empregada e da idade do revestimento.

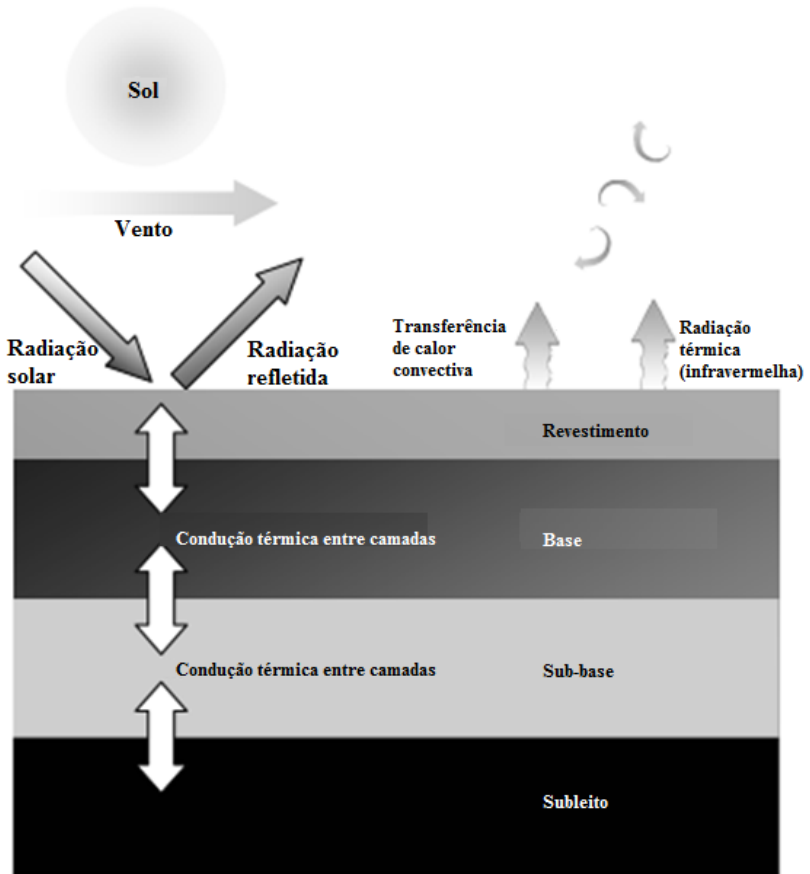
A cor do revestimento tem muitas consequências ambientais importantes. Por exemplo, a mistura asfáltica contribui com o aquecimento do ar na região próxima à sua superfície pois a cor preta implica que uma grande porcentagem da radiação solar não é refletida. A energia absorvida incrementa a temperatura do pavimento e em consequência, a temperatura do ar que está próximo a ele, contribuindo para o aquecimento da cidade. Quando a temperatura atinge desconfortáveis, o ato de ligar o ar condicionado causa um aquecimento do ar do meio ambiente, além de consumir energia. A atmosfera também responde utilizando a energia térmica para promover a conversão dos gases orgânicos e os óxidos de nitrogênio em ozônio troposférico. Existe, então, um custo tanto de energia consumida como na degradação do ambiente. Estes custos podem ser diminuídos se a superfície do pavimento fosse, por exemplo, coberta com materiais de cores mais claras (Pomerantz *et al.*, 2000).

#### 4.4.1 Mecanismo de Formação da ICU pelos Pavimentos Urbanos

Como já mencionado, existem vários tipos de ICU, cada uma com diversos mecanismos de formação, características e impactos. As ICUs que mais afetam os seres humanos são aquelas que afetam as temperaturas de ar dentro da camada do dossel urbano, ou na camada de superfície.

Devido às propriedades dos materiais do revestimento, os pavimentos promovem a absorção e o armazenamento de grandes quantidades de radiação solar não refletida sob a forma de calor, maiores inclusive que as das superfícies cobertas com vegetação, alterando desta forma o balanço energético da superfície e contribuindo com a formação da ICU.

Durante as primeiras horas do dia, as superfícies pavimentadas podem contribuir para formar uma ilha de calor fria já que absorvem uma grande quantidade de calor e permitem que o ar se conserve fresco. Este calor é transmitido do revestimento para as camadas inferiores do pavimento mediante condução. Desta forma, durante o dia, os pavimentos se tornam consideravelmente mais quentes que o meio ambiente. Durante a noite, o calor armazenado nas camadas inferiores se transmite para o revestimento e este irradia o excesso de calor para a camada de dossel. A Figura 4.5 mostra o esquema estrutural de um pavimentos e o processo de absorção de calor do mesmo (Cambridge Systematics, 2005).



**Figura 4.5** - Características e processos térmicos no pavimento  
**Fonte.** Cambridge Systematics, 2005 (adaptado).

A espessura das camadas do pavimento pode influenciar na condução térmica dentro da estrutura. Um pavimento mais fino aquecerá mais rápido durante o dia, mas também esfriará mais rápido durante a noite. A espessura efetiva do pavimento dependerá em parte de quão bem o calor pode ser conduzido desde o revestimento até as camadas de base e sub-base.

#### 4.4.2 Tipos de Pavimentos Frios

Os benefícios dos pavimentos frios são resultantes tanto do incremento da refletância solar como da porosidade da superfície pavimentada, que mantém o pavimento frio sob o sol, reduzindo a convecção de calor desde o pavimento ao ar e que, também, diminui a temperatura do ar. Menores temperaturas do ar favorecem o conforto, a economia de energia e demoram a formação do ozônio troposférico. Os pavimentos frios podem ser elaborados com as tecnologias de pavimentação existentes introduzindo-se, todavia, muitos materiais e tecnologias que permitem obter um pavimento frio.

As técnicas utilizadas para tornar um pavimento mais frio se focam no controle das seguintes características:

- Incremento do albedo: um alto albedo reduz a quantidade de energia solar absorvida pelo pavimento e o mantém mais frio. Geralmente o albedo está relacionado com a cor; cores mais claras têm maiores albedos;
- Aumento da permeabilidade: por permitir que a água e o vapor de água passem através dos poros que sejam armazenados nos poros dos revestimentos. Os pavimentos permeáveis e porosos pode ter vantagens adicionais devido ao efeito de esfriamento da superfície por evaporação; e
- Controle da textura do pavimento: neste caso a velocidade do fluxo de ar é modificada, promovendo o esfriamento da superfície pelo fluxo de ar convectivo. Geralmente, os pavimentos porosos se esfriam mais rápido que os revestimentos de mistura densa.

Existem vários tipos de pavimentos que se apresentam como opções de pavimentos frios. Tanto os pavimentos flexíveis como os rígidos podem ser utilizados e adaptados para ajudar na diminuição da temperatura do ar das grandes cidades desde que este tratamento não afete a sua resistência estrutural. Algumas das tecnologias existentes segundo a Cambridge Systematics (2005) são descritas a seguir.



#### 4.4.2.1 Pavimentos de Concreto de Cimento Portland Convencional

Os pavimentos de concreto Portland são considerados pavimentos frios devido à sua cor clara e refletividade. O grau da refletividade da superfície é afetado tanto pela cor do cimento como pela cor do agregado (particularmente quando a superfície de cimento se desgasta e o agregado fica exposto).

Alguns aditivos podem ser utilizados no concreto Portland para melhorar a refletividade do mesmo, além das características físicas e mecânicas durante a construção e vida útil. Um exemplo é o uso de escória de alto forno.

#### 4.4.2.2 Emprego de Agregados Claros na Mistura Asfáltica

A refletância da mistura asfáltica pode ser incrementada mediante o uso de agregados de cor clara tais como as rochas calcárias. Este tipo de agregado está disponível naturalmente em muitas partes do mundo. As limitações do uso deste material na pavimentação estão relacionadas com os custos referentes ao transporte até o local da obra.

#### 4.4.2.3 Superfícies de Pavimentos Porosos

As superfícies de pavimentos porosas e permeáveis são utilizadas para o controle do escoamento da água das chuvas nas áreas urbanas. Uma superfície permeável, ou porosa, que permite a percolação da água através dela pode exercer um efeito refrigerante através da evaporação da água nos vazios do pavimento contribuindo, desta forma, com a redução da ilha de calor. Tanto os pavimentos rígidos como flexíveis podem ser construídos com revestimentos porosos nas rodovias e estacionamentos. Uma superfície asfáltica porosa pode melhorar o atrito pneu-pavimento, reduzir o ruído veicular e o *splash* e *spray* devido à água acumulada na superfície. Por causa da colmatagem dos vazios, porém, estes benefícios podem diminuir com o tempo. Outros tipos de superfícies permeáveis podem ser construídas utilizando malhas plásticas ou blocos pré-fabricados preenchidos com grama ou agregado pétreo. Este tipo de superfície pode ser utilizado em diversas aplicações: calçadas, estacionamentos, ciclovias, percursos para pedestres, trilhas equestres, estabilização de taludes, etc.

#### 4.4.2.4 Pigmentos Coloridos

Os pigmentos têm como função mudar a cor da superfície asfáltica para uma cor mais clara. No entanto, os pigmentos tendem a ser utilizados somente em situações especiais onde a cor é um critério dominante da pavimentação (como no caso da sinalização de faixas de passagem de pedestres, ciclovias e vias preferenciais de circulação de ônibus). Os pigmentos também estão disponíveis para pavimentos de concreto. No entanto, pelo fato dos pavimentos de concreto já serem claros, os pigmentos podem não melhorar muito este parâmetro.

Antes da construção dos pavimentos frios, é importante se considerar as diferentes características dos revestimentos mediante a seleção dos materiais apropriados para cada situação. Por exemplo, os pavimentos de alto albedo que refletem uma maior quantidade de radiação solar, absorvendo menos calor que os pavimentos pretos e ainda permanecendo frios podem ser uma opção atrativa para mitigar os efeitos da ICU. Os mesmos, porém, podem não ser apropriados em locais onde os pedestres ou motoristas se sintam incomodados ao ser expostos à radiação refletida por longos períodos como, por exemplo, nos parques. Outros pavimentos podem tomar mais tempo para aquecer durante o dia, mas liberam o excesso de calor à noite. Esta característica poderia ser apropriada em situações onde a principal preocupação é o calor no dia ou a poluição do ar, relacionado com a formação do ozônio troposférico. De qualquer forma, antes da implantação de um novo pavimento frio, deve ser decidido qual é a melhor forma de administrar estas mudanças climáticas locais.

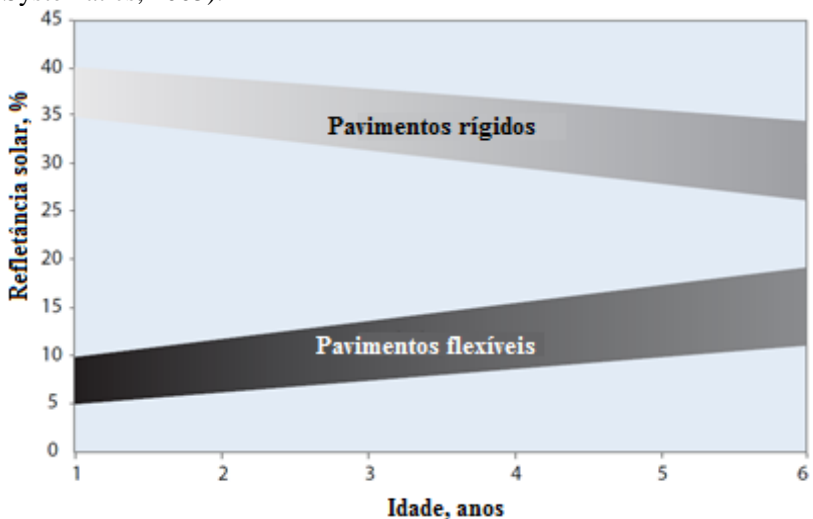
#### 4.4.3 Incremento do Albedo dos Pavimentos

A técnica mais utilizada, e que oferece melhores resultados imediatos, para a implantação de um pavimento frio é o incremento do albedo. Akbari *et al.* (2001) indicam que o incremento da refletância solar dos pavimentos em 0,25 causaria uma diminuição significativa da temperatura do pavimento em 10°C. Simulações realizadas para medir a influência do albedo do pavimento na temperatura do ar em Los Angeles indicam que o incremento do albedo de 1205 km<sup>2</sup> de pavimento em 0,25 poderia potencialmente reduzir a temperatura do ar em 0,6°C, o que poderia resultar em benefícios significativos em termos de menor consumo de energia e redução dos níveis de ozônio troposférico. Mais especificamente, a diminuição do consumo de energia para refrigeração

de ambientes resultaria na economia de \$15 milhões anuais e uma redução de despesas de \$76 milhões por ano de gastos médicos relacionados com tratamentos contra envenenamento por ozônio.

Segundo Santamouris *et al.* (2011), o efeito combinado do incremento do albedo tanto das coberturas como dos pavimentos, pode resultar na menor absorção da radiação incidente mitigando o incremento da concentração dos gases de efeito estufa. Se o albedo dos pavimentos de todas as cidades ao redor do mundo fosse incrementado em 0,15, as reduções do dióxido de carbono global (CO<sub>2</sub>) seria equivalente a uma economia de \$500 bilhões anuais.

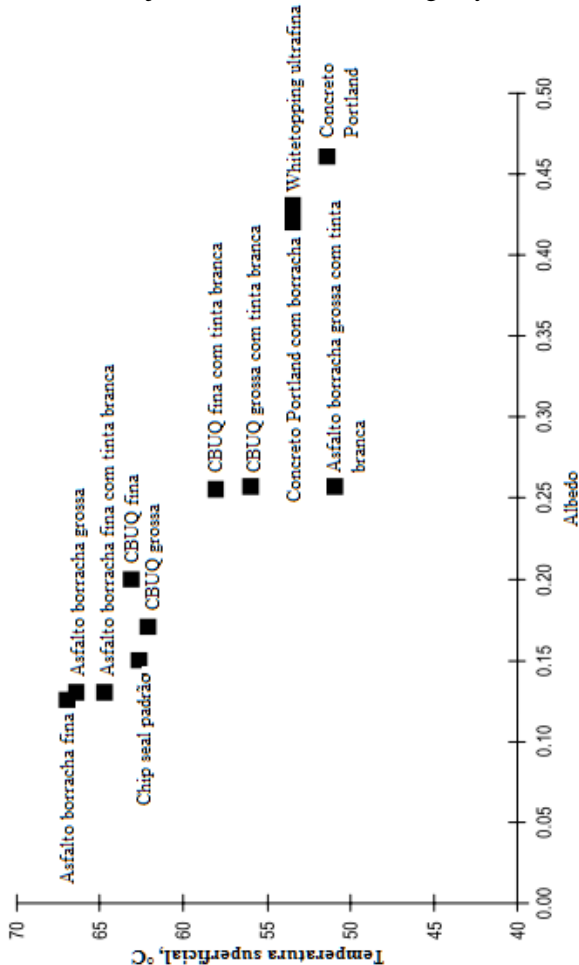
Tipicamente, os materiais empregados na pavimentação tem albedos com valores entre 0,05 a 0,40 (Figura 4.6) para os pavimentos flexíveis e rígidos, respectivamente. Com o tempo, a mistura asfáltica tende a ser mais clara quando o ligante se oxida e os agregados ficam mais expostos aumentando o albedo. No concreto de cimento Portland se dá um comportamento diferente devido ao acúmulo de sujeira e crescimento de microorganismos. Desta forma, ainda que os pavimentos tenham valores de albedos diferentes quando novos, estes valores se aproximam um do outro quando os pavimentos são colocados em serviço (Cambridge Systematics, 2005).



**Figura 4.6** - Variação da refletância solar no concreto asfáltico convencional e no concreto de cimento Portland com o tempo de uso.

**Fonte:** Cambridge Systematics, 2005 (adaptado).

O mecanismo dos pavimentos frios de albedo elevado está baseado na idéia que com o incremento da refletância da superfície do pavimento, uma menor quantidade de radiação solar será absorvida, diminuindo a temperatura diurna do pavimento. Esta baixa temperatura permitirá que a temperatura do ar seja menor a nível do solo. A correlação entre o albedo e a temperatura dos pavimentos é mostrada na Figura 4.7 para diversas superfícies de pavimentos em Phoenix, Arizona (as medições foram realizadas no dia 24 de julho de 2004) (Cambridge Systematics, 2005).



**Figura 4.7** - Temperaturas superficiais e albedo para alguns tipos de revestimentos em Phoenix, Arizona.

Fonte. Cambridge Systematics, 2005 (adaptado).

A Tabela 4.6 mostra o valor do albedo de alguns materiais mais utilizados na pavimentação de estradas, de estacionamentos e de calçadas. Os materiais a base de concreto Portland apresentam valores de albedo diferentes por causa da sua coloração (Santamouris *et al.*, 2011).

**Tabela 4.6** - Valores de albedo de os materiais de pavimentação convencionais e frios.

Material	Albedo
Mistura asfáltica convencional nova	0,04 – 0,06
Mistura asfáltica convencional envelhecida	0,09 – 0,18
White topping sobre mistura asfáltica	0,30 – 0,45
Mistura asfáltica colorida fria	0,27 – 0,55
Placa de concreto de cimento Portland cinza	0,12 – 0,20
Placa de concreto de cimento Portland branca	0,60 – 0,77
Bloco de concreto com pigmento frio (vermelho, amarelo, cinza)	0,45 – 0,49
Telha de concreto fotocatalítica branca	0,77
Mármore branco	0,65 – 0,75
Mármore escuro	0,20 – 0,40
Telha de concreto com pigmento frio (cinza, verde, bege)	0,61 – 0,68
Telha de borracha vermelha	0,07 – 0,10
Granito escuro	0,08 – 0,12

**Fonte:** Santamouris *et al.*, 2011 (adaptado).

Existem muitas formas para mudar o albedo do pavimento. Para novos pavimentos se pode utilizar ligantes e agregados de diversas cores ou alterar a cor do ligante artificialmente com pigmentos. Para pavimentos já existentes, se pode colocar uma camada nova ou um microrevestimento de cor clara, ou ainda pintar.

Em relação ao concreto Portland, como ele é composto basicamente de três materiais, cada um com seu próprio albedo, é interessante examinar a influência do albedo de cada componente no albedo final do concreto. Um estudo realizado por Pomerantz *et al.* (2003) mediu o albedo dos componentes de concreto Portland em laboratório utilizando um reflectometro de espectro solar. Os ensaios foram realizados em amostras de cimento, areia, brita e em amostras de concreto Portland endurecido. Os resultados deste estudo são mostrados na Tabela 4.7.

Os resultados das medições mostram que o albedo do concreto é maior ou igual ao albedo de algum dos seus componentes. O albedo do concreto Portland pode ser o mesmo que o do cimento ou da areia devido ao processo de acabamento da superfície, o qual permite que a mesma

seja rica em cimento. Desta forma, a argamassa de cimento e areia será a que dominará a cor do concreto endurecido. O cimento, porém, tenderá a controlar a cor por recobrir os outros componentes da mistura.

**Tabela 4.7** - Albedo dos componentes e do concreto Portland endurecido. O peso da água, não mostrada, corresponde à porcentagem faltante.

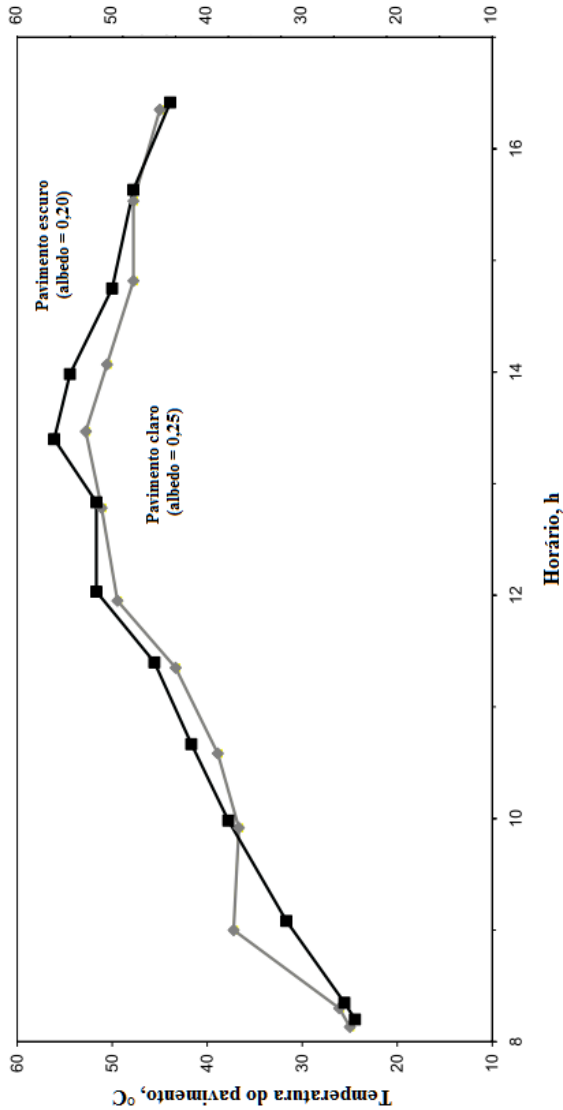
Fonte		Calaveras/ So. Cal	Calaveras/ Fresno	Calaveras/ Seattle
Cimento	Albedo	0,29	0,30	0,33
	Peso, %	14	13	
Areia	Albedo	0,31	0,21	0,10
	Peso, %	36	31	
Agregado 1	Albedo	0,30	0,20	0,27
	Peso, %; Diâmetro, cm	30; 2,5	48; 2,5	1,9
Agregado 2	Albedo	0,29	-	-
	Peso, %; Diâmetro, cm	12; 0,7	-	-
Concreto	Albedo	0,42	0,33	0,35

**Fonte.** Pomerantz *et al.*, 2003 (adaptado).

A explicação para o fato de que algumas amostras de concreto Portland apresentem um valor de albedo maior aos dos seus componentes seria que as medições dos constituintes foram realizadas sobre amostras com superfícies irregulares (areia e brita) enquanto que o concreto é liso. Estes resultados indicariam que a medição do albedo depende da rugosidade das amostras. Se a superfície a ser medida contém muitas superfícies irregulares, a luz pode ser refletidas múltiplas vezes. Cada reflexão de cada face fraturada leva a uma absorção. Existe também a possibilidade de que a sombra das faces influenciem na incidência da luz do equipamento. Uma segunda explicação seria que os componentes criados durante as reações químicas do cimento com a água têm albedo diferente que seus elementos originais (Pomerantz *et al.*, 2003).

Pomerantz *et al.* (2003) mediram a temperatura da superfície de 16 revestimentos de concreto Portland com o uso de um Termômetro Infravermelho Raytek na região da Bahia Este Bay Area de San Francisco. O albedo foi medido conforme à Norma ASTM E1918-7 “Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field.” Os resultados (Figura 4.8) mostram as temperaturas superficiais de dois pavimentos de concreto Portland com diferentes albedos, 0,20 e 0,25. Os dados indicam a

dependência da temperatura pico versus o albedo de aproximadamente  $7^{\circ}\text{C}$  para cada 0,1 de mudança do albedo do pavimento. Em um dia ensolarado a superfície com maior albedo atingiu  $52^{\circ}\text{C}$  após as 13h.



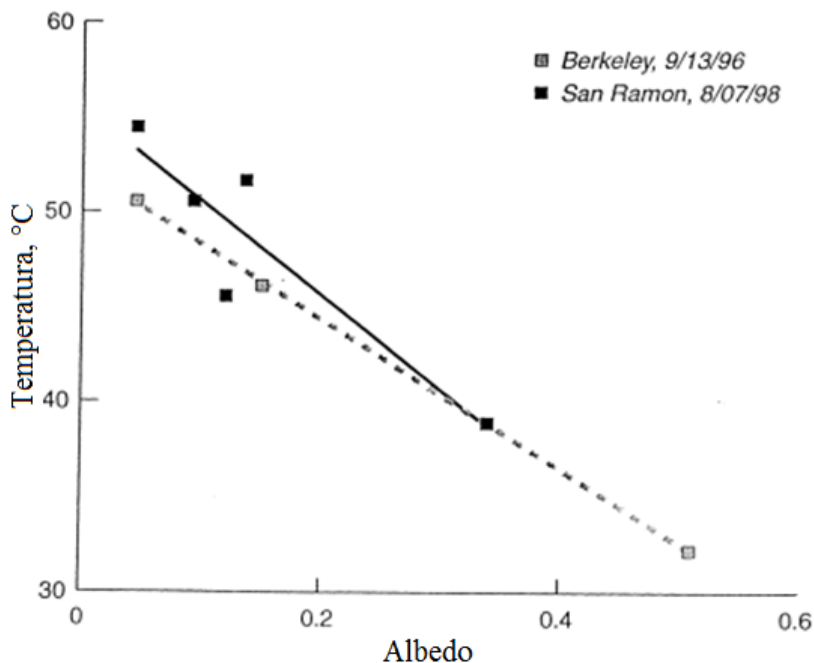
**Figura 4.8** - Temperatura superficial e horário das medições de dois pavimentos de concreto Portland de diferentes albedos.

**Fonte.** Pomerantz *et al.* 2003 (adaptado).

Pomerantz *et al.* (2000b) relatam que uma variedade de pavimentos asfálticos foram medidos na East Bay Area of San Francisco e que as temperaturas nas tardes de verão tiveram valores entre 49°C a 65°C, sendo 54°C, a média. As rodovias localizadas nas regiões ensolaradas das latitudes sul têm temperaturas maiores a 50°C. A hipótese de Solaimanian e Kenedy (1993), que convergem com as medições de Pomerantz *et al.* (2000), prediz que a temperatura máxima do pavimento nas latitudes mais baixas excederá a temperatura máxima do ar em aproximadamente 25°C. Nas regiões do hemisfério sul, onde a temperatura do ar atinge geralmente os 35°C, a temperatura superficial máxima de 60°C é muito comum. Da mesma forma, os autores indicam que medições realizadas por Asaeda *et al.* (1995) e Pomerantz *et al.* (2000b) mostraram que a temperatura da superfície do pavimento atinge o máximo uma ou duas horas depois do meio dia solar e que a partir deste momento a temperatura cai gradualmente.

Medições de temperatura em revestimentos asfálticos também foram realizadas em Berkeley e San Ramon, CA no horário das 15h00. Em Berkeley, foram estudados três tipos de revestimentos com diferentes idades: novo, desgastado e de cor clara. Em San Ramon, foram estudados quatro pavimentos asfálticos e um pavimento de concreto Portland (albedo = 0,35). No dia das medições, a intensidade da radiação solar foi de 1000 W m<sup>-2</sup>. No estudo se observou uma diminuição de aproximadamente 4°C para um incremento de 0,1 do valor do albedo (Figura 4.9). Uma mudança no valor do albedo de 0,25 é a diferença entre as mistura asfáltica nova com albedo de 0,05 e o concreto de cimento Portland com albedo 0,30 (Pomerantz *et al.*, 2000).





**Figura 4.9** - Exemplo da relação entre albedo e temperatura da superfície do pavimento.

**Fonte.** Pomerantz *et al.* 2000 (adaptado).

Para as condições de insolação, tempo e velocidade do vento similares às medições realizadas, os resultados da Figura 4.9 sugerem que é possível a diminuição da temperatura em  $3,6^{\circ}\text{C}$  para cada  $0,1$  na variação do albedo. Segundo os dados, se poderia reduzir as temperaturas máximas dos pavimentos em, aproximadamente,  $5^{\circ}\text{C}$  mediante o incremento do valor do albedo de  $0,2$  (Pomerantz *et al.*, 2000).

No Brasil, Picanço *et al.* (2011) realizaram medições de albedo de vários tipos de revestimentos na cidade de Manaus, AM. Os revestimentos medidos foram: solo com cobertura vegetal (GR), revestimento novo de areia asfalto (AAUQ), mistura asfáltica (CBUQ), localizado em uma avenida da cidade; e pavimento rígido-PR, em um condomínio residencial. As temperaturas foram medidas na superfície com um termômetro infravermelho Raytek e no ar, a  $1,5$  m de altura com um termômetro de mercúrio. O horário das medições foram desde as  $6\text{h}30$  às  $17\text{h}30$  com intervalos de uma hora entre coleta de dados. As medições

foram realizadas em dias ensolarados entre os meses de junho e julho. Os resultados são mostrados nas Tabela 4.8 a Tabela 4.10

**Tabela 4.8** - Temperatura superficial de quatro revestimentos: CBUQ, AAUQ, PR e GR.

Superfície		Temperatura na Superfície (°C)			
		CBUQ	AAUQ	PR	GR
Horário	06:30	27,10	27,90	27,80	25,20
	07:30	29,70	30,80	30,00	27,60
	08:30	34,60	38,20	35,00	31,50
	09:30	40,60	45,50	40,60	34,90
	10:30	46,20	53,50	45,20	39,60
	11:30	49,30	57,40	48,00	40,90
	12:30	51,10	58,90	50,20	42,00
	13:30	52,85	59,70	51,40	41,50
	14:30	50,60	57,20	50,60	42,40
	15:30	48,00	53,10	47,50	35,40
	16:30	44,30	47,90	43,00	33,70
17:30	36,40	39,40	37,60	29,20	
Média		42,56	47,46	42,24	35,33

Fonte. Picanço *et al.* 2011.

**Tabela 4.9** - Temperatura ambiental de quatro revestimentos: CBUQ, AAUQ, PR e GR.

Superfície		Temperatura Ambiente (°C)			
		CBUQ	AAUQ	PR	GR
Horário	06:30	26,75	26,80	27,45	26,20
	07:30	29,30	28,80	28,55	27,60
	08:30	31,75	31,75	30,85	30,50
	09:30	34,10	33,20	33,20	32,60
	10:30	36,20	35,65	34,70	34,25
	11:30	36,45	37,20	35,30	34,00
	12:30	36,65	37,05	36,75	34,90
	13:30	37,00	37,30	37,40	35,60
	14:30	37,10	37,50	36,30	36,40
	15:30	36,00	35,70	35,30	35,20
	16:30	35,00	35,60	34,70	34,00
17:30	32,45	32,40	32,00	32,30	
Média		34,06	34,08	33,54	32,80

Fonte. Picanço *et al.* 2011.

**Tabela 4.10** - Albedo de quatro revestimentos: CBUQ, AAUQ, PR e GR.

Superfície		Valor do Albedo			
		CBUQ	AAUQ	PR	GR
Horário	06:30	0,03	0,01	0,06	0,04
	07:30	0,02	0,01	0,05	0,05
	08:30	0,02	0,01	0,04	0,06
	09:30	0,02	0,01	0,06	0,07
	10:30	0,02	0,01	0,06	0,07
	11:30	0,02	0,02	0,06	0,07
	12:30	0,02	0,01	0,06	0,08
	13:30	0,02	0,02	0,06	0,07
	14:30	0,03	0,02	0,06	0,08
	15:30	0,03	0,01	0,04	0,06
	16:30	0,02	0,01	0,03	0,03
17:30	0,07	0,03	0,10	0,11	
Média		0,03	0,01	0,06	0,07

**Fonte.** Picanço *et al.* 2011.

Para as condições de medição de Picanço *et al.* (2011), tanto a amostra de concreto asfáltico como de areia asfalto, atingiram baixos valores de albedo. Os autores atribuem estes baixos resultados à cor predominante escura dos materiais. No caso do pavimento de concreto de cimento Portland, o valor médio da refletância foi de 0,06. O valor é muito baixo se comparado com os resultados da literatura, sendo que este valor pode estar relacionado com o acúmulo de sujeira na superfície do revestimento. O albedo da superfície coberta com grama foi a mais alta de todas com um valor de 0,07.

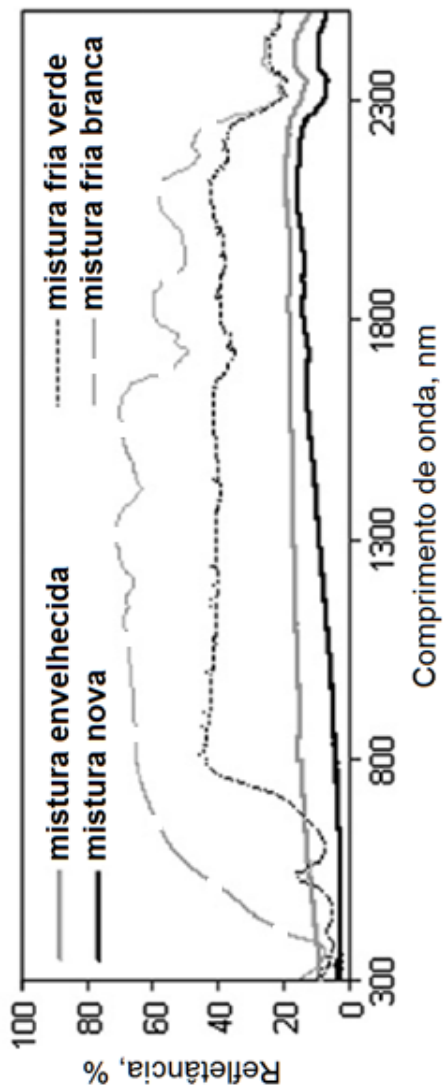
A temperatura superficial apresentou um comportamento crescente nas primeiras horas da manhã até atingir seu máximo entre as 13h30 e 14h30 para todos os revestimentos. A partir deste horário a temperatura começa a diminuir. A maior temperatura registrada corresponde ao pavimento de areia asfalto com 59,7°C, o pavimento de concreto asfáltico e concreto de cimento Portland registraram temperaturas de 52,85°C e 51,40°C respectivamente.

Acompanhando a tendência das temperaturas superficiais, a temperatura ambiental medida a 1,5 m de altura atingiu seu máximo valor entre as 13h30 e 14h30. As temperaturas do ar sobre os pavimentos variaram de 36,4 a 37,5°C (cerca de 1,1°C). É interessante perceber que, embora as temperaturas superficiais dos revestimentos sejam diferentes para os revestimentos, a temperatura do ar é quase a mesma não existindo uma diferença significativa entre elas. Segundo os dados apresentados, a diferença entre a temperatura da superfície com a temperatura do ar seria de 22,6, 15,3, 14 e 8°C para os pavimentos de areia asfalto, concreto asfáltico, concreto Portland e para a superfície com grama, respectivamente.

A justificativa dada pelos autores para a pouca diferença entre as temperaturas registradas seria que os locais de medição não apresentavam características de fluxo de vento similares, já que seriam estes os encarregados do resfriamento do ar sobre as superfícies dos pavimentos (Picanço *et al.* 2011).

Os dados presentes nas Figura 4.6 à Figura 4.9 e nas Tabela 4.6 a Tabela 4.8 mostram que, efetivamente, os valores de albedo da mistura asfáltica convencional nova ou envelhecida são baixos (0,04 a 0,18) se comparados com os valores dos revestimentos de concreto Portland (0,30 a 0,77).

Para evitar a irritação ocular com a cor muito clara da mistura asfáltica; a cor destes pigmentos frios é escura, o que significa que sua refletância solar é baixa. No entanto, o alto albedo está relacionado com a alta refletância da região NIR da radiação solar. A Figura 4.10 mostra com mais detalhe a refletância espectral da mistura asfáltica convencional preta (nova com SR = 0,06 e envelhecida com SR = 0,15) e para uma mistura asfáltica fina colorida fria (verde com SR = 0,27 e branca com SR = 0,55) que podem ser aplicadas sobre os pavimentos asfálticos existentes para incrementar o albedo. A refletância visível das amostras de mistura asfáltica fria são 0,1 e 0,45 respectivamente (Santamouris *et al.*, 2011).



**Figura 4.10** - Refletância espectral da mistura asfáltica convencional (nova e envelhecida) e fria (verde e branca).

**Fonte.** Santamouris *et al.*, 2011 (adaptado).

Os resultados da Figura 4.10 parecem ser promissores, sobretudo porque a adição de pigmentos consegue aumentar o albedo da mistura asfáltica até um valor de 0,55 ou mais. No entanto, a maioria dos artigos

sobre pavimentos frios coloridos não indica o tipo de ligante utilizado nas pesquisas. É possível que as pesquisas sobre pavimentos frios coloridos existentes se baseiam no uso de ligantes sem cor ou albinos, os quais, por ser translúcidos, permitem um melhor desempenho do pigmento dentro da mistura.

Existem técnicas que permitem incrementar o albedo de um pavimento flexível convencional sem mudar o material do revestimento. Mais especificamente, Kinouchi *et al.* (2004) desenvolveram um novo tipo de revestimento que satisfaz tanto o alto albedo e o baixo brilho baseado na aplicação de uma tinta inovadora sobre o pavimento asfáltico convencional. O pavimento desenvolvido se caracteriza pela baixa refletividade na região visível do espectro (23%) e alta refletância infravermelha (86%). Ensaios experimentais têm mostrado que a temperatura superficial máxima do revestimento pintado é aproximadamente 15°C menor que a encontrada no revestimento asfáltico convencional. Esta técnica, porém, ainda apresenta o problema do desgaste da tinta devido à circulação dos veículos.

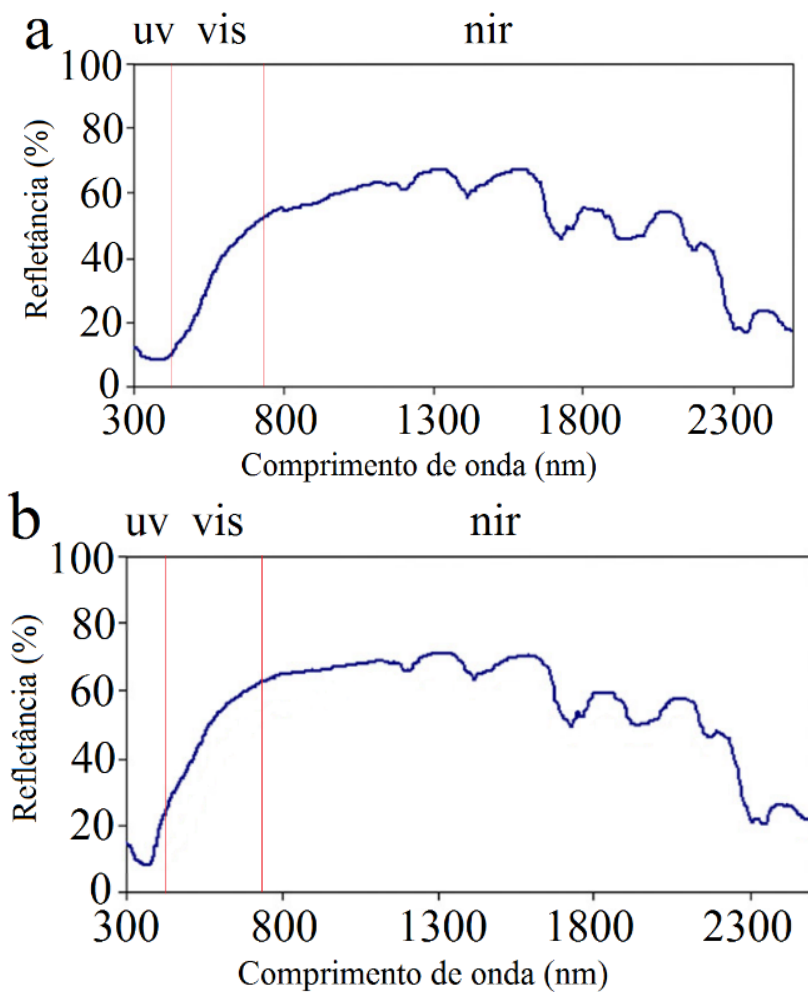
Uma alternativa ao uso de tintas frias sobre o revestimento asfáltico, e que poderia eliminar o problema de desgaste, é o uso de pigmentos frios como material constituinte da mistura asfáltica. Esta alternativa foi estudada por Synnefa *et al.* (2011). No estudo, cinco amostras de misturas asfálticas coloridas foram desenvolvidas para serem aplicadas sobre pavimentos asfálticos em boas condições com a finalidade de incrementar o albedo da superfície, mas mantendo a tonalidade escura das misturas. As superfícies de 0,5 cm de espessura (microrevestimentos), de cores verde, vermelha, amarela, bege e branca, foram elaboradas mediante a mistura de ligante asfáltico elastomérico (sem cor) e a adição de pigmentos e agregados de tamanhos e cores especiais. Infelizmente, nem as proporções de dosagem nem as características físicas e químicas dos materiais foram reveladas pelos autores do estudo. As misturas asfálticas elaboradas são mostradas na Figura 4.11.



**Figura 4.11** - Amostras de mistura asfáltica colorida (1 bege, 2 branco, 3 verde, 4 vermelho, 5 amarelo).

**Fonte:** Synnefa *et al.*, 2011.

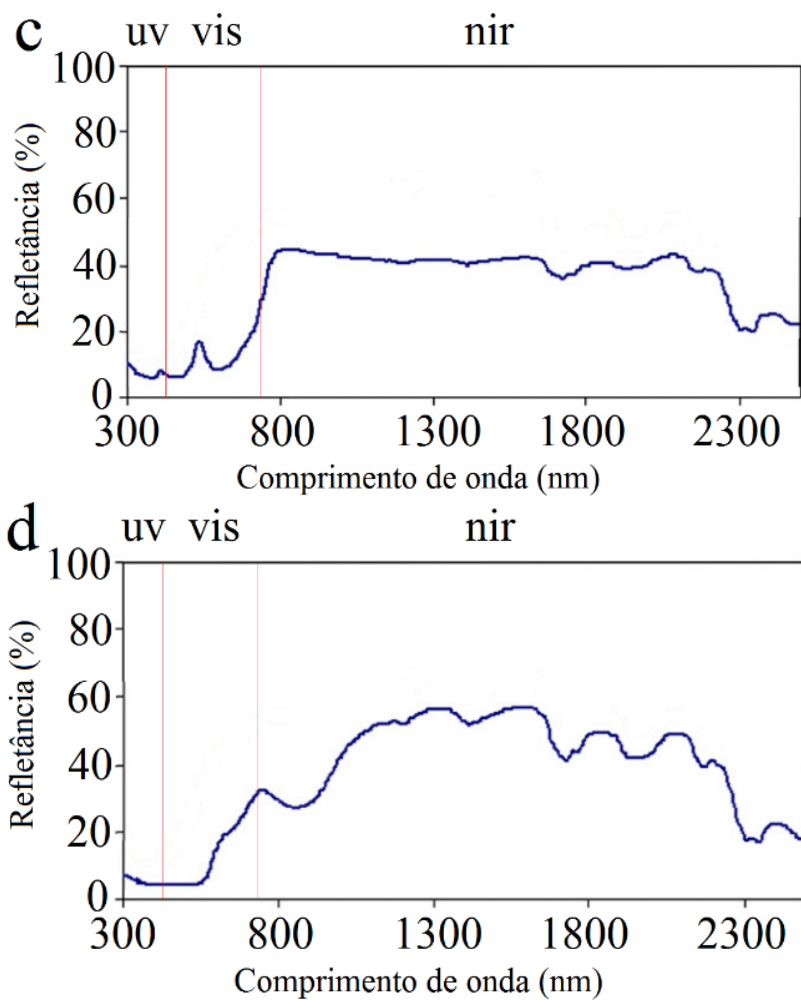
As propriedades estudadas nas misturas coloridas foram: a refletância espectral, medidas com num espectrofotômetro Varian Cary 5000, com esfera integradora, que coleta tanto a radiação especular e difusa; e a temperatura superficial mediante a inserção de termopares nas amostras. Os resultados das medições no espectrofotômetro são mostrados nas Figura 4.12 a Figura 4.14. Nas Figuras é possível observar que os pigmentos têm a habilidade de refletir a radiação NIR, de 700 a 2500 nm, de forma mais eficiente que as regiões, UV e VIS. Este comportamento se repete inclusive para as cores mais escuras (verde e vermelho) (Synnefa *et al.*, 2011).



**Figura 4.12** - Refletância espectral das amostras de mistura asfáltica colorida (a. bege, b. branco).

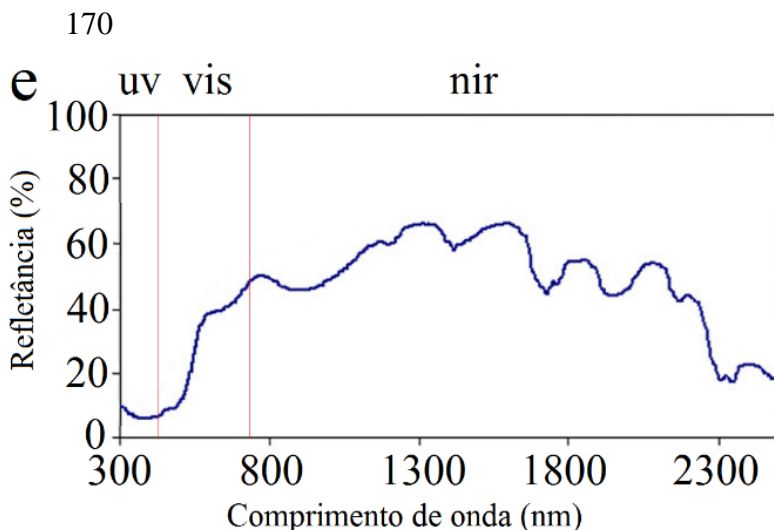
**Fonte:** Synnefa *et al.*, 2011 (adaptado).





**Figura 4.13** - Refletância espectral das amostras de mistura asfáltica colorida (c. verde, d. vermelho).

**Fonte:** Synnefa *et al.*, 2011 (adaptado).



**Figura 4.14** - Refletância espectral das amostras de mistura asfáltica colorida (amarelo).

**Fonte:** Synnefa *et al.*, 2011 (adaptado).

Mediante a integração da curva de refletância ao longo do comprimento de onda foi calculada a refletância solar de cada amostra (Tabela 4.11). Todos os valores de refletância das amostras coloridas foram maiores que as da amostra preta convencional utilizada como referência. O valor de refletância das amostras está entre 27% (amostras vermelha e verde) e 55% (amostra branca), enquanto que a amostra preta convencional é de 4%. A absortância UV de todas as amostras apresentou valores entre 90 e 96% (Synnefa *et al.*, 2011).

**Tabela 4.11** - Refletância solar das amostras de mistura asfáltica colorida testadas.

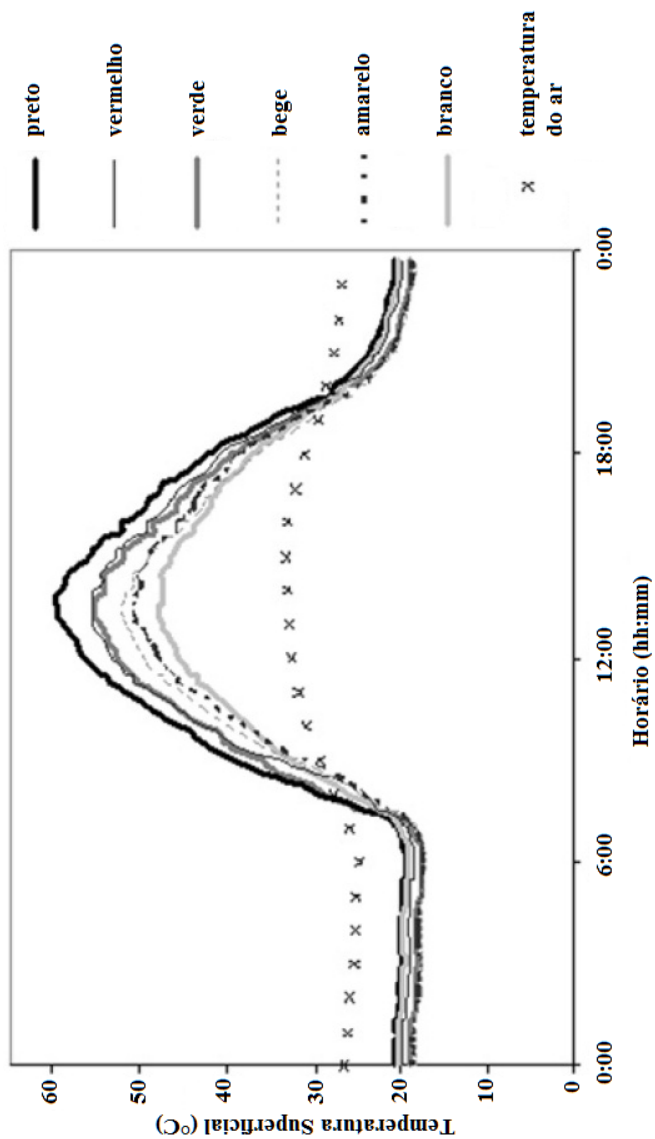
Amostra	SR (%)	SR <sub>UV</sub> (%)	SR <sub>VIS</sub> (%)	SR <sub>NIR</sub> (%)
Bege	45	10	31	56
Branca	55	10	45	63
Verde	27	8	10	39
Vermelha	27	6	11	40
Amarela	40	8	26	51
Preta	4	4	3	4

**Fonte:** Synnefa *et al.*, 2011 (adaptado).

Mesmo com baixos valores de refletância VIS, as cores mais escuras (verde e vermelho) apresentam altos valores de refletância infravermelha. No caso da amostra preta convencional, o valor da refletância quase não varia ao longo do espectro e se mantém em 4%. A alta refletância NIR explica a alta refletância total das amostras, já que quase a metade da energia solar chega como radiação invisível, UV e NIR.

A Figura 4.15 mostra a distribuição ao longo de 24h da temperatura média horária das amostras testadas e a temperatura do ar durante o período. A diferença entre a temperatura média das superfícies coloridas e a superfície preta convencional é mostrada na Tabela 4.12.

Na Figura 4.15 é evidente que durante o dia todas as amostras apresentaram temperaturas superficiais maiores que as do ar acima da superfície das amostras. Durante a noite, a temperatura do ar foi sempre maior que a temperatura da superfície das amostras testadas. Isto se deve aos altos valores de emissividade e à habilidade de liberar rapidamente durante a noite o calor absorvido durante o dia. Todas as amostras coloridas apresentaram temperaturas superficiais menores que a amostra preta convencional. A temperatura máxima das misturas foi registrada para um horário entre as 13h00 e 14h00, sendo que esta tendência é a mesma que as dos estudos realizados por Pomerantz *et al.* (2003) e Picanço *et al.* (2011).



**Figura 4.15** - Distribuição da temperatura média horária das misturas coloridas testadas e da temperatura do ar durante o período experimental (julho de 2008).

Fonte: Synnefa *et al.*, 2011 (adaptado).

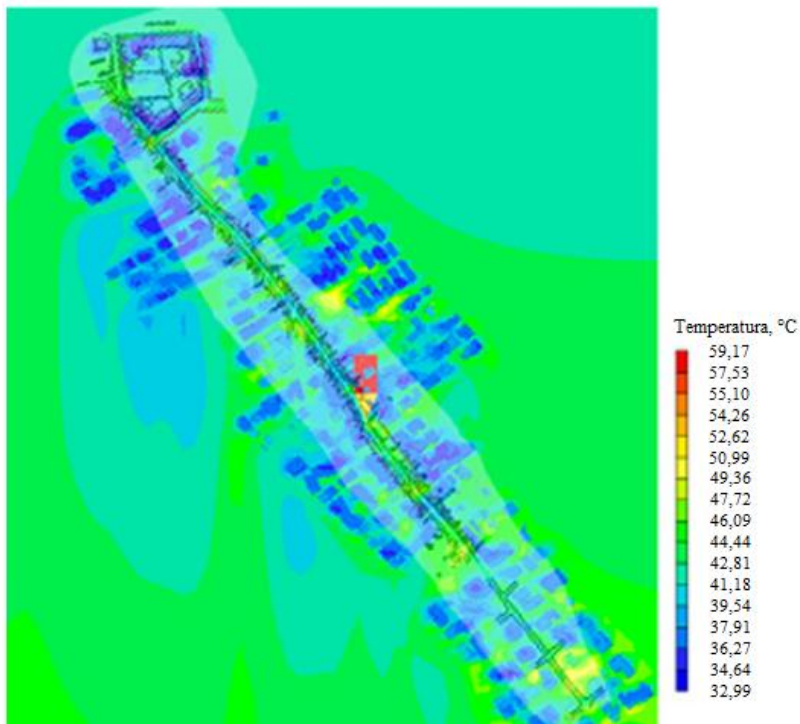
**Tabela 4.12** - Temperatura superficial diurna e noturna média e máxima das misturas coloridas ensaiadas.

Tipo de mistura	Temperatura superficial, °C				
	Diurna				Noturna
	Média	$\Delta T_{\text{média}}$	Máxima	$\Delta T_{\text{máxima}}$	Média
Preta convencional	46,7	-	59,9	-	21,6
Branca	39,0	7,7	48,0	11,9	21,1
Amarela	40,0	6,7	50,7	9,2	19,4
Bege	40,5	6,2	52,0	7,9	19,1
Vermelha	43,6	3,1	55,8	4,1	20,7
Verde	43,5	3,2	55,1	4,8	19,7

**Fonte:** Synnefa *et al.*, 2011 (adaptado).

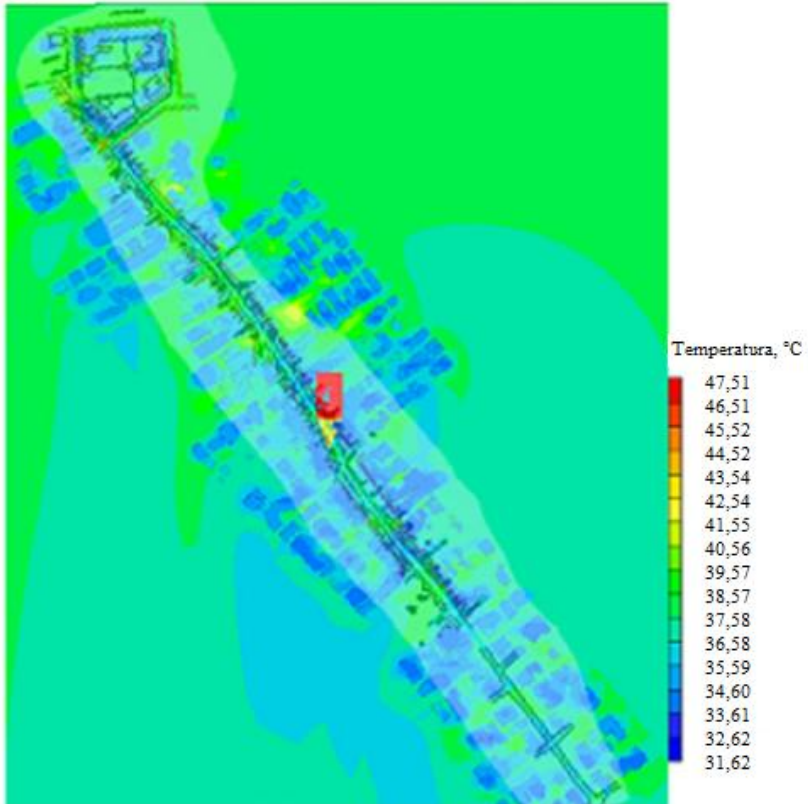
Os resultados da Tabela 4.12 mostraram que se conseguiria, em média, uma redução de 3,1 a 7,7 °C na temperatura superficial com o uso de misturas coloridas ao invés de uma mistura convencional.

Para avaliar o impacto do emprego das misturas asfálticas coloridas estudadas na temperatura ambiental, Synnefa *et al.* (2011) realizaram a simulação de um microclima urbano com o uso do software Phoenics CFD. As simulações foram realizadas para o período de verão com ventos de direção norte e velocidade de 2 m/s a 10 m de altura. O microclima simulado é mostrado nas Figura 4.16 e Figura 4.17 e corresponde a uma área comercial nos subúrbios de Atenas, com uma rodovia principal rodeada por áreas residenciais.

**A**

**Figura 4.16** - Temperatura do ar a 1,5 m de altura do microclima simulado com uso de mistura asfáltica (A) preta convencional, SR = 0,04.

**Fonte:** Synnefa *et al.*, 2011 (adaptado).

**B**

**Figura 4.17** - Temperatura do ar a 1,5 m de altura do microclima simulado com uso de mistura asfáltica (B) branca, SR = 0,55.

**Fonte:** Synnefa *et al.*, 2011 (adaptado).

De acordo com os resultados, se uma mistura asfáltica convencional (SR = 0,04 e temperatura máxima superficial 60°C) fosse colocada na rodovia, a temperatura do ar a 1,5 m de altura estaria entre 37 e 47°C (média de 42°C). No caso de empregar a mistura asfáltica branca (SR = 0,55 e temperatura máxima superficial 45°C), a temperatura do ar a 1,5 m de altura estaria entre 36 °C e 41°C (média de 37°C). A partir dos resultados, os pesquisadores concluíram que a aplicação de uma mistura asfáltica branca reduziria significativamente a temperatura do ar da área estudada em aproximadamente, 5°C sob as condições de baixa velocidade do vento simuladas. Uma aplicação em grande escala deste

material na cidade teria um impacto significativo na diminuição da temperatura do ar e da superfície, contribuindo com a mitigação do efeito de ICU e suas consequências (Synnefa *et al.*, 2011).

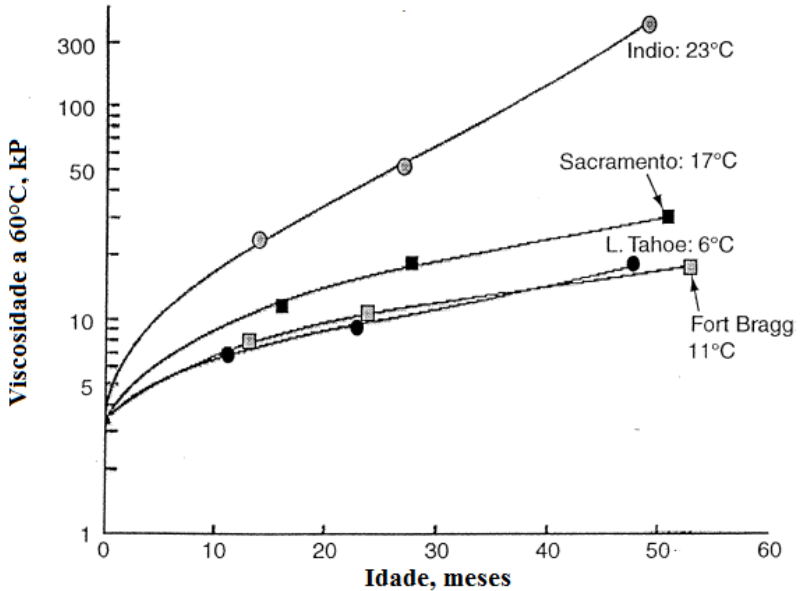
O estudo de Synnefa *et al.* (2011) mostrou o grande potencial do uso de pigmentos nas misturas asfálticas sobretudo pelos valores significativos de redução da temperatura da superfície e do ar. No entanto, deve-se considerar que as misturas coloridas foram elaboradas com ligante albino, o que permitiu que os pigmentos de OMM pudessem refletir, de forma muito eficiente, a radiação NIR nos ensaios de, espectrofotogrametria. O ligante utilizado pelos pesquisadores está disponível para comércio nos Estados Unidos e nos países europeus servindo, principalmente, para a construção de ciclovias, vias para ônibus, pistas de atletismo, parques, ou algum outro pavimento com exigências estéticas. Existe, porém, a dificuldade do uso deste material no Brasil e na América Latina, já que o ligante albino ainda não é produzido em escala comercial pela indústria.

#### **4.4.4 Efeito da Temperatura no Envelhecimento do Ligante**

O envelhecimento do ligante envolve reações físicas e químicas que são aceleradas com as altas temperaturas. A causa é a perda de hidrocarbonos voláteis, a oxidação e a polimerização. O ligante se torna mais frágil com o incremento da temperatura e a intensidade da luz ultravioleta; sendo que taxa de oxidação é o dobro para cada incremento de 10°C de temperatura (Pomerantz *et al.*, 2000).

Ensaio realizados na Califórnia por Kemp e Predoehl (1981) mostram que as condições do deserto favorecem a rápida diminuição da ductilidade e aumento da viscosidade do ligante. A Figura 4.18 mostra o efeito dramático do clima quente e ensolarado do deserto no envelhecimento do ligante. A viscosidade média de amostras expostas ao clima do deserto com temperatura média anual de 23 °C por 4 anos foi 10 vezes maior que aquelas amostras expostas a uma temperatura média de 17 °C, pelo mesmo período de tempo. A dependência da temperatura parece ser não linear. A taxa de endurecimento se acelera quando a temperatura média do ar excede aproximadamente 13°C. Nestes estudos, a fragilização, que está relacionada com o incremento da viscosidade e que por sua vez causa a falha prematura do revestimento.





**Figura 4.18** - Efeito da temperatura do ar no endurecimento do ligante como uma função do tempo.

Fonte: Pomerantz *et al.* 2000 (adaptado).

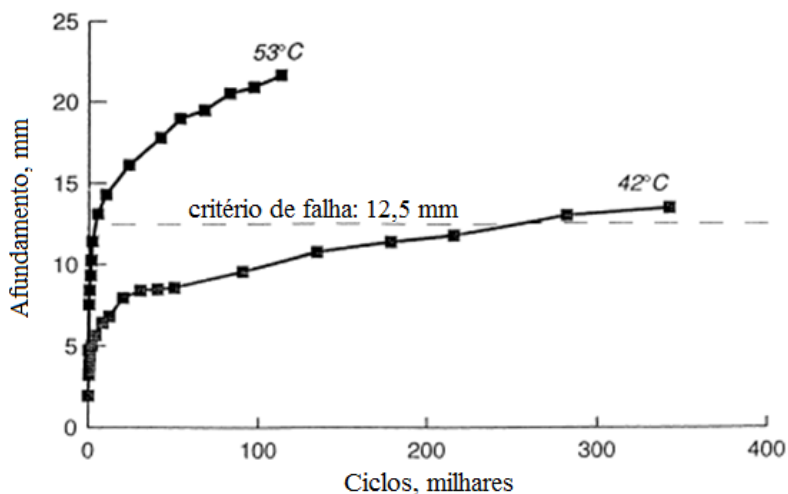
#### 4.4.5 Efeito da Temperatura no Desempenho da Mistura Asfáltica

Adicionalmente aos efeitos indesejados da ICU nas cidades, o baixo albedo da mistura asfáltica e as altas temperaturas às quais está exposto durante sua vida útil, afetam também a integridade da mistura asfáltica. Desta forma, a implantação dos pavimentos frios não traria somente benefícios em mitigar a ilha de calor, mas também poderia prolongar a vida útil do revestimento e melhorar o desempenho da estrutura quanto a formação de trilhas de roda.

Os efeitos da temperatura no desempenho do pavimento têm sido reconhecidos pelo programa SHRP o qual estabelece um intervalo de temperaturas de trabalho do ligante asfáltico dependendo das condições às quais o pavimento estará exposto. No entanto, ligantes asfálticos tenham um bom desempenho em uma maior faixa de temperatura, são mais caros. Isso abre a possibilidade de uma economia adicional quando se constrói um pavimento frio. Reduzindo-se a temperatura máxima do pavimento, um ligante de PG (grau de desempenho) menor pode ser

utilizado. A intensidade das patologias pode ser diminuída, reduzindo os custos de manutenção (Pomerantz *et al.*, 2000).

Pomerantz *et al.* (2000) estudaram a influência da temperatura do pavimento em duas amostras de mistura asfáltica densa, as quais foram aquecidas a diferentes temperaturas e foram ensaiadas a deformação permanente. O ensaio consiste em um eixo simples padrão com um pneu simples que passa repetidas vezes a uma velocidade de 7 km/h sobre as amostras. Os resultados (Figura 4.19) mostram que existe um incremento na resistência a deformação permanente por parte das misturas quando a temperatura diminui. A uma temperatura superficial de 53°C, a profundidade da trilha de roda excedeu o critério de falha, 12,5 mm, com menos de 20 000 ciclos. Baixando a temperatura a 42°C, a amostra atingiu o critério de falha só a 270 000 ciclos, o que representa um incremento de 10 vezes na vida útil da mistura quanto a este parâmetro.



**Figura 4.19** - Afundamento e número de ciclos de um eixo de carga padrão para uma superfície de pavimento com temperatura de 42 e 53°C.

**Fonte.** Pomerantz *et al.* 2000 (adaptado).

#### 4.5 RESUMO DO CAPÍTULO

No presente capítulo foram apresentadas as características dos materiais frios entre os quais se destacam os pigmentos e as tintas que podem ser utilizados para o desenvolvimento de tetos e pavimentos.

Todos estes materiais fazem parte das medidas de mitigação da ICU e se caracterizam por absover uma menor quantidade de radiação solar mantendo uma temperatura superficial mais fria do que um material convencional.

Os materiais frios mais eficientes são aqueles de cor branca ou clara. No entanto, recentemente, materiais frios coloridos têm sido produzidos com o uso de pigmentos que possuem uma alta refletância NIR. Estes materiais podem ser aplicados nas fachadas das edificações ou nos pavimentos para evitar que os usuários sejam expostos a altos níveis de radiação UV decorrentes do uso de materiais muito refletivos.

Uma alternativa para a fabricação destes materiais é o uso de pigmentos frios, os quais são compostos inorgânicos que podem ser utilizados sozinhos ou como parte de tintas, plásticos, materiais de construção, etc. Estes pigmentos possuem uma alta opacidade, estabilidade ao calor, refletância NIR, resistência ao clima e resistência a produtos químicos. Como a refletividade e absorvidade do pigmento são independentes uma da outra, o pigmento refletivo infravermelho pode ter qualquer cor. A estabilidade térmica, permite que estes pigmentos sejam utilizados, por exemplo, nas misturas asfálticas as quais, durante os processos de usinagem, compactação e vida útil, estão submetidas a altas temperaturas.

A tinta fria, derivada do pigmento, é um produto muito utilizado nas fachadas e coberturas das edificações. As tintas apresentam uma ampla gama de cores, variando de tonalidades claras até tonalidades escuras. O uso das mesmas tem ajudado a manter as superfícies exteriores com baixas temperaturas, melhorando o conforto térmico dentro das edificações. Na Itália, por exemplo, a aplicação de uma tinta fria num teto de 700 m<sup>2</sup> numa escola permitiu que temperatura superficial do mesmo diminuísse em até 20 °C. Como consequência, a demanda de energia de refrigeração foi reduzida em 54%.

No caso dos pavimentos, os quais armazenam grandes quantidades de calor durante o dia e a irradiam durante a noite, existem varias alternativas para tornar um pavimento mais frio. Estas alternativas se focam no incremento do albedo, no aumento da permeabilidade e controle da textura do pavimento; sendo que, estes dois últimos são dependentes da granulometria da mistura. O incremento do albedo mediante o uso de materiais mais claros, como foi indicado anteriormente, pode ser

prejudicial para a saúde da população e causar desconfortos oculares nos motoristas e pedestres. Por este motivo, o uso de pigmentos frios nas misturas asfálticas torna-se, neste caso, uma alternativa viável, já que permite o incremento da refletividade dos revestimentos sem uso de materiais muito brilhantes. As alternativas para tornar o pavimento mais frio foram abordadas na presente pesquisa, mediante o estudo de misturas asfálticas coloridas com uso de pigmentos frios e uso de dois tipos de granulometria; densa e porosa.

Adicionalmente aos efeitos indesejados da ICU nas cidades, o baixo albedo do pavimento e as decorrentes altas temperaturas às quais está exposto durante sua vida útil, afetam também a integridade do mesmo. A diminuição da resistência à fadiga da mistura está associada ao envelhecimento do ligante o qual envolve reações físicas e químicas que são aceleradas com as altas temperaturas. Estas mesmas altas temperaturas podem favorecer, a formação de trilha de roda na superfície dos revestimentos. Das duas patologias mencionadas, somente a deformação permanente será estudada na presente pesquisa, pois a forma que se visualiza a aplicação das misturas coloridas é em camadas de pequena espessura sobre revestimentos asfálticos ou pavimentos rígidos. Nesta condição, estas misturas trabalharão à compressão, sendo que o comportamento à deformação permanente passa a ser o parâmetro de desempenho mais importante.

Finalmente, muitos pesquisadores concordam em que a implantação dos pavimentos frios pode mitigar os efeitos da ICU e prolongar a vida útil dos revestimentos. Com a redução da máxima temperatura do pavimento, um ligante de grau de desempenho menor pode ser utilizado, e a intensidade das patologias pode ser diminuída. Isto pode acarretar uma redução no custo de manutenção das vias.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AKBARI, H.; TAHA, H. **The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities.** Energy 17 (2), 1992. p. 141–149.

ASAEDA, T., CA, V. T.; WAKE, A. **Heat Storage of Pavement and its Effect on the Lower Atmosphere.** Atmospheric Environment 30, 1995. p. 413 - 427.

BAUXBAUM, G.; PFAFF, G. **Industrial Inorganic Pigments,** Wiley-Vch Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Germany, 2005. p. 313.

BRETZ, S.E., AKBARI, H. **Long-term performance of high-albedo roof coatings,** Energy and Buildings 25, 1997. p. 159–167.

BURKHART, G., DETRIE, T., SWILER, D. **When Black is White, in Paint & Coatings Industry,** Jan. 2001. p. 30

Cambridge Systematics, Inc. **Cool Pavement Report.** Maryland: [s.n.], 2005.

**CIE Road Surfaces and Lighting.** CIE Publ. No. 66. International Commission on Illumination and the Permanent International Association of Road Congrestes. 1984.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA) **Preventive Maintenance Yields Huge Savings, Says Michigan Study,** Focus, Sept. 1997.

GIROIS, S. **Effect of Iron Compounds on PVC (Thermal and photochemical stability),** Paper at Antec 1999. p. 3604

KEMP, G. R.; N. H. PREDOEHL. **A Comparison of Field and Laboratory Environments on Asphalt Durability.** In Asphalt Paving Technology 1981, San Diego, CA, City: Association of Asphalt Paving Technologists. 1981.

KINOUCHI T, YOSHINAKA T, FUKAE N, KANDA M. **Development of cool pavement with dark colored high albedo coating,** Fifth Conference for the Urban Environment, Vancouver, Canada; 2004.

LAMBOURNE, R.; STRIVENS, T. **Paint and surface coatings, Theory and Practice** Woodhead Publishing Ltd, Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England, 1999. p. 798.

LEVINSON, R.; AKBARI, H. **Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete.** Cement and Concrete Research, 32, 2002. p. 1679–1698.

LEVINSON, R., AKBARI, H., BERDAHL, P. **Measuring solar reflectance—part I: defining a metric that accurately predicts solar heat gain.** Solar Energy 84 (9), 2010a. p. 1717–1744.

LEVINSON, R.; AKBARI, H.; BERDAHL, P. **Measuring solar reflectance—part II: review of practical methods.** Solar Energy 84 (9), 2010b. p. 1745–1759.

LEVINSON, R.; AKBARI, H.; REILLY, J.C. **Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings.** Building and Environment 42 (7), 2007a. p. 2591–2605.

LEVINSON, R.; AKBARI, H.; KONOPACKI, S.; BRETZ, S. **Inclusion of cool roofs in non residential Title 24 prescriptive requirements.** Energy Policy 33 (2), 2005a. p. 151–170.

LEVINSON, R.; BERDAHL, P.; AKBARI, H. **Solar spectral optical properties of pigments – Part II: survey of common colorants** Solar Energy Materials & Solar Cells 89, 2005. p. 351–389.

LEVINSON, R.; *et al.* **Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials.** Solar Energy Materials and Solar Cells 91, 2007b. p. 304–314.

MALSHE, Vinod; BENDIGANAVALE, Ashwini. **Infrared Reflective Inorganic Pigments.** Recent Patents on Chemical Engineering, v. 1, n. 1, 2008. p. 67–79.

PICANÇO, Helena Marinho *et al.* **Refletividade, Radiação Solar e Temperatura em Diferentes Tipos de Revestimentos das Vias Urbanas no Município de Manaus (AM).** CONINFRA 2011, agosto 2011, São Paulo, Brasil. p. 13.

Pomerantz, M. *et al.* **The Effect of Pavements' Temperatures on Air Temperatures in Large Cities.** LBNL - 43442. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000b.

POMERANTZ, Melvin; AKBARI, Hashem; HARVEY, John T. **Cooler Reflective Pavements Give Benefits Beyond Energy Savings: Durability and Illumination.** Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000. p. 13.

POMERANTZ, M. *et al.* **Examples of cooler reflective streets for urban heat-island mitigation: Portland cement concrete and chip seals.** Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003. p. 25.

PRADO, R. T.A., FERREIRA, F.L. **Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials.** Energy and Buildings 37 (4), 2005. p. 295–300.

ROSE, L. S., AKBARI, H. **Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Metropolitan Chicago Illinois** Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-49275, October 2001a.

ROSE, L. S., AKBARI, H. **Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Salt Lake City, Utah** Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-47851, February 2001b.

ROSE, L. S., AKBARI, H., TAHA, H. **Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Greater Houston, Texas** Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51448, January 2003.

ROSENFELD, Arthur H; AKBARI, Hashem; BRETZ, Sarah *et al.* **Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates.** Energy and Buildings. v. 22, 1995. p. 255–265.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, a.; KARLESSI, T. **Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions.** Solar Energy, v. 85, n. 12, 2011. p. 3085–3102.

SOLAIMANIAN, M. and T. W. KENNEDY. **Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation.** Transportation Research Record 1417, 1993. p. 1- 11.

STATHOPOULOU, M. *et al.* **A surface heat island study of Athens using high-resolution satellite imagery and measurements of the optical and thermal properties of commonly used building and paving materials.** International Journal of Sustainable Energy 28 (1), 2009. p. 59–76.

SYNNEFA, Afroditi; KARLESSI, Theoni; GAITANI, Nikiet *al.* **Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate.** Building and Environment, v. 46, n. 1, 2011. p. 38–44.

SYNNEFA A., SANTAMOURIS M., APOSTOLAKIS K. **On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment.** Solar Energy, Volume 81, Issue 4, 2007. p. 488-497.

SYNNEFA, A., SANTAMOURIS, V., LIVADA, I., **A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment.** Solar Energy Journal 80, 2006. p. 968–981.

UEMOTO, Kai L.; SATO, Neide M.N.; JOHN, Vanderley M. **Estimating thermal performance of cool colored paints.** Energy and Buildings, v. 42, n. 1, 2010. p. 17–22.

## INSTITUIÇÕES CONSULTADAS

Energy Star Roof Products.  
[http://www.energystar.gov/index.cfm?c=roof\\_prods.pr\\_roof\\_products](http://www.energystar.gov/index.cfm?c=roof_prods.pr_roof_products).  
 EU Cool Roofs Project. <<http://www.coolroofs-eu.eu/>>.  
 Cool Roof Rating Council. <<http://www.coolroofs.org/>>.  
 LBNL Cool Roofs Materials Database. <http://eetd.lbl.gov/coolroofs/>



## 5 MISTURAS ASFÁLTICAS

### 5.1 INTRODUÇÃO

A mistura asfáltica, denominada às vezes de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), é o material mais empregado na construção de pavimentos rodoviários. A mistura é um material artificial que está constituído, basicamente, de ligante asfáltico e agregados. A adequada proporção entre os seus materiais constituintes permite que a mistura se constitua num material durável que pode apresentar um bom desempenho contra três patologias principais; a fadiga, a deformação permanente e o trincamento a baixa temperatura.

### 5.2 AGREGADOS

O termo agregado é definido como o material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto. Os agregados utilizados na pavimentação podem ser classificados em três grandes grupos, segundo sua natureza, tamanho e granulometria.

A composição destes tamanhos de agregados possibilitam que se projete uma gama de diferentes tipos de misturas indo desde as tradicionais misturas densas até as inovadoras misturas drenantes tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) de elevado desempenho.

Em relação às especificações dos agregados minerais, os pesquisadores do programa SHRP escolheram algumas propriedades que consideram importantes, sobretudo para o fenômeno da deformação permanente. O dano por fadiga e o trincamento a baixa temperatura são menos afetados pelas características dos agregados.

As duas categorias de propriedades de agregados especificadas na metodologia Superpave são: as propriedades de consenso que são a angularidade do agregado graúdo, angularidade do agregado fino, partículas chatas e alongadas e o teor de argila; e as propriedades de origem que são a dureza, a sanidade e os materiais deletérios.

- Angularidade do Agregado Graúdo. Esta propriedade é determinada usando a norma ASTM C142/C142M (ASTM,

2010). Neste ensaio, os agregados são analisados manualmente para determinar a presença de faces fraturadas.

- Angularidade do Agregado Miúdo. A angularidade do agregado miúdo é definida como a porcentagem de vazios presentes numa amostra de agregado compactado solto que passa pela peneira No. 8 (2,36 mm). Esta propriedade é determinada usando a Norma ASTM C1252 (ASTM, 2006).
- Índice de Forma dos Agregados, Partículas Alongadas e Achatadas. As partículas alongadas e achatadas são aquelas que tem uma relação de largura com espessura ou comprimento com largura maior do que um valor especificado. Esta propriedade é determinada mediante a norma DNER-ME 086/94.
- Teor de Argila. O teor de argila é definido como a porcentagem de material argiloso contido numa fração de agregado que passa a peneira No. 4 (4,75 mm). Esta propriedade é determinada usando a Norma AASHTO T176 (AASHTO, 2008).
- Dureza. A dureza é a porcentagem de material perdido de uma amostra de agregado após o ensaio de abrasão de Los Angeles. Esta propriedade é determinada usando a norma DNER-ME 035/98.
- Sanidade. A sanidade é exposta como a porcentagem de material perdido de uma amostra de agregado durante o ensaio de durabilidade com sódio e sulfato de magnésio. A norma utilizada para o ensaio é a DNER-ME 089/94.
- Materiais Deletérios. A porcentagem de materiais deletérios numa amostra de agregados é determinada usando a norma DNER-ME 054/97.

### 5.3 LIGANTE ASFÁLTICO

O asfalto é uma substância com propriedades cimentantes que é conhecido pelo homem há mais de 2000 anos. Embora existam depósitos naturais de asfalto, atualmente o ligante é produzido a partir do refino do petróleo.

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), ou ligante asfáltico, é um material com comportamento visco-elástico. No entanto o comportamento viscoso ou elástico depende da temperatura e da frequência e duração do carregamento imposto. Por exemplo, um ligante asfáltico a 60 °C pode fluir a mesma quantidade em uma hora do que um ligante asfáltico a 25 °C em cinco horas. Esta relação de comportamento às vezes é chamada de superposição tempo-temperatura.

Sob altas temperaturas e carregamento lento, o ligante asfáltico se comporta como um fluido viscoso e se deforma. Isso é muitas vezes chamado de comportamento plástico porque depois que o ligante flui, não retorna à sua posição original, o que pode levar a deformação permanente na mistura asfáltica. À baixa temperatura e sob carregamento rápido, os ligantes asfálticos se comportam quase como sólidos elásticos. Eles deformam-se sob as cargas e retornam para sua posição original lentamente quando a carga é retirada. Se a carga aplicada provoca tensões superiores à resistência da mistura, então ocorre uma ruptura a baixa temperatura. Em temperaturas intermediárias, a 60°C, os ligantes asfálticos exibem um comportamento visco-elástico.

O asfalto é constituído principalmente por moléculas orgânicas que podem reagir com o oxigênio no ambiente deixando o material com comportamento mais frágil. Este processo é chamado de oxidação ou envelhecimento do ligante. Na prática, o envelhecimento acontece durante as fases de transporte, usinagem e compactação (envelhecimento a curto prazo) e também a longo prazo no tempo de serviço do pavimento (envelhecimento a longo prazo). Na fase de usinagem, existem películas finas de ligante asfáltico cobrindo o agregado. Com uma área superficial significativa em contato com o oxigênio num ambiente com alta temperatura, a oxidação é intensa e ocorre de forma rápida. A oxidação continua durante o transporte, espalhamento e compactação da mistura asfáltica, mas a uma velocidade menor. Para simular este envelhecimento a curto prazo, em laboratório, utiliza-se o equipamento de Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT). O equipamento Pressure Aging Vestel (PAV) é usado para simular o envelhecimento a longo prazo, que se dá durante a vida útil da rodovia, em laboratório.

A especificação brasileira para o ligante asfáltico de 2005 utiliza o ensaio de penetração para a classificação dos CAPs produzidos no Brasil. A penetração do ligante tem uma relação com a sua dureza e consistência. Assim, CAPs mais duros apresentam uma penetração

menor. Juntamente com a penetração, a especificação relaciona uma série de ensaios que são realizados com o ligante virgem e envelhecido a curto prazo para que se possa avaliar melhor as características físicas do ligante.

O sistema de classificação Performace Graded (PG) para ligantes asfálticos foi desenvolvido pela SHRP (Strategic Highway Research Program) entre os anos de 1987 e 1993. Neste programa, foram desenvolvidos novos ensaios para a caracterização do ligante, abordando fundamentalmente aspectos relacionados com o comportamento reológico.

#### 5.4 METODOLOGIA DE DOSAGEM MARSHALL

Bruce Marshall, enquanto trabalhava no Mississippi State Highway Department no anos 40s, elaborou os conceitos base para o método de dosagem Marshall. O U.S Corps of Engineers realizou pesquisas baseadas nos conceitos de Bruce Marshall e eventualmente criou um método que chamou de Marshall. No Brasil a norma utilizada é a DNER-ME 043/95 “Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall”. O método consta de sete passos que são descritos brevemente a seguir:

- Avaliação dos agregados a serem utilizados segundo as normas respectivas. As propriedades físicas de massa específica, absorção e granulometria são utilizadas para determinar as propriedades volumétricas da mistura.
- Avaliação do ligante asfáltico segundo as especificações vigentes. Após os ensaios são determinadas as temperaturas de usinagem e compactação da mistura.
- Moldagem dos corpos de prova Marshall. Neste passo são moldados três corpos de prova para cada um de cinco teores de ligante asfáltico. As amostras são compactadas utilizando o compactador Marshall.
- Ensaios de estabilidade e fluência Marshall. A estabilidade é definida como a máxima carga de ruptura num corpo de prova Marshall um velocidade de 0,8 mm/s e a fluência, é o deslocamento (redução do diâmetro) vertical da amostra até a falha.

- Densidade e teor de vazios. Estas propriedades são determinadas mediante cálculos usando a massa específica aparente e a massa específica máxima da mistura.
- Tabulação e plotagem dos resultados. Com os dados obtidos nos ensaios, as medias dos resultados podem ser tabulados e comparados com os requisitos exigidos.

No Brasil, a especificação DNIT-ES 031/2004 define os requisitos exigidos para a mistura asfáltica a serem utilizadas em revestimentos (Tabela 5.1). Além dos parâmetros estimados anteriormente, deve ser calculada também a relação betume/vazios (RBV) e a resistência à tração da mistura.

**Tabela 5.1** - Requisitos de dosagem de mistura asfáltica do DNIT-ES 031/2004

Características	Camada de rolamento	Camada de ligação
V <sub>v</sub> , %	3 - 5	4 - 6
RBV, %	75 - 82	65 - 72
Estabilidade mín., kgf (75 golpes)	500	500
RT a 25°Ck mín., Mpa	0,65	0,65

**Fonte.** Bernucci *et al.*, 2008 (adaptado).

## 5.5 METODOLOGIA DE DOSAGEM SUPERPAVE

### 5.5.1 O Strategic Highway Research Program

O Strategic Highway Research Program ou SHRP foi um programa de pesquisa americano desenvolvido entre os anos de 1987 a 1993 com um custo de U\$ 150 milhões. A terceira parte deste investimento foi direcionada para o desenvolvimento de especificações de desempenho de materiais asfálticos que permitissem uma melhor aproximação entre os valores obtidos no laboratório e o comportamento em campo (FHWA; 2000).

O produto final da pesquisa do programa SHRP foi a metodologia Superpave, a qual é um acrônimo de Superior Performing Asphalt Pavements. A metodologia inclui uma especificação sobre o ligante asfáltico, que permite a caracterização do ligante asfáltico em diversas temperaturas e idades, uma série de ensaios e especificações de

agregados, a dosagem da mistura asfáltica, e a análise de desempenho do pavimento. Após 1993, a National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) e outras agências continuaram as pesquisas para desenvolver modelos e ensaios de predição mais precisos. O método atualizado pode ser encontrado na versão da AASHTO MP2 “Superpave Volumetric Mix Design” (AASHTO, 2003).

Os ensaios de ligantes da metodologia Superpave medem propriedades físicas e reológicas que podem ser relacionadas diretamente com o desempenho em campo mediante princípios de engenharia. A especificação do ligante se baseia no clima e na temperatura do pavimento onde se pretende utilizar o ligante.

### **5.5.2 Seleção do Ligante Asfáltico**

O grau de desempenho ou PG dos ligantes é definido por dois números, por exemplo PG 64-22. O primeiro número, 64, é frequentemente chamado de “grau a alta temperatura”. Isto significa que o ligante possui propriedades físicas adequadas quanto a deformação permanente até 64 °C. Esta pode ser a temperatura mais elevada do pavimento, correspondente ao clima, que se espera que o ligante resista. Da mesma forma, o segundo número, -22, é frequentemente chamado de “grau a baixa temperatura” e significa que o ligante possui propriedades físicas adequadas no pavimento até a temperatura de -22 °C. Algumas considerações adicionais são feitas em termos de volume de tráfego (caminhões pesados) e tempo de aplicação de carga (autopistas, corredores de ônibus, etc.), para se especificar adequadamente o ligante em cada caso.

As propriedades físicas e reológicas também são medidas em ligantes que sofreram envelhecimento, de curto e longo prazo, em laboratório, de forma a simular o que ocorre no pavimento real.

O PG do ligante asfáltico, é selecionado baseado no clima da região onde a rodovia será construída. A diferença entre os vários tipos de PG dos ligantes guarda relação com as temperaturas mínima e máxima encontradas na estrutura do pavimento. A temperatura a ser utilizada como parâmetro de escolha do PG do ligante é a temperatura do pavimento medida a 20 mm de profundidade sob a superfície do revestimento.

Utilizando análises teóricas das condições de desempenho, com modelos de fluxo de calor e balanço de energia, e assumindo valores de absorção solar (0,90), transmissão de radiação através do ar (0,81), radiação atmosférica (0,70), e velocidade do vento (4,5 m/s), a equação desenvolvida pelo programa SHRP para estimar a temperatura no pavimento é:

$$T_{20mm} = (T_{ar} - 0,00618Lat^2 + 0,2289Lat + 42,2)(0,9545) - 17,78$$

**Equação 5.1**

Onde:  $T_{20mm}$  = maior temperatura do pavimento (°C) a uma 20 mm de profundidade;

$T_{ar}$  = temperatura média do ar (°C) no período de sete dias consecutivos mais quentes; e,

$Lat$  = latitude geográfica da localização da rodovia, em graus.

### 5.5.3 Estrutura Granulométrica das Misturas

Para definir a curva granulométrica da mistura, a metodologia Superpave utiliza o diagrama de potência 0,45 com limites de controle e zona restrita (Figura 5.1) e duas definições em relação ao tamanho do agregado:

- Tamanho máximo que corresponde a um tamanho de peneira maior que o tamanho máximo nominal.
- Tamanho máximo nominal que corresponde ao tamanho da peneira que retém mais de 10 por cento de toda a composição granulométrica.

A localização dos pontos de controle e da zona restrita depende do tamanho máximo da composição granulométrica. As Tabela 5.2 e Tabela 5.3 mostram estes valores.

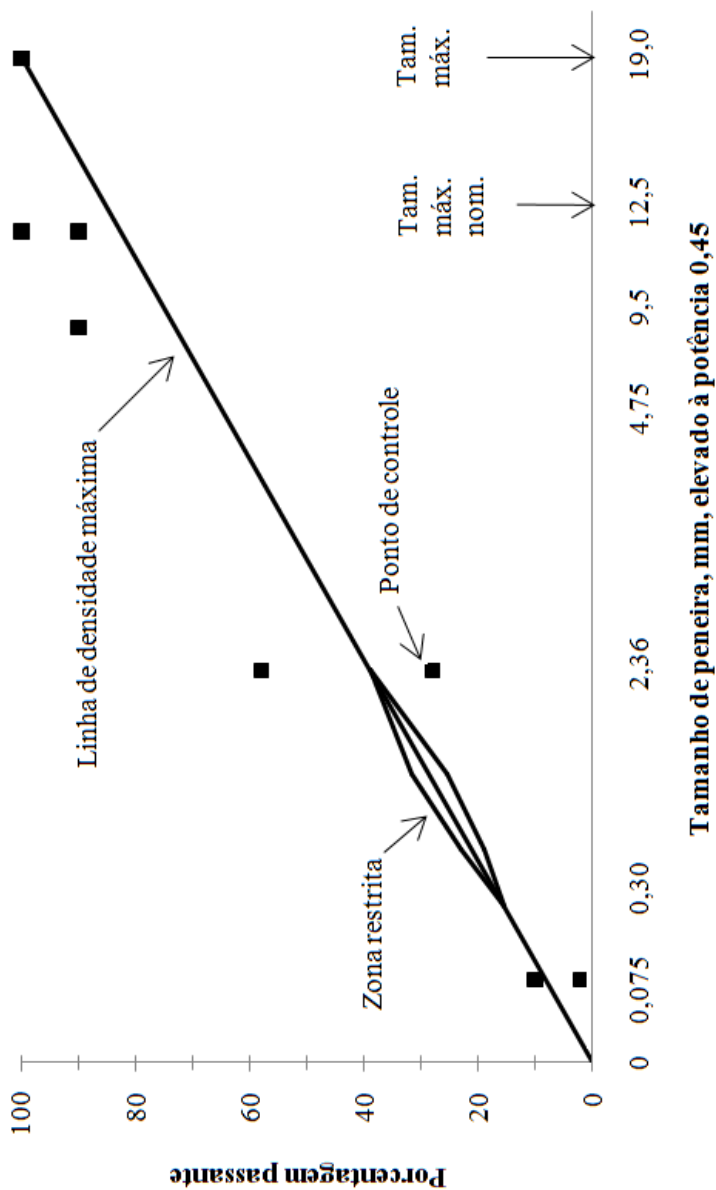


Figura 5.1 – Diagrama de potência 0,45 da metodologia Superpave.



**Tabela 5.2** - Pontos de controle da metodologia Superpave.

Porcentagem passante								
Peneira, mm	9,5 mm		12,5 mm		19 mm		25 mm	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
50,0	-	-	-	-	-	-	-	-
37,5	-	-	-	-	-	-	100	-
25,0	-	-	-	-	100	-	90	100
19,0	-	-	100	-	90	100	-	90
12,5	100	-	90	100	-	90	-	-
9,5	90	100	-	90	-	-	-	-
4,75	-	90	-	-	-	-	-	-
2,36	32	67	28	58	23	49	19	45
1,18	-	-	-	-	-	-	-	-
0,600	-	-	-	-	-	-	-	-
0,300	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075	2	10	2	10	2	8	1	7

**Tabela 5.3** - Zona restrita da metodologia Superpave.

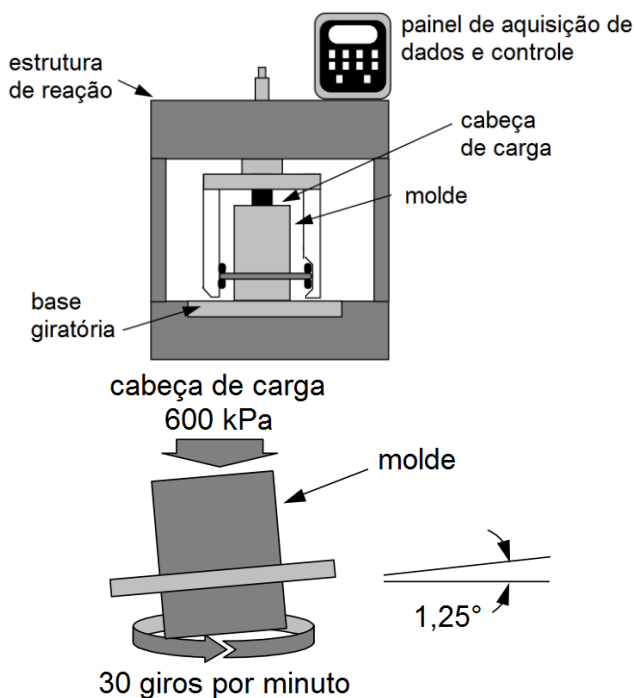
Porcentagem passante								
Peneira, mm	9,5 mm		12,5 mm		19 mm		25 mm	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
4,75	-	-	-	-	-	-	39,5	39,5
2,36	47,2	47,2	39,1	39,1	34,6	34,6	26,8	30,8
1,18	31,6	37,6	25,6	31,6	22,3	28,3	18,1	24,1
0,600	23,5	27,5	19,1	23,1	16,7	20,7	13,6	17,6
0,300	18,7	18,7	15,5	15,5	13,7	13,7	11,4	11,4

### 5.5.4 Ensaio de Compactação na Prensa de Compactação Giratória

A Prensa de Compactação Giratória (PCG) é um equipamento mecânico aperfeiçoado no Programa SHRP que procura simular, em laboratório, os efeitos dos equipamentos industriais na compactação da mistura asfáltica em campo. A estrutura de prensa (Figura 5.2) consta com um sistema hidráulico ou mecânico que fornece uma pressão de

compactação de 600 kPa ao corpo de prova. O diâmetro do dispositivo de carga corresponde nominalmente ao diâmetro interno do molde que é de 150 mm. O medidor de pressão, com indicador digital, mede a pressão do dispositivo de carga durante a compactação. A medida que o corpo de prova se adensa durante a compactação, o medidor de pressão aciona o sistema de carregamento para ajustar a posição do dispositivo de carga a modo de manter a pressão de compactação constante durante o processo.

A medição da altura do corpo de prova é uma função importante da PCG. Utilizando a massa da mistura no molde, o diâmetro do molde e a altura do corpo de prova, a massa específica aparente da mistura é calculada em tempo real, durante o processo de compactação. Todos estes dados são transferidos a um programa de computador que está sincronizado com a PCG e que permite a visualização dos parâmetros mencionados em tempo real.



**Figura 5.2** – Prensa compactadora giratória Superpave.

### 5.5.5 Preparação e Moldagem das Misturas asfálticas

Uma vez selecionado o ligante, os agregados e a composição previa da granulometria das misturas asfáltica, procede-se à sua preparação, usinagem, compactação e ensaio. A seleção final do projeto estrutural do agregado é um processo de tentativa e erro. Este passo consiste em misturar os agregados disponíveis em diferentes porcentagens para chegar a uma granulometria que atenda aos requisitos da metodologia Superpave. Três misturas tentativas são normalmente empregadas com este propósito. Uma das três misturas tentativa é considerada ideal se possuir propriedades volumétricas aceitáveis (baseadas no tráfego e nas condições ambientais) nos teores de ligante previstos em projeto. Uma vez selecionado, a mistura tentativa torna-se o projeto estrutural do agregado (esqueleto mineral).

Quando uma estrutura de agregado é selecionada, devem ser compactados corpos de prova adicionais variando o teor de ligante. As propriedades destas misturas devem ser avaliadas para determinar o teor de ligante ótimo. Uma mistura para determinação da Gmm (massa específica máxima) e um mínimo de dois corpos de prova devem ser compactados na PCG para cada um dos seguintes teores de ligante:

- Teor estimado de ligante;
- Teor estimado de ligante  $\pm 0,5\%$ ; e,
- Teor estimado de ligante + 1,0%.

Para padronizar o efeito do ligante, as misturas precisam ser usinadas e compactadas sob condições de temperatura que correspondam à viscosidade de  $0,170 \pm 20$  Pa s e  $0,280 \pm 30$  Pa s, respectivamente. Estes valores de temperatura devem ter sido previamente determinados no ensaio de viscosidade do ligante.

Após a homogeneização a mistura deve permanecer em estufa durante duas horas na temperatura de compactação para simular o envelhecimento que ocorre a curto prazo durante o transporte do material desde a usina até o local da obra e também para possibilitar a absorção do ligante pelo agregado. Os moldes de compactação e as bases devem ser condicionadas a  $135$  °C por, pelo mínimo, 30 a 45 minutos, antes da compactação.

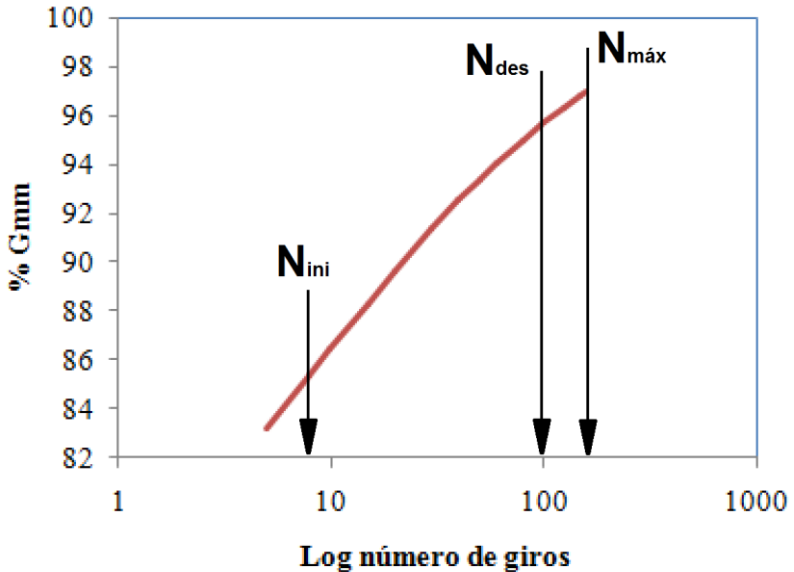
Após o período de duas horas, inicia-se a compactação. O número de giros utilizados para a compactação é determinado com base no tráfego para 20 anos de projeto. Três níveis de giros são importantes:

- O número de giros de projeto ( $N_{\text{projeto}}$  ou  $N_{\text{des}}$ );
- O número de giros inicial ( $N_{\text{inicial}}$  ou  $N_{\text{ini}}$ ); e
- O número de giros máximo ( $N_{\text{máximo}}$  ou  $N_{\text{máx}}$ ).

O número de giros de projeto  $N_{\text{des}}$  está dentro de um intervalo entre 50 a 125 giros e é função do nível do tráfego. Os níveis dos números de giros são apresentados na Tabela 5.4. A apresentação da curva de compactação é mostrada na Figura 5.3.

**Tabela 5.4** - Esforço de compactação giratório Superpave.

ESALs de projeto (milhões)	Parâmetros de compactação			Aplicações típicas do pavimento
	$N_{\text{inicial}}$	$N_{\text{projeto}}$	$N_{\text{máximo}}$	
< 0,3	6	50	75	Tráfego muito leve (estradas locais; vias urbanas onde o tráfego de caminhões é proibido).
0,3 a < 3	7	75	115	Tráfego médio (estradas coletoras; a maioria das estradas municipais)
3 a < 30	8	100	160	Tráfego médio a pesado (estradas urbanas; rotas estatais; rodovias federais)
$\geq 30$	9	125	205	Tráfego pesado (sistema interestadual; estações de pesagem de caminhões)



**Figura 5.3** – Curva de compactação de uma amostra na PCG.

As amostras de prova são compactadas até o  $N_{des}$  desejado. As relações entre o  $N_{des}$ ,  $N_{máx}$  e o  $N_{ini}$  são:

$$\text{Log}_{10}N_{máx} = 1,10\text{Log}_{10}N_{des} \quad \text{Equação 5.2}$$

$$\text{Log}_{10}N_{ini} = 0,45\text{Log}_{10}N_{des} \quad \text{Equação 5.3}$$

A massa específica aparente ( $G_{mb}$ ) dos corpos de prova deve ser medida segundo a norma ASTM D2726/2726M. A massa específica máxima ( $G_{mm}$ ) deve ser medida utilizando a norma ASTM 2041.

A prioridade da metodologia de dosagem Superpave é que um teor ótimo de ligante seja utilizado para cada mistura de prova (correspondentes às três granulometrias testadas) de forma que se atinja um grau de compactação de 96% da  $G_{mm}$ , ou 4% de vazios de ar a um  $N_{des}$ . Se isso não acontece com nenhuma das misturas de prova, as outras propriedades volumétricas não podem ser avaliadas. Se as misturas apresentassem porcentagens de vazios de ar maiores ou menores que 4%,

então se deve estimar o teor ótimo de ligante de cada mistura para que se atinja o grau de compactação de 96% da  $G_{mm}$  ao  $N_{des}$ .

A metodologia Superpave indica que as misturas devem apresentar um grau de compactação máximo de 98% ao  $N_{máx}$ . Este parâmetro serve para proteger a mistura de uma compactação excessiva no campo sob as condições de tráfego e que, eventualmente, a mesma se torne plástica e apresente problemas de deformação permanente. Após a seleção da combinação de agregados e do teor de ligante ótima, dois corpos de prova adicionais são compactados até o  $N_{máx}$  e uma amostra é submetida ao ensaio de massa específica máxima. Os dados relativos ao  $N_{ini}$ ,  $N_{des}$  e  $N_{máx}$  são novamente avaliados e devem cumprir com os critérios da metodologia Superpave.

### 5.5.6 Requisitos da Mistura asfáltica

Os requisitos de dosagem da mistura asfáltica na metodologia Superpave são os seguintes:

- Parâmetros volumétricos de mistura;
- Teor de filler; e
- Sensibilidade à água.

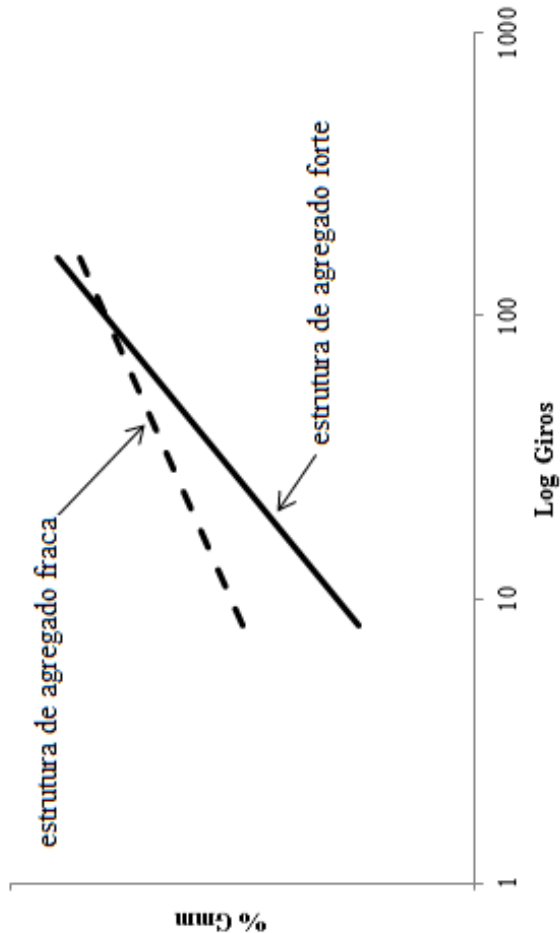
Valores específicos para estes parâmetros são aplicados durante a dosagem da mistura no Nível I.

#### 5.5.6.1 Requisitos Volumétricos de Mistura

Os requisitos volumétricos de mistura são a porcentagem vazios na mistura ( $V_v$ ), porcentagem de vazios no agregado mineral (VAM), porcentagem de vazios preenchidos com ligante (RBV), teor de ligante ( $P_{be}$ ), e massa específica aparente ( $G_{mb}$ ) da mistura durante a compactação no  $N_{ini}$  e  $N_{máx}$ . A porcentagem de vazios na mistura é usada como base para a seleção do teor de ligante asfáltico. Na metodologia Superpave, a porcentagem de vazios correspondente ao  $N_{des}$  é de 4% .

O grau de compactação é determinado para o  $N_{ini}$  e  $N_{des}$  para cada mistura de prova. A porcentagem de vazios ( $V_v$ ) e vazios no agregado mineral (VMA) devem ser determinadas para o  $N_{des}$ . As características da curva de compactação obtidas durante a compactação fornecem

informação sobre a resistência relativa da estrutura do agregado e do teor de ligante (trabalhabilidade da mistura). Para um mesmo teor de ligante, as misturas com estruturas de agregado mais fracas apresentam inclinações mais suaves do que as misturas com estruturas mais fortes (Figura 5.4).



**Figura 5.4** – Curva de compactação de duas misturas com estruturas de agregados diferentes.

As propriedades estimadas são comparadas com os critérios aplicados à mistura, que dependem do nível de tráfego e do tamanho máximo nominal do agregado Tabela 5.5.

**Tabela 5.5** – Critérios de aceitação das misturas Superpave.

ESALs (milhões)		< 0,3	0,3 a < 3	3 a < 10	10 a < 30	≥ 30
Massa específica aparente requerida, % Gmm	Nini	≤ 91,5	≤ 90,5	≤ 89,0		
	Ndes	96				
	Nmáx	≤ 98,0				
Vazios no agregado mineral (VMA), % mínima	Tamanho máximo nominal do agregado (mm)	37,5	11			
		25	12			
		19	13			
		12,5	14			
		9,5	15			
Vazios preenchidos com ligante, %		70 -80	65 - 78	65 -75		
Relação filer-betume		0,6 - 1,2				

### 5.5.6.2 Relação Filer-Betume

A relação filer-betume é a relação entre a porcentagem em peso do agregado fino menor que 0,075 mm e o teor efetivo de ligante exprestado como uma porcentagem do peso total da mistura. Um valor aceitável está na faixa de 0,6 a 1,2 para todas as misturas.

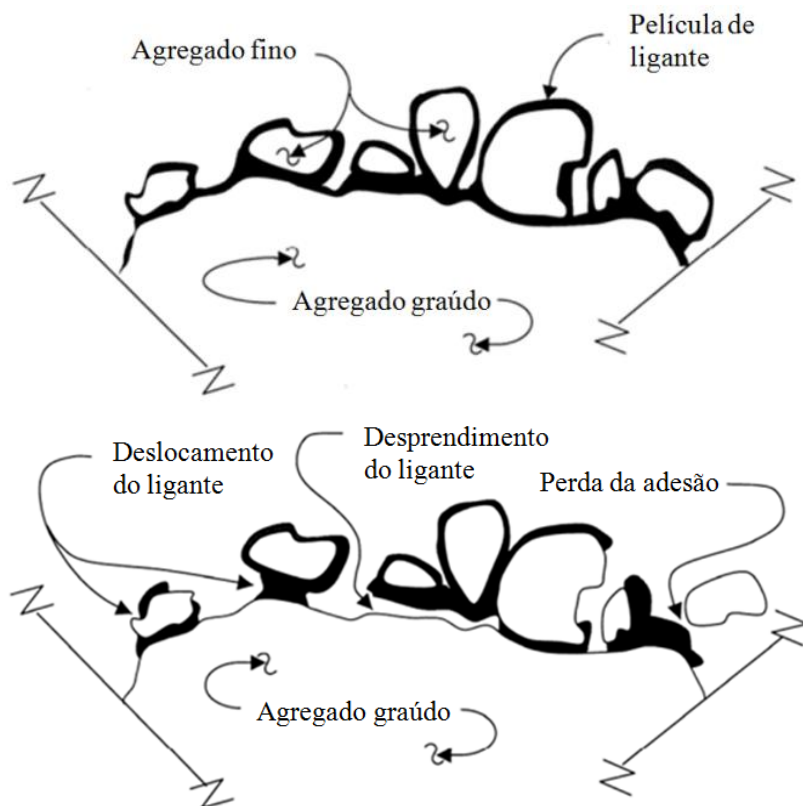
### 5.5.6.3 Sensibilidade à Água

A adesão entre o ligante e o agregado é uma propriedade importante e complexa que é decisiva para o bom desempenho do revestimento. Esta propriedade é fortemente afetada pela presença de água no revestimento. O dano por umidade induzida nos revestimentos asfálticos pode ser associado a dois mecanismos: perda da adesão e perda da coesão (Figura 5.5).

No primeiro mecanismo, a água penetra entre o ligante e o agregado e descola a película de ligante deixando o agregado sem proteção. Isto porque o agregado tem maior afinidade pela água (natureza hidrófila) do que pelo ligante. O segundo mecanismo inclui a interação da água com o ligante asfáltico e reduz a coesão do mesmo. Ambos



mecanismos levam a uma severa redução na resistência da mistura asfáltica (Liang, 2008).



**Figura 5.5** – Mecanismo de interação da água com o ligante asfáltico.

**Fonte:** Liang, 2008 (adaptado).

A sensibilidade à água de uma mistura asfáltica pode ser avaliada mediante a norma AASHTO T 283 “Resistência ao Dano pela Umidade Induzida em Misturas Betuminosas Compactadas”, também conhecido como ensaio de Lottman Modificado. Este ensaio tem duas finalidades: serve para identificar qual combinação de ligante asfáltico e agregado é a mais suscetível à umidade e para medir a eficiência de aditivos melhoradores de adesividade.

Para avaliar a sensibilidade à água, são moldados, no mínimo, 6 corpos de prova cilíndricos de mistura asfáltica na PCG. As amostras serão divididas em dois grupos; o primeiro grupo será ensaiado sem condicionamento e o segundo será ensaiado após um condicionamento que consiste na saturação (70%), congelamento a  $-18^{\circ}\text{C}$  (16 horas) e banho maria a  $60^{\circ}\text{C}$  (24 horas). Os dois conjuntos de corpos de prova são rompidos a tração por compressão diametral na temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ . A relação entre a resistência média dos corpos de prova condicionados com a resistência dos corpos de prova não condicionados deve ser maior a 0,7.

## 5.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A adição de pigmentos possivelmente afeta os parâmetros mecânicos e de desempenho das misturas asfálticas coloridas. Para esta avaliação foram definidos alguns tipos de ensaios possíveis de serem realizados na UFSC.

### 5.6.1 Ensaio de Resistência à Tração

Este ensaio foi realizado para avaliar o efeito dos pigmentos na resistência à tração nas misturas coloridas. O ensaio de resistência à tração (RT) é um ensaio de ruptura que tem se mostrado um parâmetro importante na caracterização das misturas asfálticas. A configuração do ensaio consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a este diâmetro. Este ensaio é regulamentado no Brasil pela norma DNIT 136/2010 - ME.

Segundo a norma DNIT 031/2004-ES, o valor de RT mínimo para as misturas asfálticas deve ser de 0,6 MPa, valores típicos para CBUQ situam-se na média entre 0,5 e 2,0 MPa. Misturas drenantes ou camadas porosas de atrito (CPA) tendem a mostrar valores mais baixos, da ordem de 0,5 a 0,8 MPa; misturas tipo SMA situam-se geralmente entre 0,8 a 1,2 MPa; misturas de módulo elevado (EME) exibem valores da ordem de 2,0 a 3,0 MPa.

### 5.6.2 Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência (MR) foi realizado para avaliar o efeito do pigmento na rigidez das misturas asfálticas coloridas e compará-los com os resultados da mistura de referência. Os ensaios foram realizados somente nas misturas asfálticas densas.

O ensaio é padronizado no país pela norma DNIT 135/2010. Este ensaio é realizado aplicando-se uma dinâmica diametral que é no máximo 15% do valor da RT. Mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura. Os corpos de prova cilíndricos são de aproximadamente 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, no caso de corpos de prova moldados no compactador Marshall.

Valores típicos como a ordem de grandeza para simples orientação, podem ser considerados na faixa de 2 000 a 8 000 MPa para misturas a 25 °C, sendo os menores correspondentes a misturas com ligantes modificados por polímeros ou por borracha e os maiores a misturas com asfaltos de consistência dura. Deve-se ainda considerar a influência da distribuição granulométrica, do tamanho máximo do agregado, da cor do ligante e da idade da mistura.

### 5.6.3 Ensaio de Deformação Permanente

A deformação permanente ou *rutting* (em inglês) se refere à deformação plástica da mistura asfáltica sob o passo dos veículos. Esta deformação pode dar-se na forma de uma deformação lateral do revestimento sob a trilha de roda (sem variação de volume) ou por densificação adicional (sem variação de volume), pelo tráfego, das camadas do pavimento.

O ensaio foi realizado para avaliar a influência dos pigmentos na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. Isto porque as misturas coloridas estudadas serão utilizadas como camadas de rolamento de pequena espessura assentadas sobre uma camada de mistura asfáltica convencional.

Existem vários tipos de ensaios para avaliar a deformação permanente entre os quais se destacam os ensaios de *creep* estático, *creep* dinâmico e os simuladores de laboratório. Para este ensaio foi utilizado o

simulador de tráfego do Laboratoire Central des Pontes et Chaussées (LCPC) (Figura 5.6).

Estes ensaio não permite a visualização exata do quanto uma mistura deformará em campo, porém permite ordenar a mistura asfáltica quanto a este requisito ou verificar os parâmetros que podem influenciar na deformação. As diretrizes francesas têm limitado a deformação permanente obtida no simulador de tráfego em 10% como limite aceitável.



Figura 5.6 – Simulador de tráfego do LCPC.

#### 5.6.4 Ensaio Cântabro

O ensaio Cântabro é um ensaio complementar que mede a resistência à desagregação das misturas asfálticas a qual está relacionada com o arrancamento progressivo de agregados do revestimento por causa

do atrito pneu-pavimento. Este ensaio é padronizado no Brasil pela norma DNER-ME 383/99.

O ensaio consiste na análise das massas de corpos de prova Marshall de misturas asfálticas drenantes ou porosas, submetidos ao aparelho de abrasão Los Angeles. O desgaste máximo admitido é de 25% para misturas asfálticas porosas.

Os resultados deste ensaio permitiram avaliar a influência do pigmento frio na resistência ao desgaste das misturas asfálticas coloridas e compará-los com os resultados da mistura de Referência. O ensaio foi realizado somente para as misturas asfálticas CPA.

## 5.7 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA TEXTURA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

### 5.7.1 Ensaio de Mancha de Areia

Este ensaio foi realizado para avaliar a macrotextura de todos os revestimentos de granulometria densa estudados. A classificação da superfície é importante devido a que a rugosidade superficial influi diretamente na refletância solar dos revestimentos. O ensaio é baseado na norma ASTM E 965 (2006) e consiste no espalhamento, em forma de círculo, de um volume conhecido de areia com granulometria padronizada sobre uma superfície. O ensaio pode ser realizado sobre qualquer tipo de superfície com exceção das superfícies de misturas porosas. Nestas misturas, a areia tende a penetrar dentro da mistura invalidando o ensaio. A partir do volume de areia utilizado e da área coberta pela mesma, calcula-se a profundidade média da textura coberta.

A classificação da macrotextura é dada pela altura média de mancha de areia segundo os critérios do Quadro 5.1.

**Quadro 5.1 - Classes de Macrotextura**

Classe	Altura média de mancha de areia (mm)
Muito fina ou muito fechada	$H \leq 0,20$
Fina ou fechada	$0,20 < H \leq 0,40$
Média	$0,40 < H \leq 0,80$
Grosseira ou aberta	$0,80 < H \leq 1,20$
Muito grosseira ou muito aberta	$H > 1,20$

### 5.7.2 Ensaio de Drenabilidade

Este ensaio foi realizado para medir a drenabilidade dos revestimentos de granulometria porosa estudados. Este parâmetro está relacionado com a textura superficial, o qual não é possível de ser medido, nas misturas porosas, mediante o ensaio de mancha de areia.

O ensaio está baseado na norma NF P 98 254-3 (1993) e avalia a permeabilidade das misturas asfálticas, especialmente das misturas de tipo drenante. O método de ensaio utiliza um tubo de acrílico transparente acoplado a um fundo perfurado com dimensões padrão, colado a um anel de borracha o qual está em contato direto com a superfície do revestimento (Fontes, 2009). No orifício de escoamento da água, colocase um tamponamento para vedação.

No tubo existem duas marcações a diferentes alturas que servem para fazer as leituras com o cronômetro. O tubo é apoiado na superfície do revestimento e preenchido com água. Após a retirada da tampa de vedação, cronometra-se o tempo gasto para o volume de água entre as duas marcas seja escoado (Barra, 2009).

## 5.8 RESUMO DO CAPÍTULO

No presente capítulo foi feita uma revisão dos materiais componentes, das metodologias de projeto da mistura e dos ensaios de caracterização mecânica da mistura asfáltica. A adequada proporção entre o agregado, ligante e os parâmetros volumétricos permite que a mistura tenha um bom desempenho quanto à fadiga, à deformação permanente e ao trincamento a baixa temperatura.

O ligante asfáltico é um material com comportamento visco-elástico e termo-suscetível. O seu comportamento depende da temperatura e da frequência e duração do carregamento imposto. No Brasil, o ensaio de penetração, realizado a 25 °C, é utilizado para classificar os ligantes produzidos no país. Além do ensaio de penetração, a especificação relaciona outros ensaios que permitem avaliar as características físicas do ligante. No presente estudo, os ligantes foram submetidos a ensaios de caracterização que são parte tanto da especificação brasileira como da especificação Superpave.

Os agregados são materiais granulares que podem ter diversas origens. A granulometria do agregado influi diretamente no tipo e no desempenho de mistura asfáltica. No presente estudo as proporções dos agregados foram ajustados para produzir misturas asfálticas com dois tipos de granulometrias: uma mistura densa e uma mistura porosa.

A metodologia Marshall de dosagem de mistura asfáltica é amplamente utilizada no Brasil e em vários outros países devido à sua praticidade e ao fato de não precisar de equipamentos muito avançados para sua implementação. A metodologia Superpave é menos empírica e faz uso de equipamentos mais sofisticados que permitem um melhor projeto da mistura. Esta metodologia foi desenvolvida, basicamente, para misturas densas, não existindo, ainda, uma metodologia padronizada para misturas abertas (porosas). Por este motivo, no presente estudo, a dosagem da mistura asfáltica densa foi realizada segundo a metodologia Superpave. Para as proporções de dosagem da mistura asfáltica porosa, foram adotadas as recomendações de Meurer Filho (2001), no qual a dosagem foi realizada segundo a metodologia Marshall.

Na metodologia Superpave, a prensa de compactação giratória é utilizada na moldagem das amostras. Os dados coletados pela prensa servem para estimar o grau de densificação das misturas devido ao esforço aplicado e avaliar a trabalhabilidade da mistura. As misturas compactadas segundo a metodologia Marshall e Superpave passam por um processo onde as propriedades volumétricas, teor de filer e sensibilidade à água são avaliados. Para serem aceitas, os resultados da avaliação devem respeitar os limites estabelecidos pelas metodologias.

As misturas estudadas passaram por uma série de ensaios mecânicos com a finalidade de caracterizá-las quanto ao desempenho frente à adição de pigmentos. No presente estudo, as misturas asfálticas foram submetidos aos ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, deformação permanente e Cântabro. Os ensaios de resistência à tração e deformação permanente foram realizados tanto para a mistura densa como para a mistura porosa. O módulo de resiliência foi realizado só para a mistura densa e o ensaio Cântabro só para a mistura porosa.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T-283. **Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage.** Washington, D. C, 1989.

AASHTO T176. **Standard Method of Test for Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test.** Washington, D. C, 2008.

ABPV – Associação Brasileira de Pavimentação. **Informativo Técnico Sobre Avaliação da Resistência à Derrapagem Através de Aparelhagem Portátil.** Boletim Técnico, Rio de Janeiro, n. 18, 1999.

AFNOR NF P 98-253-1. **Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 1: Estai d’Orniérage.** Association Française de Normalisation, AFNOR, 1993.

AFNOR NF T 98-254-3. **Mesure de Propriétés Liées à la Perméabilité des Matériaux des Mélanges Hydrocarbonés - Partie 3: Estai au Drainomètre de Chantier.** Association Française de Normalisation, AFNOR, 1993.

ASTM Standard C142/C142M. **Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, DOI: 10.1520/D5821, [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C1252. **Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, DOI: 10.1520/C1252-06, [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard D2041/D2041M. **Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, DOI: 10.1520/D2041\_D2041M-11, [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard D2726/D2726M. **Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, DOI: 10.1520/D2726\_D2726M, [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard D2872-12e1 **Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/D2872-12E01, [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard D4402/D4402M-13 **Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/D4402\_D4402M, [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard D6521-13 **Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/D6521, [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard D7175-08 **Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/D7175-08, [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard E965-96, 2006. **Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, DOI: 10.1520/E0965-96R06, [www.astm.org](http://www.astm.org).

BARRA B. S. **Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas.** Tese de Doutorado. Florianópolis, 2009. p. 327.

BERNUCCI L. B., MOTTA L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B., **Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro. Petrobras. Abeda, 2006.

BUTTON, Joe W. *et al.* **Significance of Restricted Zone in Superpave Aggregate Gradation Specification.** Transportation Research Board, 2002.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 035/98. **Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles”.** Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 054/97. **Equivalente de areia**. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 086/94. **Agregados – determinação do índice de forma**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 089/94. **Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER - ME 383/99. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro** Rio de Janeiro, 1999.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT-ES 031/2004. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. DNIT 135/2010 – ME. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. DNIT 136/2010 – ME. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

Federal Highway Administration (FHWA) **Superpave Fundamentals. Reference Manual**. NHI Course #131053, 2000.

FLINTSCH, Gerardo W. **Composite Pavement Systems: Synthesis of Design and Construction Practices**. 2008.

FONTES L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Universidade do Minho. Florianópolis, 2009, p. 588.

FHWA, T. F. **The Handbook of Highway Engineering**, Taylor & Francis Group. Florida, USA. 2006, p. 888.

LAVIN, Patrick G. **Asphalt Pavements - A practical guide to design, production, and maintenance for engineers and architects**. 2003.

MATHEW, Tom V. **Introduction to Transportation Engineering**. v. 320, 2007.

MEURER FILHO, E. **Estudo de Granulometria Para Concretos Asfálticos Drenantes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2001.

MOTTA L. M., TONIAL I., CONSTANTINO R. S., **Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas. Tradução Comentada**. Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro. 1996.

PETERSON, Kent *et al.* **Asphalt Paving Design Guide**. Minnesota Asphalt Pavement Association.

## 6 MÉTODO DA PESQUISA

A revisão bibliográfica permitiu obter informações importantes acerca do panorama atual e das medidas de mitigação do fenômeno da Ilha de Calor Urbana. Na área da construção civil, as melhores opções estão relacionadas com a mudança de cor das superfícies e o uso de materiais frios, de alto albedo e emitância térmica. Na área da pavimentação urbana, no entanto, estas alternativas são aplicáveis de forma limitada.

Em todos os trabalhos consultados, há convergência no sentido de que o incremento do valor do albedo dos revestimentos é a melhor opção para diminuir o armazenamento de calor nos pavimentos. As cores mais claras, como as do concreto Portland ou as das mistura asfáltica claras, oferecem maiores valores de refletância solar. No entanto, existe o problema em alguns casos da exposição prolongada da população à radiação solar refletida que, além de causar incomodo, pode ocasionar danos à saúde ocular.

Os pigmentos inorgânicos de óxidos metálicos mistos são uma boa alternativa para incrementar o albedo total dos pavimentos já que incrementam, sobretudo, a refletância da região infravermelha do espectro solar. Para evitar o brilho excessivo dos materiais de pavimentação, pode-se recorrer ao uso de pigmentos escuros. Desta forma, os pavimentos apresentarão um maior valor de refletância solar, mas mantendo a cor escura.

O método da pesquisa consiste em nove etapas que são descritas a seguir.

### 6.1 ETAPA 1 – REFLETÂNCIA DOS LIGANTES COLORIDOS

Foram avaliados oito tipos de pigmentos, sete em pó e um em grãos, de dois fabricantes diferentes. Os pigmentos em pó foram denominados de Amarelo, Marrom A, Marrom B, Marrom C, Preto, Verde e Vermelho A. O pigmento em grão foi denominado Vermelho B. Os pigmentos avaliados são mostrados nas Figura 6.1 a Figura 6.4.



(a)



(b)

**Figura 6.1** – Pigmentos utilizados na pesquisa: Amarelo (a), Marrom A (b).



(c)



(d)

**Figura 6.2** – Pigmentos utilizados na pesquisa: Marrom B (c), Marrom C (d).



(e)



(f)

**Figura 6.3** – Pigmentos utilizados na pesquisa: Preto (e), Verde (f).





(g)



(h)

**Figura 6.4** – Pigmentos utilizados na pesquisa: Vermelho A (g) e Vermelho B granulado(h).

Inicialmente se analisou a possibilidade de realizar o ensaio de refletância com os pigmentos diluídos para medir a transmitância de luz da solução de acordo com o procedimento descrito no item 2.7.3. O valor de transmitância da solução medida no espectrofotômetro não poderia, porém, ser relacionada com o valor de refletância medida com o piranômetro em campo. Optou-se, então, por realizar o ensaio de refletância da mistura do pigmento com o ligante, com uso da esfera integradora do espectrofotômetro.

Para a obtenção dos ligantes coloridos, uma porção de ligante com CAP 50/70, ou ligante albino, e de pigmento foram aquecidos a uma temperatura de 100 °C. Posteriormente, ambos foram pesados, misturados e despejados em uma tampa metálica de 2,5 cm de diâmetro e 0,7 cm de altura para conformação da amostra.

### **6.1.1 Influência do Tipo de Pigmento na Refletância dos Ligantes**

A influência do tipo de pigmento na refletância dos ligantes coloridos foi avaliada, utilizando uma proporção pigmento/ligante única. Para tal fim foram preparadas dez amostras. Sete amostras foram preparadas misturando-se ligante CAP 50/70 e pigmento em pó na proporção de 4,9:4. Esta proporção foi escolhida por recomendação do fabricante, a porcentagem de pigmento recomendada pelo fabricante é de 4% e a porcentagem de ligante para a mistura asfáltica de referência, previamente dosada foi de 4,9%. Uma amostra foi preparada misturando pigmento Vermelho B com ligante asfáltico CAP 50/70 na proporção de 4,5:2,4 por recomendação do fabricante. Uma amostra foi elaborada misturando pigmento amarelo com ligante albino na proporção de 4:7,3; esta alta proporção de ligante é necessária para dar coesão suficiente à mistura asfáltica.

Como parâmetro de referência, foi utilizada uma amostra de CAP 50/70 para comparar o valor da refletância dos ligantes coloridos e a avaliar o seu desempenho. Não foi possível preparar uma amostra de ligante albino puro porque, devido à cor translúcida do material, o feixe de luz do espectrofotômetro não seria completamente refletido pelo ligante mas pelo material da tampa de metal no fundo da amostra, alterando o resultado.

As amostras de ligante colorido foram denominadas de forma similar ao pigmento que foi utilizado na sua elaboração. Por exemplo, o

nome Amarelo-albino indica que a amostra foi elaborada com pigmento Amarelo e ligante albino. Já o nome Verde indica que a amostra foi elaborada com pigmento Verde e CAP 50/70. A proporção dos materiais utilizados na elaboração dos ligantes coloridos é mostrada na Tabela 6.1.

A cor final do ligante colorido foi fortemente influenciada pela cor do ligante. As amostras elaboradas a partir da mistura dos pigmentos e do CAP 50/70 resultaram num material de cor escura. A amostra Amarelo, por exemplo, foi a mais afetada neste sentido apresentando uma coloração semelhante verde escuro e dificilmente esta mistura poderia ter sido reconhecida como amarela. Em contrapartida, a mistura do ligante albino e pigmento Amarelo resultou em uma mistura de cor bem clara.

**Tabela 6.1** – Proporção do ligante e dos pigmentos das amostras de ligantes coloridos.

Amostra de ligante colorido	Proporção dos materiais, %		
	CAP 50/70	Ligante albino	Pigmento
Amarelo-albino	-	7,3	4
Amarelo	4,9	-	4
Marrom A	4,9	-	4
Marrom B	4,9	-	4
Marrom C	4,9	-	4
Preto	4,9	-	4
Verde	4,9	-	4
Vermelho A	4,9	-	4
Vermelho B	4,9	-	2,4
Referência	4,9	-	-

### 6.1.2 Influência da Porcentagem de Pigmento na Refletância dos Ligantes

Os resultados do ensaio de refletância serviram para identificar aqueles pigmentos com baixa refletância solar e descartá-los da pesquisa. Uma nova sequência de ensaios de refletância foi realizada, mas desta vez com uso de amostras coloridas com proporções variáveis de ligante e pigmento. Os pigmentos coloridos utilizados nesta nova sequência de ensaios foram o Amarelo, o Amarelo-albino, o Verde, o Vermelho A e o

Vermelho B (Figura 6.5). O objetivo do ensaio foi verificar se o aumento da proporção do pigmento na mistura incrementa significativamente a refletância da mistura. Para este novo ensaio, a proporção do ligante se manteve a mesma e a proporção do pigmento em pó variou em  $\pm 1$  e  $\pm 2$ . No caso das amostras com pigmento Vermelho B, a proporção do pigmento se manteve a mesma e a proporção do ligante variou em  $\pm 0,5$  e  $\pm 1$ . As proporções utilizadas no ensaio são mostradas na Tabela 6.2.



**Figura 6.5** – Ligantes coloridos utilizados no ensaio de refletância em laboratório.

**Tabela 6.2** – Ligante coloridos com proporções variáveis de pigmento ou ligante.

Proporção dos materiais					
Ligante	Pigmento	Ligante	Pigmento	Ligante	Pigmento
Albino	Amarelo	CAP 50/70	Amarelo – Verde – Vermelho A	CAP 50/70	Vermelho B
7,3	2	4,9	2	5,5	2,4
7,3	3	4,9	3	5,0	2,4
7,3	4	4,9	4	4,5	2,4
7,3	5	4,9	5	4,0	2,4
7,3	6	4,9	6	3,5	2,4

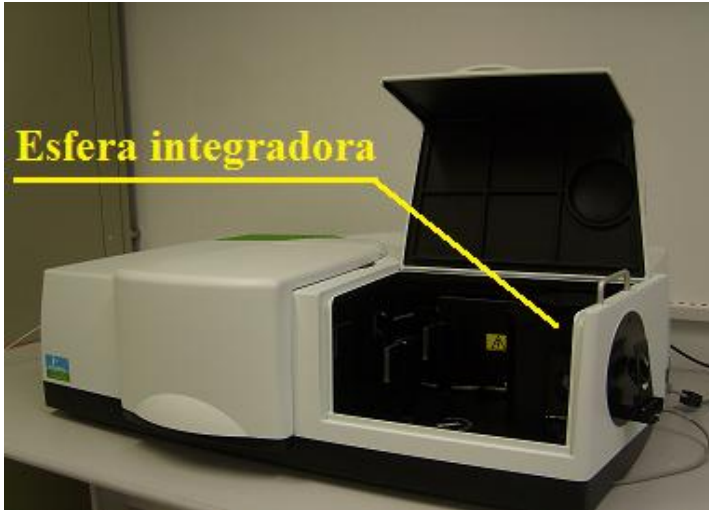
### 6.1.3 Influência do Tipo de Ligante na Refletância Solar

Na Tabela 6.3 foi possível verificar que o tipo de ligante influenciou na aparência das amostras Amarelo-albino e Amarelo. A diferença de cores entre as duas amostras indicaria que ambas possuem valores de refletância distintos. Para comprovar esta hipótese, foram comparados os resultados de refletância das amostras Amarelo-albino e Amarelo com proporções de pigmento/ligante similares. As proporções das amostras analisadas são mostradas na Tabela 6.3.

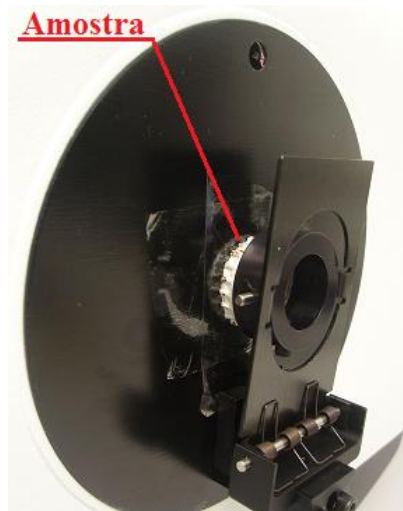
**Tabela 6.3** – Proporções dos ligantes Amarelo e Amarelo-albino.

Proporção dos materiais			
Amostra	Ligante	Pigmento	Lig/pig
Amarelo	4,9	2	2,45
	4,9	3	1,23
Amarelo-albino	7,3	4	2,43
	7,3	6	1,22

Os ensaios de refletância dos ligantes coloridos foram realizados de acordo com a norma ASTM E903-96 “Standard Test Method for Solar Absorption, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres” utilizando-se um espectrofotômetro UV/Vis/NIR com esfera integradora LAMBDA 750 UV/Vis/NIR e LAMBDA 1050 UV/Vis/NIR (Figura 6.6).



(a)



(b)

**Figura 6.6** - Espectrofotômetro PERKIN ELMER (a) e esfera integradora (b).

Nesta etapa de pesquisa foram utilizados dois termos no tratamento dos dados: refletância espectral e refletância solar. A refletância espectral refere-se à porcentagem de radiação refletida por cada comprimento de onda do espectro. Por exemplo, o ligante CAP 50/70 apresenta uma

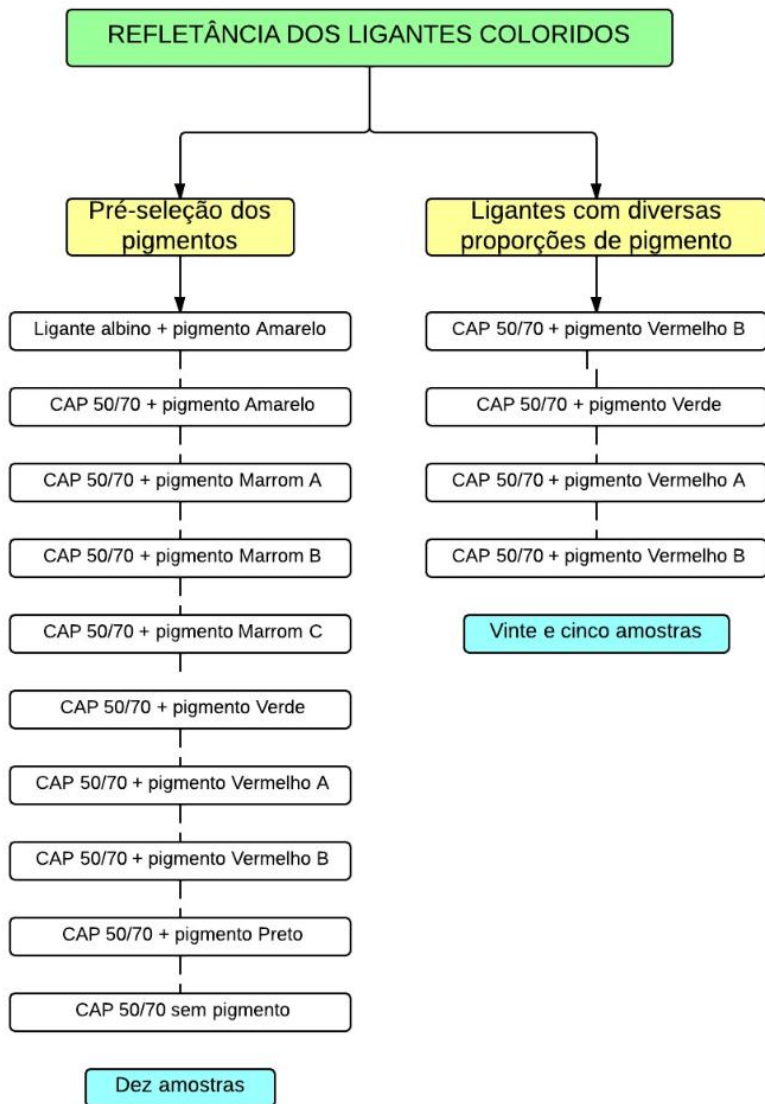
refletância espectral de, aproximadamente, 5% nos 750 nm de comprimento de onda. Isso significa que, quando atingido pelo feixe de radiação do espectrofotômetro com comprimento de onda de 750 nm, o ligante reflete somente 5% e absorve 95% desta radiação.

Já o termo de refletância solar refere-se ao valor da refletância espectral normalizado em

$\text{W m}^{-2}$ . Para realizar a normalização deve-se multiplicar o valor da refletância espectral a um certo comprimento de onda pelo valor da irradiância do espectro solar especificado na norma ASTM G173-03 para um coeficiente de AM 1,5 (Figura 2.7). Por exemplo, para calcular o valor da refletância solar do ligante CAP 50/70 a 750 nm, deve-se multiplicar o valor da irradiância solar ( $1,23 \text{ W m}^{-2}$ ) pelo valor da refletância espectral (5%) neste comprimento de onda. O resultado é de  $0,06 \text{ W m}^{-2}$ .

O cálculo da refletância solar deve ser realizado para todos os comprimentos de onda analisados a modo de construir uma curva de refletância solar. A área por baixo da curva é calculada e dividida pelo valor da irradiância solar que atinge a superfície terrestre ( $1000,4 \text{ W m}^{-2}$ ). O resultado, expresso em porcentagem, será o valor total da refletância solar da amostra.

A Figura 6.7 apresenta o diagrama desta etapa de pesquisa.



**Figura 6.7** – Diagrama da Etapa de Refletância dos Ligantes Coloridos (Etapa I).



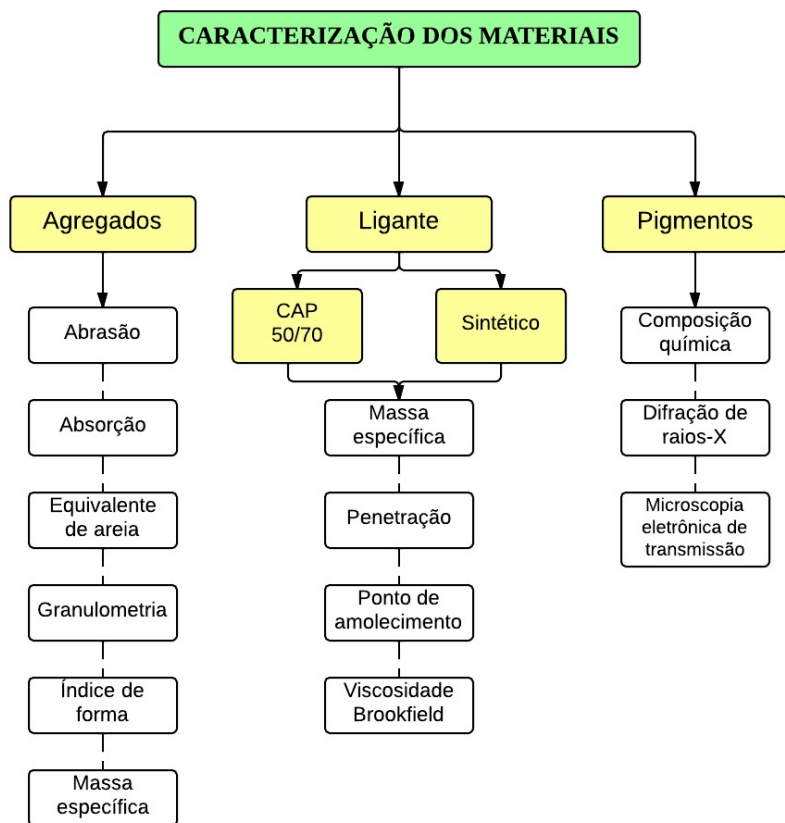
## 6.2 ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

Esta etapa consistiu na caracterização física e química dos materiais utilizados na pesquisa. Os agregados utilizados são de origem granítica e foram cedidos pela empresa de Mineração Santa Bárbara, localizada na cidade de Palhoça – SC. Foram coletados três tipos de agregados: um agregado tipo Brita 1 com tamanho máximo de  $\frac{3}{4}$ ”; um agregado tipo Brita zero, com tamanho máximo de  $\frac{3}{8}$ ”; e, um agregado tipo Pó de pedra com tamanho máximo de 4,75 mm. Para os agregados foram realizados ensaios de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), equivalente de areia (DNER-ME 054/97), granulometria (DNER-ME 083/98), índice de forma (DNER-ME 086/94), angularidade do agregado graúdo (ASTM D5821), angularidade do agregado miúdo (ASTM T304), materiais deletérios (ASTM C142/C142M), massa específica do agregado graúdo e miúdo (DNER-ME 081/98 e DNER 085/94).

Para o ligante, convencional e sintético (albino), foram realizados ensaios de penetração (DNIT 155/2010), ponto de amolecimento (DNIT 131/2010), viscosidade Brookfield (ABNT NBR 15184) e massa específica (ABNT NBR 6296). Os ligantes coloridos (mistura de ligante com pigmento) também foram submetidos aos ensaios de viscosidade. Os ligantes coloridos que foram utilizados nesta etapa são o Amarelo-albino, Verde, Vermelho A e Vermelho B.

Os pigmentos que dão cor às misturas asfálticas são derivados de óxidos metálicos mistos. Estes possuem cor escura, mas com alta refletância da radiação infravermelha. Dos oito pigmentos utilizados na pesquisa, sete pertencem ao grupo de pigmentos Bayferrox da empresa LANXESS Indústria de Produtos Químicos e Plásticos LTDA. A apresentação destes sete pigmentos é na forma de pó de tamanho nanométrico. O oitavo pigmento é comercializado pela empresa espanhola Campi y Jové, S.A. e pertencem ao grupo de pigmentos de alto desempenho Nosbur® Color<sup>+</sup>. A apresentação deste pigmento é na forma de grãos de tamanho milimétrico. A diferença entre a forma e o tamanho deste pigmento é consequência da sua composição: 80% de pigmento em pó e 20% de resinas. Os ensaios realizados com os pigmentos foram composição química, difração de raios-X e microscopia eletrônica de transmissão; estes ensaios foram realizados no Departamento de Engenharia Civil, no Laboratório de Materiais (LabMat) e no Laboratório

Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da Universidade Federal de Santa Catarina. A Figura 6.8 mostra o diagrama da presente etapa.



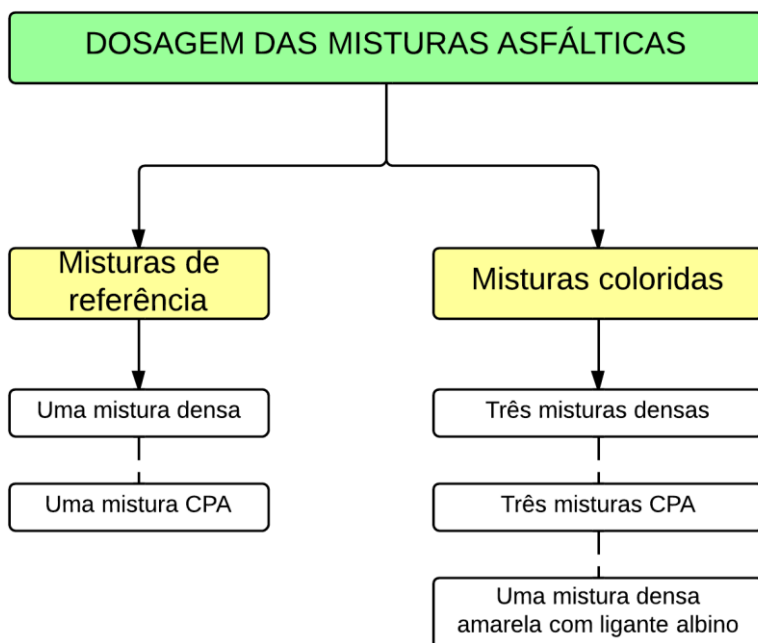
**Figura 6.8** – Diagrama da Etapa de Caracterização dos Materiais Empregados (Etapa II).

### 6.3 ETAPA 3 – DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Na pesquisa foram utilizadas dois tipos de misturas asfálticas convencionais; uma mistura densa e uma mistura porosa, a qual atende as características de uma mistura CPA (camada porosa de atrito). Estas duas misturas serviram de referência para avaliar o desempenho das misturas coloridas. A mistura densa foi escolhida porque é a mistura mais utilizada nos pavimentos das vias urbanas. Já o uso da mistura CPA surgiu da necessidade de estudar a influência da granulometria e da porosidade

tanto nos valores de refletância como no desempenho térmico e mecânico da mistura colorida.

Foram dosadas, também, três misturas asfálticas densas e três misturas asfálticas CPA coloridas, ambas com ligante CAP 50/70. Uma outra mistura densa colorida foi elaborada com uso de ligante albino. A Figura 6.9 apresenta o diagrama desta etapa.



**Figura 6.9** – Diagrama da Etapa de Dosagem das Misturas Asfálticas (Etapa III).

### 6.3.1.1 Dosagem da Mistura Asfáltica Densa

A dosagem da mistura asfáltica densa foi realizada segundo a metodologia Superpave. Os três tipos de agregados minerais disponíveis foram utilizados para compor três estruturas granulométricas diferentes, correspondentes às três primeiras misturas de prova. Com a estrutura granulométrica definida, procedeu-se a estimativa o teor de ligante inicial para cada mistura e a proporção, em peso, dos materiais de cada mistura asfáltica.

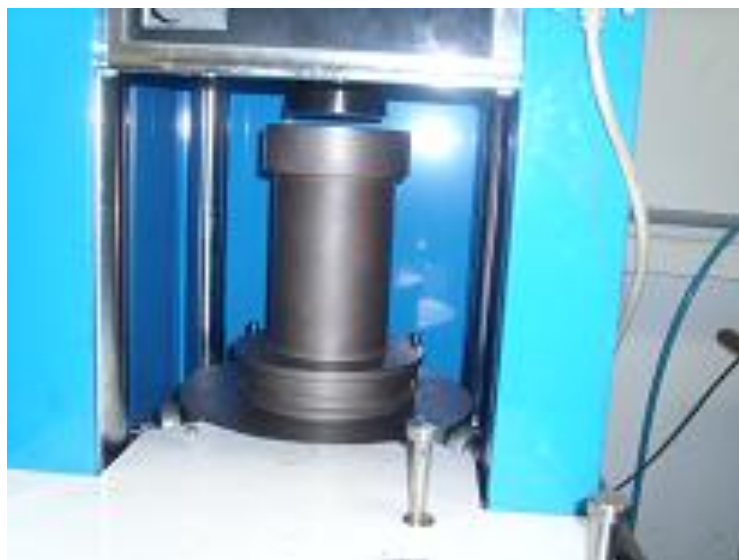
Para cada mistura foram moldados dois corpos de prova na PCG e preparadas mais duas amostras para a determinação da massa específica máxima (Gmm) pelo método de Rice. As temperaturas de usinagem e compactação foram de 152 e 139 °C, determinadas pelo ensaio de viscosidade rotacional do CAP 50/70. Após a moldagem foi determinada a massa específica aparente (Gmb) de cada amostra compactada para, com estes resultados, elaborar as curvas de compactação de cada mistura.

Após a compactação, foi determinada a porcentagem de vazios de ar (Vv) e a porcentagem de vazios no agregado mineral (VAM). Estes parâmetros servem para determinar as propriedades volumétricas das misturas de prova: porcentagem estimada de ligante (Pb, estimado), %VAM estimado, %RBV estimado, %Gmm estimado, teor de ligante efetivo estimado (Pbe estimado) e teor de filer (DP). Estas propriedades foram comparadas com os critérios da Tabela 5.5.

Das três misturas avaliadas, foi escolhida aquela que atendia melhor os critérios da metodologia Superpave. Foram compactados corpos de prova adicionais com base na estrutura granulométrica escolhida para definir o teor de ligante que permitisse à mistura atingir um grau de compactação de 96% a 100 giros. Tomando como base a mistura escolhida, foram compactadas misturas com teores de  $\pm 0,5\%$  e  $+1\%$  de ligante. As propriedades volumétricas destas novas misturas foram avaliadas para determinar o teor de ligante ótimo. Após esta determinação, a mistura com o teor de ligante ótimo foi compactada para determinar o grau de compactação a 160 giros o qual, segundo a metodologia Superpave, deve ser menor a 98%. A mistura que atendeu todos estes requisitos, foi denominada de Mistura de Referência densa e escolhida como base para a dosagem das misturas asfálticas densas coloridas. As Figura 6.10 e Figura 6.11 mostra o processo de compactação da Mistura de Referência densa na PCG.



(a)



(b)

**Figura 6.10** – Processo de compactação da mistura asfáltica: mistura no molde cilíndrico (a); cilindro pronto para compactação dentro da PCG (b).



(c)



(d)

**Figura 6.11** –Extração do corpo de prova (c); aparência dos corpos de prova após compactação (d).

### 6.3.1.2 Misturas Asfálticas Coloridas Densas

A proporção dos materiais utilizados na dosagem das misturas coloridas densas tem como base a granulometria e o teor de ligante da Mistura de Referência densa. Os pigmentos utilizados foram o Amarelo, Verde, Vermelho A e Vermelho B. Os mesmos foram adicionados como uma proporção da massa total da mistura sem substituir nem o ligante nem os agregados minerais. No entanto, a adição dos pigmentos causou uma diminuição das proporções dos outros materiais na massa total.

Nas misturas coloridas densas, a porcentagem de 4% do pigmento em pó foi descontada do 100% da mistura asfáltica colorida. O 96% restante foi repartido entre o ligante e o agregado mineral respeitando as porcentagens destes materiais na mistura de Referência.

A compactação das misturas coloridas foi realizada de forma similar à da mistura de Referência, em moldes de 150 mm (Tabela 7.3) para um total de 160 giros. As Figura 6.12 a Figura 6.16 mostra o processo de usinagem da mistura Vermelho B. A Figura 6.17 mostra os corpos de prova moldados.



(a)

**Figura 6.12** – Processo de usinagem da mistura Vermelho B: pesagem do pigmento (a).



(b)



(c)

**Figura 6.13** – Processo de usinagem da mistura Vermelho B: pesagem do ligante (b); adição do agregado graúdo (c).





(d)



(e)

**Figura 6.14** – Processo de usinagem da mistura Vermelho B: adição do agregado miúdo (d); mistura sem pigmento (e).



(f)



(g)

**Figura 6.15** – Processo de usinagem da mistura Vermelho B: adição do pigmento (f); mistura colorida pronta (g).



(h)

**Figura 6.16** – Processo de usinagem da mistura Vermelho B: mistura na bandeja para envelhecimento a curto prazo (h).



**Figura 6.17** – Corpos de prova com 100 mm de diâmetro, de esquerda para a direita mistura: Referência, Verde, Vermelho A, Vermelho B e Amarelo-albino.

### 6.3.1.3 Avaliação da Sensibilidade à Água – Ensaio Lottman

Este ensaio foi realizado segundo a norma AASHTO T 283, a qual prevê a moldagem de seis corpos de prova com 100 mm de diâmetro e com volume de vazios de  $7,0 \pm 0,5\%$ . O ensaio foi realizado com e sem a

adição de um aditivo melhorador de adesividade (*dop*) na proporção de 0,5% da massa do ligante asfáltico (DNER 078/94). O objetivo da moldagem de corpos de prova sem *dop* foi a de avaliar a influência dos pigmentos na adesividade entre o ligante e os agregados.

#### 6.3.1.4 Mistura Asfáltica CPA

Não existe um método para o projeto de misturas asfálticas porosas de atrito mediante a metodologia Superpave. Por este motivo, para a moldagem das misturas porosas foram adotados os parâmetros (granulometria, teor de ligante e volume de vazios) utilizados por Knabben (2012). A curva granulométrica adotada corresponde à desenvolvida por Meurer Filho (2001). Esta mistura apresentou um desempenho adequado quanto às características de vazios comunicantes, drenabilidade e de deformação permanente. A granulometria da mistura atende os limites estabelecidos pela Faixa V de acordo com a especificação de serviço DNER-ES 386/99.

No estudo mencionado, para a dosagem das misturas de camada porosa de atrito (CPA) foi utilizada a metodologia Marshall. A moldagem dos corpos de prova foi realizada aplicando 50 golpes por face. Foi adotado um teor de ligante de 4,3% e um volume de vazios de 21,9% para as misturas. O cálculo da proporção dos materiais de dosagem das misturas CPA coloridas foi utilizado o mesmo procedimento das misturas densas. O teor de pigmento continuou sendo de 4% no caso dos pigmentos em pó e de 2,4% no caso do pigmento Vermelho B. O processo de compactação é mostrado na Figura 6.18.



(a)



(b)

**Figura 6.18** – Compactação (a) e aparência final (b) da mistura Vermelho B CPA.

### 6.3.1.5 Mistura Asfáltica Densa com Pigmento Albino

A quantidade de ligante vegetal albino disponível para a pesquisa foi de, aproximadamente, sete quilos. Esta quantidade de ligante não era suficiente para realizar a dosagem e a moldagem dos corpos de prova necessários para os ensaios mecânicos. Por este motivo, procedeu-se a pular a etapa de dosagem e utilizar o ligante somente na moldagem dos corpos de prova e das placas da mistura asfáltica. O teor de ligante utilizado para a moldagem da mistura densa é de 7,3% e foi indicado pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes) com base em estudos exploratórios com divulgação restrita. A granulometria e o teor de pigmento Amarelo das misturas foram as mesmas das misturas asfálticas densas com CAP puro. Esta mistura foi denominada de Amarelo-albino. Em ensaios prévios, os corpos de prova compactados com um teor de ligante albino de 5,1% sofreram perda de material e, até, desagregação da amostra.

Quatro amostras foram compactadas na PCG, sendo duas sem pigmento e duas com pigmento. A finalidade da moldagem foi obter os parâmetros de compactação das misturas com ligante albino e a de analisar a influência do pigmento Amarelo nas misturas. Como o ligante albino é muito sensível à temperatura, podendo ocorrer enrijecimento do mesmo durante a etapa de envelhecimento a curto prazo, as amostras foram moldadas imediatamente depois da etapa de usinagem. Figura 6.19 e Figura 6.20 mostram a processo de usinagem da mistura Amarelo-albino.



(a)

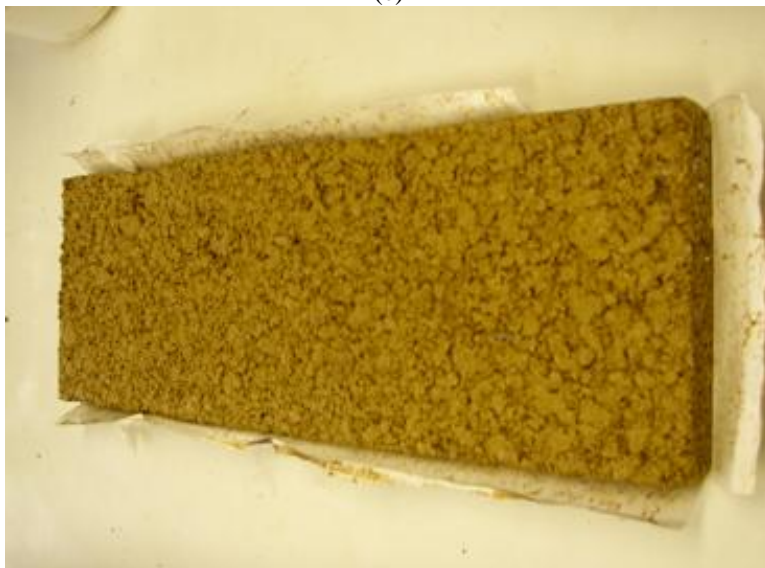


(b)

**Figura 6.19** – Mistura Amarelo-albino: passagem do ligante albino (a), usinagem do agregado com o ligante (b).



(c)



(d)

**Figura 6.20** – Mistura Amarelo-albino: mistura usinada e pronta para compactação (c) e placa para ensaio de refletância em campo (d).



## 6.4 ETAPA 4 – CONSTRUÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

Nesta etapa foram executadas as placas de revestimento em campo para medição da refletância solar, temperatura nas placas e textura. As placas executadas se dividem em três categorias: revestimentos não asfálticos, misturas asfálticas e concreto Portland.

### 6.4.1 Construção dos Revestimentos Não Asfálticos

Foi feita a terraplenagem e executada uma camada de bica corrida de 12,0 cm numa área de 360 metros quadrados onde foram executadas 7 placas de 4 x 4 metros com os seguintes materiais:

- 2 placas de *petit pavê* sendo uma com rocha calcarea (branca) e a outra com riolito (vermelha).
- 2 placas de paver, sendo 1 com bloquetes vermelhos e outro com bloquetes amarelos com resistência à compressão de 35 Mpa.
- 2 placas de concreto Portland sendo uma de granulometria aberta (concreto Portland poroso) e outra de granulometria densa convencional (concreto Portland denso). A resistência à compressão simples destas duas misturas foi de 17 e 22 MPa respectivamente.

A construção da área experimental é mostrada nas Figura 6.21 a Figura 6.27.



(a)

**Figura 6.21** – Construção da área experimental: limpeza do local (a).



(b)



(c)

**Figura 6.22** – Construção da área experimental: nivelamento da superfície (b), disposição das formas (c).



(d)

**Figura 6.23** – Construção da área experimental: execução da placa de paver vermelho (d).



(a)

**Figura 6.24** – Revestimentos construídos na área experimental: *petit pavê* branco (a).



(b)



(c)

**Figura 6.25** – Revestimentos construídos na área experimental: *petit pavé* vermelho (b), *paver vermelho* (c).



(d)



(e)

**Figura 6.26** – Revestimentos construídos na área experimental: paver amarelo (d), concreto Portland denso (e).



(f)

**Figura 6.27** – Revestimentos construídos na área experimental: concreto Portland poroso (f).

#### **6.4.2 Moldagem das Placas de Mistura Asfáltica**

As placas de revestimento asfáltico foram moldados em Laboratório devido ao custo do pigmento e à não existência de empresas em Florianópolis que se dispusessem a realizar o serviço em campo. Foram moldadas 8 misturas asfálticas utilizando duas granulometrias (densa e CPA) e quatro cores (preta, de referência; com pigmento verde: com pigmento vermelho A e com pigmento vermelho B). A área final das placas devia ser superior a 1 m x 1 m para poder realizar o ensaio de refletância em campo (Akbari *et al.*, 2008). As placas foram moldadas na mesa compactadora do LCPC com dimensões de 50 x 18 x 5 cm, necessitando de 12 placas para formar um área de 1 m<sup>2</sup>. O volume de vazios alvo das placas compactadas foi de 4% no caso das misturas densas e de 21,9% no caso das misturas CPA. Quatro placas de cada mistura foram aproveitadas para realizar os ensaios de deformação permanente.

No caso da mistura Amarelo-albino, devido à pouca quantidade de pigmento, foram moldadas somente 10 placas com 18 cm de largura, 50

cm de comprimento e 3 cm de espessura. As placas moldadas foram utilizadas somente nos ensaios de refletância e medida de temperatura em campo. As Figura 6.28 a Figura 6.30 mostra as placas das misturas densas.

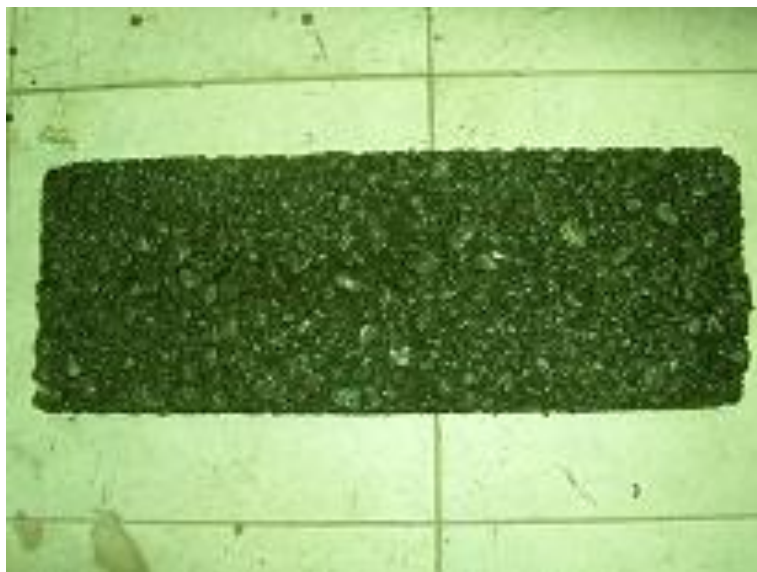


(a)



(b)

**Figura 6.28** – Placas de mistura asfáltica densa: disposição da mistura para compactação (a), mistura de Referência (b).



(c)



(d)

**Figura 6.29** – Placas de mistura asfáltica densa: Verde (c), Vermelho A (d).





(e)

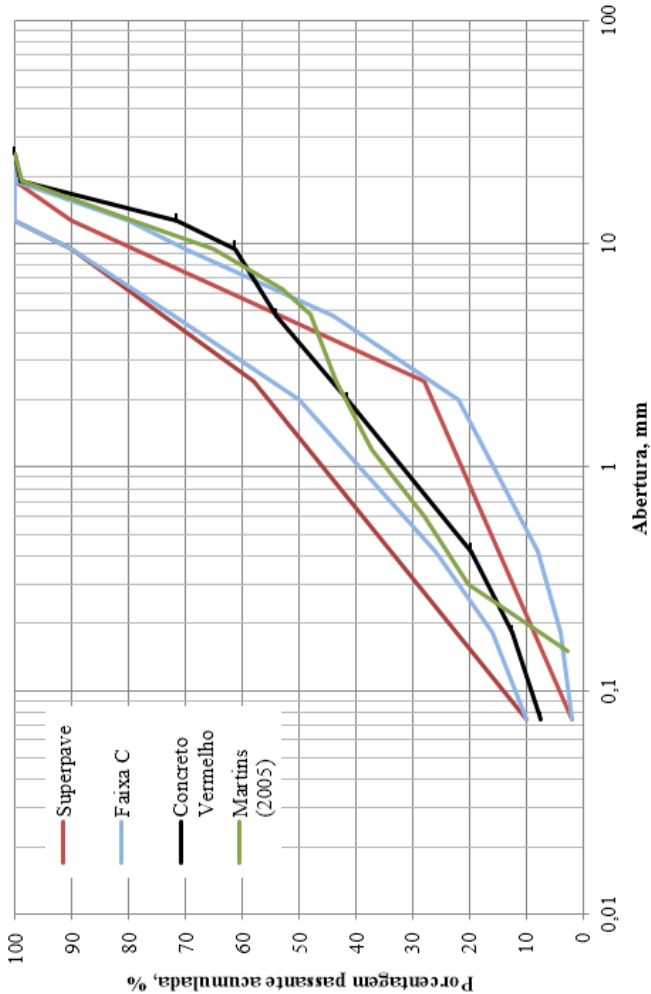


(f)

**Figura 6.30** – Placas de mistura asfáltica densa: Vermelho B (e) e Amarelo-albino (f).

### 6.4.3 Concreto Portland com Pigmento Vermelho

Foram moldadas 12 placas com concreto Portland denso com adição do pigmento Vermelho A. Para a moldagem das placas foram utilizadas as proporções de materiais indicadas por Martins (2005). A granulometria da mistura é mostrada na Figura 6.31.



**Figura 6.31** – Curva granulométrica da mistura de concreto Portland Vermelho denso.

**Fonte:** Martins, 2005.

Para a moldagem foi utilizado um teor de pigmento de 4% da massa total da mistura, um consumo de cimento de  $396 \text{ kg/m}^3$  e uma relação água/cimento de 0,53. A resistência à compressão simples desta mistura foi de 38 MPa. As proporções dos materiais são mostradas na Tabela 6.4. Os materiais foram misturados em betoneira e posteriormente compactados manualmente dentro dos moldes utilizados para a confecção das placas de mistura asfáltica. As dimensões finais das placas foram  $18 \times 50 \times 5 \text{ cm}$ . A superfície das placas foi desempenada, produzindo uma textura lisa. A Figura 6.32 mostra a moldagem das placas da mistura de concreto Portland denso Vermelho.

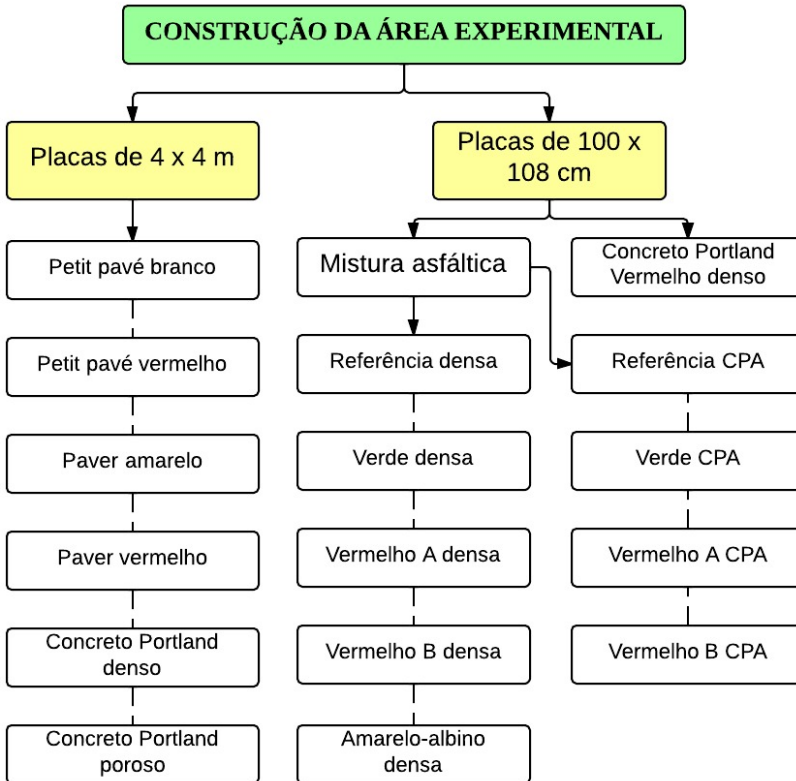
**Tabela 6.4** – Proporção dos materiais utilizados na mistura de concreto Portland denso Vermelho.

Material	Porcentagem em massa do total do agregado, %	Porcentagem em massa do total da mistura, %
Cimento		14,85
Pó de pedra	52	38,05
Pedrisco	6	4,41
Brita 1	42	30,78
Pigmento		4,00
Água		7,89



**Figura 6.32** – Moldagem das placas de mistura de concreto Portland Vermelho denso.

A Figura 6.33 mostra o diagrama da etapa de construção da área experimental.



**Figura 6.33** – Diagrama da Etapa de Construção da Área Experimental (Etapa IV).

## 6.5 ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DA REFLETÂNCIA SOLAR DOS REVESTIMENTOS EM CAMPO

A refletância solar dos revestimentos não asfálticos foi medida de acordo com a norma ASTM E 1918-06 “Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field”. A medição da refletância dos revestimentos asfálticos foi medida de acordo com o procedimento E1918A (Akbari *et al.*, 2008). Ambas medições foram realizadas com o uso de um Piranômetro modelo CMP 21 fabricado pela empresa Kipp & Zonen. O ensaio de refletância

foi realizado durante o mês de fevereiro de 2013 correspondente à estação de verão no hemisfério sul. O ensaio foi programado para este período com a finalidade de medir a refletância dos revestimentos sob valores elevados de irradiância solar. Para caracterizar a textura da superfície das placas testadas, foi realizado o ensaio de mancha de areia e drenabilidade.

### **6.5.1 Medição Refletância das Placas Maiores**

Como mencionado, as medições para as placas de 4 x 4 metros foram realizados segundo a norma ASTM E 1918-06. A aparelhagem utilizada para realizar o ensaio foi a seguinte:

Sensores – Dois piranômetros sensíveis à energia radiante na faixa entre os 0,28 – 2,8 micrômetros. O piranômetro produz uma saída linear de  $\pm 0,5\%$  entre 0 e  $1400 \text{ W m}^{-2}$  e um tempo de resposta de um segundo. Um dos piranômetros foi colocado virado para cima e o outro virado para baixo.

- Leitor de dados – a microvoltagem gerada pelo piranômetro é convertida em digital com um leitor que tem uma precisão de no mínimo  $\pm 0,5\%$  e uma resolução de  $1 \text{ W m}^{-2}$ .
- Bancada do piranômetro – Os piranômetros estão montados num braço metálico e um apoio, similar a uma mesa, que permite que os mesmos se mantenham a uma altura de 50 cm por cima da superfície para minimizar o efeito da sombra nas medições da radiação refletida. O braço e o apoio são finos o suficiente para minimizar as sombras.

Os piranômetros foram colocados no extremo do braço metálico em posições opostas. Um foi orientado para cima com a finalidade de registrar a radiação solar incidente. O outro foi orientado para baixo para registrar a radiação solar refletida pela superfície da placa. O procedimento para medição da refletância solar das placas com dimensões de 4 x 4 metros foi o seguinte:

- Os ensaios foram realizados em dias de céu limpo, sem a presença de nuvens ou neblina que possam influir negativamente nas medições;

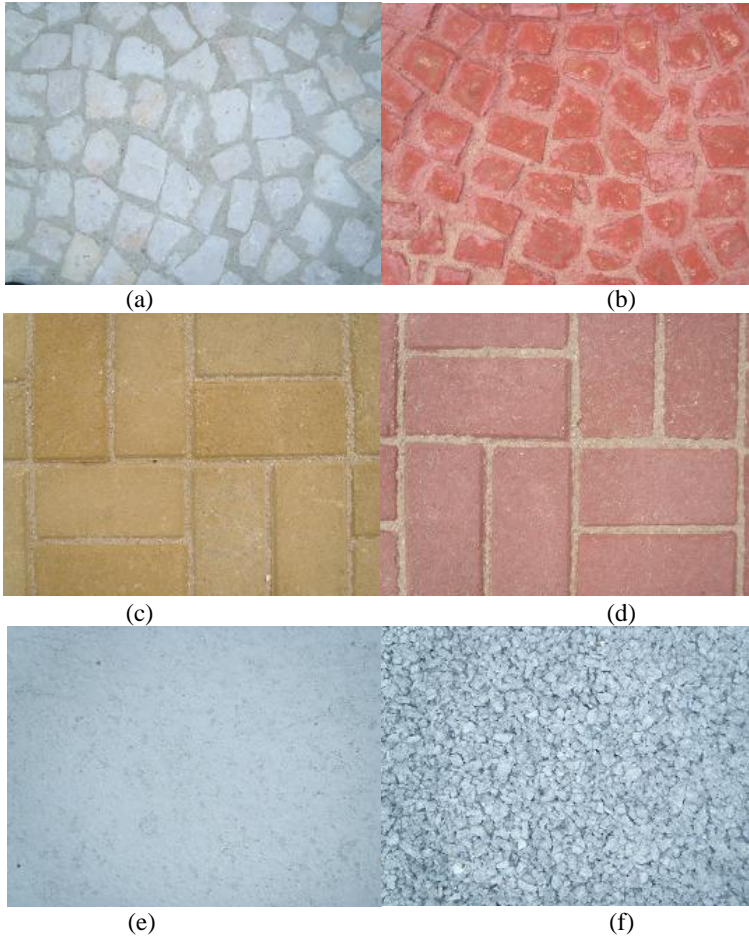
- A área experimental foi construída numa região afastada de paredes ou outros objetos que pudessem refletir radiação solar, ou produzir sombras, para a superfície da mesma;
- O ângulo dos raios solares em relação ao zênite solar foi menor que  $45^\circ$ . No caso de superfícies planas ou pouco onduladas, o requisito da norma limita os testes aos horários entre as 9h e as 15h durante o verão, pois é necessário que a radiação solar neste horário seja de no mínimo 70% do valor ao meio dia. No presente estudo, o horário dos ensaios foi das 11 às 13 horas; e
- A leitura da radiação solar incidente e refletida foi realizada quando ambas se mantinham constantes por, pelo menos, 10 s. As leituras foram realizada num intervalo de tempo menor que 2 min.

O valor da refletância solar é dado pela a relação entre a radiação refletida e a radiação incidente. A refletância solar calculada deve ter uma precisão de 0,01 numa escala entre 0,00 e 1,00. O resultado é o valor médio de pelo menos sete medições.

A Figura 6.34 mostra o piranômetro utilizado e a disposição do mesmo durante a medição da refletância das placas grandes. A Figura 6.35 mostra a aparência da superfície das placas ensaiadas.



**Figura 6.34** – Piranômetro (a) e a disposição do mesmo (b) durante os ensaios de refletância em campo.



**Figura 6.35** – Aparência da superfície das placas de 4 x 4 metros: *petit pavé* branca (a), *petit pavé* vermelha (b), *paver* amarelo (c), *paver* vermelho (d), concreto Portland denso (e) e concreto Portland poroso (f).

### 6.5.2 Medição Refletância das Placas Menores

Para as misturas asfálticas e para a mistura de concreto Portland vermelho, com dimensões de 1,00 x 1,08 m, os ensaios foram realizados segundo o procedimento E1918A proposto por Akbari *et al.* (2008). Este procedimento permite o ensaio de amostra de dimensões reduzidas, menores que 4 x 4 m, como indicados pela norma ASTM E1918, minimizando o gasto com pigmentos



Segundo o procedimento E1918A, para a medição de superfícies com até 1 m<sup>2</sup> de área, devem ser utilizadas membranas de papel, opacas, de cores preta e branca, com valores de refletância conhecido. Ambas as membranas tem que ter dimensões exatamente iguais às da amostra. Os valores de refletância das duas membranas foram previamente calculados mediante o ensaio de refletância em laboratório.

O procedimento E1918A divide a medição da refletância de uma área determinada em três estágios. No primeiro estágio, a área objetivo é coberta exatamente por uma membrana delgada de papel opaca branca. No segundo estágio, a área é coberta por uma membrana delgada de papel opaca preta. No terceiro estágio, a área é descoberta. A refletância é determinada com o uso da seguinte equação:

$$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$$

#### **Equação 6.1**

Onde  $R_t$  é a refletância solar calculada,  $R_b$  e  $R_w$  são as refletâncias solares das peças de papel opacas preta e branca.  $I_1$ ,  $I_2$ , e  $I_3$  são as radiações incidentes no sensor do piranômetro nos estágios 1, 2, e 3. Para medir a refletância foram seguidos os seguintes passos:

- Os piranômetros foram colocados no centro da área e a placa coberta com a membrana preta e depois, com a membrana branca;
- Foi registrada a leitura da radiação solar incidente ( $I_H$ ) no piranômetro orientado para cima;
- Foi registrada a leitura da radiação solar refletida pela amostra no primeiro estágio ( $I_1$ ) no piranômetro virado para baixo. Em seguida, a membrana branca foi removida e foi feita a leitura da radiação solar refletida pela amostra no segundo estágio ( $I_2$ ). Por último, a membrana preta foi removida e foi feita a leitura da radiação solar refletida no terceiro estágio ( $I_3$ );
- Finalmente, foi feita a leitura, da radiação solar incidente ( $I'H$ ) no piranômetro virado para cima. Se a diferença entre  $I_H$  e  $I'H$  for maior a 20 Wm<sup>-2</sup>, todo o procedimento deve ser repetido;

- Todas as leituras foram realizadas num intervalo que não excedeu os 10 minutos. Para cada leitura, deixava-se estabilizar o piranômetro por 30 segundos;
- A refletância solar foi calculada utilizando a Equação 6.1;
- Todos os passos anteriores eram repetidos por, pelo menos, mais duas vezes até se obter três valores de  $R_t$ ; e
- Se a diferença dos três valores de  $R_t$  fosse maior a 0,02, se recomenda repetir os ensaios.

O procedimento de medição da refletância das placas de 100 x 108 cm é mostrado nas Figura 6.36 e Figura 6.37.



(a)



(b)

**Figura 6.36** – Medição da refletância das placas de 100 x 108 cm: colocação das placas (a), medição da refletância com a membrana de papel branco (b).



(c)



(d)

**Figura 6.37** – Medição da refletância das placas de 100 x 108 cm: disposição e medição da refletância com a membrana de papel preta (c) e medição da refletância da placa sem uso de membranas (d).

### 6.5.3 Medição da Refletância de Revestimentos Envelhecidos

O ensaio de refletância foi realizado, também, em outros revestimentos já existentes com a finalidade de comparar os valores coletados correspondentes a revestimentos novos com os valores de revestimentos velhos que já foram submetidos à intempérie e ao desgaste (com idade superior a 20 anos). O ensaio foi realizado para uma mistura asfáltica desgastada localizada na frente da Reitoria da UFSC e para três calçadas de pedra *petit pavê* nas cores branca, preta e vermelha. Os valores coletados foram utilizados na etapa de modelamento climático. As Figura 6.38 Figura 6.40 mostra os revestimentos envelhecidos submetidos ao ensaio.



(a)

**Figura 6.38** – Medição da refletância dos revestimentos envelhecidos: mistura asfáltica convencional (a).



(b)



(c)

**Figura 6.39** – Medição da refletância dos revestimentos envelhecidos: pedra *petit pavê* branca (b), pedra *petiti pavê* preta (c).



(d)

**Figura 6.40** – Medição da refletância dos revestimentos envelhecidos: pedra *petit pavê* vermelha (d).

#### **6.5.4 Ensaio de Mancha de Areia**

O ensaio de macha de areia foi realizado sobre a superfície do revestimento de mistura asfáltica densa de Referência, Verde, Vermelho A, Vermelho B e Amarelo-albino e no revestimento de concreto Portland denso e concreto Portland Vermelho denso. O ensaio não foi realizado nas misturas porosas uma vez que a superfície é incapaz de reter a areia usada no teste. O ensaio também não foi realizado nos revestimentos de pedra *petit pavê* nem nos blocos de concreto Portland devido à alta heterogeneidade da superfície representada pela fuga entre as peças.

O ensaio está baseado na norma ASTM E965-96 (2006) a qual descreve o procedimento para determinar a textura superficial de um pavimento mediante o círculo de areia. O ensaio pode ser realizado em qualquer tipo de pavimento, flexível ou rígido, e consiste em distribuir uniformemente sobre a superfície um volume determinado de areia. A partir do volume de areia utilizado e da área coberta pela mesma, se calcula a profundidade média da textura coberta pela areia mediante a Equação 6.2. A Figura 6.41 mostra o procedimento de ensaio.

$$H = \frac{V}{\pi R^2}$$

**Equação 6.2**

onde: H = Profundidade média da textura superficial, em mm;  
V = Volume da areia utilizada (25 000 mm<sup>3</sup>);  
R = Ráio médio do círculo de areia, em mm.



(a)



(b)

**Figura 6.41** – Ensaio de mancha de areia: disposição da areia (a) e formação do círculo para medição do diâmetro(b).



### 6.5.5 Drenabilidade

O ensaio de drenabilidade (NF T 98-254-3; 1993) foi realizado em todos os revestimentos estudados. Foram realizados quatro leituras em cada revestimento. A média dos resultados é expressa em milímetros de água escoados por segundo. A Figura 6.42 mostra o ensaio realizado na mistura asfáltica de Referência CPA.



**Figura 6.42** – Ensaio de drenabilidade.

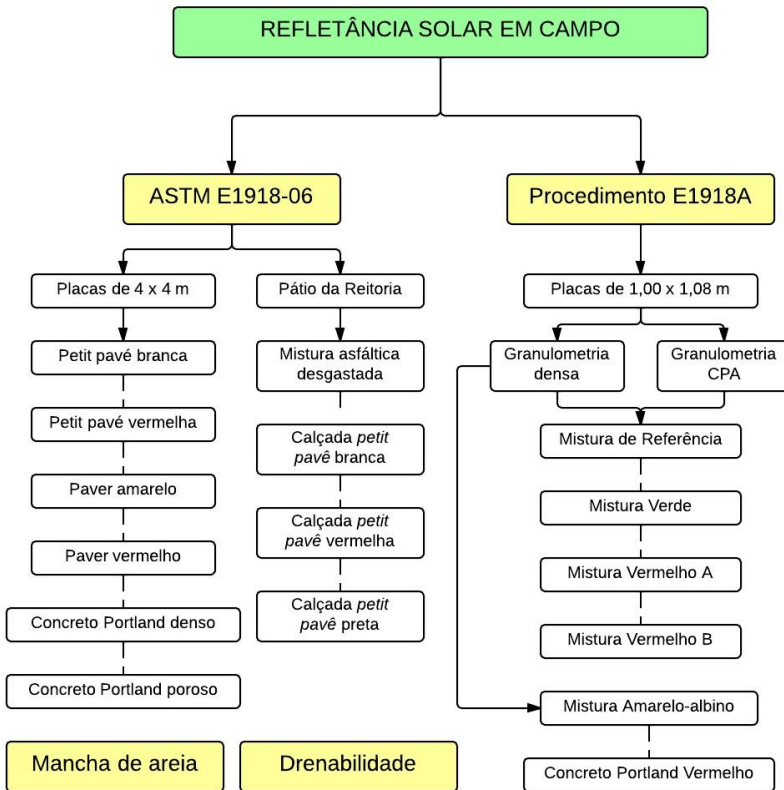
Tanto os resultados de mancha de areia como de drenabilidade permitem avaliar a textura da superfície dos revestimentos. O ensaio de mancha de areia fornece dados sobre a altura média da rugosidade, mas só pode ser realizado em superfícies que não possuam vazios comunicantes.

No caso do ensaio de drenabilidade, os resultados relacionam a textura da superfície com a habilidade de escoar uma determinada

quantidade de água num espaço de tempo. Os revestimentos que conseguem drenar a água mais rápido são aqueles com uma textura mais aberta.

Ambos os resultados podem ser relacionados com a habilidade de reflexão da radiação dos revestimentos. No caso de dois materiais similares, aquele que apresentar uma textura mais lisa terá uma refletância maior do que aquele com um textura mais grosseira.

A Figura 6.43 mostra o diagrama da etapa de avaliação da refletância solar dos revestimentos em campo.



**Figura 6.43** – Diagrama da Etapa de Avaliação da Refletância Solar dos Revestimentos em Campo (Etapa V).

## 6.6 ETAPA 6 – MEDIÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL E INTERNA DOS REVESTIMENTOS

As medições realizadas nesta etapa não seguem um procedimento normalizado visto que não existe uma metodologia padronizada para realizar este ensaio. Existem, porém, as metodologias utilizadas nas pesquisas revisadas, as quais fazem ênfase na medição da temperatura superficial dos revestimentos tanto com uso de termômetros infravermelhos como com uso de termopares inseridos nas amostras. Desta forma, foi definido um procedimento de medição que se assemelharia às das pesquisas revisadas (item 4.3).

Nesta etapa foram medidas a temperatura superficial, interna a 1 cm e a 3 cm de profundidade. A temperatura superficial foi medida com uso de um termômetro digital infravermelho modelo FLUKE 66 IR THERMOMETER a uma distância de 10 cm da superfície dos revestimentos. Para a medição da temperatura interna, foram realizadas duas perfurações no centro dos revestimentos, uma com 1 cm e outra com 3 cm de profundidade. Os furos foram separados por uma distância horizontal de 2,5 cm. Em cada furo foi colocado um termistor na profundidade especificada. Os termistores são do tipo NTC, com resistência ôhmica de 130 kOhm a 20°C. O diâmetro do sensor é 2 mm e a tensão de alimentação da fonte divisora de tensão é 5 Volts, DC. A Figura 6.44 mostra os termistores e o termômetro utilizados na medição de temperatura das misturas.

A medição das temperaturas também foi realizada no mês de fevereiro. Junto com os dados de temperatura foram coletados dados referentes à intensidade solar, temperatura do ar e umidade relativa. Uma vez que não se possuía um sistema de aquisição de dados, a coleta de dados foi realizada de forma manual coletando um dado por vez. A coleta de dados foi realizada desde as 10h15 até as 16h15, com intervalo de uma hora entre medidas. A Figura 6.45 mostra o diagrama da etapa de medição da temperatura superficial e interna dos revestimentos.

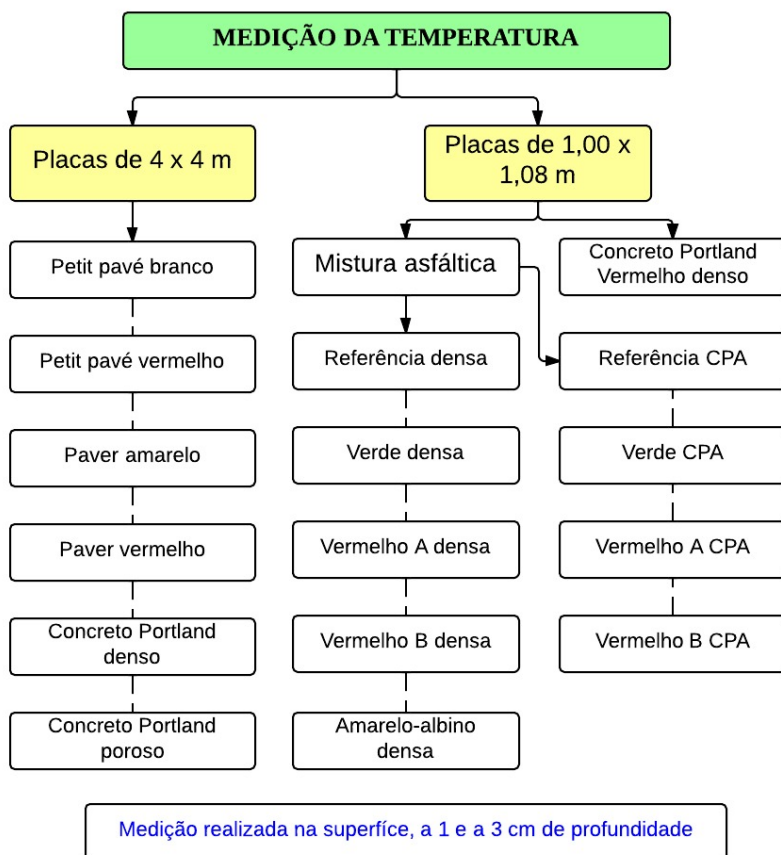


(a)



(b)

**Figura 6.44** – Termistores (a) e termômetro infravermelho (b) utilizados na medição de temperatura das misturas.



**Figura 6.45** – Diagrama da Etapa de Medição da Temperatura Superficial e Interna dos Revestimentos.

## 6.7 ETAPA 7 – ENSAIOS MECÂNICOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Nesta etapa foram realizados ensaios mecânicos com o objetivo de avaliar a influência da adição dos pigmentos de óxidos metálicos mistos na resistência das misturas asfálticas. Foram realizados ensaios de resistência à tração (DNIT 136/2010 - ME), módulo resiliente (DNER-ME 133/10), ensaio Cântabro (DNER-ME 383/99) e deformação permanente (NF P 98-253-1). Foram avaliadas as misturas de Referência, Verde, Vermelho A e Vermelho B com granulometria densa e CPA. Os

ensaios mecânicos não foram realizados com a mistura Amarelo-albino pois a totalidade do ligante albino foi utilizado na moldagem das placas para os ensaios de refletância em campo.

Os resultados deste ensaio no presente trabalho permitiram avaliar a influência do pigmento frio na resistência à tração das misturas asfálticas coloridas e compará-los com os resultados da mistura convencional (Referência). O ensaio foi realizado tanto para as misturas asfálticas densas como para as misturas asfálticas porosas (Camada Porosa de Atrito – CPA). Além de permitir a caracterização das misturas, os resultados de RT foram utilizados para alimentar o programa computacional para realizar o ensaio de Módulo de Resiliência.

O ensaio de deformação permanente foi realizado de acordo com a norma NF P 98-253-1 (AFNOR, 1991) e ocorre a uma frequência de 1 Hz, onde em cada ciclo ocorrem duas passadas do pneu que possui uma pressão de 0,6 MPa. No total, são aplicados 30.000 ciclos (60.000 passadas do pneu) nas placas a uma temperatura de 60°C com intervalos para medições intermediárias da deformação causada. Esta deformação é medida em 15 pontos distintos da placa e a média destas medidas é comparada com a média da deformação inicial.

Os ensaios de resistência à tração (Figura 6.46), módulo resiliente (Figura 6.47) e ensaio Cântabro (Figura 6.48) foram realizados à temperatura padronizada de 25 °C especificada nas suas normas respectivas. O ensaio de deformação permanente (Figura 6.49) foi realizado em dois estágios; No primeiro estágio, todas as misturas foram ensaiadas a 60 °C de acordo com a norma. No segundo estágio, as placas foram ensaiadas a uma temperatura inferior. A temperatura de ensaio, no segundo estágio, corresponde à diferença da temperatura interna das misturas coloridas, com relação à mistura de Referência, registrada no ensaio de temperatura em campo.

Por exemplo, a temperatura máxima registrada para a mistura de Referência densa foi de 54,7°C às 13h15 a uma profundidade de 1 cm. Para as mesmas condições, a temperatura registrada para a mistura Verde densa foi de 51,5°C. A diferença de 3,2°C foi descontada da temperatura de ensaio padronizada. Desta forma, a temperatura de ensaio para a mistura Verde densa no segundo estágio do foi de 56,8°C.



**Figura 6.46** – Ensaio de resistência à tração da mistura Vermelho A.



**Figura 6.47** – Ensaio de módulo de resiliência da mistura Verde.



**Figura 6.48** – Aparência da misturas CPA de Referência após o ensaio C&A.



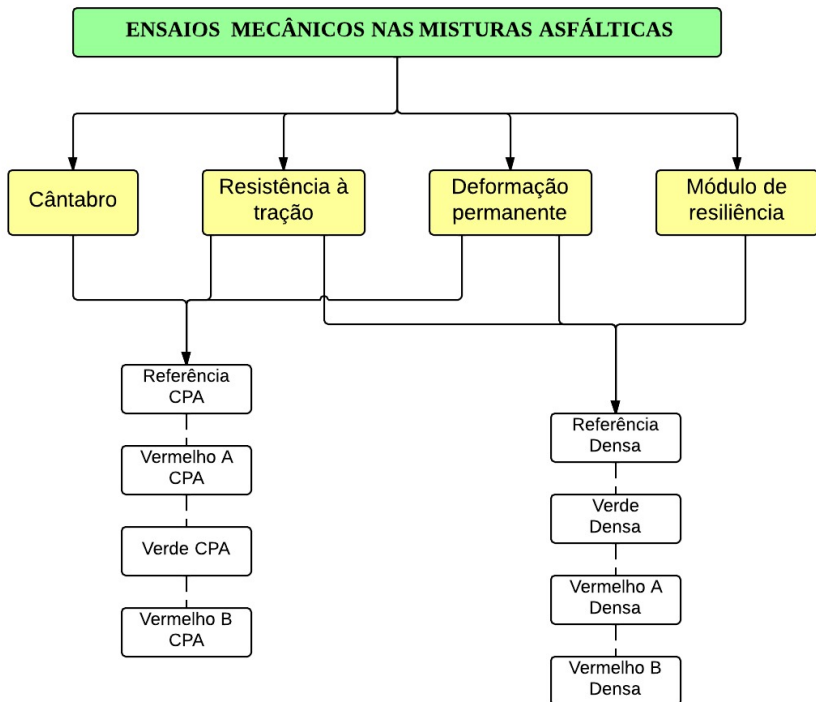
(a)

(b)

**Figura 6.49** – Medição da trilha de roda durante o ensaio de deformação permanente.



A Figura 6.50 mostra o diagrama da etapa de ensaios mecânicos nas misturas asfálticas.



**Figura 6.50** – Diagrama da Etapa de Ensaios Mecânicos nas Misturas Asfálticas (Etapa VII)

## 6.8 ETAPA 8 – MODELAGEM CLIMÁTICA

A etapa de modelagem permitiu estimar a mudança na temperatura do ar decorrente do uso de materiais de pavimentação com alta refletância. Nesta etapa foi modelado o microclima urbano correspondente ao pátio da Reitoria da Universidade Federal de Santa Catarina. O espaço modelado tem uma área de 200 x 200 m. A área (Figura 6.51) apresenta alguns tipos de superfícies envelhecidas; mistura asfáltica, pedra *petit pavê* (branca, preta e vermelha) e grama. O objetivo foi simular a influência da mudança do tipo de material (e sua correspondente refletância) na temperatura ambiental do local. Os materiais simulados foram os mesmos que foram estudados na presente

pesquisa. A modelagem e análise dos parâmetros climáticos do local foi realizada no software Envi-met Versão 3.1. Os resultados obtidos foram comparados com os dados coletados no local durante a temporada de verão e permitiram avaliar a Ilha de Calor Urbana para esta área.



**Figura 6.51** – Pátio da Reitoria da UFSC.

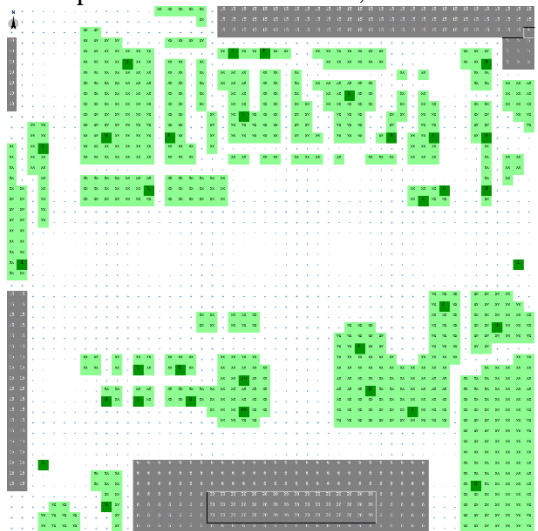
**Fonte:** Google Maps.

A coleta dos dados de temperatura e umidade relativa do local foram realizados mediante a disposição de sensores em um poste na frente da Reitoria (Figura 6.52). Os cinco sensores são da marca HOBO®, modelo U12 Temp-RH *Data Logger*, foram colocados no poste a uma altura de quatro, cinco, sete, nove e dez metros e permitiram a medição da temperatura e da umidade relativa a cada 15 minutos durante o 20 de dezembro de 2012 até o 10 de abril de 2013.



**Figura 6.52** – Sensores de temperatura e umidade no pátio da Reitoria da UFSC.

O local de simulação foi modelado a partir do mapa da UFSC em formato CAD (Figura 6.53). O modelo corresponde a uma área aproximada de 40.000 m<sup>2</sup> (200 x 200 m), dos quais 12.080 m<sup>2</sup> estão cobertos com vegetação. No modelo, a localização dos sensores de temperatura correspondem à coordenada 27, 27.



**Figura 6.53** – Pátio da Reitoria da UFSC: modelo no Envi-met.

O software foi alimentado com os dados de refletância de vários revestimentos estudados. Alguns tipos destes revestimentos já existem no local e durante as simulações foram substituídos por revestimentos similares mas na condição de novos. Os revestimentos utilizados na simulação são mostrados no Quadro 6.1.

**Quadro 6.1** - Refletância solar dos revestimentos utilizados na modelagem climática.

Revestimento	Refletância solar	Observação
Amarelo-albino	12,53	Novo
Vermelho B – Densa	7,41	Novo
Referência – Densa	4,27	Novo
Mistura asfáltica envelhecida	15,64	Existente no local
Concreto Portland Denso	42,75	Novo
<i>Petit pavê</i> branca	49,93	Novo
<i>Petit pavê</i> branca envelhecida	24,87	Existente no local
<i>Petit pavê</i> vermelha envelhecida	18,23	Existente no local
<i>Petit pavê</i> preta envelhecida	9,84	Existente no local

A simulação teve início ao meio dia do 20 de janeiro de 2013 e durou 5 dias. Os resultados de temperatura simulada foram obtidos a cada 24 horas. Os parâmetros climáticos que serviram para alimentar o software foram: temperatura inicial de 29,19 °C; umidade relativa de 55%; velocidade do vento a 10 m de altura de 1 m s<sup>-1</sup>; e direção do vento sul. Após cinco dias de medição, os sensores de temperatura instalados no Pátio da Reitoria registraram uma temperatura média máxima de 35,34 °C a qual foi atingida às 13h00.

Como o local possui um pátio revestido com pedra *petit pavê* de cores branca, preta e vermelha e uma rua com mistura asfáltica envelhecida, foram simuladas cinco situações com o objetivo de analisar a influência da variação do tipo de revestimento na temperatura do local. As cinco simulações são mostradas no Quadro 6.2.

**Quadro 6.2** - Revestimentos simulados no pátio da Reitoria da UFSC.

Simulação	Revestimento	Revestimento do pátio	Área alterada (m <sup>2</sup> )
Primeira	Mistura asfáltica envelhecida original	<i>Petit pavê</i> envelhecida original	-
Segunda	Mistura asfáltica de Referência Densa	<i>Petit pavê</i> envelhecida original	800
Terceira	Mistura asfáltica Amarelo-albino	<i>Petit pavê</i> branca nova	29664
Quarta	Concreto Portland Denso	<i>Petit pavê</i> branca nova	29664
Quinta	Mistura asfáltica Vermelho B - Densa	<i>Petit pavê</i> branca nova	29664

## 6.9 ETAPA 9 – RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Todos os dados coletados durante as etapas anteriores foram compilados e ordenados para logo serem analisados. A análise dos dados visa o entendimento, sobretudo, da influência das características físicas, químicas e cromáticas das misturas no seu desempenho óptico, térmico e mecânico.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T-283 (1989), **Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage**. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. 13<sup>th</sup> Edition. Washington, D. C.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 15184:2004. **Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, 2004

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 6296:2012. **Produtos betuminosos semissólidos — Determinação da massa específica e densidade relativa**. Rio de Janeiro, 2012.

AFNOR NF T 98-254-3 (1993), **Mesure de Propriétés Liées à la Perméabilité des Matériaux des Mélanges Hydrocarbonés - Partie 3: Estai au Drainomètre de Chantier**. Association Française de Normalisation, AFNOR.

Akbari, H.; Levinson, R.; Stern, S. **Procedure for Measuring the Solar Reflectance of Flat or Curved Roofing Assemblies**. Solar Energy 82 (2008) pp. 648-655, doi:10.1016/j.solener.2008.01.001.

ASTM Standard C131, 2003. **Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/C0131-06, www.astm.org.

ASTM Standard C142/C142M. **Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, DOI: 10.1520/D5821, www.astm.org.

ASTM Standard E965-96, 2006. **Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, DOI: 10.1520/E0965-96R06, www.astm.org.

ASTM Standard E1918, 2006. **Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/E1918-06, www.astm.org.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 035/98. **Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro, 1998

\_\_\_\_\_. DNER – ME 054/97. **Equivalente de areia**. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 078/94. **Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 081/98. **Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 083/98. **Agregados – análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 085/94. **Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 086/94. **Agregados – determinação do índice de forma**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. DNER – ES 386/99. **Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito**. Rio de Janeiro, 1999.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 131/2010 – ME. **Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. DNIT 155/2010 – ME. **Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

Knabben R. M. **Estudo do Ruído Pneu-Pavimento e da Absorção Sonora em Diferentes Revestimento de Pavimento**. Dissertação de Mestrado. UFSC, Florianópolis, SC, 2012, 251 p.



Martins V. C., **Otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do concreto dosado em central com a utilização de aditivos.** Dissertação de mestrado. UFSC, Florianópolis, 2005, 185 p.

MEURER FILHO, E. **Estudos de Granulometria para Concretos Asfálticos Drenantes.** Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2001.



## 7 RESULTADOS E ANÁLISE

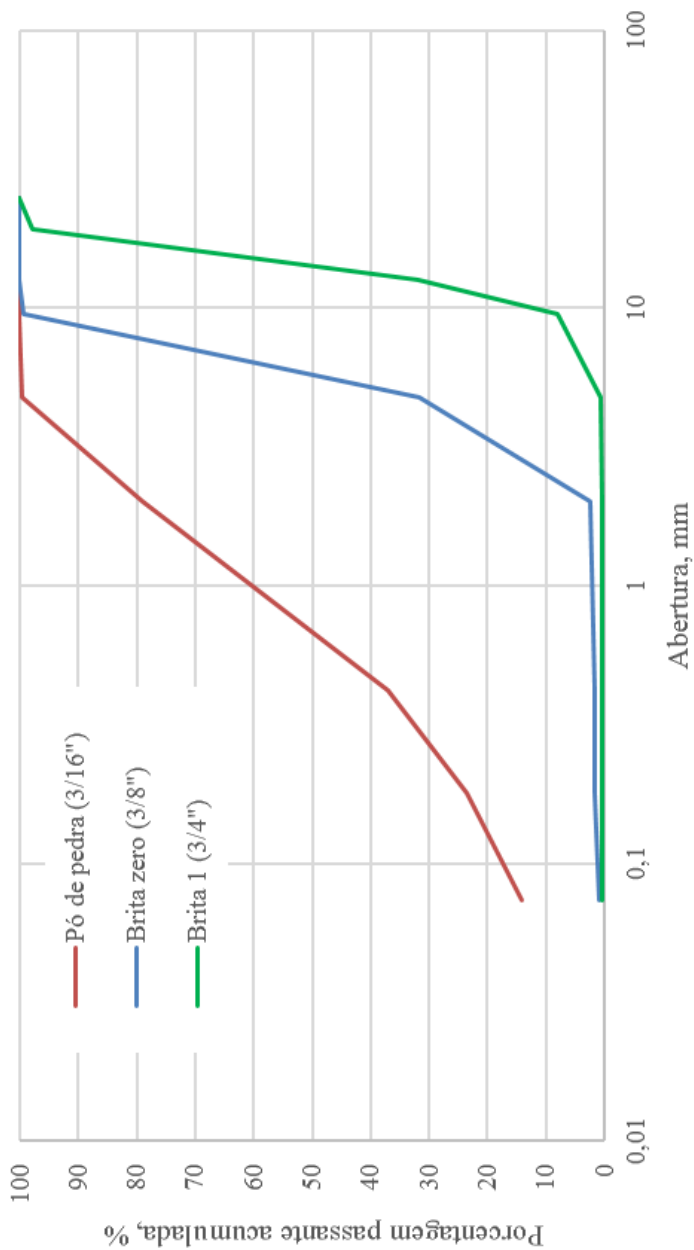
### 7.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

#### 7.1.1 Agregados

A granulometria e as características físicas dos agregados são apresentados na Tabela 7.1 e as curvas granulométricas de cada agregado são mostradas na Figura 7.1. Os agregados utilizados são do tipo granítico, o qual apresenta uma carga elétrica eletro-negativa na sua superfície.

**Tabela 7.1** – Características físicas dos agregados minerais.

Peneira	Abertura (mm)	Porcentagem passante acumulada (%)		
		Pó de pedra (3/16")	Brita zero (3/8")	Brita 1 (3/4")
1	25	100,0	100,0	100,0
¾	19,1	100,0	100,0	97,8
½	12,7	100,0	100,0	32,0
3/8	9,5	100,0	99,3	8,0
n 4	4,75	99,6	31,8	0,6
n 10	2	78,9	2,4	0,5
n 40	0,42	37,1	1,8	0,5
n 80	0,18	23,6	1,6	0,4
n 200	0,074	14,1	1,0	0,3
Massa específica aparente, g cm <sup>-3</sup> (Gsb)			2,718	2,749
Massa específica real, g cm <sup>-3</sup> (Gsa)		2,711	2,748	2,766
Índice de forma			2,00	2,09
Equivalente de areia, %		74	95	
Abrasão Los Angeles, %			20	



**Figura 7.1** – Curvas granulométricas dos agregados utilizados.

### 7.1.2 Ligante

As características físicas dos ligantes CAP 50/70 e albino vegetal são mostrados na Tabela 7.2.

**Tabela 7.2** – Características do ligante CAP 50/70 e do ligante albino vegetal.

Ensaio	Ligante CAP 50/70	Ligante albino vegetal
Penetração, 25 °C, 5s, 100g (1/10mm)	51	57
Ponto de amolecimento (°C)	54	50,3
Viscosidade Brookfield		
a 135 °C (cP)	340	265
a 150 °C (cP)	172	126
a 177 °C (cP)	64	45
Temperatura de usinagem, °C	152	143
Temperatura de compactação, °C	139	133
Ductilidade a 25°C (cm)		> 100
Massa específica, 25 °C, g/cm <sup>3</sup>	1,00	1,04

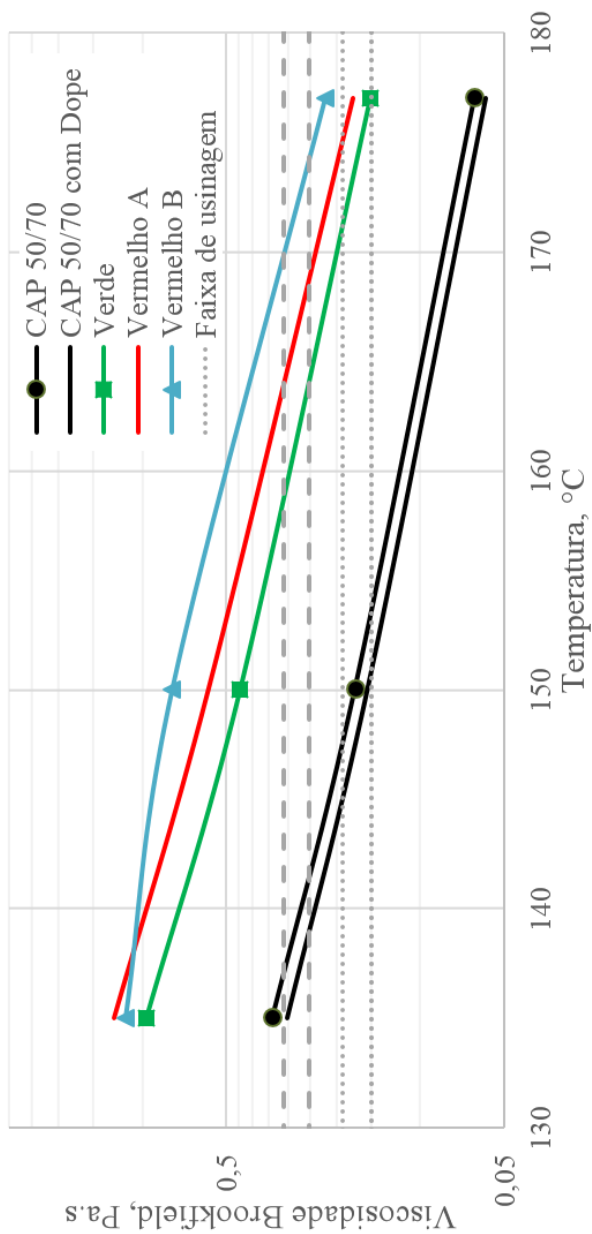
O ensaio de viscosidade rotacional foi realizado, adicionalmente, para o ligante CAP 50/70 com adição de 0,5% de *dop*, para o ligante Amarelo (ligante albino e pigmento Amarelo na proporção de 7,3:4), para o ligante Verde (CAP 50/70 com *Dop* e pigmento Verde na proporção 4,9:4), para o ligante Vermelho A (CAP 50/70 com *Dop* e pigmento Vermelho A na proporção 4,9:4) e para o ligante Vermelho B (CAP 50/70 com *Dop* e pigmento Vermelho B na proporção 4,5:2,4). Os resultados dos ensaios são mostrados na Tabela 7.3;

As curvas de viscosidade-temperatura para os ligantes CAP 50/70, CAP 50/70 com *dop*, Verde com *dop*, Vermelho A com *dop* e Vermelho B com *dop* são mostradas na Figura 7.2. Na Figura 7.3 são mostradas as curvas viscosidade-temperatura do ligante albino vegetal e Amarelo-albino.

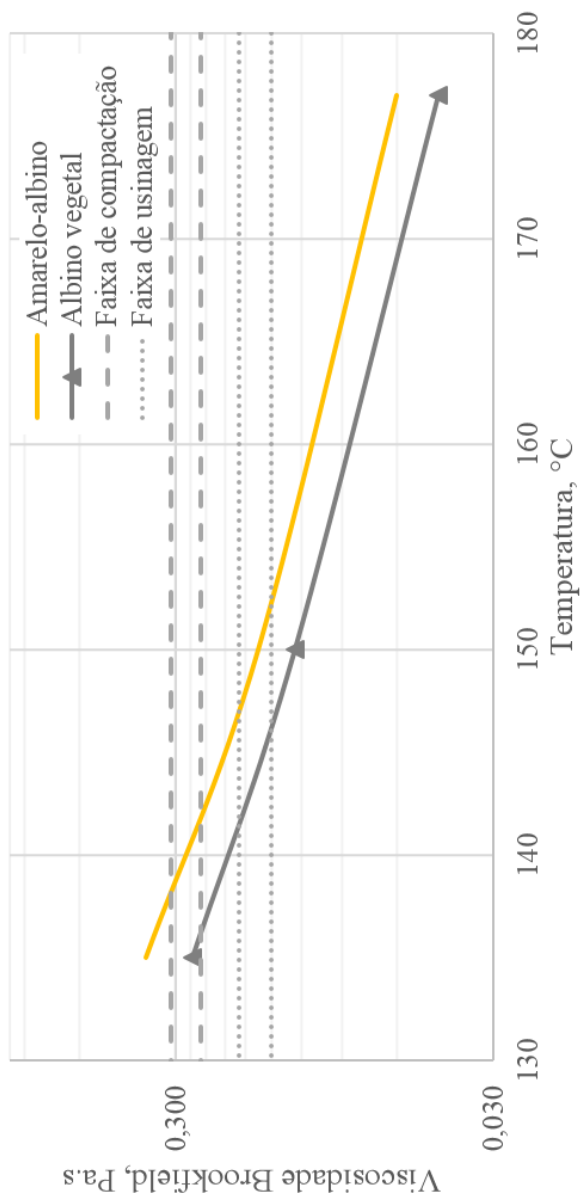
**Tabela 7.3** – Ensaio de viscosidade rotacional do ligante CAP 50/70 (com *dop*), Verde, Vermelho A, Vermelho B e do ligante Amarelo-albino.

Temperatura, velocidade	CAP 50/70 ( <i>dop</i> )	Verde ( <i>dop</i> )	Vermelho A ( <i>dop</i> )	Vermelho B ( <i>dop</i> )	Amarelo-albino
135 °C, 20 rpm; Pa.s	0,300	0,968	1,257	1,150	0,373
150 °C, 50 rpm; Pa.s	0,155	0,445	0,576	0,781	0,165
177 °C, 100 rpm; Pa.s	0,058	0,152	0,174	0,220	0,061
Temperatura de usinagem a 0,17 +/- 0,02 Pa.s ; (°C)					
0,19	146	171	175	178	148
0,17	149	174	177	179	151
0,15	152	177	180	180	154
Temperatura de compactação, 0,28 +/- 0,03 Pa.s; (°C)					
0,31	133	160	164	172	138
0,28	136	162	166	174	140
0,25	139	165	169	175	142

Os pigmentos são substâncias sólidas as quais ao serem adicionadas ao ligante CAP 50/70, causam o enrijecimento do mesmo. Como consequência, o ligante torna-se mais duro e sua viscosidade aumenta. Este efeito é visível nas curvas viscosidade-temperatura e pode ter uma grande influência na resistência mecânica da mistura asfáltica.



**Figura 7.2** – Curva viscosidade – temperatura do ligante CAP 50/70, Verde, Vermelho A e Vermelho B com *dop*.



**Figura 7.3** – Curva viscosidade – temperatura do ligante albino vegetal e do ligante Amarelo-albino.



O ligante albino apresenta uma viscosidade menor do que a do CAP 50/70. A diferença entre a temperatura de usinagem e compactação do ligante CPA 50/70 com o ligante albino não é uniforme, sendo de 9 e 6°C respectivamente (Tabela 7.3). O uso do ligante albino ao invés do CAP 50/70 na produção de misturas asfálticas exigiria um menor consumo energético e permitiria uma economia durante a usinagem.

A adição de 0,5% de *dop* no ligante CAP 50/70 diminui um pouco a viscosidade do mesmo. Os resultados mostram que a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação foi de 3°C (Tabela 7.2 e Tabela 7.3).

Por causa do enrijecimento do CAP 50/70, a adição dos pigmentos Verde, Vermelho A e Vermelho B, aumentou as temperaturas de usinagem em 25, 28 e 30 °C e as temperaturas de compactação em 26, 30 e 38°C (Tabela 7.3). Entretanto, como discutido no item 6.3.1.2 a mistura colorida foi homogeneizada e compactada nas mesmas temperaturas a mistura de Referência. A usinagem e compactação das misturas asfálticas durante a etapa de dosagem foram realizados com as temperaturas de trabalho estimadas para o ligante CAP 50/70 com *dop*.

A adição do pigmento Amarelo tem um efeito similar no ligante albino vegetal aumentando a viscosidade e as temperaturas de trabalho do mesmo. No entanto, o incremento das temperaturas não foi tão drástico como no ligante CAP 50/70. Neste caso, o incremento das temperaturas de usinagem e compactação foi de 8 e 7°C respectivamente. O baixo incremento das temperaturas de trabalho do ligante albino com pigmento Amarelo comparados com o ligante CAP 50/70 e os outro pigmentos se deve à diferença de proporções entre as amostras. No caso das amostras com ligante CAP 50/70, a proporção do ligante:pigmento foi de 4,9:4, enquanto que para o ligante Amarelo-albino foi de 7,3:4. Ou seja, a viscosidade do ligante Amarelo-albino foi menos afetado pela adição de pigmento Amarelo devido, possivelmente, à baixa proporção do mesmo na amostra.

### 7.1.3 Pigmentos

As características físicas e químicas dos pigmentos estudados são mostradas no Quadro 7.1.

**Quadro 7.1** – Características físicas e químicas dos pigmentos estudados.

Pigmento	Nome comercial	Denominação Química	Forma	Massa específica g/cm <sup>3</sup>
Amarelo	Bayferrox 921	Óxido de ferro	Acicular (pó)	4,00
Marrom A	Bayferrox 975 M	Óxido de ferro sintético	Irregular (pó)	4,20
Marrom B	Bayferrox 601 M	Óxido de ferro sintético	Irregular (pó)	4,20
Marrom C	Bayferrox 658 M	Óxido de ferro sintético	Irregular (pó)	4,60
Preto	Bayferrox 318	Oxido de ferro sintético	Esférica (pó)	4,60
Verde	Colortherm Green GN	Óxido de cromo	Esférica (pó)	5,20
Vermelho A	Bayferrox 120	Óxido de ferro sintético	Esférica (pó)	5,00
Vermelho B	Nosbur® Color+ R	Óxido de ferro (80%) e resinas (20%)	Cilíndrica (pó)	2,35

As Figura 7.4 a Figura 7.7, mostram os resultados do ensaio de difração de raios-X dos pigmentos Amarelo, Verde, Vermelho A e Vermelho B. Os resultados mostram que as amostras apresentam uma estrutura cristalina pouco amorfa, o que favoreceria a não reatividade destes materiais com outros elementos. Embora a composição química dos pigmentos Amarelo, Vermelho A e Vermelho B seja parecida, os mesmos tem origens diferentes devido à cristalinização do óxido de ferro.

O pigmento Amarelo é um derivado do mineral Goethite e os pigmentos Vermelho A e B são derivados do mineral Hematita. A Goethite é um mineral do tipo argiloso mais abundante em solos de clima tropical. No Brasil, a Goethite confere coloração amarela ao solo. A Hematita é o óxido de ferro propriamente dito. Este é um mineral que faz parte de solos de regiões tropicais e subtropicais e confere a cor vermelha aos solos.

Além de hematita, o pigmento Vermelho B, apresenta, também, traços de calcita, o qual seria parte da composição química das resinas deste produto. O pigmento Verde é composto por óxido de cromo o qual é um composto inorgânico que pode ser utilizado como precursor de outros compostos de cromo. Este óxido é encontrado na natureza sob a forma do mineral raro chamado eskolaite.

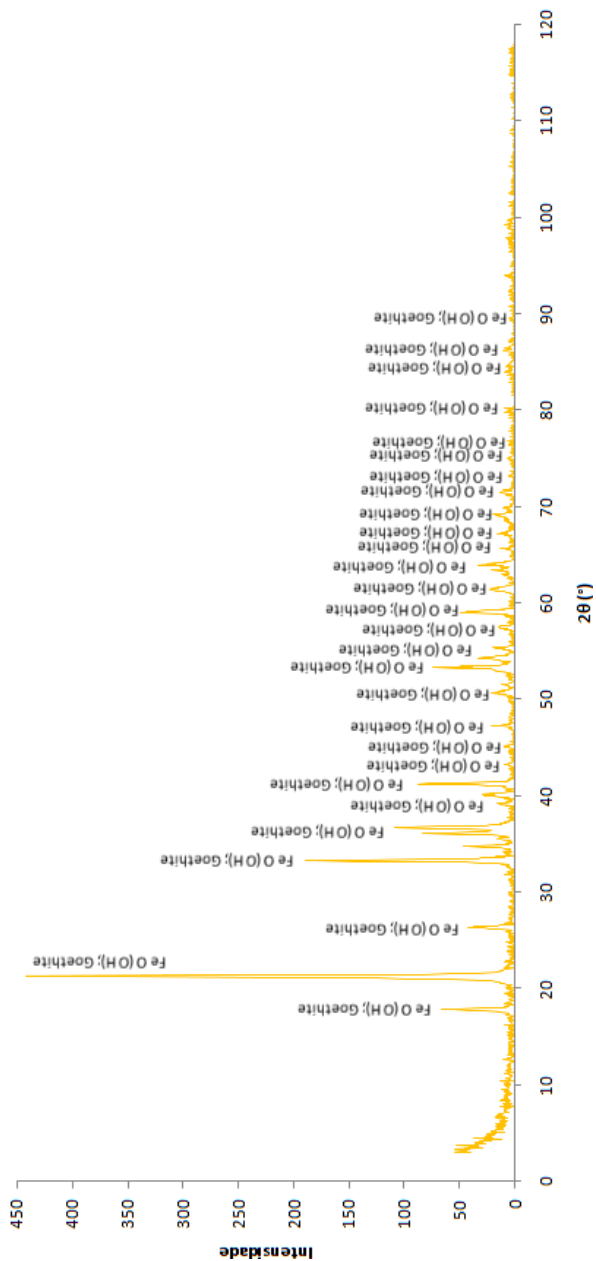


Figura 7.4 – DRX do pigmento Amarelo.

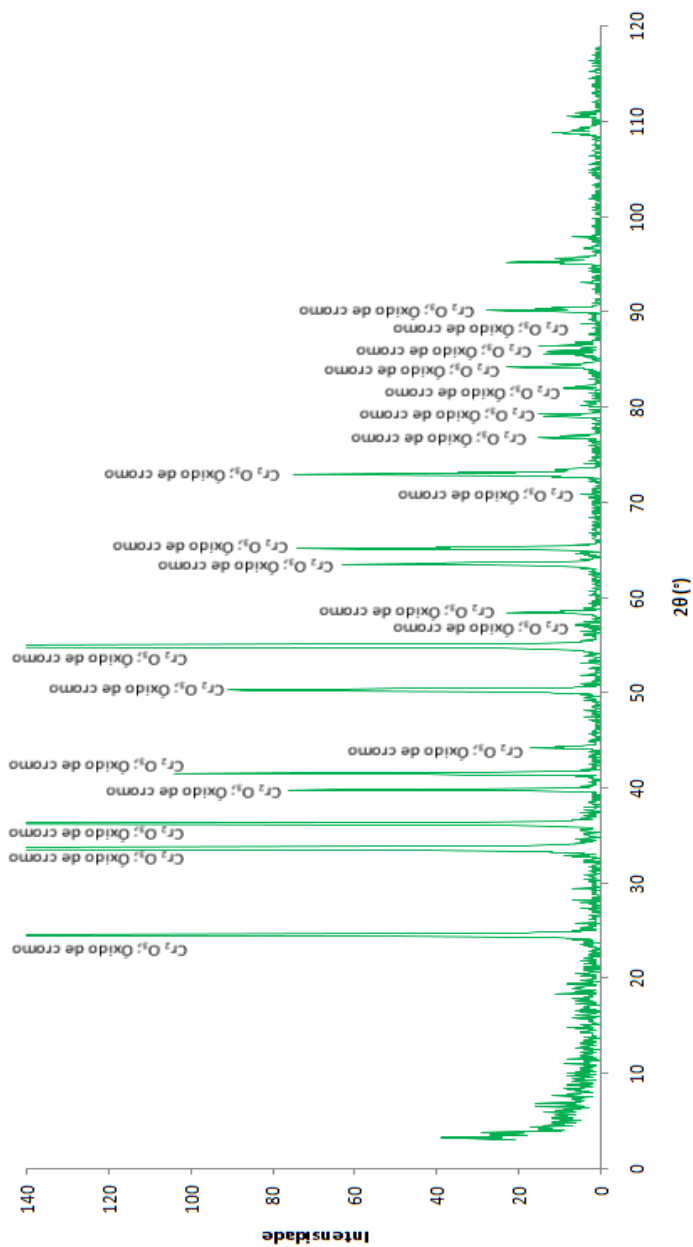


Figura 7.5 – DRX do pigmento Verde.

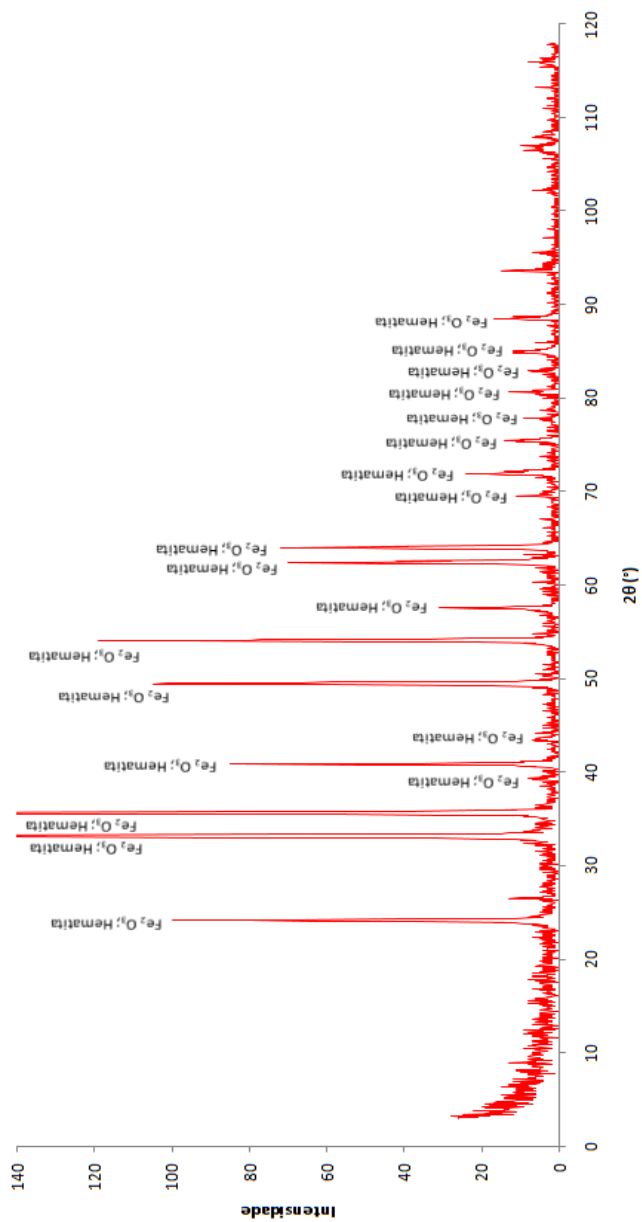


Figura 7.6 – DRX do pigmento Vermelho A.

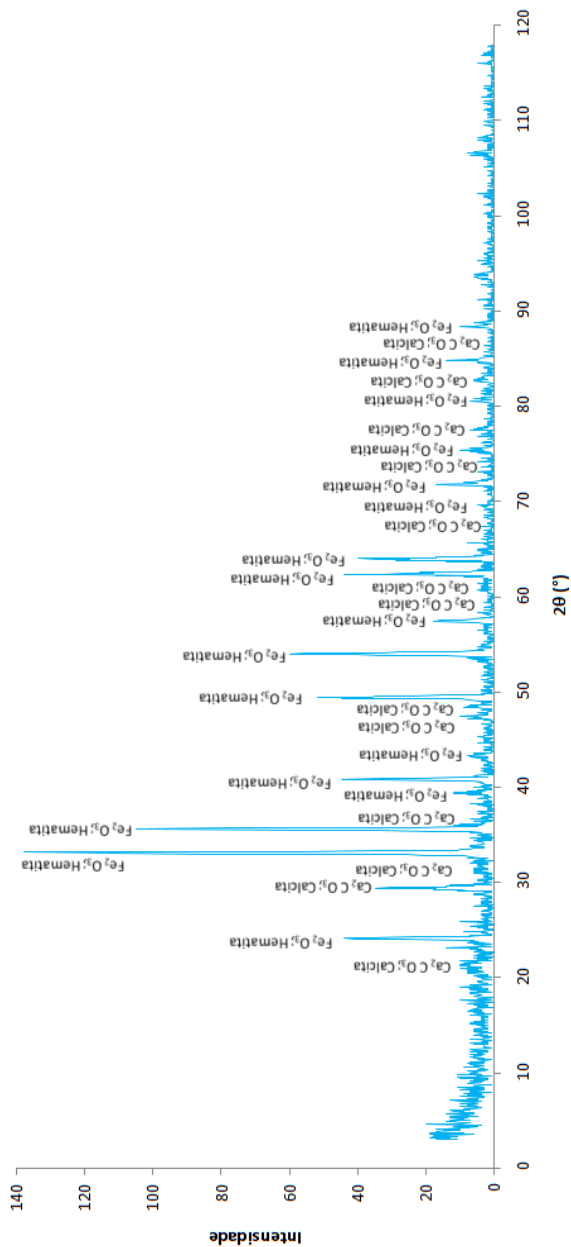
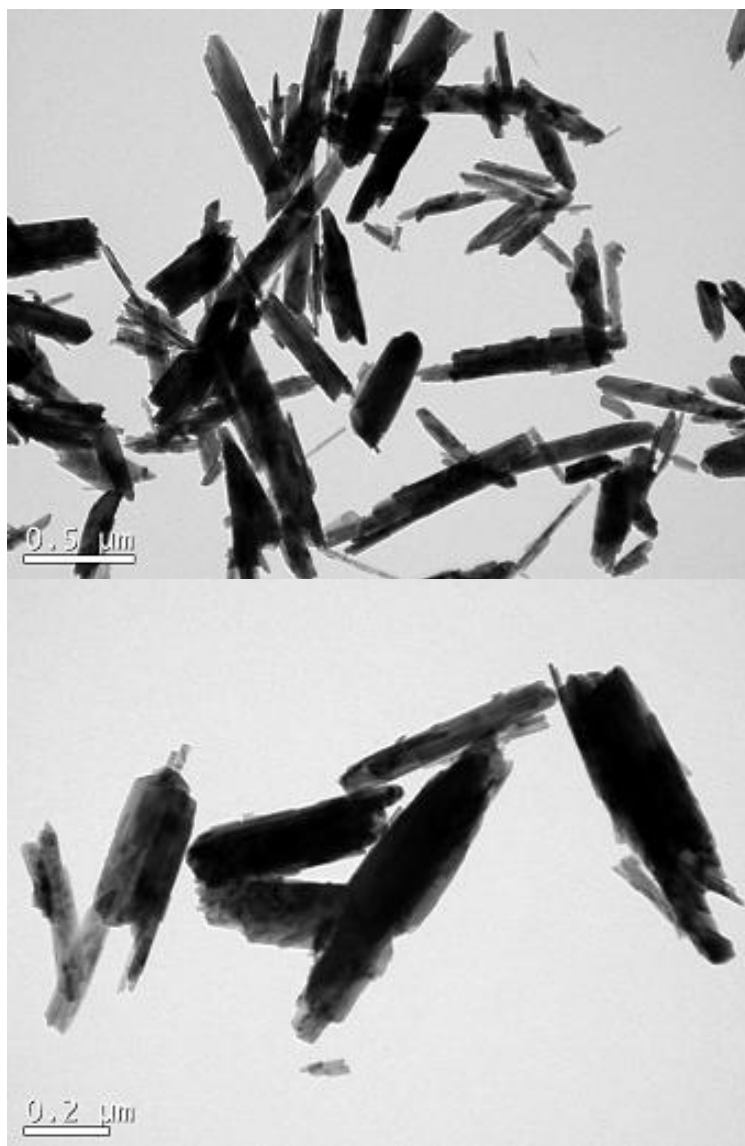


Figura 7.7 – DRX do pigmento Vermelho B.

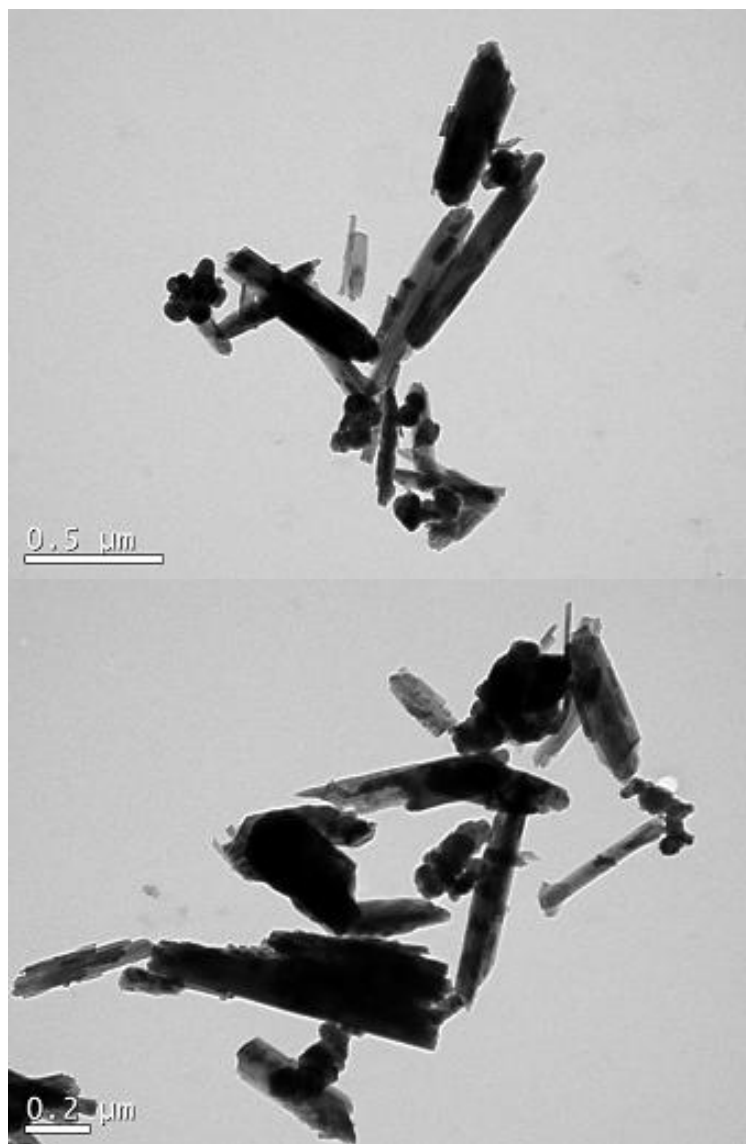
As Figura 7.8 a Figura 7.14 mostram as imagens obtidas no microscópio eletrônico de transmissão JEM-1011 TEM. As imagens mostram a morfologia dos pigmentos assim como o seu tamanho aproximado e a homogeneidade. Neste ensaio, foi possível analisar todos os pigmentos disponíveis para a pesquisa menos o Vermelho B, o qual, pelo seu tamanho e composição, não foi possível de dissolver.

O pigmento Amarelo apresenta forma acicular, ou de agulha, e distribuição homogênea de partículas. O pigmento Marrom A não é homogêneo, pois apresenta partículas tanto de forma acicular como de forma arredondada (de menor tamanho). O pigmento Marrom B apresenta forma acicular homogênea. No pigmento Marrom C, pode-se identificar as mesmas características morfológicas que o pigmento Marrom A. O pigmento Preto apresenta partículas arredondadas mas uma distribuição granulométrica heterogênea com presença de partículas muito grandes e muito pequenas. Os pigmentos Verde e Vermelho A têm partículas com forma arredondada e com uma distribuição homogênea. A forma e tamanho dos pigmentos dependem da sua composição e, sobretudo, da moagem durante o processo de produção dos mesmos.





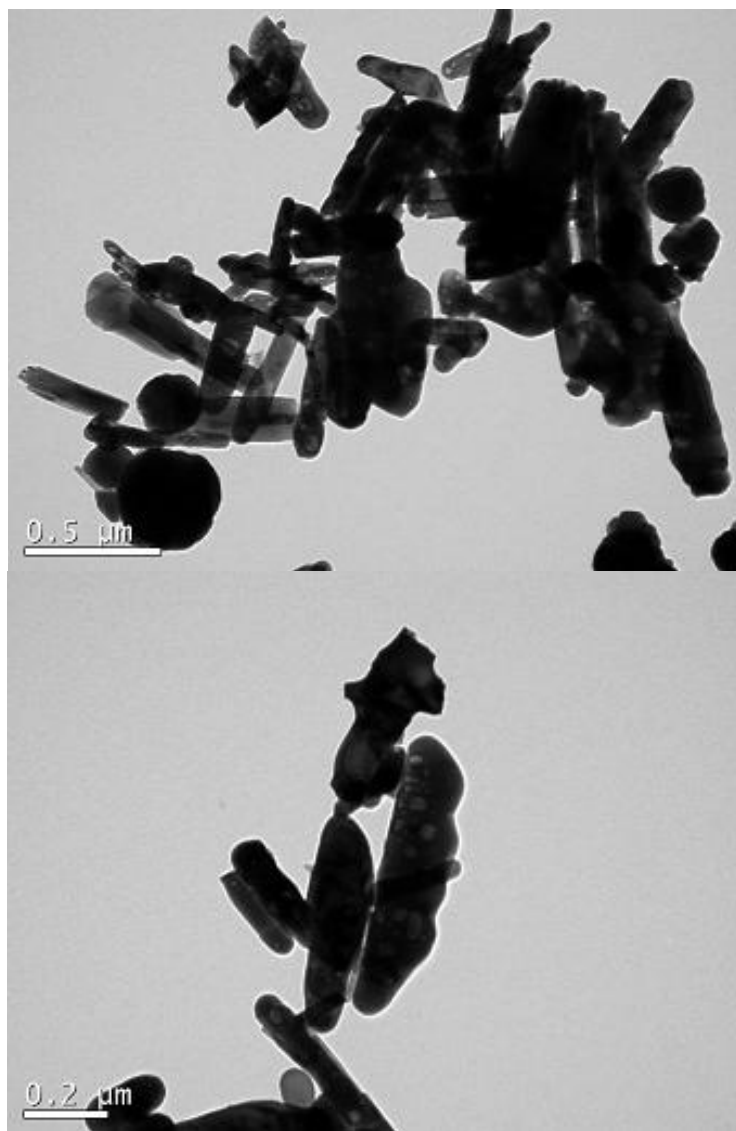
**Figura 7.8** – Microscopia do pigmento Amarelo.



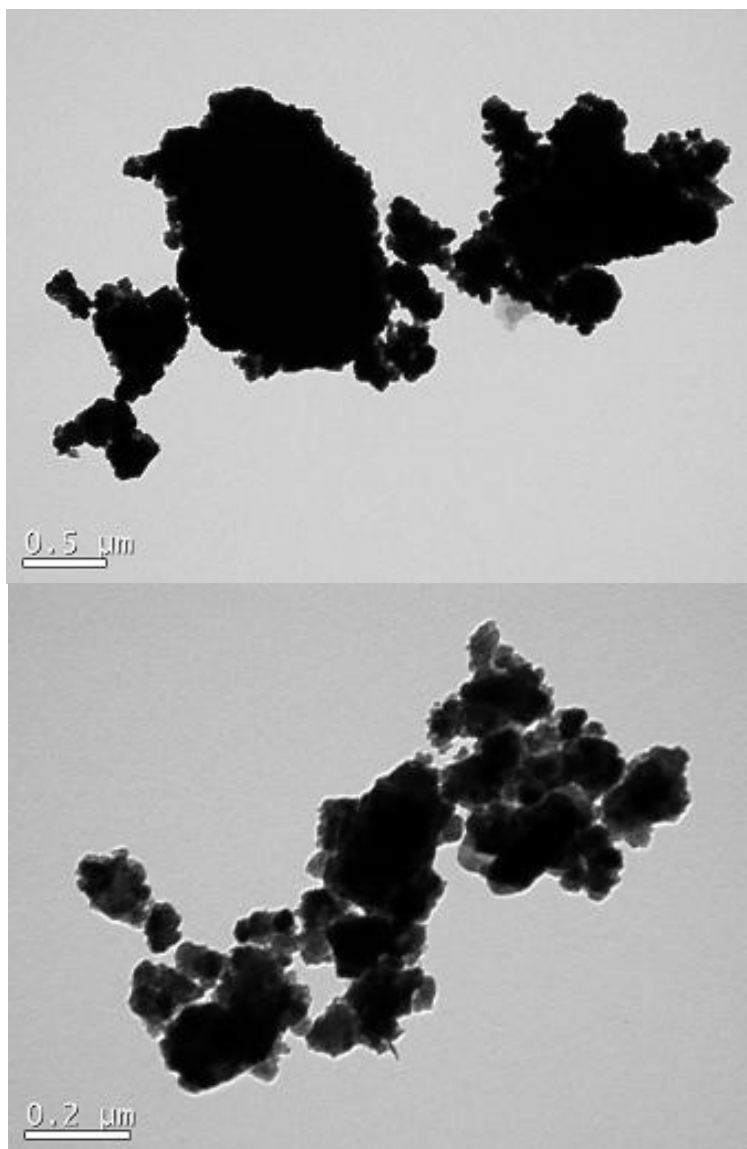
**Figura 7.9** – Microscopia do pigmento Marrom A.



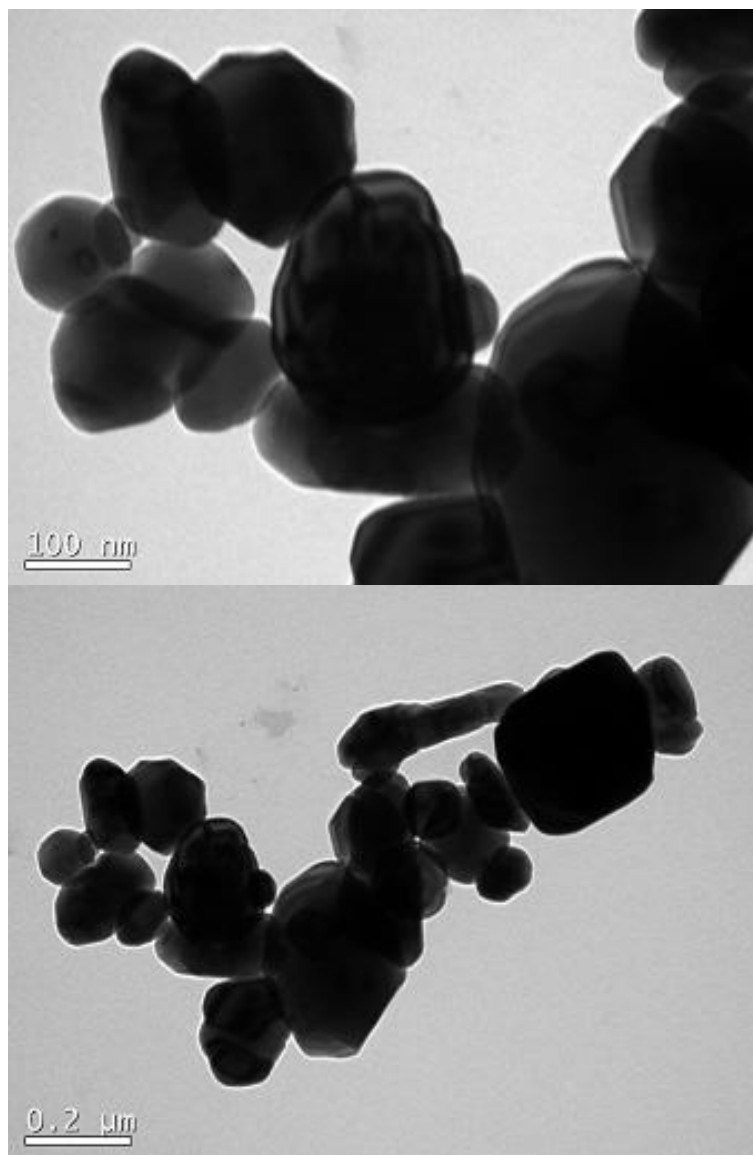
**Figura 7.10** – Microscopia do pigmento Marrom B.



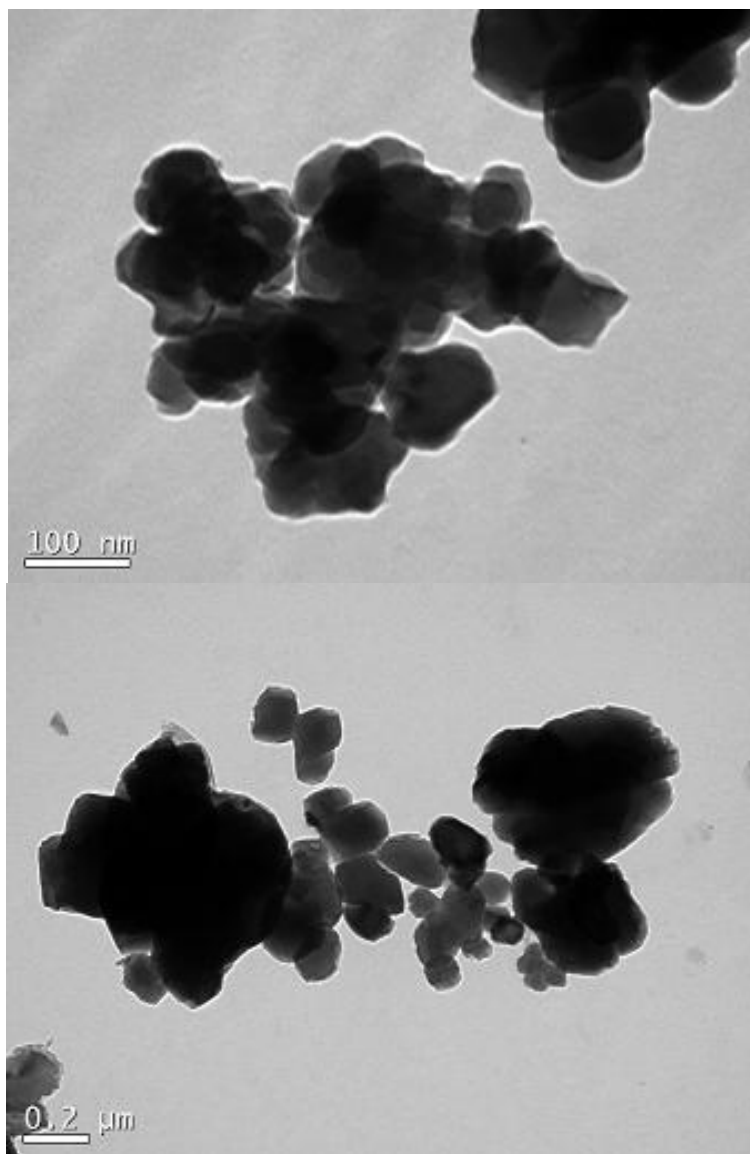
**Figura 7.11** – Microscopia do pigmento Marrom C.



**Figura 7.12** – Microscopia do pigmento Preto.



**Figura 7.13** – Microscopia do pigmento Verde.



**Figura 7.14** – Microscopia do pigmento Vermelho A.

A Tabela 7.4 mostra o grau de alcalinidade (pH mínimo e máximo) dos pigmentos Amarelo, Verde, Vermelho A e Vermelho B, o qual influi no comportamento elétrico da sua superfície.

No caso dos óxidos, os mesmos possuem duplo comportamento elétrico, gerando cargas elétricas negativas quando os valores de pH superam o ponto de carga zero (PCZ) e cargas positivas quando os valores de pH são menores que o PCZ. O ponto de carga zero é o ponto onde existe um balanço entre as cargas positivas e negativas de um elemento, ou seja, a carga elétrica é nula.

Os óxidos de ferro como a hematita e goethite apresentam PCZ variando entre 7 a 9. O pigmento Amarelo à base de goethite tem valores de pH variando entre 3,5 a 7,5, ou seja tem carga elétrica positiva. O pigmento Vermelho A a base de hematita tem pH entre 4 a 8, ou seja tem carga elétrica, principalmente, positiva. O óxido de cromo por sua vez, tem um valor de PCZ de 7 apresentado cargas predominantemente positivas.

**Tabela 7.4** – pH mínimo e máximo dos pigmentos Amarelo, Verde, Vermelho A e Vermelho B.

Pigmento	Nome comercial	Mineral	pH mín	pH máx	PCZ
Amarelo	Bayferrox 921	Goethite	3,5	7,5	7 - 9
Verde	Colortherm Green GN	Eskoliaite	5	7	7
Vermelho A	Bayferrox 120	Hematita	4	8	7 - 9
Vermelho B	Nosbur® Color <sup>+</sup> R	Hematita	4	8	7 - 9

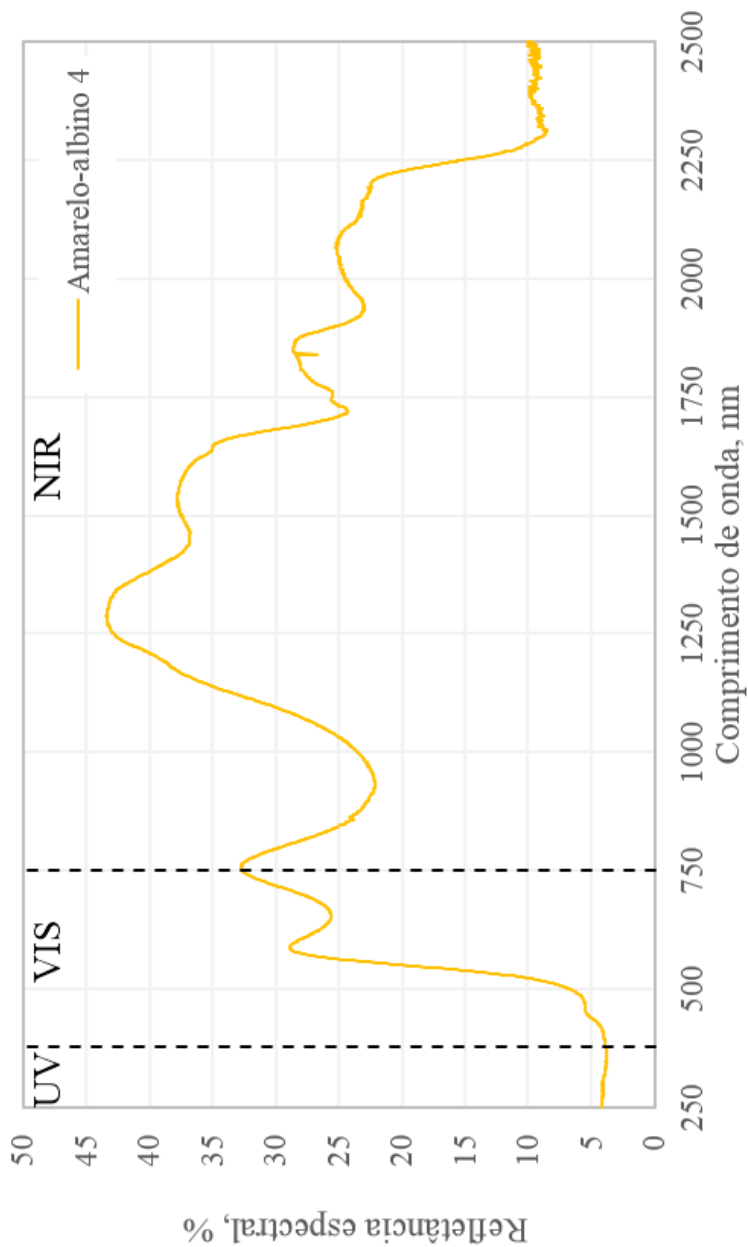
A carga elétrica dos pigmentos uma vez adicionados na mistura asfáltica, podem alterar a carga elétrica da interface agregado-ligante, melhorando a adesividade. A melhora da adesividade está relacionada com um melhor desempenho mecânico da mistura asfáltica.

## 7.2 PRÉ-SELEÇÃO DOS PIGMENTOS

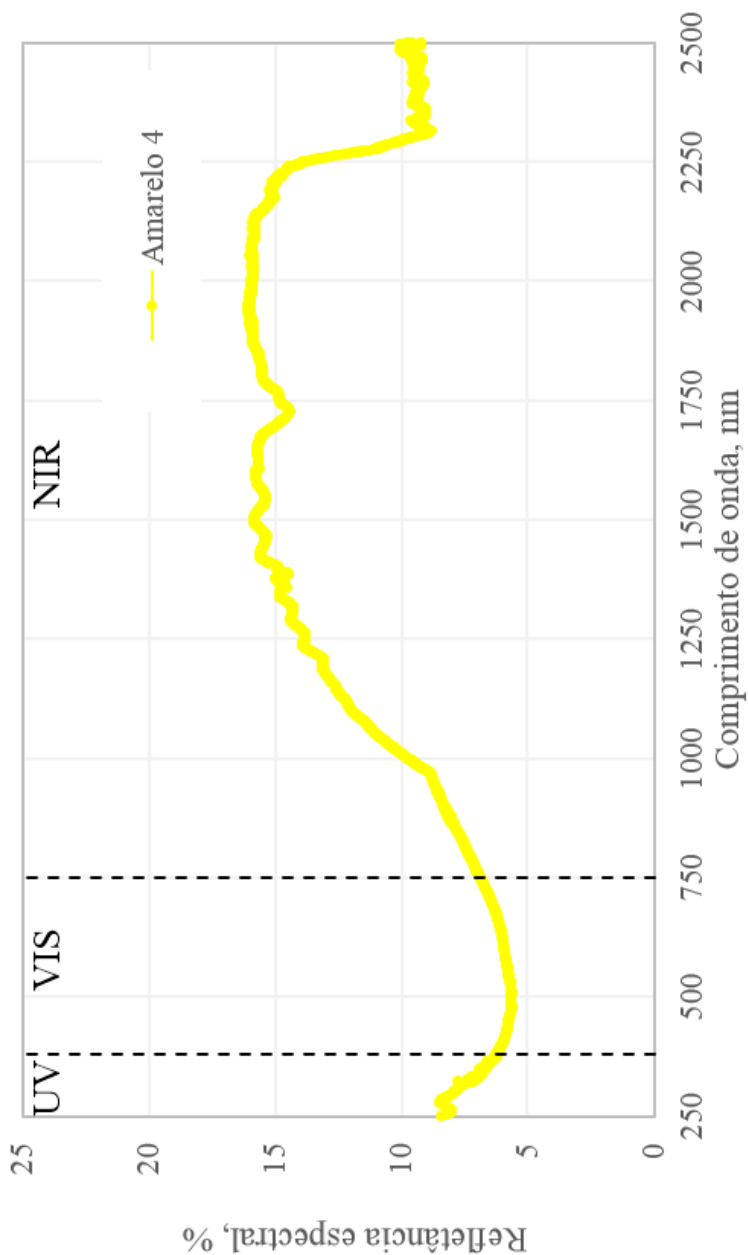
### 7.2.1 Influência do Tipo de Pigmento na Refletância dos Ligantes

Os resultados do ensaio de refletância espectral medida em laboratório dos ligantes coloridos são mostrados nas Figura 7.15 a Figura 7.24. Os valores mostrados correspondem à porcentagem de radiação que é refletida durante o ensaio. Estes dados ainda devem passar por um processo de normalização para se obter os resultados de refletância solar.

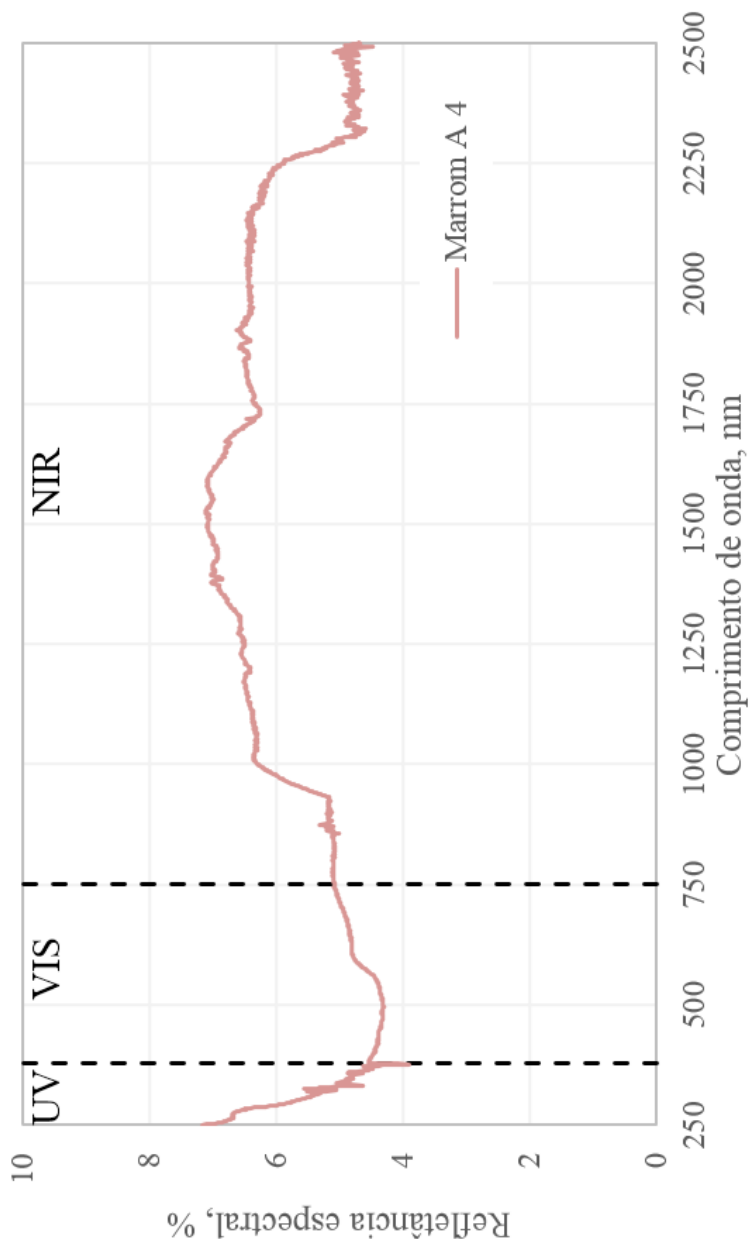




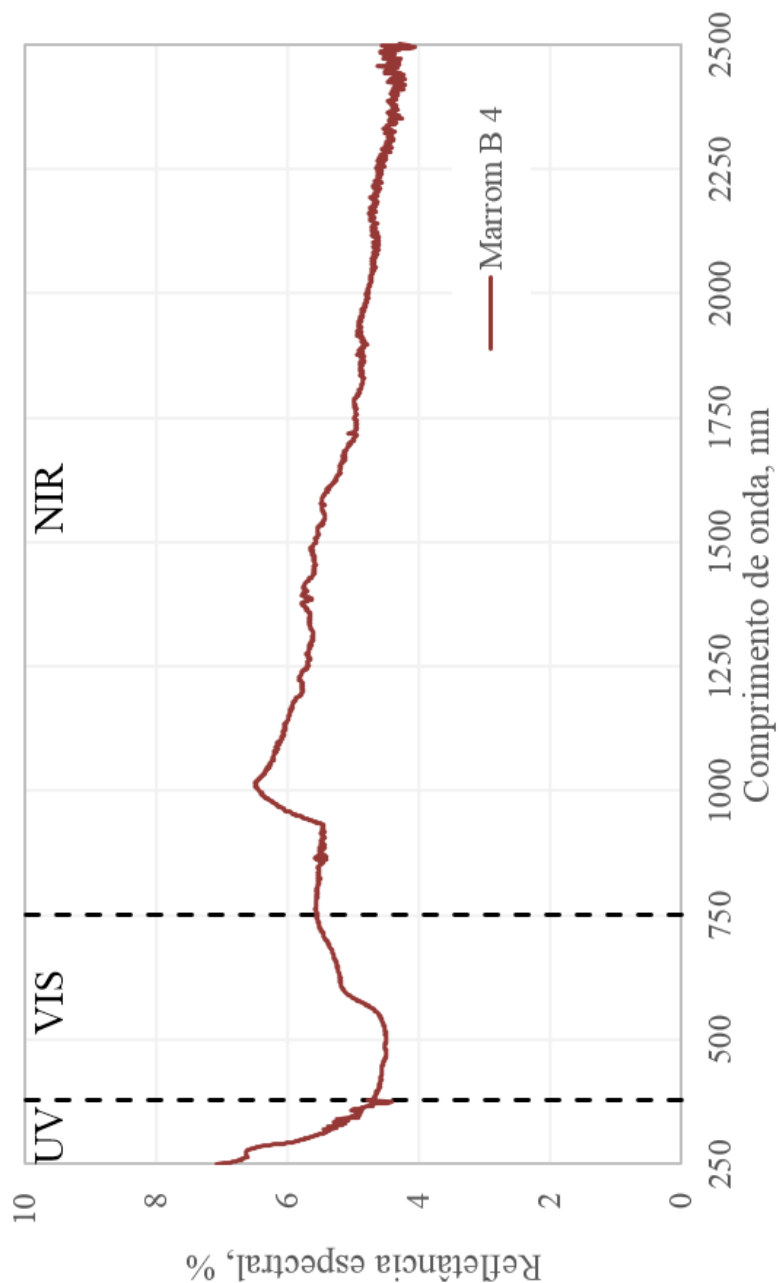
**Figura 7.15** – Refletância espectral do ligante Amarelo-albino.



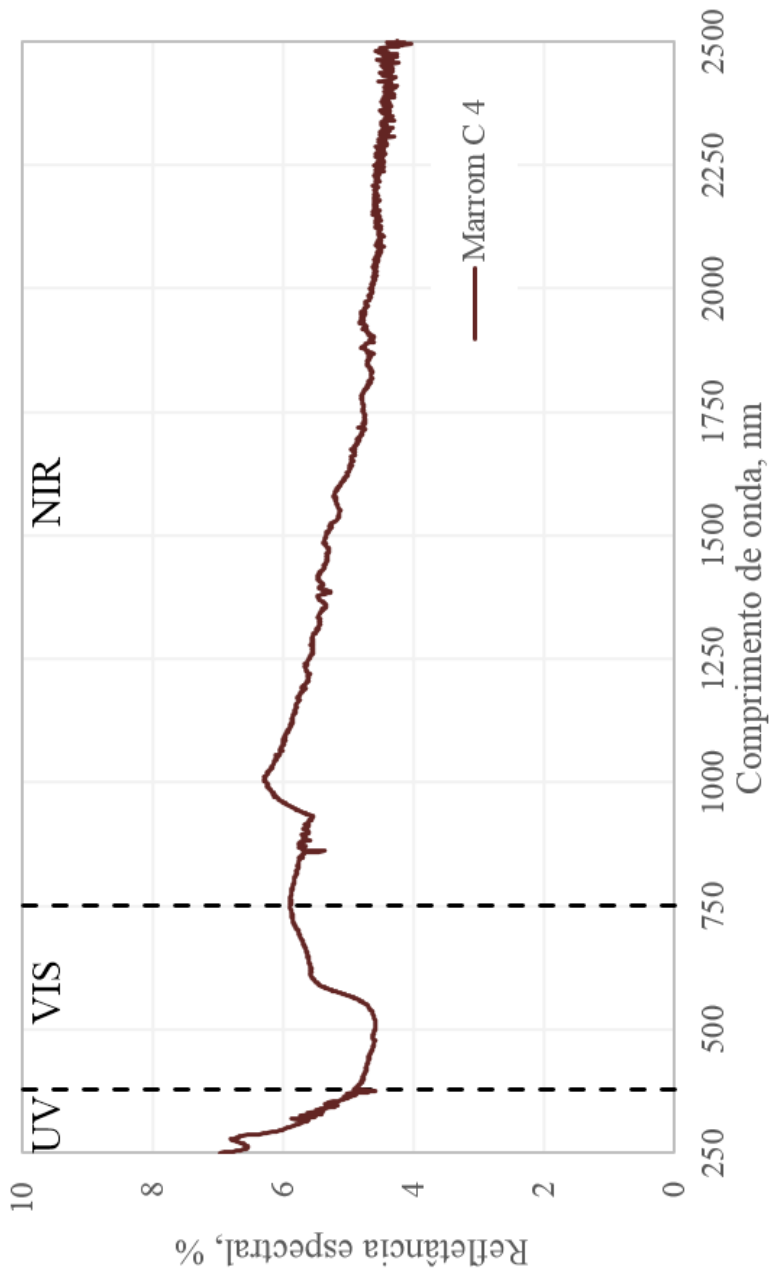
**Figura 7.16** – Refletância espectral do ligante Amarelo.



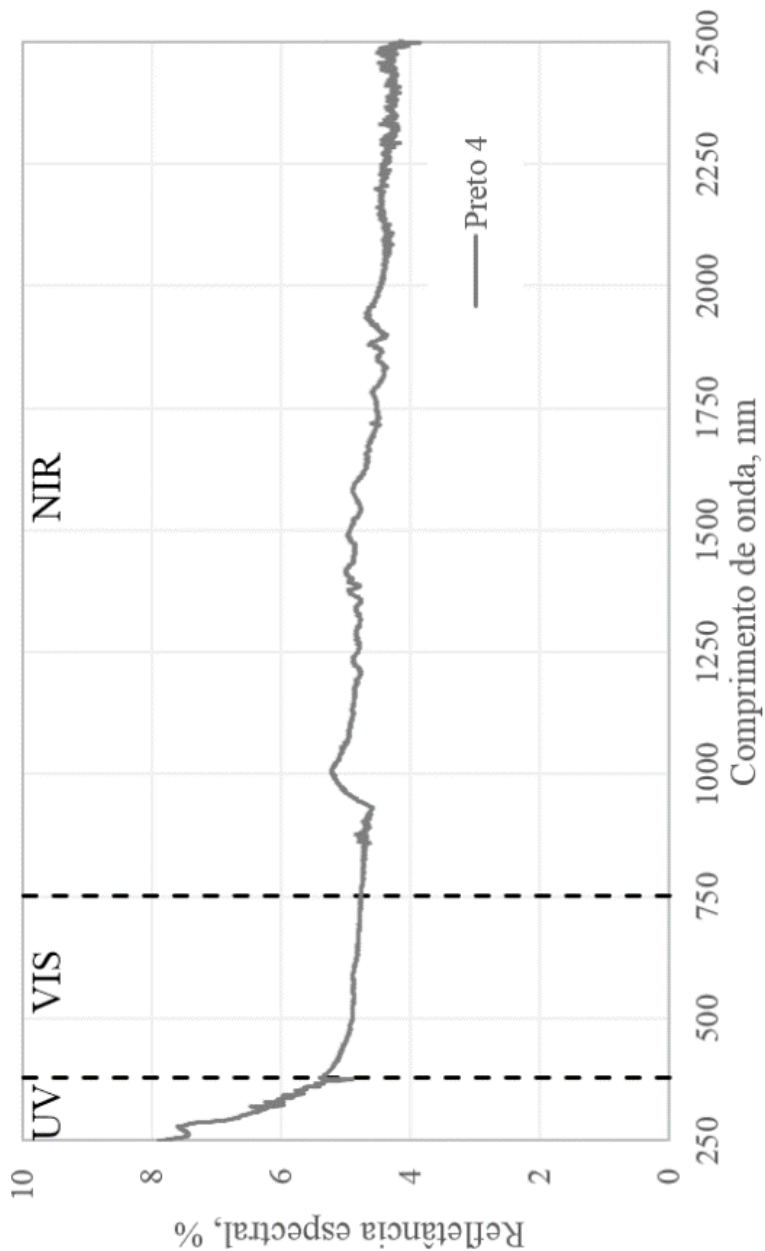
**Figura 7.17** – Refletância espectral do ligante Marrom A.



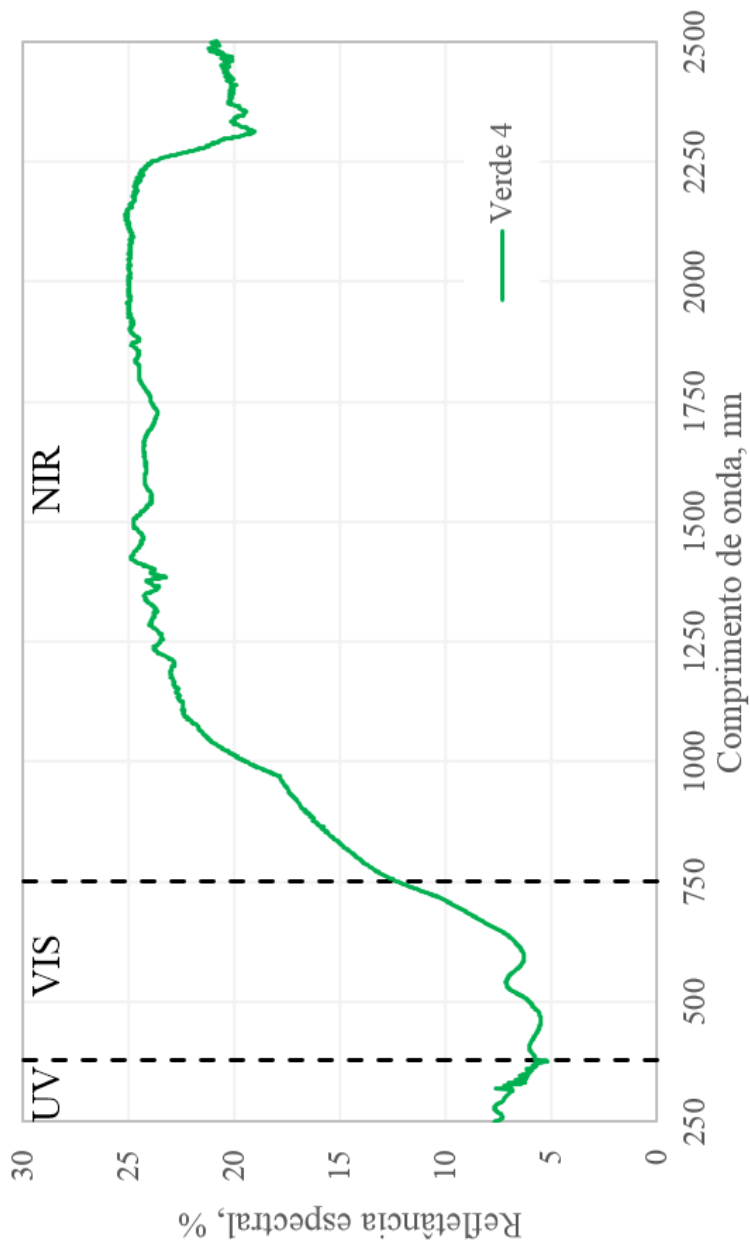
**Figura 7.18** – Refletância espectral do ligante Marrom B.



**Figura 7.19** – Refletância espectral do ligante Marrom C.



**Figura 7.20** – Refletância espectral do ligante Preto.



**Figura 7.21** – Refletância espectral do ligante Verde.

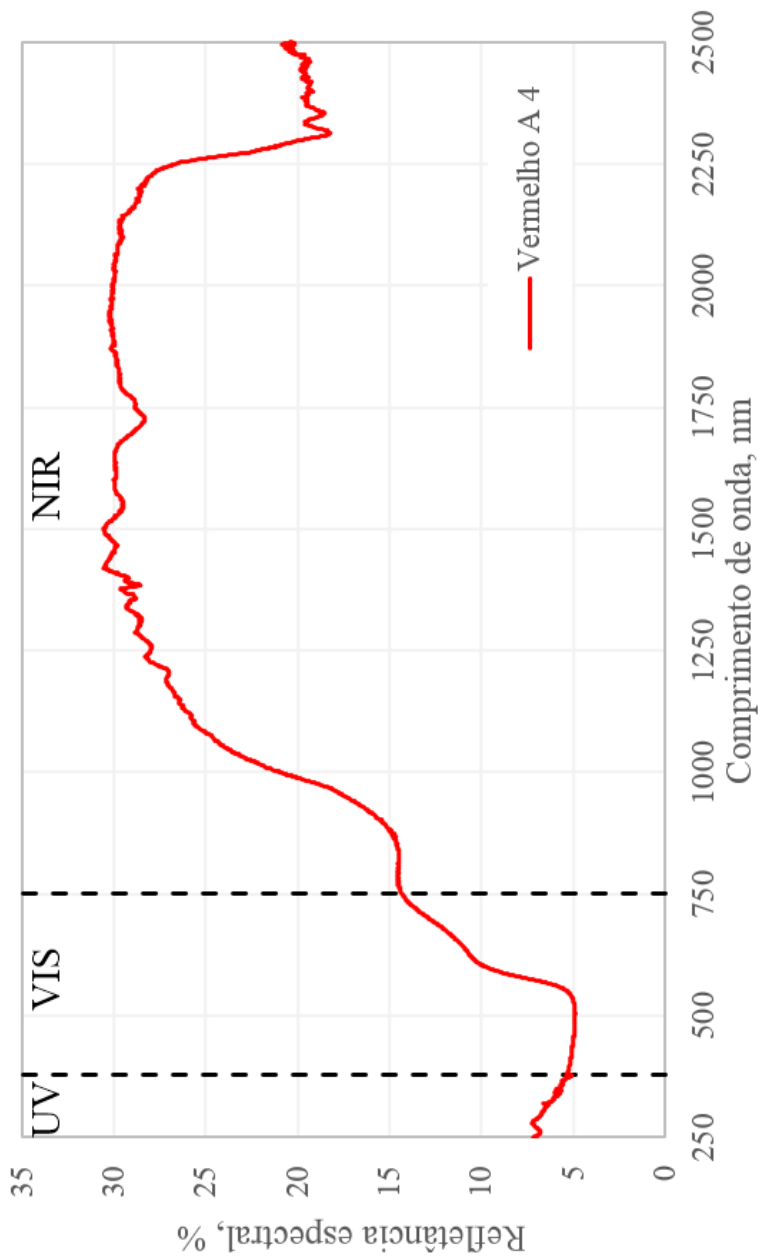
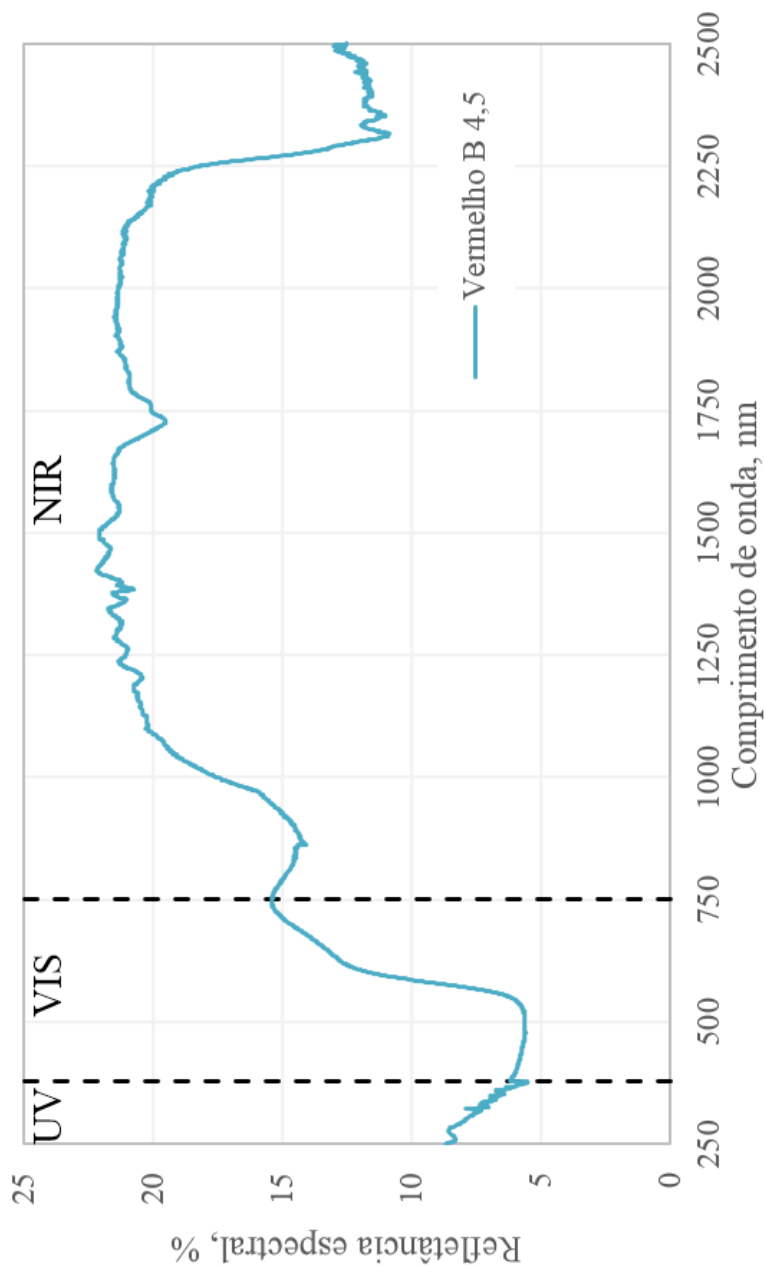
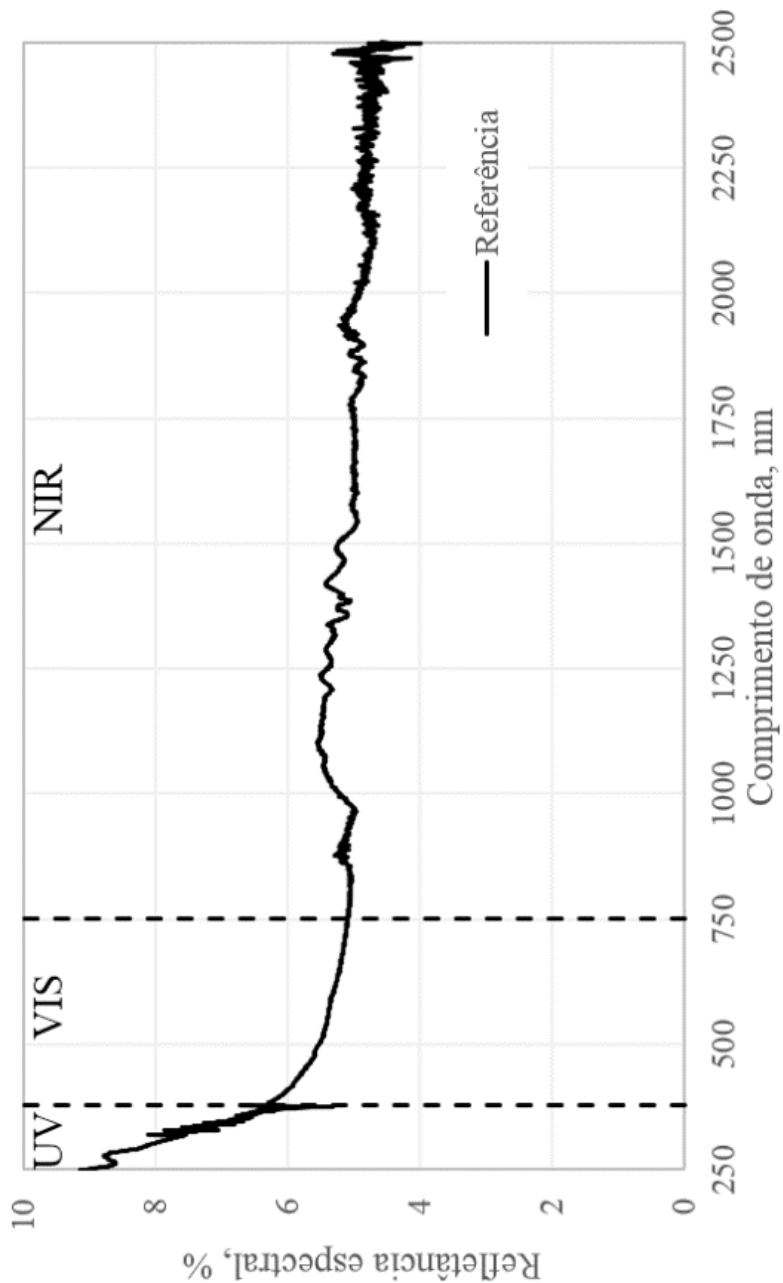


Figura 7.22 – Refletância espectral do ligante Vermelho A.





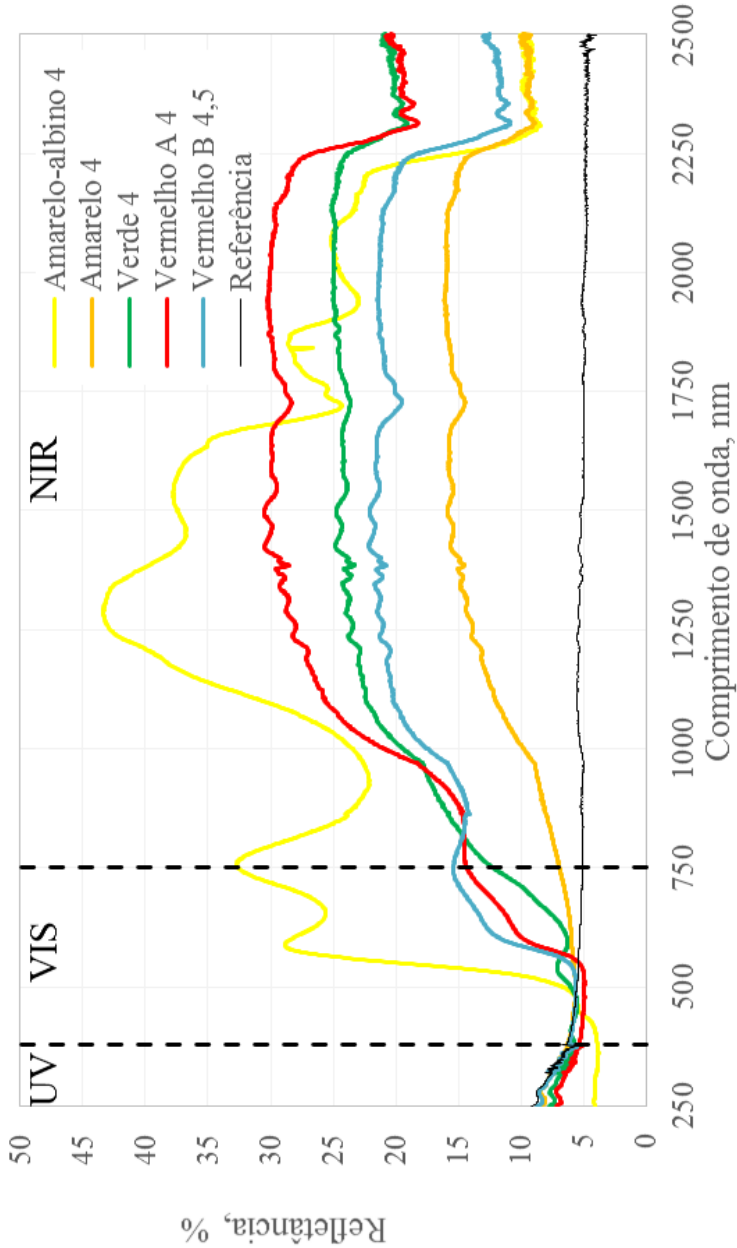
**Figura 7.23** – Refletância espectral do ligante Vermelho B.



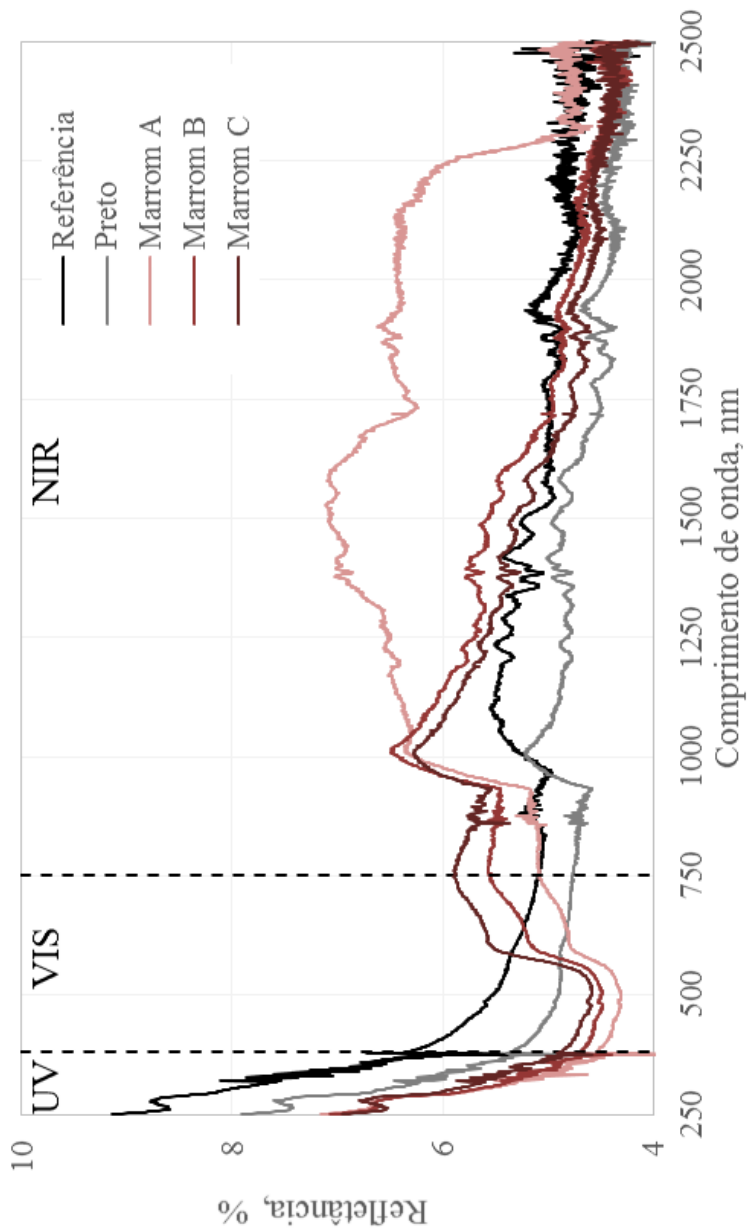
**Figura 7.24** – Refletância espectral do ligante puro – CAP 50/70.

As curvas mostram que os ligantes coloridos refletem o espectro eletromagnético com diversas intensidades dependendo do comprimento de onda analisado. A forma da curva e os valores de refletância das amostras estão influenciados tanto pelo tipo de pigmento como pelo tipo de ligante utilizado. Para comparar a refletância das amostras, as mesmas foram divididas em dois grupos.

O primeiro grupo (Figura 7.25) é formado pelas amostras Amarelo-albino, Amarelo, Verde, Vermelho e Vermelho B 4,5 as quais obtiveram um desempenho superior à amostra de Referência. O segundo grupo (Figura 7.26) é formado pelas amostras Marrom A, Marrom B, Marrom C e Preto e são aquelas que obtiveram um desempenho parecido com a amostra de Referência (ligante puro).



**Figura 7.25** – Refletância espectral das amostras Amarelo-albino, Amarelo, Verde, Vermelho A, Vermelho B e de Referência.



**Figura 7.26** – Refletância espectral da amostras Marrom A, Marrom B, Marrom C, Preto e de Referência.

No primeiro grupo, o desempenho de todas amostras na região UV foi similar ao da amostra de Referência. Os valores variaram entre 9 a 5%. As curvas das amostras coloridas seguem a mesma tendência que a amostra de Referência mas todas apresentam valores levemente inferiores à mesma. A refletância na faixa UV estaria influenciada mais pela refletância do próprio ligante do que pela cor ou tipo de pigmento.

O ligante albino, por sua parte, se mostra menos eficiente em refletir a radiação UV do que seu par convencional. A amostra Amarelo-albino teve o pior desempenho entre as analisadas, com valores quase constantes próximos ao 5%. Tanto a amostra Amarelo-albino como a Amarelo foram moldadas com o mesmo tipo de pigmento e se esperava que, pela cor translúcida do ligante albino, a refletância desta amostra fosse maior que as outras. No entanto, como já foi indicado, a refletância UV não parece ser influenciada pelo tipo de pigmento. Em consequência, as amostras moldadas com ligante convencional apresentariam uma resistência levemente superior à degradação por radiação ultravioleta do que as amostras moldadas com ligante albino.

As curvas de refletância do segundo grupo permitem visualizar melhor a pouca eficiência dos pigmentos em refletir a radiação UV. Na Figura 7.26, se pode apreciar que todas as amostras apresentam valores de refletância UV, no mínimo, 1% inferiores do que a amostra de Referência.

Os valores das curvas de refletância UV obtidas no ensaio são compatíveis com os resultados obtidos por Synnefa *et al.* (2011) (Figura 4.14) onde os valores de refletância UV foram menores a 10%. Os valores são também similares aos apresentados por Prado e Ferreira (2005) (Tabela 3.3) os quais mostraram que os materiais coloridos geralmente apresentam valores baixos de refletância UV. Ainda que as diferenças encontradas sejam levemente significativas na região UV, as mesmas não têm grande influência na refletância total porque o comprimento de radiação UV representa só 5% de todo o espectro eletromagnético que chega na Terra.

Na região VIS, até os 500 nm aproximadamente, a refletância de todas as amostras se manteve próxima ao 5%. A partir dos 500 ou 600 nm, no primeiro grupo analisado, as curvas das amostras à base de CAP 50/70 apresentam um aumento gradual nos valores de refletância. No limite da faixa VIS, os maiores valores de refletância são os das amostras

Vermelhas e da amostra Verde. A amostra Amarelo apresentou o valor mais baixo sem conseguir superar 8% no comprimento de onda de 750 nm. Em contrapartida, a amostra Amarelo-albino apresenta o melhor desempenho, com um incremento abrupto no valor de refletância a partir dos 500 nm. Entre os 500 e 750 nm, a refletância média da amostra chega a ser de 25%, aproximadamente.

Chama a atenção, novamente, a influência do tipo de ligante na refletância das amostras com pigmento Amarelo já que para um mesmo comprimento de onda, na faixa VIS, o valor da refletância para a amostra Amarelo-albino chega a ser de 3 a 5 vezes maior que a da amostra Amarelo. Se este efeito se repetisse para amostras com os pigmentos Verde ou Vermelhos, as refletâncias dos mesmos poderiam atingir valores muito altos, talvez próximos aos 45%.

No segundo grupo de maneira análoga ao primeiro, os valores de refletância tendem a aumentar a partir dos 600 nm de comprimento de onda. A amostra Marrom B e Marrom C foram as que tiveram melhor desempenho, conseguindo superar levemente a refletância da amostra de Referência em alguns comprimentos de onda próximos aos 750 nm. A amostra Marrom A e Preto não conseguiram superar a refletância da amostra de Referência (ligante puro).

A partir dos 750 nm, todas as amostras do primeiro grupo apresentaram valores de refletância mais altos que na região VIS, mostrando que, efetivamente, os tipos de pigmentos utilizados se caracterizam pela alta refletância NIR. Entre as amostras à base de CAP 50/70, o ligante Vermelho A é aquele que mais se destaca, com valores próximos a 30%, seguido pelos ligantes Verde, Vermelho B e Amarelo. A amostra Vermelho B atinge valores próximos a 22%, mas deve-se considerar que a proporção do pigmento nesta amostra é menor do que para a amostra Vermelho A. Se a quantidade de pigmento fosse a mesma para as duas amostras, a refletância do ligante Vermelho B seria, possivelmente, maior a do Vermelho A.

Uma explicação para o alto desempenho do ligante Vermelho B estaria relacionada com a composição do mesmo. Ele é dissolvido em resinas e polímeros e provavelmente as resinas e os polímeros devem potencializar a capacidade de dispersão dos pigmentos na mistura asfáltica, permitindo que elas se distribuam melhor na superfície do ligante ampliando a área disponível para reflexão da radiação.

A amostra Amarelo-albino apresentou, também, valores altos de refletância NIR, atingindo um máximo de 44% para um comprimento de onda de 1300 nm. A partir dos 1700, porém, os valores de refletância caíam, ficando abaixo das curvas dos pigmentos Vermelho A, Verde e Vermelho B. A partir dos 2250 nm, o valor da refletância é igual ao da amostra Amarelo. Contudo, evidencia-se, mais uma vez a importância do uso do ligante albino na refletância da amostra com pigmento Amarelo. A amostra Amarelo-albino, com uma proporção ligante/pigmento de 7,3:4, atingiu valores de refletância NIR entre 3 a 4 vezes o valor da amostra Amarelo, com proporção ligante/pigmento de 4,9:4.

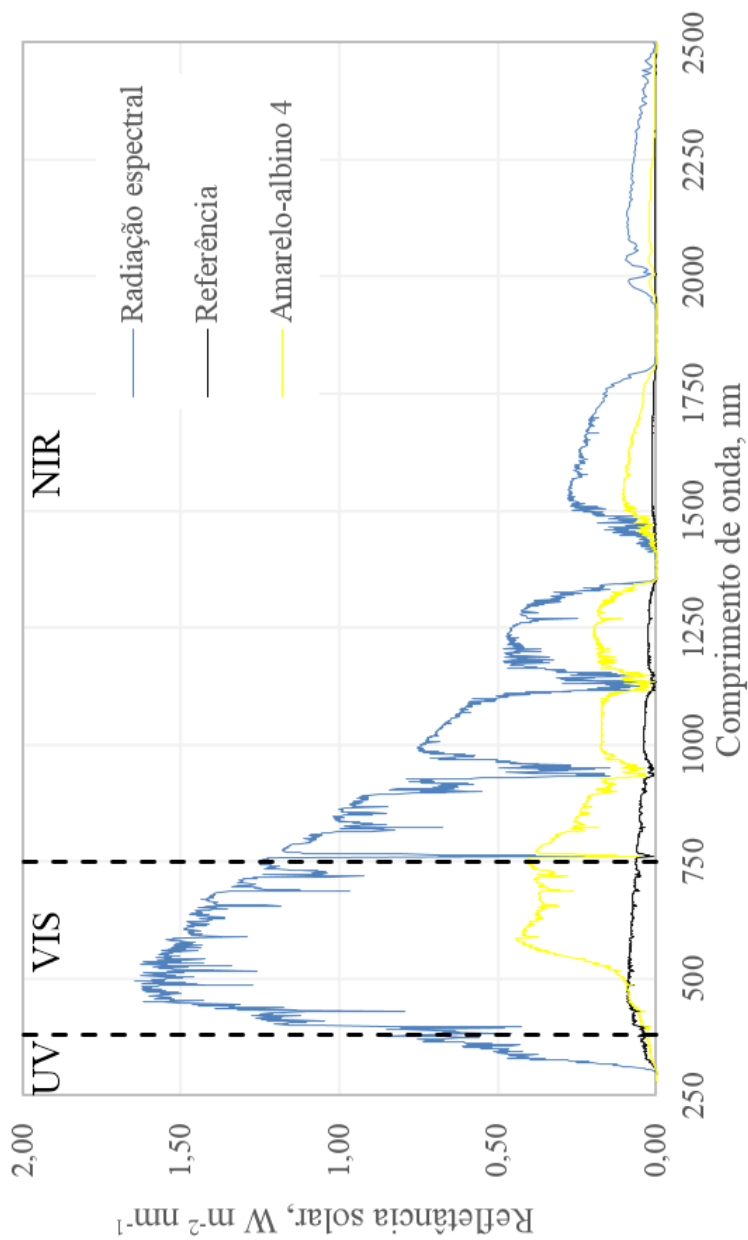
No segundo grupo analisado, as amostras Marrons atingem valores de refletância NIR maiores que a da amostra de Referência, mas ainda assim tais valores não superam o 7% em alguns casos. A refletância da amostra Preto continua sendo inferior à de Referência, se mantendo num valor constante próximo a 5%.

Nas curvas de todos os pigmentos estudados se aprecia uma queda nos valores de refletância a partir dos 2300 nm de comprimento de onda. No caso do primeiro grupo, a refletância dos pigmentos Vermelho A e Verde nesta região cai para 20%, e 11% para as amostras Amarelo-albino, Amarelo e Vermelho B.

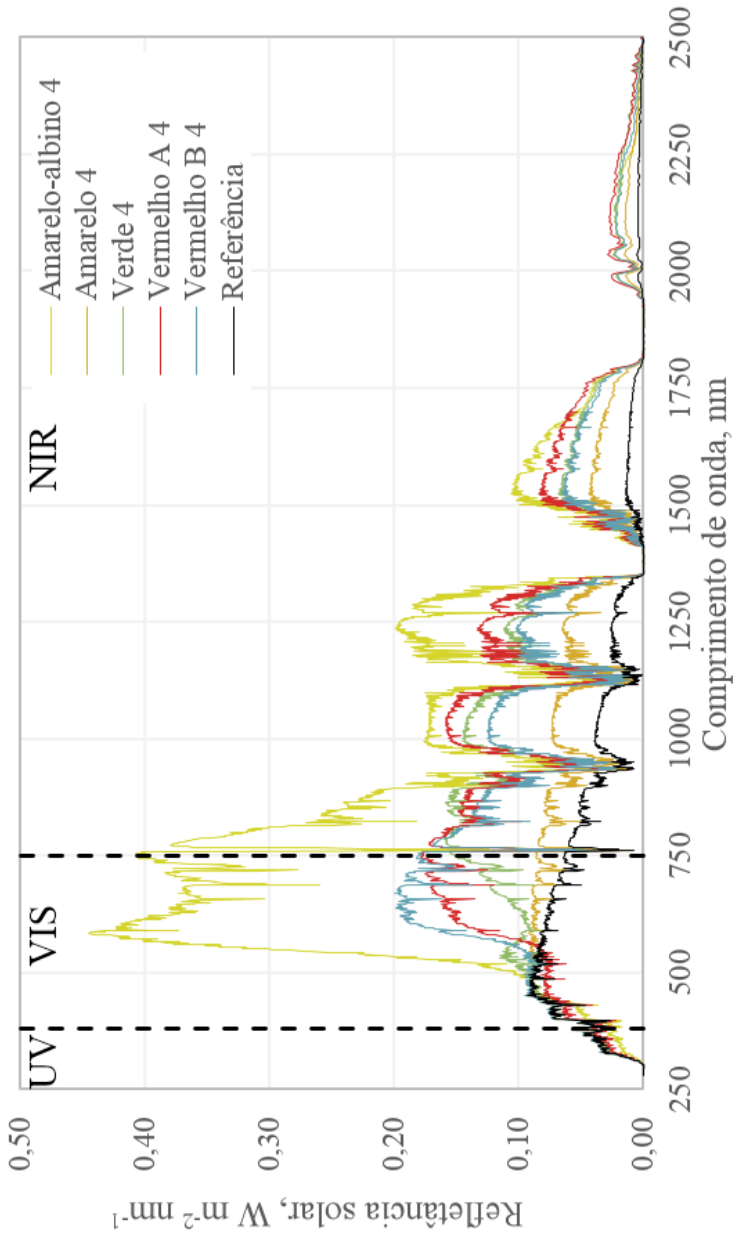
Embora a refletância das amostras atinjam valores altos, para o cálculo da refletância solar, os valores de refletância de cada comprimento de onda devem ser multiplicados pelos valores padronizados do espectro de massa de ar 1,5 (ASTM G173-03) já mostrado na Figura 2.7. Após a operação, as curvas de refletância apresentam formas similares às do espectro padronizado; para ter uma ideia da diferença entre o espectro padronizado e das curvas de refletância solar dos ligantes coloridos, a Figura 7.27 mostra a refletância solar do espectro padronizado, da amostra Amarelo-albino e da amostra de Referência.

As curvas de refletância solar dos ligantes coloridos são mostrados nas Figura 7.28 e Figura 7.29.





**Figura 7.27** – Refletância solar do espectro padronizado, da amostra Amarelo-albino e da amostra de Referência.



**Figura 7.28** – Refletância solar da amostra Amarelo-albino, Amarelo, Verde, Vermelho A, Vermelho B e da amostra de Referência.

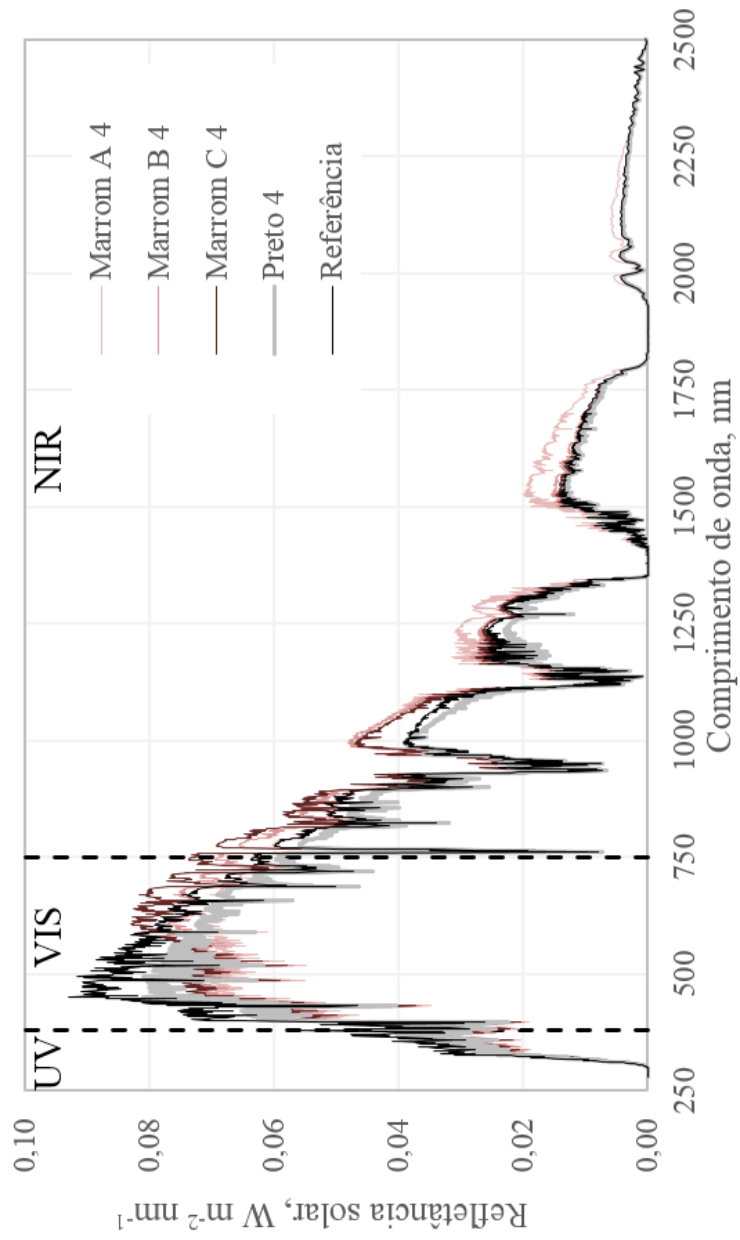


Figura 7.29 – Refletância solar da amostra Marrom A, Marrom B, Marrom C, Preto e da amostra de Referência.

A integração da área abaixo da curva de refletância e sua divisão pelo valor da irradiância espectral na superfície terrestre, dá como resultado os valores da refletância solar das amostras analisadas. Os resultados são mostrados na Tabela 7.5.

**Tabela 7.5** – Refletância solar dos ligante coloridos.

Amostra	Refletância solar, %			
	UV	VIS	NIR	Total
Amarelo-albino	0,1	9,2	13,4	22,8
Amarelo	0,2	3,0	5,0	8,2
Marrom A	0,1	2,3	2,7	5,1
Marrom B	0,1	2,4	2,5	5,2
Marrom C	0,1	2,5	2,5	5,3
Verde	0,2	3,5	8,9	12,7
Vermelho A	0,1	4,1	9,9	14,2
Vermelho B	0,2	4,7	8,1	13,1
Preto	0,1	2,4	2,1	4,8
Referência	0,2	2,7	2,3	5,3

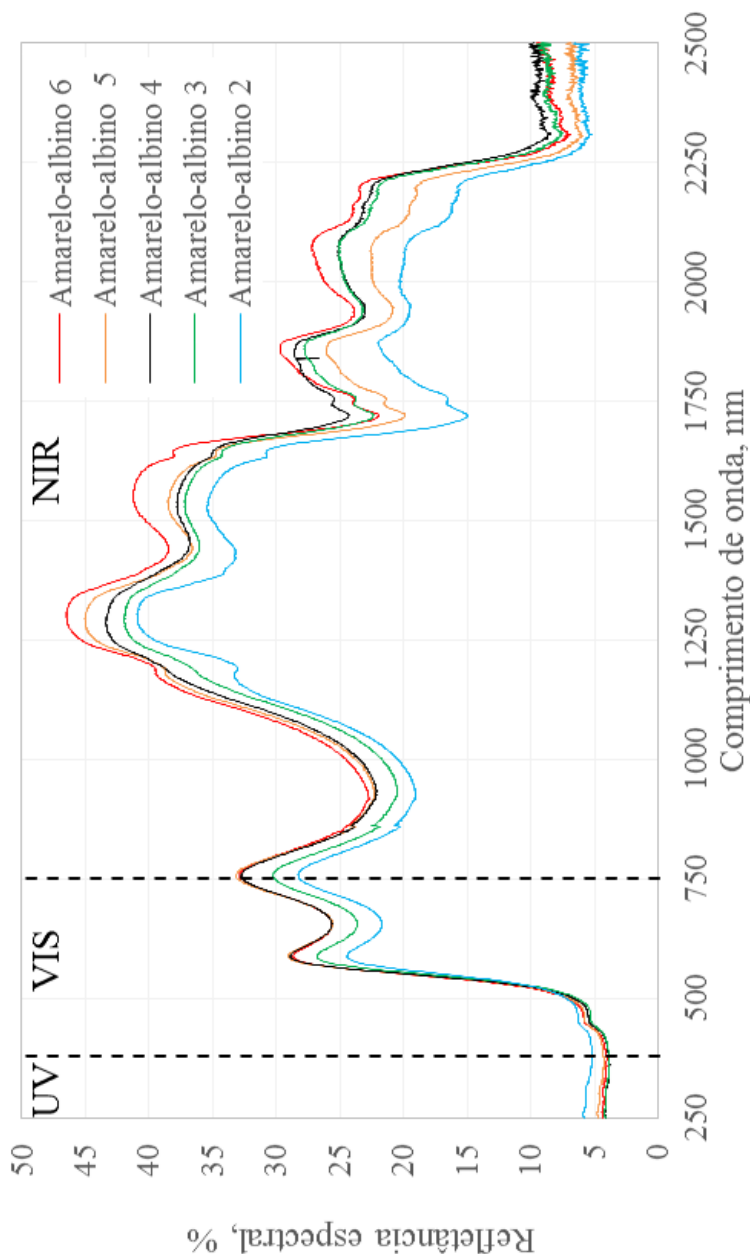
Nos resultados de refletância solar, verifica-se que o valor mais alto corresponde à amostra Amarelo-albino. Este valor é consequência da alta refletância VIS, com um valor três vezes maior que a amostra Amarelo, e NIR, com um valor duas vezes e meia maior que a amostra Amarelo. Em relação à amostra de Referência, a refletância da amostra Amarelo-albino é quatro vezes maior. É também 50% superior à amostra Vermelho A, a qual foi a segunda amostra com maior refletância.

Entre as amostra constituídas por CAP 50/70, as amostras Vermelho A, Vermelho B e Verde foram que apresentaram maiores valores, superando 12%. As amostras de cor Marrom e de cor Preto apresentaram valores baixos similares ao da amostra de Referência. Este fato foi decisivo para desconsiderar o uso destes últimos pigmentos nos ensaios posteriores. A amostra Amarelo atingiu um valor que é quase o dobro da mistura de Referência mas ainda fica atrás dos pigmentos Vermelhos e do Verde e muito mais atrás do que a amostra elaborada com ligante albino. Os baixos resultados da amostra Amarelo, junto com o fato dela não apresentar visualmente uma cor amarelada, foram os parâmetros

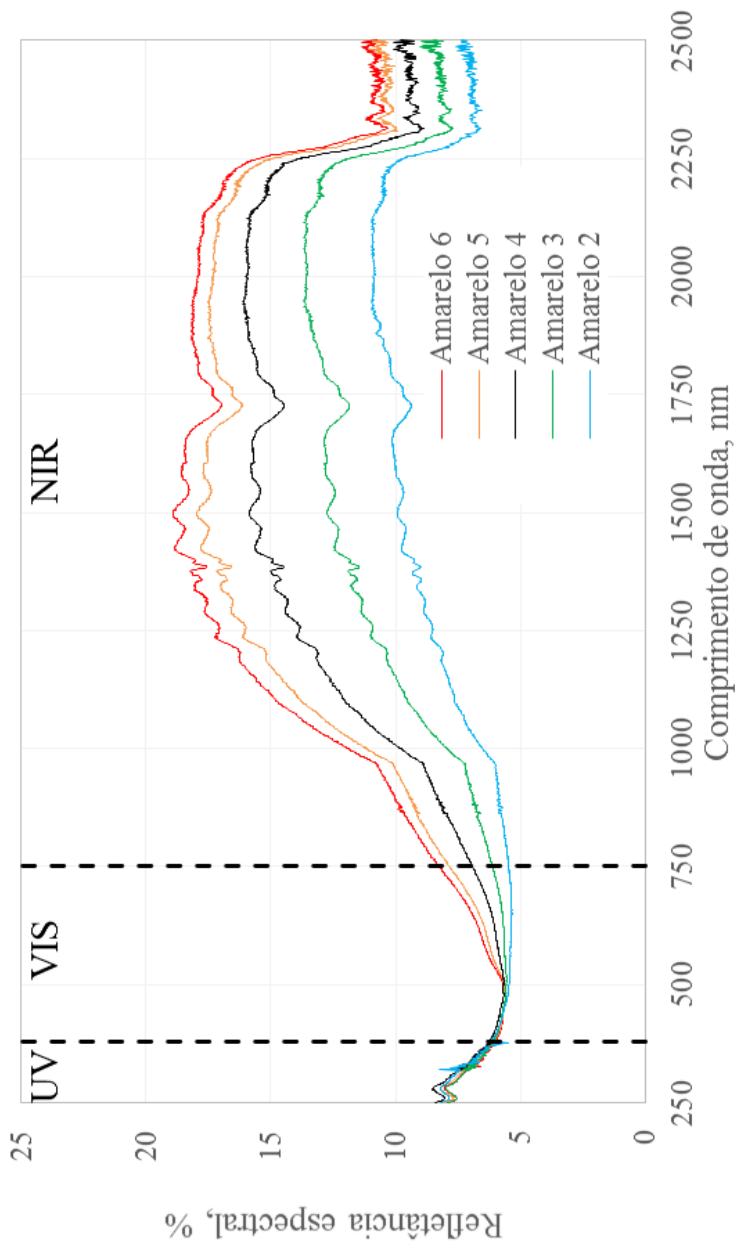
pelos quais esta amostra foi, também, desconsiderada dos ensaios posteriores.

### **7.2.2 Influência da Porcentagem de Pigmento na Refletância dos Ligantes**

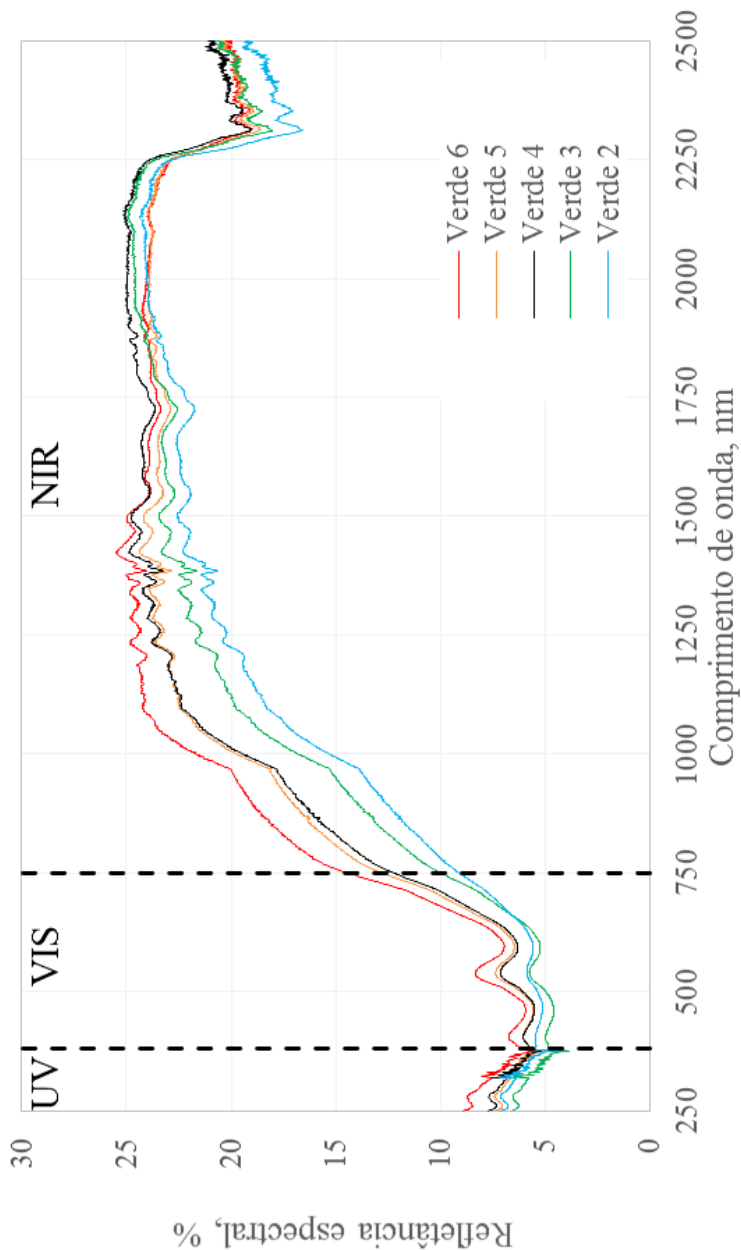
Com o intuito de verificar se o aumento da proporção do pigmento nas amostras causaria um aumento significativo nos valores de refletância, foram moldadas amostras com porcentagens variáveis de pigmentos. Para as amostras com pigmento em pó se manteve a quantidade de ligante e a proporção do pigmento variou em  $\pm 1$  e  $\pm 2$ . Desta forma foram ensaiadas amostras com proporções ligante/pigmento: 4,9/2; 4,9/3; 4,9/5; e, 4,9/6. No caso da amostra Vermelho B a proporção que variou foi a do ligante em  $\pm 0,5$  e  $\pm 1$ . As proporções ligante/pigmento das amostras foram: 3,5/2,4; 4/2,4; 5/2,4; e, 5,5/2,4. As curvas de refletância das amostras são mostradas nas Figura 7.30 a Figura 7.34 e nas Tabela 7.6 a Tabela 7.10



**Figura 7.30** – Refletância espectral do ligante Amarelo-albino com porcentagens variáveis de pigmento.

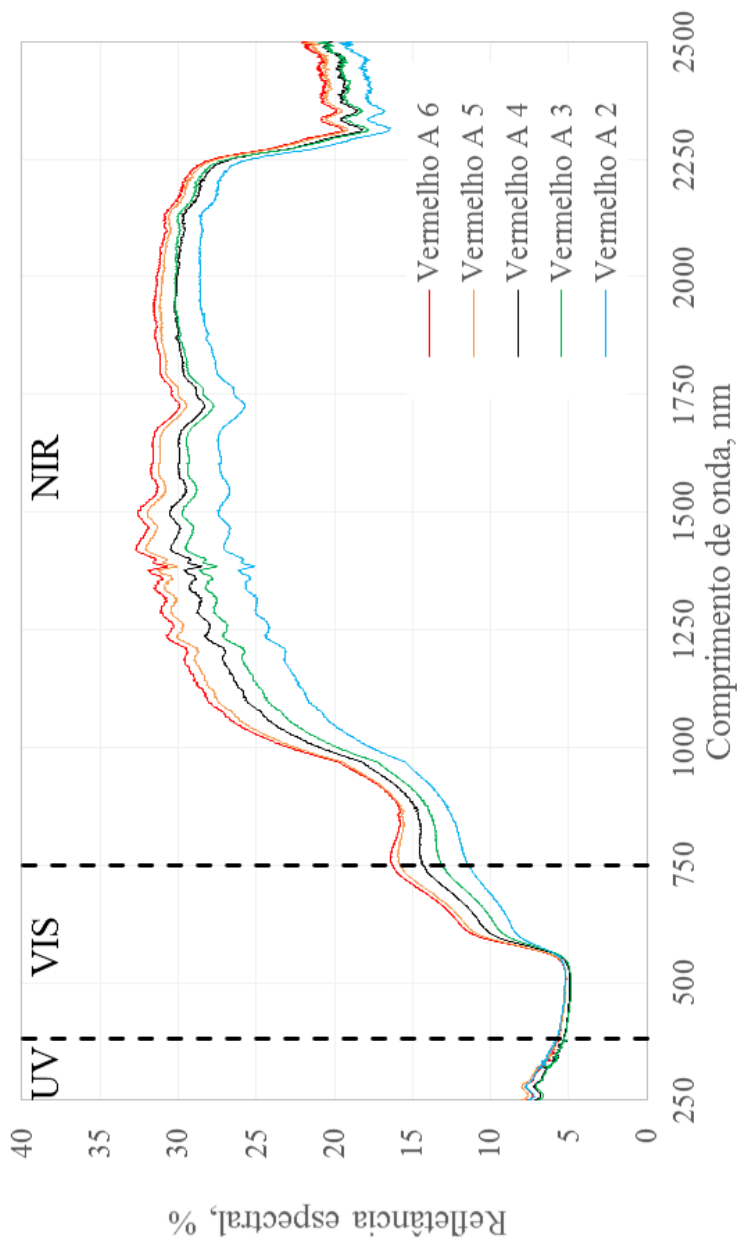


**Figura 7.31** – Refletância espectral do ligante Amarelo com porcentagens variáveis de pigmento.

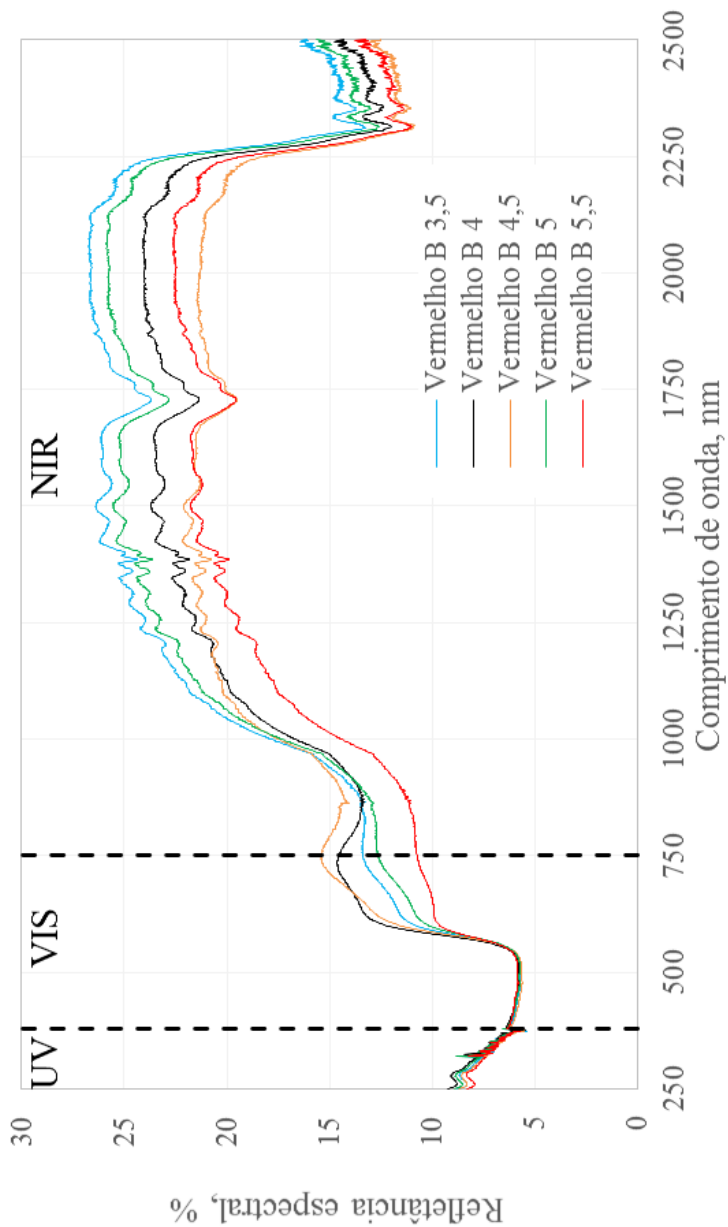


**Figura 7.32** – Refletância espectral do ligante Verde com porcentagens variáveis de pigmento.





**Figura 7.33** – Refletância espectral do ligante Vermelho A com porcentagens variáveis de pigmento.



**Figura 7.34** – Refletância espectral do ligante Vermelho B com porcentagens variáveis de pigmento.

**Tabela 7.6** – Refletância solar do ligante Amarelo-albino com porcentagens variáveis de pigmento.

Proporção dos materiais			Refletância solar, %			
Ligante	Pigmento	Lig/pig	UV	VIS	NIR	Total
Amarelo-albino						
7,3	2	3,65	0,1	8,1	11,6	19,9
7,3	3	2,43	0,1	8,5	12,6	21,3
7,3	4	1,83	0,1	9,1	13,4	22,7
7,3	5	1,46	0,1	9,2	13,4	22,8
7,3	6	1,22	0,1	9,2	13,9	23,3

**Tabela 7.7** – Refletância solar do ligante Amarelo com porcentagens variáveis de pigmento.

Proporção dos materiais			Refletância solar, %			
Ligante	Pigmento	Lig/pig	UV	VIS	NIR	Total
Amarelo						
4,9	2	2,45	0,2	2,7	3,3	6,3
4,9	3	1,63	0,2	2,8	4,1	7,2
4,9	4	1,23	0,2	3,0	5,0	8,2
4,9	5	0,98	0,2	3,1	5,6	9,0
4,9	6	0,82	0,2	3,2	6,0	9,4

**Tabela 7.8** – Refletância solar do ligante Verde com porcentagens variáveis de pigmento.

Proporção dos materiais			Refletância solar, %			
Ligante	Pigmento	Lig/pig	UV	VIS	NIR	Total
Verde						
4,9	2	2,45	0,1	3,0	7,4	10,6
4,9	3	1,63	0,1	2,9	8,0	11,1
4,9	4	1,23	0,2	3,5	8,9	12,7
4,9	5	0,98	0,1	3,6	9,0	12,8
4,9	6	0,82	0,2	4,0	9,6	13,9

**Tabela 7.9** – Refletância solar do ligante Vermelho A com porcentagens variáveis de pigmento.

Proporção dos materiais			Refletância solar, %			
Ligante	Pigmento	Lig/pig	UV	VIS	NIR	Total
Vermelho A						
4,9	2	2,45	0,2	3,6	8,6	12,5
4,9	3	1,63	0,1	3,8	9,5	13,6
4,9	4	1,23	0,1	4,1	9,9	14,2
4,9	5	0,98	0,2	4,4	10,6	15,2
4,9	6	0,82	0,2	4,5	10,7	15,5

**Tabela 7.10** – Refletância solar do ligante Vermelho B com porcentagens variáveis de pigmento.

Proporção dos materiais			Refletância solar, %			
Ligante	Pigmento	Lig/pig	UV	VIS	NIR	Total
Vermelho B						
5,5	2,4	2,45	0,2	3,9	7,1	11,3
5,0	2,4	1,63	0,2	4,2	8,4	12,8
4,5	2,4	1,23	0,2	4,7	8,1	13,0
4,0	2,4	0,98	0,2	4,7	8,1	13,1
3,5	2,4	0,82	0,2	4,4	8,7	13,3

As curvas mostradas nas Figura 7.30 aFigura 7.34 evidenciam a relação entre o incremento da proporção do pigmento e o aumento da refletância das amostras para certas regiões do espectro eletromagnético. No entanto, este aumento não é significativo em termos de refletância total após a normalização das curvas.

Os resultados das Tabela 7.6 a Tabela 7.10 confirmam que as variações na proporção do pigmento não mudaram significativamente o valor de refletância solar de nenhuma das regiões do espectro. A refletância UV permaneceu quase inalterável; pequenas variações na ordem de centésimos de unidade, são percebidas para algumas amostras, mas estas variações não têm maior influência no valor total da refletância solar.

A refletância VIS não sofreu, também, grandes alterações. As pequenas variações são da ordem de 1% da refletância para uma mudança na proporção do pigmento de 2 para 6. A refletância NIR foi a mais influenciada pelo incremento do pigmento; porém, a variação da refletância para esta faixa chega a no máximo 2%.

Somando-se as variações nas faixas UV, VIS e NIR, a refletância solar das amostras sofreu uma alteração de menos de 2% para um incremento na proporção do pigmento de 2 para 4. Para o incremento da proporção do pigmento de 2 para 6, a variação da refletância solar chega a ser de 3%, aproximadamente. Com base nestes resultados, pode-se afirmar que um maior consumo de pigmento na mistura asfáltica não incrementa significativamente o valor de refletância solar. Desta forma é mais interessante se empregar uma porcentagem menor de pigmento para baratear o custo da mistura.

### 7.2.3 Influência do Tipo de Ligante na Refletância Solar

Os resultados do análise de dados das amostras Amarelo e Amarelo-albino são apresentados na Tabela 7.11 e nas Figura 7.35 e Figura 7.36.

**Tabela 7.11** – Refletância solar dos ligantes Amarelo e Amarelo-albino.

Amostra	Proporção dos materiais			Refletância solar, %			
	Pigmento	Ligante	Lig/pig	UV	VIS	NIR	Total
Amarelo	2	4,9	2,45	0,2	2,7	3,3	6,3
	4	4,9	1,23	0,2	3,0	5,0	8,2
Amarelo-albino	3	7,3	2,43	0,1	8,5	12,6	21,3
	6	7,3	1,22	0,1	9,2	13,9	23,3

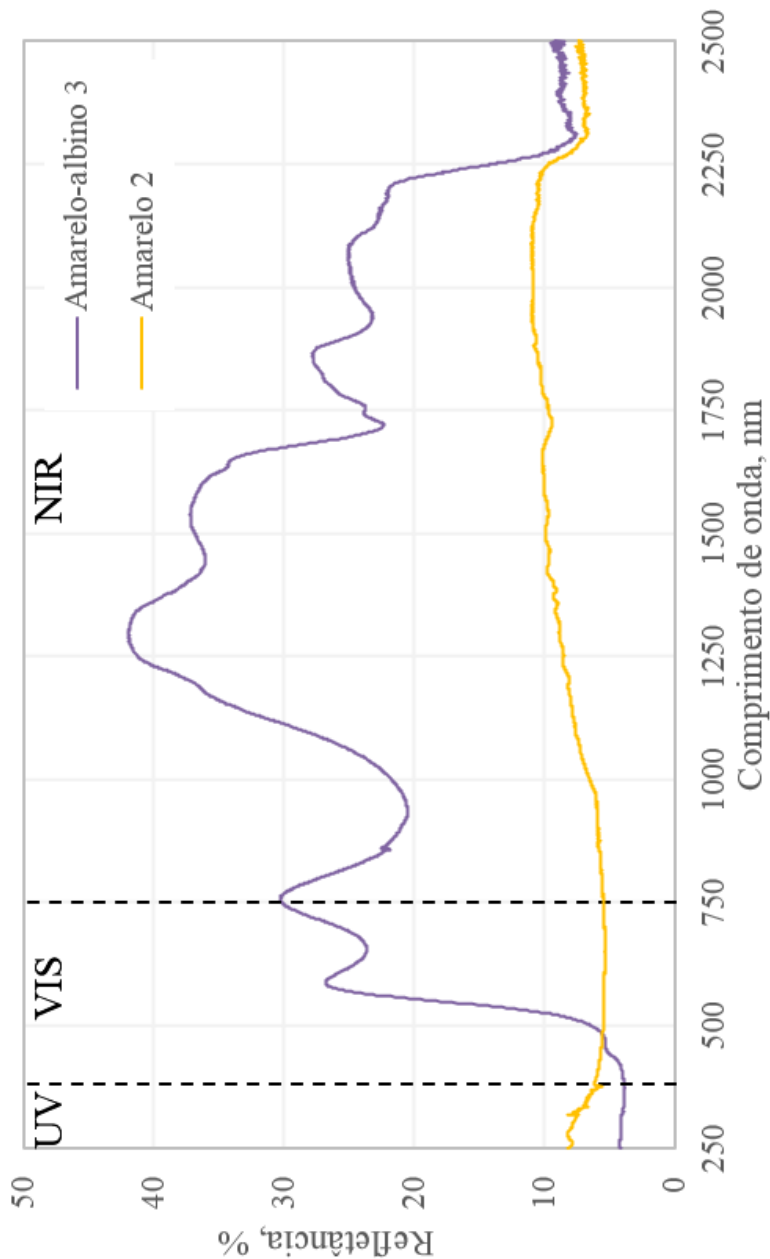


Figura 7.35 – Refletância dos ligantes Amarelo-albino 3 e Amarelo 2.

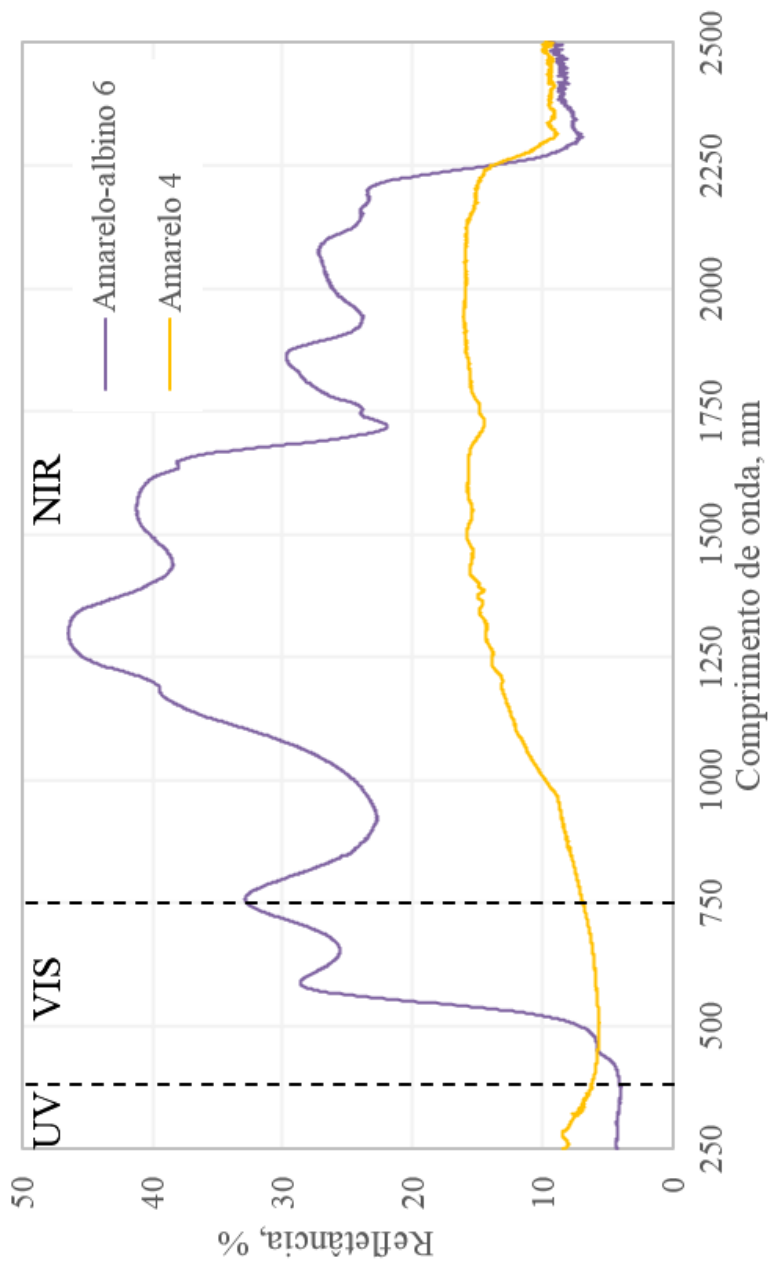


Figura 7.36 – Refletância dos ligantes Amarelo-albino 6 e Amarelo 4.

Para realizar a comparação foram utilizadas amostras com valores similares de pigmento/ligante. Por exemplo, a amostra Amarelo com relação ligante/pigmento de 2,45 foi comparada com a amostra Amarelo-albino com relação 2,43. Os resultados mostraram que a refletância da amostra com ligante albino é muito superior ao da amostra com CAP 50/70. A diferença na refletância é de 15% o qual é um valor muito alto, considerando que nem as amostras Verde, Vermelho A ou Vermelho B atingem este valor. Para as amostras com relação ligante/pigmento de 1,22 e 1,23, a diferença de refletância é similar, aproximadamente 15%.

As amostras Amarelo apresentam valores de refletância UV um pouco maiores que as amostras Amarelo-albino. O motivo disso pode ser que o CAP 50/70 tem maior eficiência em refletir a região UV do que o ligante albino. A diferença do valor da refletância é maior nas regiões VIS e NIR, indicando que o ligante albino é mais eficiente na refletância destas duas regiões do que o CAP 50/70.

Após o análise dos dados na etapa de pré-seleção dos pigmentos, as amostras escolhidas para dar continuidade à pesquisa foram a Amarelo-albino, Amarelo, Verde, Vermelho A e Vermelho B. A proporção de ligante/pigmento para cada uma destas amostras é a mesma especificada inicialmente: 7,3/4 para a amostra Amarelo-albino; 4,9/4 para as amostras Amarelo, Verde e Vermelho A; e, 4,5/2,4 para a amostra Vermelho B.

Estas proporções, em porcentagem da massa total, foram utilizadas na elaboração das misturas asfálticas coloridas. Por comodidade, as misturas asfálticas coloridas com um determinado tipo de pigmento foram denominadas da mesma forma que as amostras de ligante colorido.

## 7.3 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

### 7.3.1 Seleção da Estrutura de Agregados

Foram selecionadas três curvas granulométricas mediante a combinação dos três tipos de agregados disponíveis em diferentes porcentagens. As três granulometrias são mostradas na Tabela 7.12. As curvas granulométricas assim como os Pontos de Controle e a Zona Restrita da metodologia Superpave e os limites da Faixa C do DNIT 031/2004 são mostrados nas Figura 7.37 e Figura 7.38.



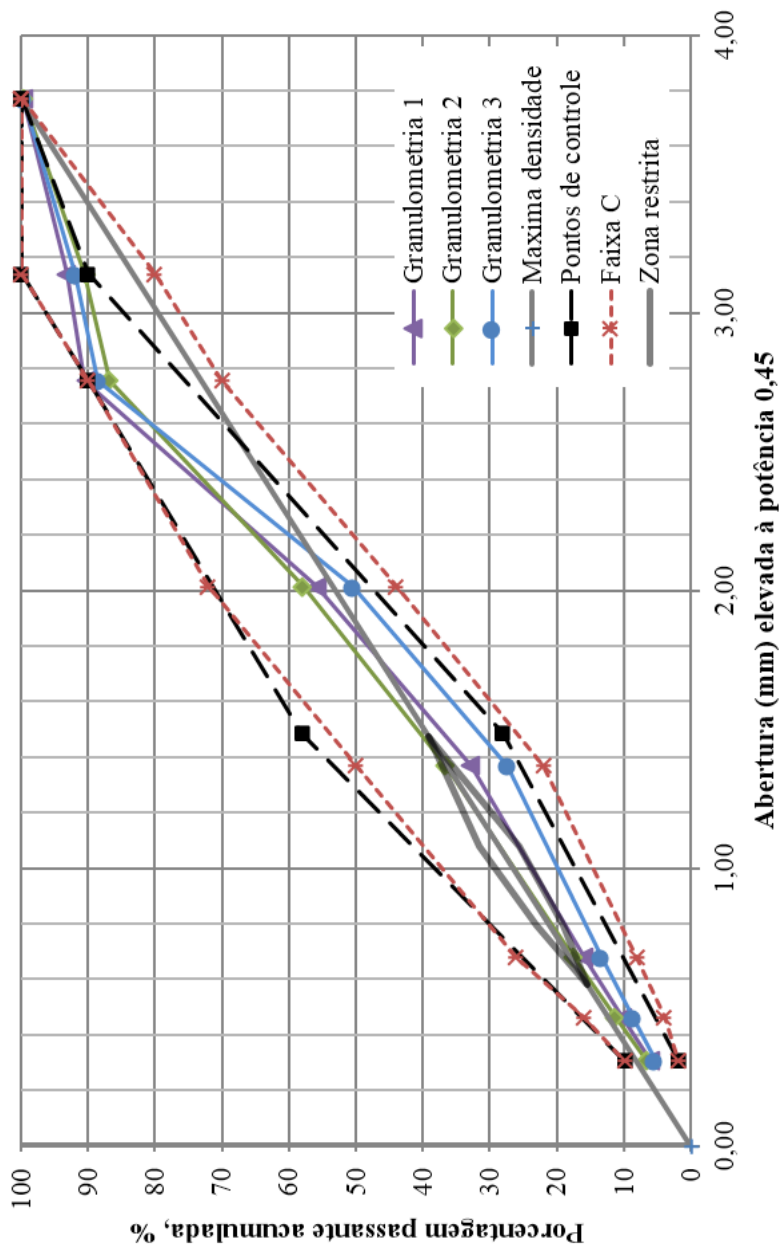
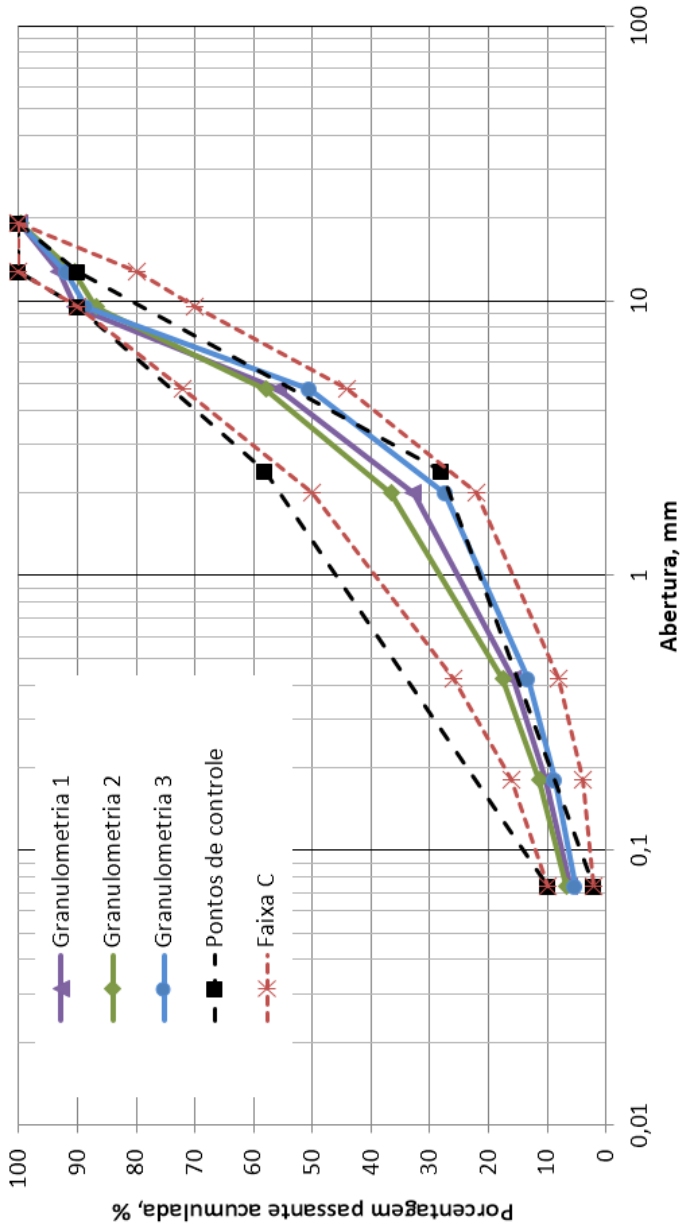


Figura 7.37 – Curvas granulométricas selecionadas para a dosagem Superpave.



**Figura 7.38** – Curvas granulométricas selecionadas para a dosagem Superpave na escala semi logarítmica.

**Tabela 7.12** – Granulometrias selecionadas para a dosagem Superpave.

Peneira	Abertura (mm)	Porcentagem passante acumulada, %		
		Granulometria 1	Granulometria 2	Granulometria 3
1	25	100,0	100,0	100,0
¾	19,1	99,8	99,7	99,7
½	12,7	93,2	90,5	91,8
3/8	9,5	90,5	86,8	88,6
# 4	4,75	55,8	57,9	50,4
# 10	2,00	32,8	36,6	27,4
# 40	0,42	15,8	17,5	13,3
# 80	0,18	10,3	11,3	8,7
# 200	0,074	6,2	6,8	5,2
Pó de pedra, %		40	45	33
Pedrisco, %		50	41	55
Brita 1, %		10	14	12

Das três granulometrias disponíveis, somente a número 3 não passou por dentro da zona restrita. Segundo os requisitos da metodologia Superpave, as outras duas deveriam ser descartadas. No entanto, não foi possível construir outras granulometrias que se acomodassem melhor nos requerimentos, e por isso se trabalhou com três granulometrias.

### 7.3.2 Seleção do Teor de Ligante de Dosagem

Para cada granulometria, foram determinadas as seguintes propriedades volumétricas de cada mistura de prova: massa específica aparente seca da combinação dos agregados ( $G_{sb}$ ), massa específica efetiva ( $G_{se}$ ), volume de ligante asfáltico absorvido ( $V_{ba}$ ), volume efetivo de ligante ( $V_{be}$ ), peso do agregado ( $W_s$ ) e o teor inicial de ligante ( $P_{bi}$ ). Os resultados são mostrados na Tabela 7.13. O teor inicial de ligante ( $P_{bi}$ ) para cada misturas é calculado com a equação:

$$P_{bi} = \frac{G_b \times (V_{be} + V_{ba})}{(G_b \times (V_{be} + V_{ba})) + W_s} \times 100$$

**Equação 7.1**

Onde:  $P_{bi}$  = porcentagem (em peso da mistura) de ligante;  
e,

$W_s$  = peso do agregado, em gramas.

**Tabela 7.13** – Propriedades volumétricas das misturas de prova.

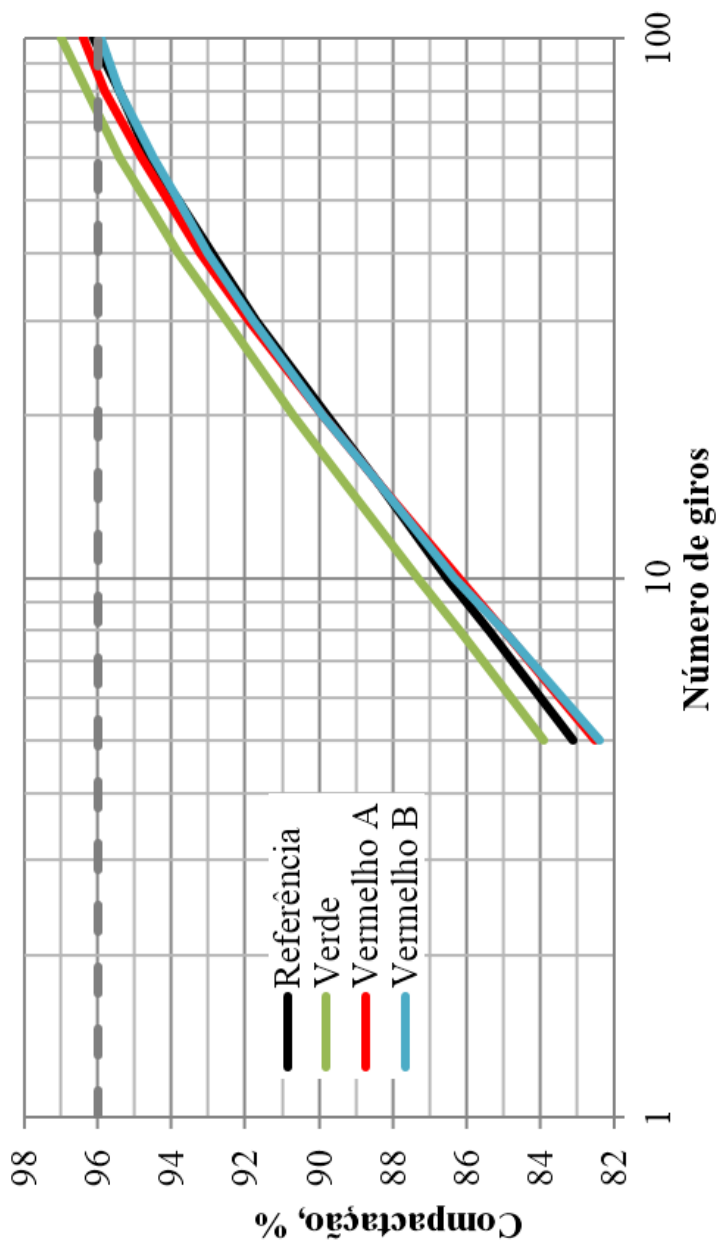
Parâmetro	Granulometria 1	Granulometria 2	Granulometria 3
Gsb, g cm <sup>-3</sup>	2,718	2,719	2,719
Gsa, g cm <sup>-3</sup>	2,735	2,734	2,738
Gse, g cm <sup>-3</sup>	2,732	2,731	2,734
Vba, cm <sup>3</sup>	0,0041	0,0036	0,0046
Vbe, cm <sup>3</sup>	0,101	0,101	0,101
Ws, g	2,292	2,291	2,294
Pbi, %	4,38	4,37	4,40

### 7.3.3 Proporção dos Materiais das Misturas Asfálticas

A proporção dos materiais utilizados, em porcentagem, para a dosagem e compactação das misturas asfálticas são apresentados na Tabela 7.14. Os resultados do ensaio de compactação são mostrados na Figura 7.39.

**Tabela 7.14** – Proporção dos materiais utilizados na dosagem e compactação das misturas asfálticas densas.

Mistura asfáltica	Proporção do material, %				
	Ligante	Pó de pedra	Pedrisco	Brita 1	Pigmento
Referência	5,10	31,32	52,20	11,39	-
Verde	4,90	30,06	50,11	10,93	4,00
Vermelho A	4,90	30,06	50,11	10,93	4,00
Vermelho B	4,50	30,72	51,21	11,17	2,40



**Figura 7.39** - Curva de compactação da mistura asfálticas coloridas com 100 mm de diâmetro.

Os dados referentes a todo o processo de dosagem e compactação das misturas asfálticas densas são mostrados com mais detalhe no Anexo A.

### 7.3.4 Avaliação da Sensibilidade à Água das Misturas Asfálticas sem Dop

O ensaio foi realizado com corpos de prova com 100 mm de diâmetro. Os resultados do ensaio são mostrados na Tabela 7.15 a Tabela 7.18.

**Tabela 7.15** – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura de Referência.

Referência	Com condicionamento			Sem condicionamento		
	A	C	B	E	D	F
Vazios, %	6,5	6,4	6,7	6,3	6,5	6,7
Vol Vazios, cm <sup>-3</sup>	35,4	35,4	36,8	35,0	35,9	37,3
RT médio, kPa	615,8			1101,6		
TSR, %	55,90					

**Tabela 7.16** – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Verde.

Verde	Com condicionamento			Sem condicionamento		
	A	B	D	C	E	F
Vazios, %	6,5	6,5	6,7	6,6	6,6	6,3
Vol Vazios, cm <sup>-3</sup>	36,0	35,6	36,9	36,2	36,2	34,5
RT médio, kPa	721,2			1151,5		
TSR, %	62,63					

**Tabela 7.17** – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Vermelho A.

Vermelho A	Com condicionamento			Sem condicionamento		
	A	F	C	B	E	D
% Vazios	6,4	6,6	6,6	6,3	6,6	6,5
Vol Vazios, cm <sup>-3</sup>	34,6	35,9	36,0	33,9	36,1	35,7
RT médio, kPa	851,1			1386,8		

TSR, %	61,37
--------	-------

**Tabela 7.18** – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Vermelho B.

Vermelho B	Com condicionamento			Sem condicionamento		
	C	E	F	A	B	D
% Vazios	6,9	6,3	6,4	6,7	6,3	6,4
Vol Vazios, cm <sup>3</sup>	38,2	34,4	35,0	36,2	34,5	34,8
RT médio, kPa	704,3			1133,3		
TSR, %	62,63					

Dentre as misturas condicionadas que foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão, as misturas com pigmento obtiveram os melhores resultados. Um comportamento similar apresentaram as amostras não condicionadas. O maior resultado foi a da amostra com pigmento Vermelho A sem condicionamento, a qual foi, aproximadamente, 25% superior ao seu par sem pigmento.

Assim, a hipótese que a carga elétrica positiva do pigmento (item 7.1.3), no momento de entrar em contato com os agregados graníticos, poderia melhorar a resistência ao dano por umidade da mistura se confirmou. Entretanto, a resistência à tração das amostras condicionadas deve ser, no mínimo, 70% do valor das amostras sem condicionar. Nenhuma das misturas avaliadas, conseguiu atingir este valor. Por este motivo foi necessário o uso de um aditivo para melhorar a adesividade do ligante com o agregado mineral.

Foram avaliados teores de *dop* de 0,2, 0,4 e 0,6%. O teor adequado foi definido em 0,5%. A adição de 0,5% de *dop* no ligante CAP 50/70 diminuiu a temperatura de usinagem e compactação, a qual foi de 149 e 139 °C (Tabela 7.3), respectivamente. Os resultados dos ensaios de compactação das misturas asfálticas com 100 de diâmetro com *dop* são mostrados na Tabela 7.19 e na Figura 7.40.

**Tabela 7.19** – Dados de compactação da mistura asfálticas com 100 mm de diâmetro com *dop*.

Giros	% Gmm			
	Referência	Verde	Vermelho A	Vermelho B
5	83	84,3	83,2	83,4
$N_{ini} = 8$	85,3	86,6	85,6	85,7
10	86,4	87,7	86,8	86,8
15	88,4	89,7	88,9	88,7
20	89,7	91,2	90,4	90,1
30	91,6	93,1	92,4	92,0
40	92,8	94,5	93,7	93,2
50	93,7	95,4	94,7	94,1
60	94,4	96,2	95,4	94,8
80	95,4	97,3	96,5	95,7
$N_{des} = 100$	96,1	98,0	97,2	96,4
Gmb, g cm <sup>-3</sup>	2,441	2,527	2,518	2,483
%Gmm@Nmax	96,1	98	97,2	96,4
Gmm, g cm <sup>-3</sup>	2,541	2,579	2,591	2,576



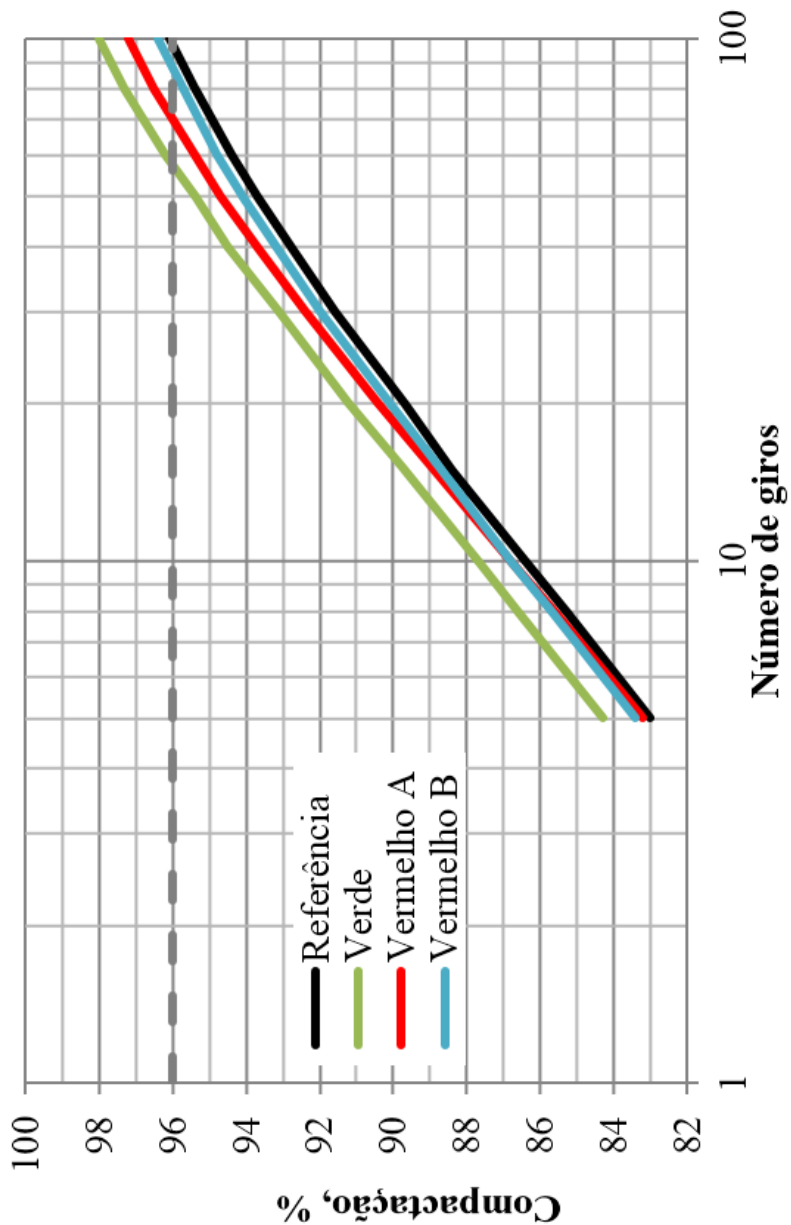


Figura 7.40 - Curva de compactação da misturas asfálticas coloridas com dop.

O uso do *dop* teve uma leve influência na trabalhabilidade das misturas asfálticas. No caso das misturas coloridas, estas sofreram um pequeno incremento da trabalhabilidade e, em consequência, do grau de compactação aos 100 giros, entre 0,5 a 1% maior. Como a mistura de Referência densa não sofreu alteração do grau de compactação, não foi necessária a mudança da granulometria, nem do teor de ligante das misturas. Os resultados do ensaio Lottman nas misturas asfálticas densas com adição de *Dop* são mostradas nas Tabela 7.20 a Tabela 7.23

**Tabela 7.20** – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura de Referência com *Dop*.

Referência	Com condicionamento			Sem condicionamento		
	A	E	F	B	C	D
Vazios, %	6,7	6,6	6,8	6,7	6,5	6,8
Vol Vazios, cm <sup>-3</sup>	37,2	36,5	37,9	37,7	36,0	37,7
RT médio, kPa	777,6			1080,0		
TSR, %	71,71					

**Tabela 7.21** – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Verde com *Dop*.

Verde	Com condicionamento			Sem condicionamento		
	A	C	F	B	D	E
Vazios, %	6,4	6,8	6,7	6,5	6,8	6,5
Vol Vazios, cm <sup>-3</sup>	35,3	37,1	37,1	35,6	37,1	35,3
RT médio, kPa	889,0			1121,0		
TSR, %	79,31					

**Tabela 7.22** – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Vermelho A com *Dop*.

Vermelho A	Com condicionamento			Sem condicionamento		
	C	D	F	A	B	E
Vazios, %	6,8	6,4	6,8	6,5	6,8	6,3
Vol Vazios, cm <sup>-3</sup>	37,5	34,7	37,6	34,9	37,4	34,0
RT médio, kPa	1032,1			1323,2		
TSR, %	78,01					

**Tabela 7.23** – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida na mistura Vermelho B com *Dop*.

Vermelho B	Com condicionamento			Sem condicionamento		
	A	B	C	D	E	F
Vazios, %	6,4	6,4	6,1	6,5	6,2	6,2
Vol Vazios, cm <sup>3</sup>	34,9	34,8	33,2	35,4	33,6	34,1
RT médio, kPa	878,8			1078,5		
TSR, %	81,48					

De forma similar ao que aconteceu com as amostras sem *dop*, nas amostras com *dop* a adição de pigmentos melhorou a resistência à tração das misturas em relação à amostra de referência. Entre as amostras não condicionadas, os valores de resistência à tração foram de 20 a 50% superiores ao seu par convencional sem pigmentos.

O uso de *dop* melhora a resistência à tração das amostras condicionadas, incrementando o valor em, aproximadamente 30% em relação às amostras sem *dop*. Nas amostras não condicionadas, porém, o uso do *dop* diminui a resistência à tração dos corpos de prova em uma porcentagem similar. O uso de *dop*, no entanto, permitiu que o critério de TSR de 80% fosse atingido pelas misturas. A Tabela 7.24 mostra os resultados do ensaio de dano por umidade induzida nas misturas asfálticas sem e com *dop*.

**Tabela 7.24** – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida nas misturas sem e com *dop*.

RT, kPa	Referência		Verde	
	<i>s/ dop</i>	<i>c/ dop</i>	<i>s/ dop</i>	<i>c/ dop</i>
Condicionada	615,8	777,6	Condicionada	889,0
Sem condicionar	1101,6	1080,0	Sem condicionar	1121,0
TSR, %	55,90	71,71	TSR, %	79,31

RT, kPa	Vermelho A		Vermelho B	
	<i>s/ dop</i>	<i>c/ dop</i>	<i>s/ dop</i>	<i>c/ dop</i>
Condicionada	851,1	1032,1	704,3	878,8
Sem condicionar	1386,8	1323,2	1133,3	1078,5
TSR, %	61,37	78,01	62,63	81,48

A Figura 7.41 mostra a mistura Vermelho A, condicionada, sem e com *dop* após o ensaio Lottman. Na figura é possível verificar as regiões

onde superfície do agregado granítico está aparente devido ao descolamento da película de ligante pela ação da água. Na mistura sem *dop* esta área está presente sobretudo no interior do corpo de prova. Na mistura com *dop*, esta área é menor e se concentra principalmente perto da superfície externa do corpo de prova.



(a)



(b)

**Figura 7.41** – Mistura Vermelho A sem *dop* (a), e com *dop* (b).

#### 7.4 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS CPA

A granulometria das misturas CPA é mostrada na Tabela 7.25. A Figura 7.42 mostra a disposição das curvas granulométricas assim como os limites estabelecidos pela Faixa V de acordo com a especificação de serviço DNER-ES 386/99.

**Tabela 7.25** – Granulometria da mistura asfáltica CPA.

Peneira	Abertura (mm)	CPA
1	25	100,0
¾	19,1	99,0
½	12,7	70,1
3/8	9,5	59,3
# 4	4,75	30,3
# 10	2	15,3
# 40	0,42	7,6
# 80	0,18	5,0
# 200	0,074	3,1
Pó de pedra, %		18
Pedrisco, %		38
Brita 1, %		44

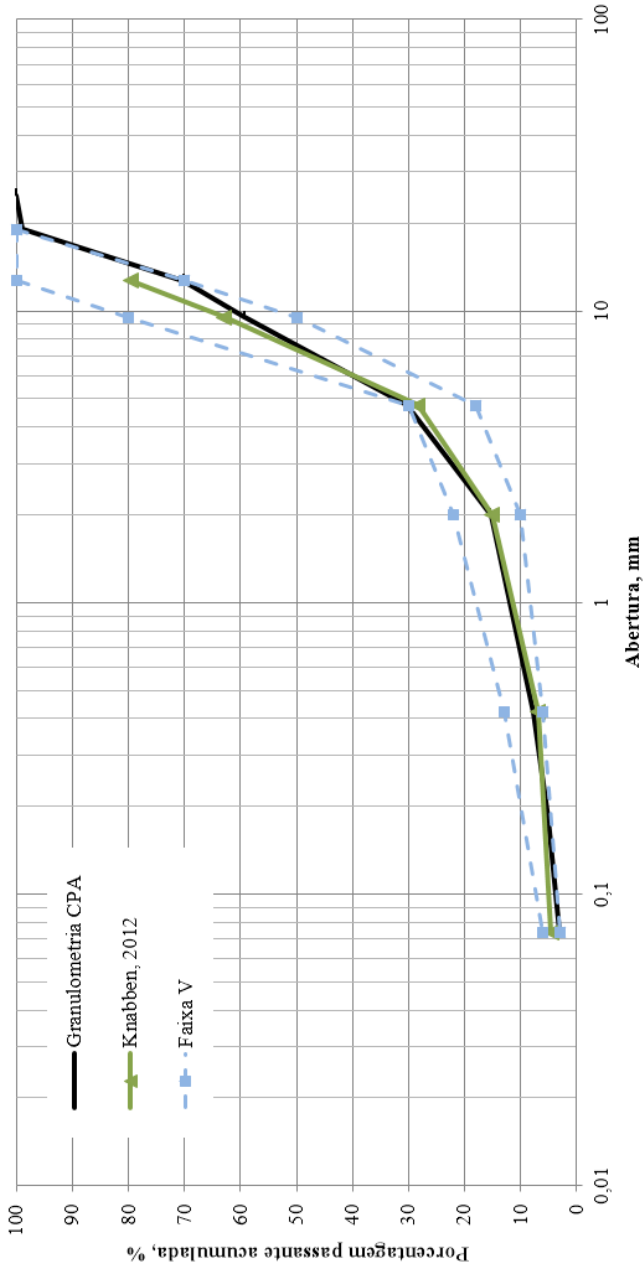


Figura 7.42 – Granulometria da mistura asfáltica CPA.

A proporção de materiais utilizados para a moldagem das misturas CPA de Referência, Verde, Vermelho A e Vermelho B são mostrados na Tabela 7.26. A porcentagem de pigmento na mistura foi de 4% (pigmento em pó) e 2,4% (pigmento granulado). Estas porcentagens são as recomendadas pelo fabricante.

**Tabela 7.26** – Proporção dos materiais utilizados nas misturas CPA.

Material	Ligante	Pó de pedra	Pedrisco	Brita 1	Pigmento
<b>Referência - CPA</b>					
Porcentagem em massa do total do agregado, %		18	38	44	
Porcentagem em massa do total da mistura, %	4,30	17,23	36,37	42,11	
<b>Verde e Vermelho A - CPA</b>					
Porcentagem em massa do total do agregado, %		18	38	44	
Porcentagem em massa do total da mistura, %	4,13	16,54	34,91	40,42	4
<b>Vermelho B - CPA</b>					
Porcentagem em massa do total do agregado, %		18	38	44	
Porcentagem em massa do total da mistura, %	3,72	16,90	35,68	41,31	2,4

## 7.5 DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICAS COM LIGANTE ALBINO VEGETAL

As proporções das misturas com ligante albino vegetal sem e com pigmento são mostradas na Tabela 7.27. Para não ter risco de desagregação da mistura devido à falta de ligante, ambas as misturas foram moldadas com 7,30% de ligante.

**Tabela 7.27** – Proporção dos materiais utilizados nas misturas albinas.

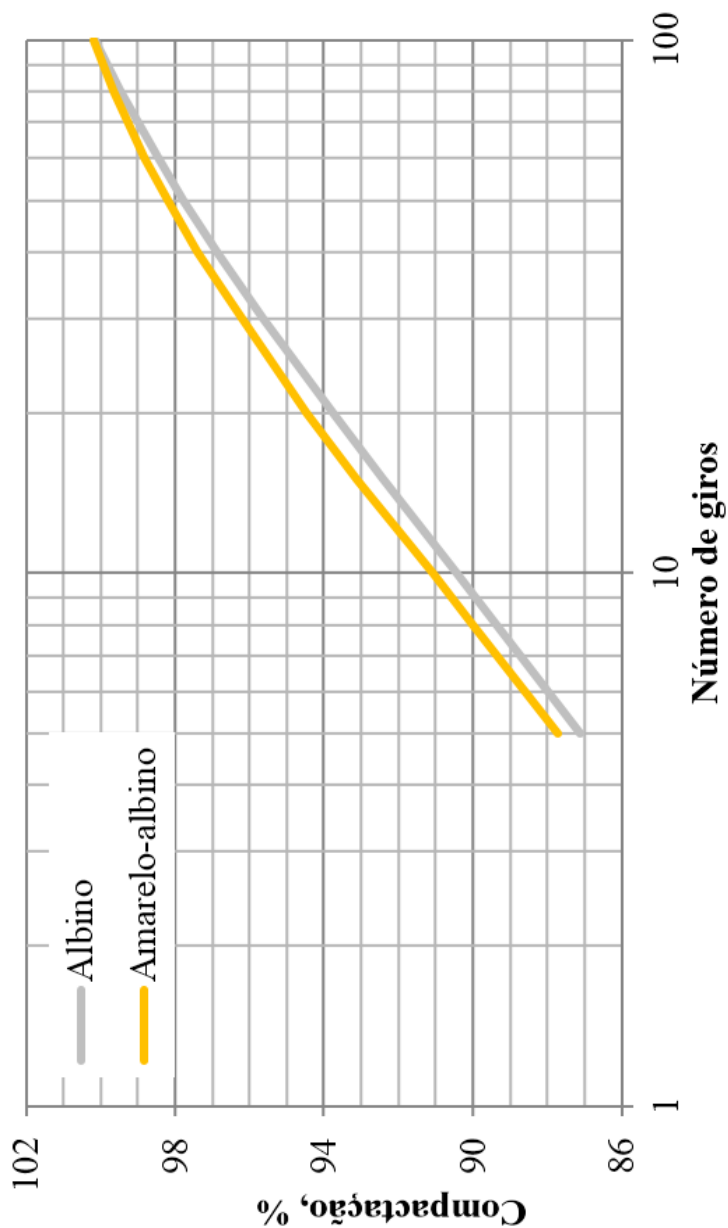
Material	Ligante	Pó de pedra	Pedrisco	Brita 1	Pigmento
Albino sem pigmento					
Porcentagem em massa do total do agregado, %		33	55	12	
Porcentagem em massa do total da mistura, %	7,30	30,59	50,99	11,12	
Amarelo-albino					
Porcentagem em massa do total do agregado, %		33	55	12	
Porcentagem em massa do total da mistura, %	7,30	29,27	48,79	10,64	4

Os resultados do ensaio de compactação são mostrados na Tabela 7.28 e na Figura 7.43.

**Tabela 7.28** – Dados de compactação da mistura asfálticas com ligante albino vegetal.

Giros	%Gmm	
	Albino sem pigmento	Amarelo-albino
5	87,1	87,7
$N_{ini} = 8$	89,4	90,0
10	90,4	91,1
15	92,4	93,1
20	93,8	94,5
30	95,6	96,2
40	96,9	97,4
50	97,8	98,2
60	98,5	98,8
80	99,4	99,7
$N_{des} = 100$	100,1	100,2
Gmb, %	2,452	2,491
%Gmm@Ndes	100,1	100,2
Gmm	2,448	2,486





**Figura 7.43** - Curva de compactação da misturas asfálticas com ligante albedo vegetal.

As duas misturas moldadas atingem um grau de compactação maior a 100%, estando fora do critério especificado pela metodologia Superpave. O alto teor de ligante é, com certeza, o responsável pela alta trabalhabilidade das misturas. Para conseguir amostras com 4% de vazios, o número de giros deve ser, aproximadamente, 30.

Os resultados mostram que o teor de ligante utilizado não atenderia o critério Superpave, havendo necessidade de reduzir o teor de ligante. Entretanto não foi possível testar outros teores devido à falta de disponibilidade do ligante.

## 7.6 REFLETÂNCIA SOLAR EM CAMPO

### 7.6.1 Avaliação da Textura Superficial dos Revestimentos

Os resultados do ensaio de mancha de areia e drenabilidade são mostrados nas Tabela 7.29 e Tabela 7.30. Devido à heterogeneidade da superfície dos revestimentos de pedra *petit pavê* e de blocos de concreto Portland, não foi possível caracterizar a textura dos mesmos.

**Tabela 7.29** – Altura média da macrotextura dos revestimentos.

Amostra	Altura, mm			Média, mm	Classificação
	A	B	C		
Referência densa	1,19	1,06	1,22	1,16	Grosseira
Verde densa	1,35	1,38	1,51	1,42	Muito grosseira
Vermelho A densa	1,48	1,48	1,30	1,42	Muito grosseira
Vermelho B densa	1,15	1,02	1,19	1,12	Grosseira
Amarelo-albino densa	1,41	1,59	1,32	1,44	Muito grosseira
Concreto Portland denso	0,78	0,95	0,82	0,85	Grosseira
Concreto Portland Vermelho denso	0,81	0,74	0,67	0,74	Média

**Tabela 7.30** – Drenabilidade dos revestimentos.

Amostra	Drenabilidade, mm s <sup>-1</sup>				Média, mm s <sup>-1</sup>
	A	B	C	D	
Referência densa	16,0	15,8	9,8	14,8	14,1
Verde densa	12,9	11,5	17,2	23,2	16,2
Vermelho A densa	30,3	28,8	20,1	19,3	24,6
Vermelho B densa	13,1	17,3	4,0	13,7	12,0
Amarelo-albino densa	9,1	7,8	3,3	7,2	6,9
Referência CPA	21,8	31,8	31,8	20,4	26,5
Verde CPA	51,3	31,3	23,1	27,3	33,2
Vermelho A CPA	31,0	35,8	32,7	32,7	33,0
Vermelho B CPA	33,9	32,7	24,6	40,6	32,9
Concreto Portland denso	7,5	5,5	5,2	7,6	6,5
Concreto Portland Vermelho denso	6,2	6,4	5,9	6,5	6,3
Concreto Portland poroso	65,9	97,1	92,3	69,6	81,2

Os resultados do ensaio de mancha de areia mostram que as superfícies de concreto Portland denso possuem texturas mais lisas do que as misturas de mistura asfáltica. No caso das misturas asfálticas, todas apresentam texturas similares com alturas de areia entre 1,12 e 1,44 mm. No caso das misturas de Concreto Portland denso e Vermelho denso, a diferença entre as texturas pode estar relacionada com o acabamento superficial.

Como esperado, os resultados do ensaio de drenabilidade mostram que o revestimento de concreto Portland poroso é o que possui maior quantidade de vazios comunicantes favorecendo a sua habilidade de escoamento de água.

### 7.6.2 Avaliação da Refletância Solar

As medições da refletância solar em campo dos revestimentos são mostrados na Tabela 7.31 e nas Figura 7.44 a Figura 7.47.

**Tabela 7.31** – Refletância solar em campo dos revestimentos.

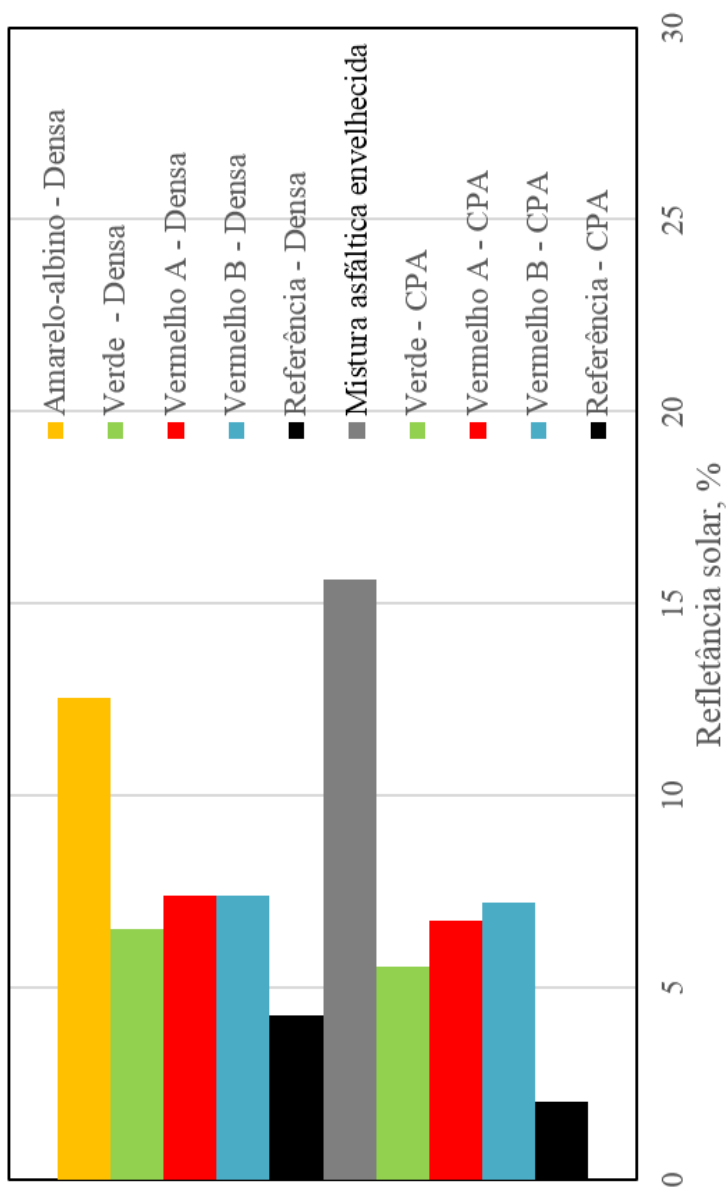
Amostra	Área de medição, m x m	Refletância solar, %
<b>Mistura asfáltica</b>		
Amarelo-albino - Densa	1,00 x 0,90	12,5
Verde - Densa	1,00 x 1,08	6,5
Vermelho A - Densa	1,00 x 1,08	7,3
Vermelho B - Densa	1,00 x 1,08	7,4
Referência - Densa	1,00 x 1,08	4,2
Mistura asfáltica densa envelhecida	4,00 x 4,00	15,6
Verde - CPA	1,00 x 1,08	5,5
Vermelho A - CPA	1,00 x 1,08	6,7
Vermelho B - CPA	1,00 x 1,08	7,2
Referência - CPA	1,00 x 1,08	2,0
<b>Concreto Portland</b>		
Concreto Portland Denso	4,00 x 4,00	42,7
Concreto Portland Poroso	4,00 x 4,00	17,5
Concreto Portland Vermelho Denso	1,00 x 1,08	23,0
Bloco vermelho	4,00 x 4,00	26,4
Bloco amarelo	4,00 x 4,00	31,0
<b>Pedra <i>petit pavê</i></b>		
<i>Petit pavê</i> branca	4,00 x 4,00	49,9
<i>Petit pavê</i> vermelha	4,00 x 4,00	24,8
<i>Petit pavê</i> branca envelhecida	4,00 x 4,00	25,7
<i>Petit pavê</i> vermelha envelhecida	4,00 x 4,00	18,2
<i>Petit pavê</i> preta envelhecida	4,00 x 4,00	9,8
Brita de granito	4,00 x 4,00	13,4

Os maiores valores de refletância solar coletados correspondem aos revestimentos de pedra *petit pavê* branca e de concreto Portland denso. Ambos possuem as cores mais claras o qual favorece a alta refletância. O menor valor corresponde à mistura de Referência CPA a qual é aproximadamente 48% menos refletiva que o revestimento de pedra *petit pavê* branca. É interessante notar que os revestimentos com

cor vermelha (concreto Portland Vermelho denso, bloco vermelho e pedra *petit pavê* vermelha), o valor da refletância é similar, fluuando entre 23 a 26,4%. Ou seja, um pigmento vermelho convencional teria o mesmo efeito que um pigmento especial em termos de refletância e que a cor vermelha da rocha.

Entre as misturas asfálticas, mistura asfáltica envelhecida apresentou o maior valor de refletância o qual é mais de três vezes o valor da refletância coletada para a mistura de Referência densa nova (Figura 7.44). O motivo da diferença deve-se a que a mistura envelhecida possui uma superfície desgastada com agregado de cor clara aparente, de origem granítica. Desta forma, os resultados estão influenciados mais pela refletância do agregado mineral do que do ligante asfáltico. Além disso, a oxidação do ligante asfáltico tende para uma cor cinza (mais clara). Isto ocorre já em um período de cinco anos. É possível que se a mistura de Referência densa moldada em laboratório fosse submetida a um processo de desgaste superficial e envelhecimento a longo prazo, apresentaria um valor de refletância similar à da mistura envelhecida.

Uma opção de pesquisa para o futuro seria, então, o o estudo de agregados coloridos que permitissem o incremento da refletância do revestimento após o desgaste superficial da argamassa da mistura asfáltica e o envelhecimento do ligante.



**Figura 7.44** – Refletância solar em campo dos revestimentos asfálticos.

A Tabela 7.32 mostra os resultados de refletância solar dos ligantes coloridos medida em laboratório e a refletância solar das misturas asfálticas densa e CPA. A relação ligante/pigmento dos ligantes coloridos é a mesma que as das misturas coloridas densas. Por sua vez, estas quantidades são maiores do que as relações ligante/pigmento das misturas CPA. Ou seja, as misturas densas possuem uma maior quantidade de ligante em relação ao pigmento do que as misturas CPA. É de se esperar, então, que por possuir maior quantidade de pigmento, a refletância das misturas CPA seria maior que a refletância do ligante colorido ou das misturas coloridas densas. No entanto, ocorreu o contrário. A refletância dos ligantes coloridos é maior, aproximadamente o dobro, que as das misturas densas e os valores destas são maiores aos das misturas CPA.

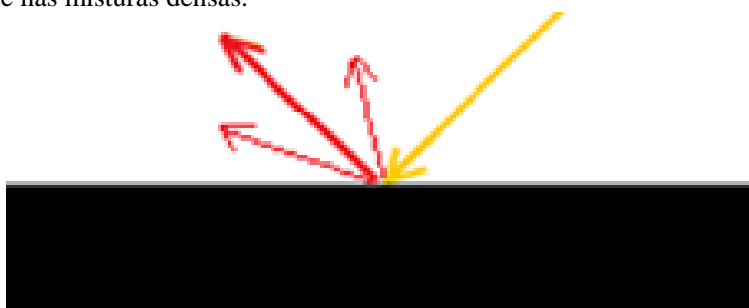
**Tabela 7.32** – Refletância solar dos ligantes coloridos em laboratório e das misturas asfálticas densa e CPA em campo.

Amostra	Refletância solar em laboratório, %	Refletância solar em campo, %	
		Densa	CPA
Amarelo-albino - Densa	22,8	12,5	
Verde - Densa	12,7	6,5	5,5
Vermelho A - Densa	14,2	7,3	6,7
Vermelho B - Densa	13,1	7,4	7,2
Referência - Densa	5,3	4,2	2,0

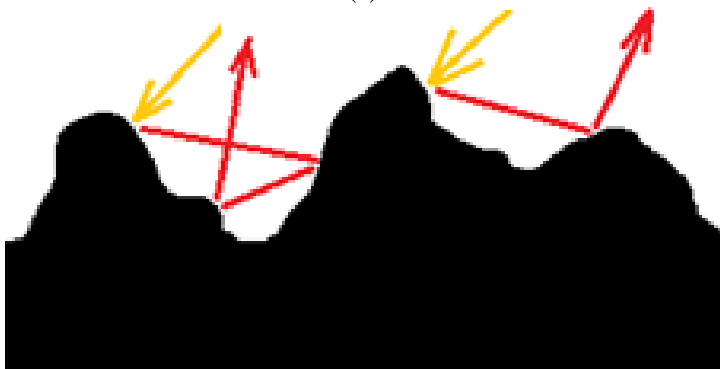
A explicação para esta diferença de comportamento da refletância está associada à textura da superfície das amostras (Tabela 7.29 e Tabela 7.30). Enquanto que as amostras de ligante colorido possuem superfícies lisas, nas misturas densas as superfícies são rugosas e nas misturas CPA as superfícies são rugosas e drenantes.

A radiação incidente em laboratório nas amostras de ligante colorido é refletida, em várias direções, uma única vez pela superfície lisa difusa. Nas misturas densas, a área superficial é maior do que na superfície lisa e permite uma maior absorção da radiação solar. Nas misturas CPA, além da área superficial, a estrutura porosa da superfície reflete a radiação em direção a ao céu como ao interior da mistura. A radiação é, então, refletida e absorvida várias vezes, no interior do revestimento, antes de ser refletida de volta para a atmosfera (Figura

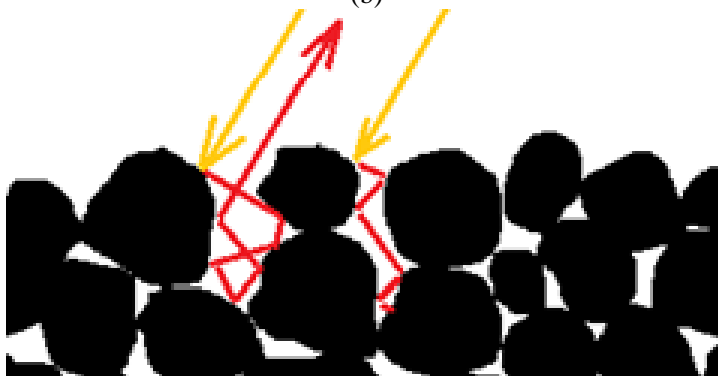
7.45). Isto faz com que a temperatura nestas misturas tenda a ser maior que nas misturas densas.



(a)



(b)



(c)

**Figura 7.45** – Mecanismo de reflexão da radiação solar por parte das superfícies com superfície: lisas (a), grosseira (b) e porosa (c).

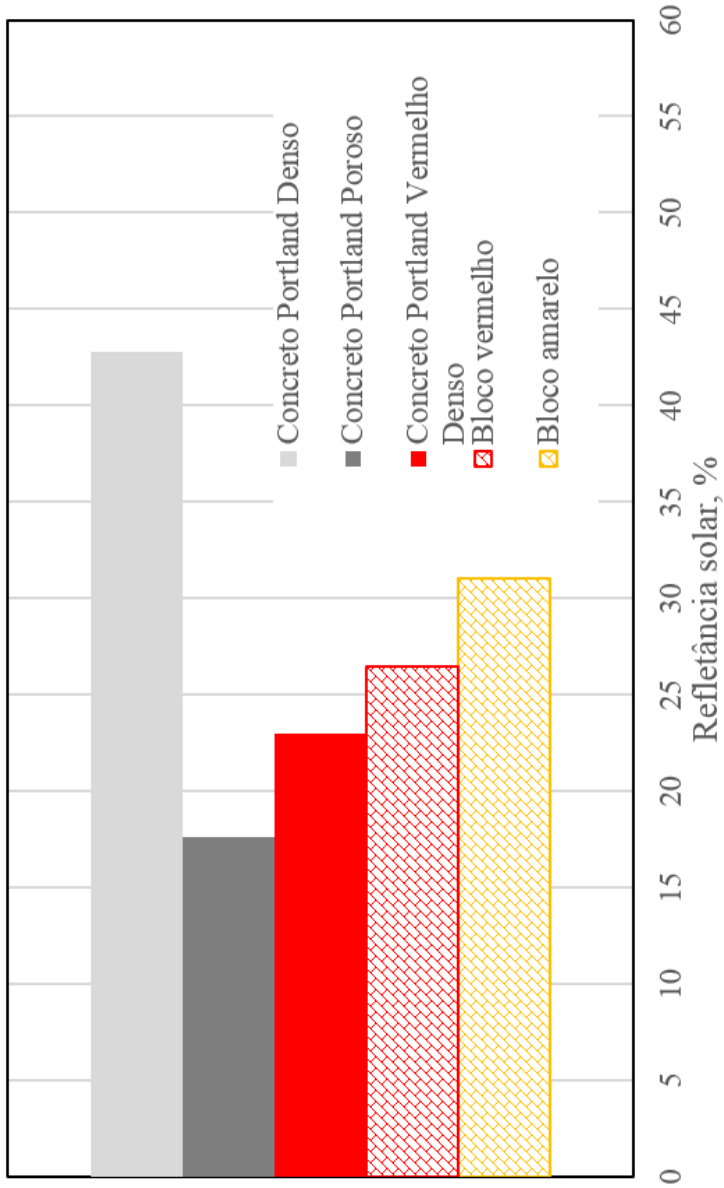


Entre os revestimentos de concreto Portland, a mistura densa sem pigmento atingiu o maior valor de refletância (Figura 7.46). Em contrapartida, a mistura porosa sem pigmento atingiu um valor quase três vezes menor. Esta diferença de valores pode ser explicada pela cor e textura do revestimento. Enquanto que o revestimento denso possuía uma cor cinza bem clara, o revestimento poroso possuía uma cor cinza escura e uma textura muito rugosa.

A explicação para a diferença de coloração está na quantidade de água disponível para a pasta de cimento. No concreto Portland denso esta quantidade foi maior. Com isso, durante o adensamento, aflorou mais pasta de cimento na superfície. Durante a hidratação do cimento desta pasta, forma-se mais hidróxido de cálcio que facilmente migra para superfície dando um tom mais claro. No concreto Portland poroso a quantidade de água foi menor e a pasta cimentícia ficou mais seca. Com isto, durante a hidratação do cimento, a quantidade de hidróxido de cálcio que consegue ficar na superfície é menor fazendo prevalecer a cor natural do cimento que é cinza escuro.

Adicionalmente, a textura e a granulometria porosa favoreceriam à reflexão múltipla dos raios incidentes no revestimento permitindo que uma maior quantidade de radiação seja absorvida pela mistura.

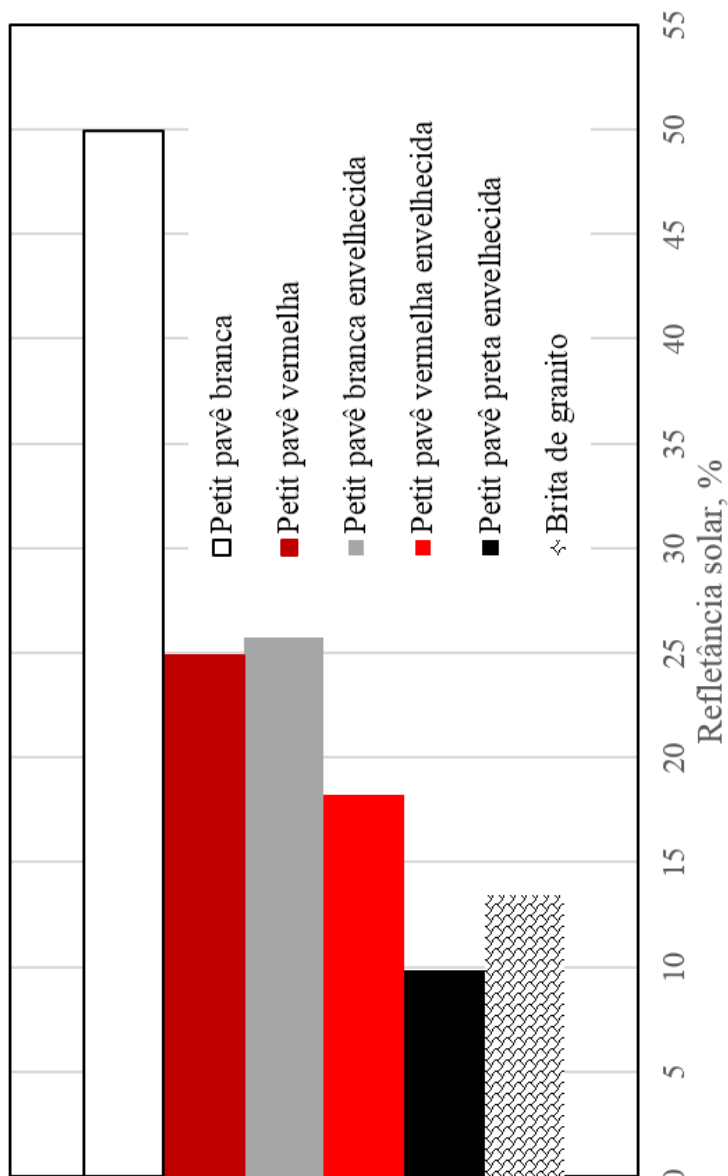
O revestimento de bloco amarelo atingiu o segundo maior valor de refletância, seguida pelo revestimento de cor vermelho e depois pelo revestimento de concreto Portland Vermelho denso. Neste caso, a cor do revestimento influenciou diretamente o valor da refletância. Embora os revestimentos de bloco vermelho e concreto Portland vermelho denso tenham a mesma cor, este último é um pouco mais escuro devido à quantidade de pigmento utilizada na sua elaboração.



**Figura 7.46** – Refletância solar em campo dos revestimentos de concreto Portland.

Na Figura 7.47 é possível observar a influência do envelhecimento (oxidação superficial do ligante) na refletância do revestimento. Os dados foram obtidos no Pátio da Retoria da UFSC. Neste caso, o envelhecimento é resultado do acúmulo de sujeira na superfície (limo) e da ação do intemperismo que tornou as superfícies mais escuras.

A diferença entre a refletância solar de uma superfície nova e uma envelhecida é mais evidente no revestimento de pedra *petit pavê* branca. Neste revestimento, a superfície envelhecida possui um valor de refletância que é a metade do apresentado pela superfície nova. Assim, para que a refletância seja mantida ao longo do tempo, estas superfícies deverão ser periodicamente lavadas.



**Figura 7.47** – Refletância solar em campo dos revestimentos de pedra *petit pavê*.

## 7.7 TEMPERATURA DOS REVESTIMENTOS EM CAMPO

Os resultados da medida de temperatura em campo são mostrados nas Tabela 7.33 a Tabela 7.36. São mostrados os resultados para cada hora desde as 10h16 até as 16h15 de radiação solar incidente, a umidade ambiente, a temperatura ambiente e a temperatura dos revestimentos na superfície e a uma profundidade de 1 e 3 cm.

A temperatura dos revestimentos não é constante durante o dia e muda segundo o horário de medição. A temperatura dos revestimentos é menor durante as primeiras horas, atingindo seu máximo entre as 12h15 e 13h15. A partir deste horário, a temperatura entra em declínio. O horário no qual os revestimentos atingem suas temperaturas máximas pode ser denominado de horário crítico.

A relação entre a temperatura e o horário crítico depende da intensidade da radiação solar incidente nos revestimentos. No horário da manhã, os revestimentos encontram-se com uma baixa temperatura, e vai mudando conforme a radiação solar aumenta e é absorvida pela superfície. No entanto, a absorção de calor não causa um incremento imediato da temperatura. Por este motivo, a maior temperatura não é registrada para o meio dia (horário de maior radiação solar), e sim por volta das 13h. A partir deste horário, como a radiação diminui, o revestimento começa a liberar o calor excedente ao meio ambiente, diminuindo a sua temperatura.

Segundo os dados obtidos, os revestimentos absorvem radiação solar durante a manhã e liberam calor durante a tarde. Durante as duas primeiras horas do ensaio, ocorreu um rápido incremento de temperaturas até atingir um patamar que durou desde as 12h15 até as 14h15. Após este horário, a temperatura começou a declinar.

A temperatura medida está relacionada principalmente com a cor dos revestimentos. Os revestimentos mais refletivos, pedra *petit pavê* e concreto Portland denso, apresentaram as menores temperaturas. Os revestimentos menos refletivos, misturas de Referência densa e CPA, atingiram as maiores temperaturas.

### 7.7.1 Temperatura Superficial

A menor temperatura superficial medida para o horário das 13h15 foi registrada para o revestimento de pedra *petit pavê* branca seguida pelo revestimento de concreto Portland denso, com 2,9 °C a mais. A maior temperatura foi registrada no horário das 12h15 para a mistura de Referência CPA seguida da mistura de Referência densa, com 0,5 °C a menos. A diferença entre a temperatura superficial mais quente e a mais fria para o horário mais crítico foi de 18,4 °C (Figura 7.48).

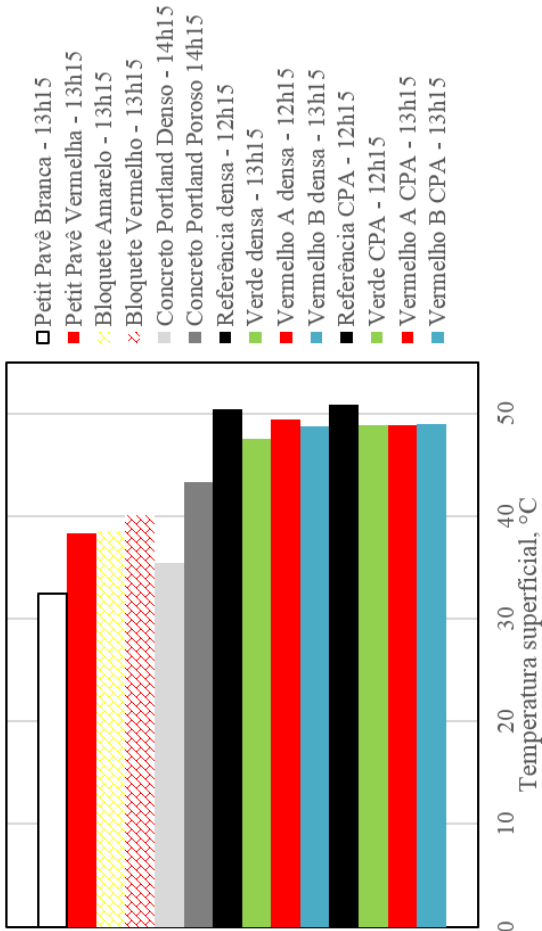


Figura 7.48 – Temperatura superficial dos revestimentos no horário crítico.

## 7.7.2 Temperatura a 1 cm de Profundidade

A 1 cm de profundidade, a menor temperatura foi registrada novamente para o revestimento de pedra *petit pavê* branca e para o revestimento de concreto Portland. A temperatura mais quente foi registrada para a mistura de Referência densa, seguida da mistura de Referência CPA. A diferença entre a maior e menor temperatura a 1 cm de profundidade para o horário mais crítico foi de 17,9 °C (Figura 7.49).

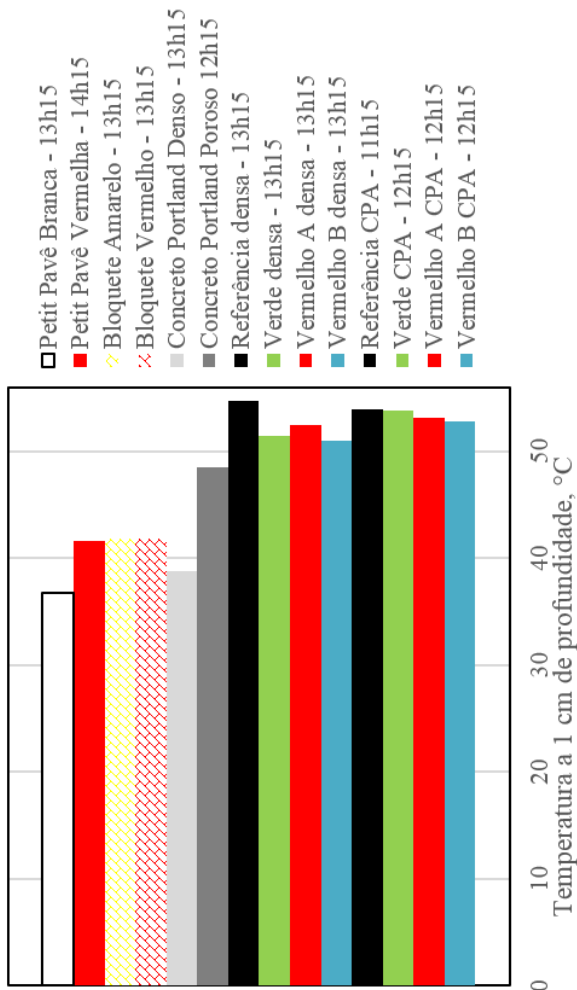
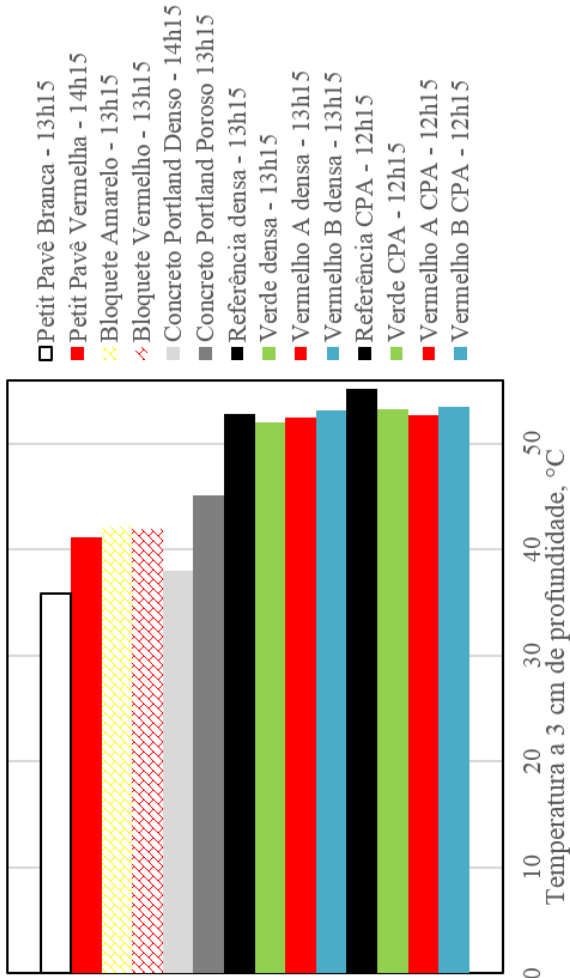


Figura 7.49 – Temperatura a 1 cm de profundidade dos revestimentos no horário crítico.

### 7.7.3 Temperatura a 3 cm de Profundidade

A 3 cm de profundidade, novamente as menores temperatura foram registradas para os revestimentos de pedra *petit pavê* branca e concreto Portland denso. As maiores temperaturas foram registradas para a mistura de Referência e Vermelho B CPA. Neste caso, a diferença entre a maior e a menor temperatura foi de 19,3 °C (Figura 7.50).



**Figura 7.50** – Temperatura a 3 cm de profundidade dos revestimentos no horário crítico.



O motivo pelo qual a temperatura superficial é menor do que a temperatura interna se deve à troca de calor entre a superfície e o meio ambiente e à presença de correntes de ar o que favorece o esfriamento da superfície.

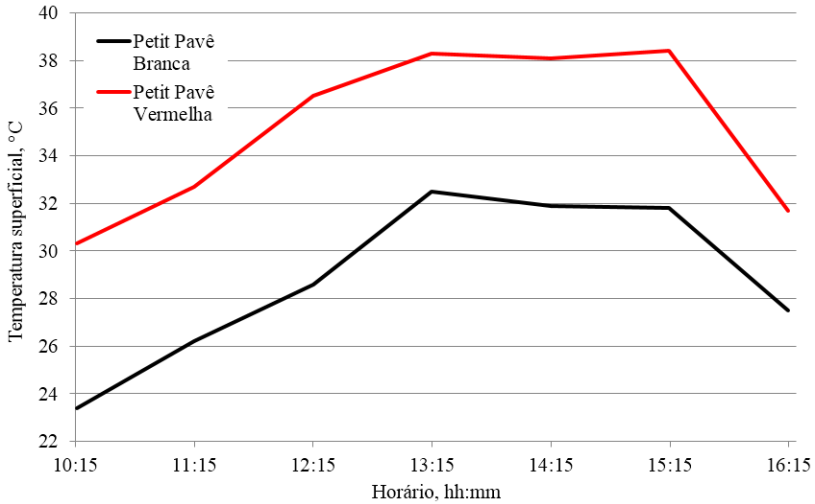
#### 7.7.4 Temperatura dos Revestimentos de Pedra *Petit Pavê*

As temperaturas obtidas dos revestimentos de pedra *petit pavê* são mostrados na Tabela 7.33.

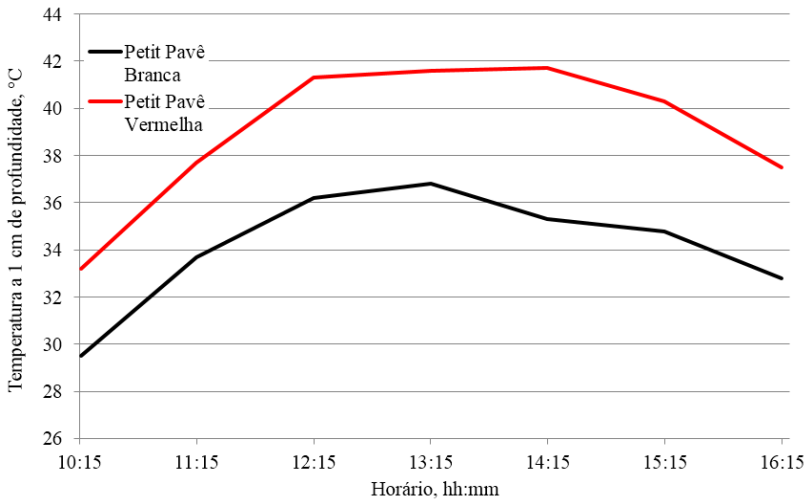
**Tabela 7.33** – Temperatura superficial e interna dos revestimentos de pedra *petit pavê*.

Horário, hh:mm	10:16	11:15	12:15	13:15	14:15	15:15	16:15
Radiação solar, $W m^{-2}$	641,6	735,1	763,5	725,3	627,5	466,2	274,6
Umidade ambiental, %	61	62	51	48	59	57	57
Temperatura ambiental, °C	28,3	27,7	29,9	31	28,8	30,8	29,8
<i>Petit pavê</i> Branca							
T° sup., °C	23,4	26,2	28,6	32,5	31,9	31,8	27,5
T° a 1 cm, °C	29,5	33,7	36,2	36,8	35,3	34,8	32,8
T° a 3 cm, °C	27,3	31,8	34,9	35,9	35,8	34,8	32,8
<i>Petit pavê</i> Vermelha							
T° sup., °C	30,3	32,7	36,5	38,3	38,1	38,4	31,7
T° a 1 cm, °C	33,2	37,7	41,3	41,6	41,7	40,3	37,5
T° a 3 cm, °C	30,9	35,5	39,6	41,0	41,1	40,2	38,2

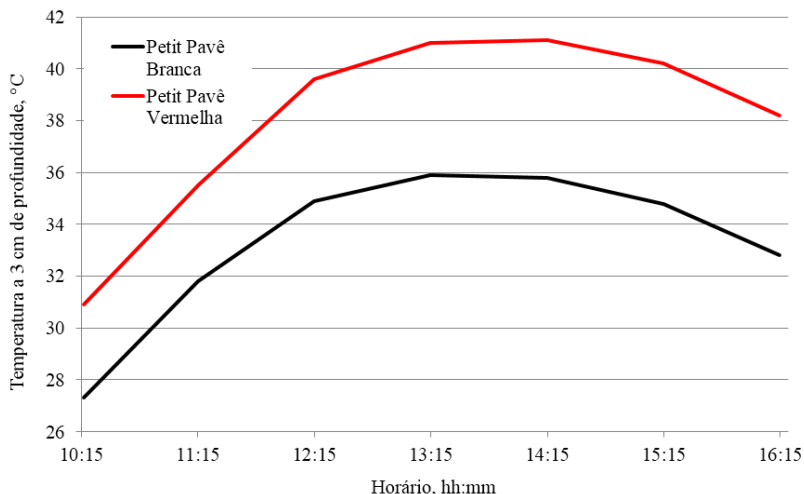
Nos revestimentos de pedra *petit pavê*, a maior temperatura foi atingida no horário das 13h15 no revestimento de cor vermelha. Para este mesmo horário, o revestimento de cor branca atingiu uma temperatura 5,8 °C menor. As Figura 7.51 a Figura 7.53 mostram a evolução da temperatura nos revestimentos ao longo do dia. A diferença da refletância entre o revestimento de cor branca e de cor vermelha é de 25,0%.



**Figura 7.51** – Temperatura superficial dos revestimentos de pedra *petit pavê*.



**Figura 7.52** – Temperatura a 1 cm de profundidade dos revestimentos de pedra *petit pavê*.



**Figura 7.53** – Temperatura a 3 cm de profundidade dos revestimentos de pedra *petit pavê*.

Assim, ao se elaborar um projeto paisagístico de uma praça, o predomínio de pedras *petit pavê* branca favoreceria a redução da Ilha de Calor, tornando o ambiente mais agradável. A intercalação com ilhas de vegetação propiciaria uma redução do desconforto quanto à visão dos pedestres.

### 7.7.5 Temperatura dos Revestimentos de Concreto Portland

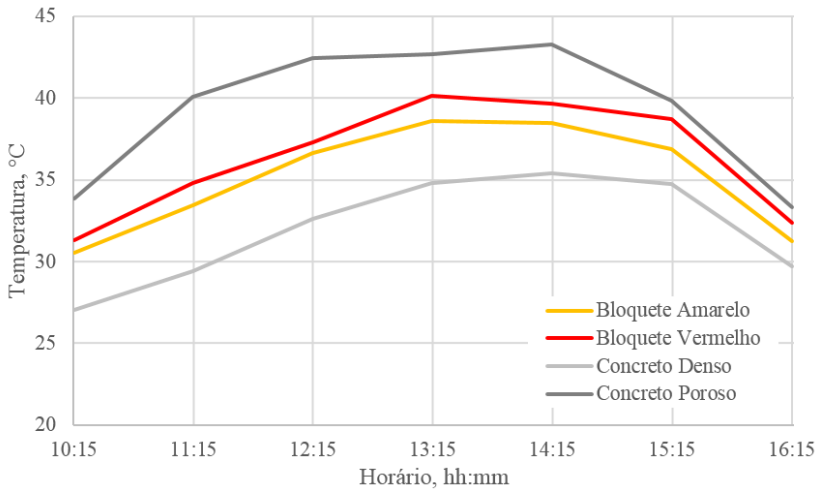
As temperaturas coletadas dos revestimentos de concreto Portland são mostrados na Tabela 7.34.

**Tabela 7.34** – Temperatura superficial e interna dos revestimentos de concreto Portland.

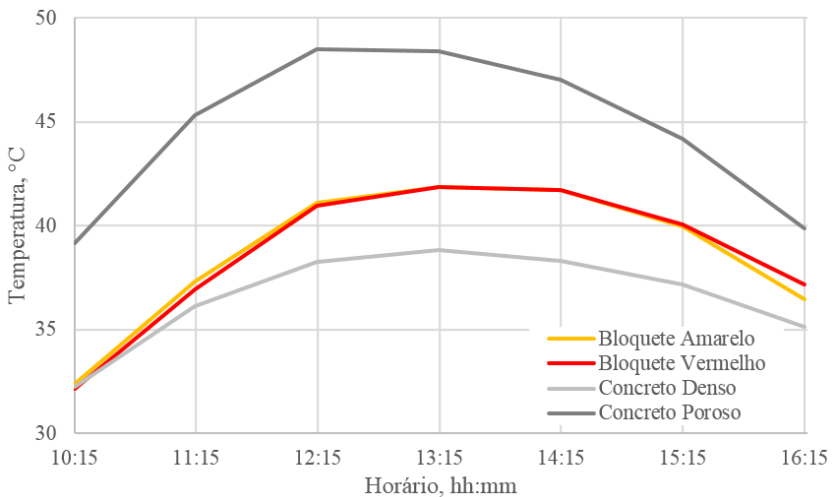
Horário, hh:mm	10:16	11:15	12:15	13:15	14:15	15:15	16:15
Radiação solar, W m <sup>-2</sup>	641,6	735,1	763,5	725,3	627,5	466,2	274,6
Umidade ambiental, %	61	62	51	48	59	57	57
Temperatura ambiental, °C	28,3	27,7	29,9	31	28,8	30,8	29,8
<i>Bloco Amarelo</i>							
T° sup., °C	30,5	33,4	36,6	38,6	38,5	36,9	31,2
T° a 1 cm, °C	32,4	37,3	41,1	41,9	41,7	40,0	36,4
T° a 3 cm, °C	33,8	38,4	42,1	42,2	41,8	40,3	37,5
<i>Bloco Vermelho</i>							
T° sup., °C	31,3	34,8	37,3	40,1	39,7	38,7	32,4
T° a 1 cm, °C	32,1	36,9	41,0	41,9	41,7	40,0	37,2
T° a 3 cm, °C	34,2	39,0	41,0	41,9	41,9	40,7	38,2
<i>Concreto Portland Denso</i>							
T° sup., °C	27,0	29,4	32,6	34,8	35,4	34,7	29,7
T° a 1 cm, °C	32,2	36,1	38,2	38,8	38,3	37,2	35,1
T° a 3 cm, °C	29,2	33,0	36,5	37,7	37,9	37,3	35,7
<i>Concreto Portland Poroso</i>							
T° sup., °C	33,9	40,1	42,4	42,7	43,3	39,8	33,3
T° a 1 cm, °C	39,2	45,3	48,5	48,4	47,0	44,2	39,9
T° a 3 cm, °C	35,3	40,8	44,8	45,2	44,6	42,8	39,6

Nos revestimentos de concreto Portland, a maior temperatura foi medida no revestimento poroso. Para os horários críticos, o revestimento denso atingiu uma temperatura entre 7,5 a 9,7 °C menor. Uma alternativa para o uso do revestimento de concreto Portland denso, o qual tem um refletância muito alta que pode dar desconforto à visão, seria o uso de blocos vermelho ou amarelo. Entretanto eles atingiram temperaturas entre 3,8 e 5,3 °C superiores ao concreto Portland denso no horário crítico. As Figura 7.54 a Figura 7.56 mostram a evolução da temperatura nestes revestimentos. Como as temperaturas atingidas pelo concreto Portland poroso são maiores, a ideia de utilizar este material com o objetivo de

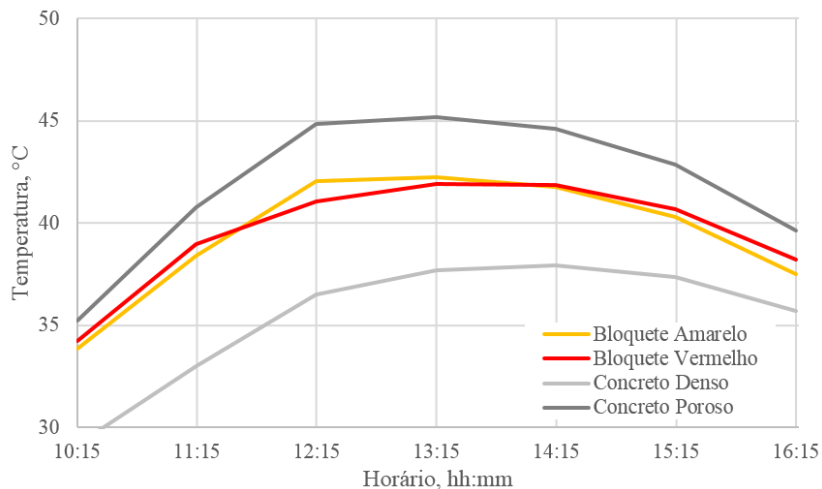
infiltrar a água de chuva, acabaria levando a um aumento da temperatura do microclima.



**Figura 7.54** – Temperatura superficial dos revestimentos de concreto Portland.



**Figura 7.55** – Temperatura a 1 cm de profundidade dos revestimentos de concreto Portland.



**Figura 7.56** – Temperatura a 3 cm de profundidade dos revestimentos de concreto Portland.

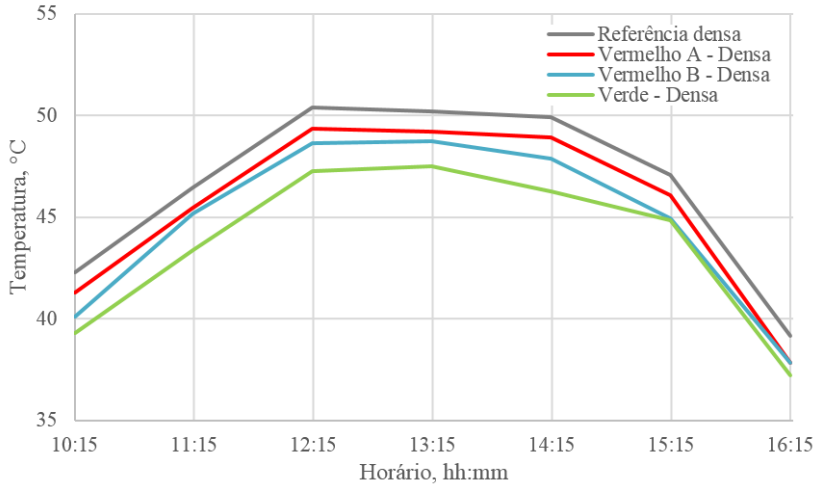
### 7.7.6 Temperatura dos Revestimentos de Mistura Asfáltica Densa

As temperaturas coletadas dos revestimentos de mistura asfáltica densa são mostrados na Tabela 7.35. A diferença de temperaturas medida a 1 cm de profundidade foram utilizadas para modificar a temperatura de ensaio no ensaio de deformação permanente.

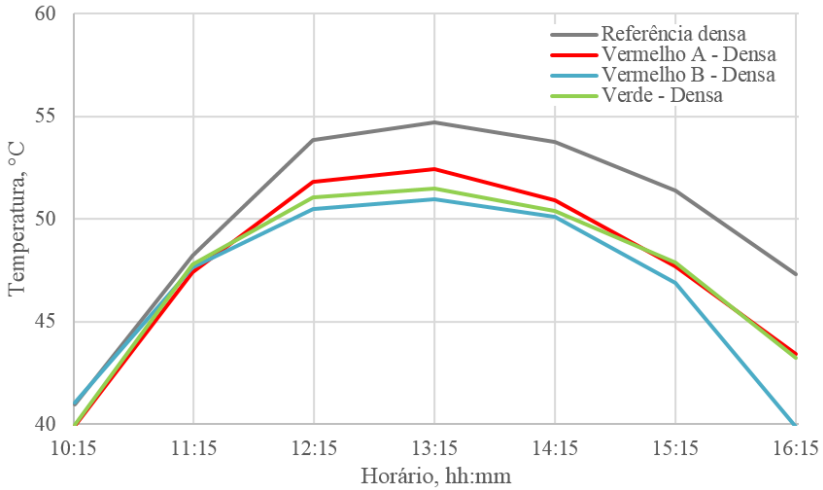
**Tabela 7.35** – Temperatura superficial e interna dos revestimentos de mistura asfáltica densa.

Horário, hh:mm	10:16	11:15	12:15	13:15	14:15	15:15	16:15
Radiação solar, W m <sup>-2</sup>	641,6	735,1	763,5	725,3	627,5	466,2	274,6
Umidade ambiental, %	61	62	51	48	59	57	57
Temperatura ambiental, °C	28,3	27,7	29,9	31	28,8	30,8	29,8
<i>Referência Densa</i>							
T° sup., °C	42,3	46,5	50,4	50,2	49,9	47,1	39,1
T° a 1 cm, °C	41,0	48,2	53,9	54,7	53,8	51,4	47,3
T° a 3 cm, °C	39,4	48,2	51,8	52,8	51,3	48,4	44,5
<i>Verde Densa</i>							
T° sup., °C	39,3	43,4	47,3	47,5	46,3	44,8	37,2
T° a 1 cm, °C	40,0	47,8	51,1	51,5	50,4	47,9	43,2
T° a 3 cm, °C	37,1	45,5	51,0	52,0	51,4	49,0	45,2
<i>Vermelho A Densa</i>							
T° sup., °C	41,3	45,5	49,4	49,2	48,9	46,1	37,8
T° a 1 cm, °C	39,9	47,4	51,8	52,5	50,9	47,7	43,4
T° a 3 cm, °C	37,7	45,6	51,5	52,5	51,7	49,2	45,4
<i>Vermelho B Densa</i>							
T° sup., °C	40,1	45,2	48,7	48,7	47,9	44,9	37,8
T° a 1 cm, °C	41,1	47,6	50,5	51,0	50,1	46,9	39,9
T° a 3 cm, °C	39,5	47,1	52,3	53,2	52,6	51,9	45,3

Nas misturas asfálticas densas, a maior temperatura foi atingida no horário das 13h15 pela mistura de Referência, a qual é a menos refletiva do conjunto. Para este mesmo horário, as misturas coloridas apresentaram temperaturas inferiores, entre 2,2 a 3,7 °C. Estes resultados são significativos se consideramos que as misturas densas tem valores de refletância bem próximos. As Figura 7.57 a Figura 7.59 mostram a evolução da temperatura nos revestimentos.

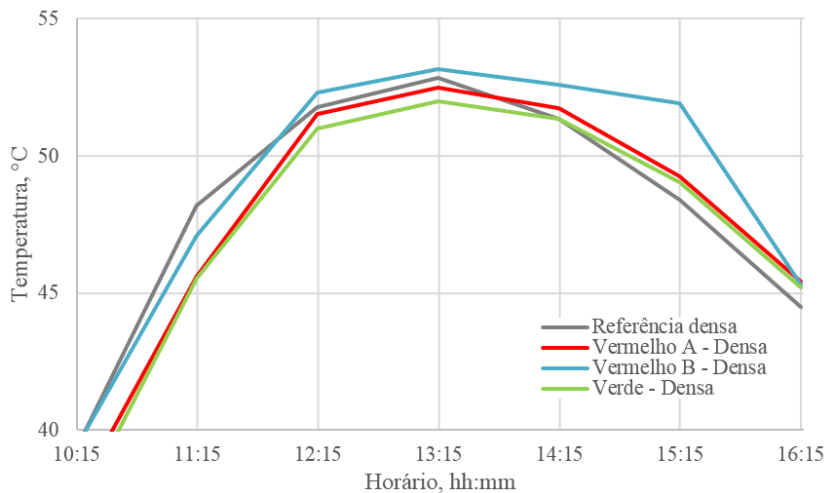


**Figura 7.57** – Temperatura superficial das misturas asfálticas densas.



**Figura 7.58** – Temperatura a 1 cm de profundidade das misturas asfálticas densas.





**Figura 7.59** – Temperatura a 3 cm de profundidade das misturas asfálticas densas.

### 7.7.7 Temperatura dos Revestimentos de Mistura Asfáltica CPA

As temperaturas obtidas dos revestimentos de mistura asfáltica CPA são mostrados na Tabela 7.36.

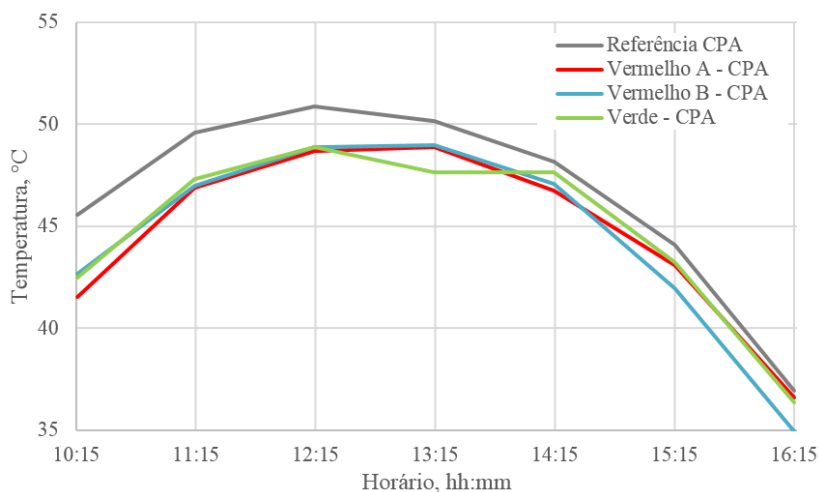
**Tabela 7.36** – Temperatura superficial e interna dos revestimentos de mistura asfáltica CPA.

Horário, hh:mm	10:16	11:15	12:15	13:15	14:15	15:15	16:15
Radiação solar, W m <sup>-2</sup>	641,6	735,1	763,5	725,3	627,5	466,2	274,6
Umidade ambiental, %	61	62	51	48	59	57	57
Temperatura ambiental, °C	28,3	27,7	29,9	31	28,8	30,8	29,8
<i>Referência CPA</i>							
T° sup., °C	45,5	49,6	50,9	50,1	48,2	44,1	37,0
T° a 1 cm, °C	47,2	53,9	53,1	51,8	49,6	45,7	41,5
T° a 3 cm, °C	44,0	51,6	55,2	54,9	53,2	49,8	45,5
<i>Verde CPA</i>							
T° sup., °C	42,5	47,3	48,9	47,7	47,7	43,3	36,3
T° a 1 cm, °C	42,5	50,3	53,9	52,4	51,2	47,3	42,4
T° a 3 cm, °C	40,1	48,9	53,3	52,9	51,7	48,5	44,1
<i>Vermelho A CPA</i>							
T° sup., °C	41,5	46,9	48,7	48,9	46,8	43,1	36,6
T° a 1 cm, °C	42,0	49,5	53,1	51,2	50,3	46,0	41,8
T° a 3 cm, °C	39,7	48,5	52,6	52,6	51,3	48,2	44,0
<i>Vermelho B CPA</i>							
T° sup., °C	42,7	47,0	48,9	49,0	47,1	42,0	34,9
T° a 1 cm, °C	41,8	49,1	52,8	52,0	50,8	47,3	41,3
T° a 3 cm, °C	40,2	49,8	53,5	53,4	52,1	48,8	43,5

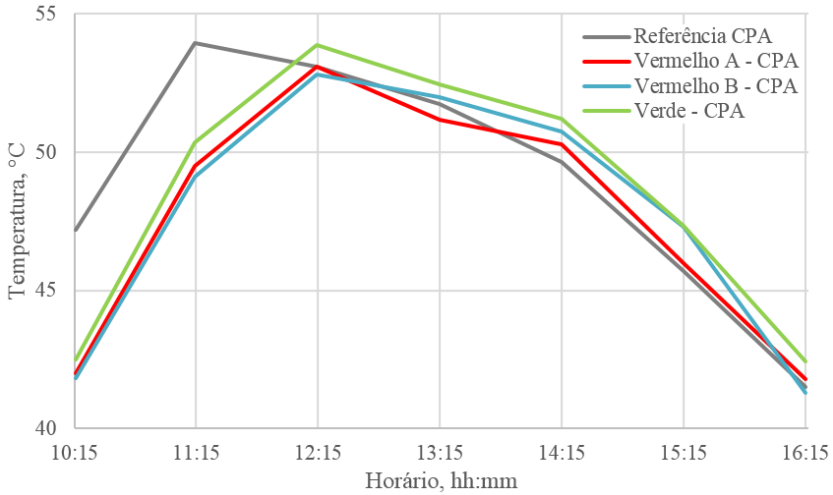
Similar ao que aconteceu nas misturas densas, nas misturas asfálticas CPA, a maior temperatura foi medida no horário das 12h15 e a 3 cm de profundidade. Para este mesmo horário, as misturas coloridas CPA atingiram valores entre 1,7 a 2,6 °C menos do que a mistura CPA de Referência.

É interessante perceber que embora, durante as primeiras horas do dia, a temperatura superficial das misturas CPA é maior do que as misturas densas, chegando a ser até 3,8 °C maior, durante a tarde o

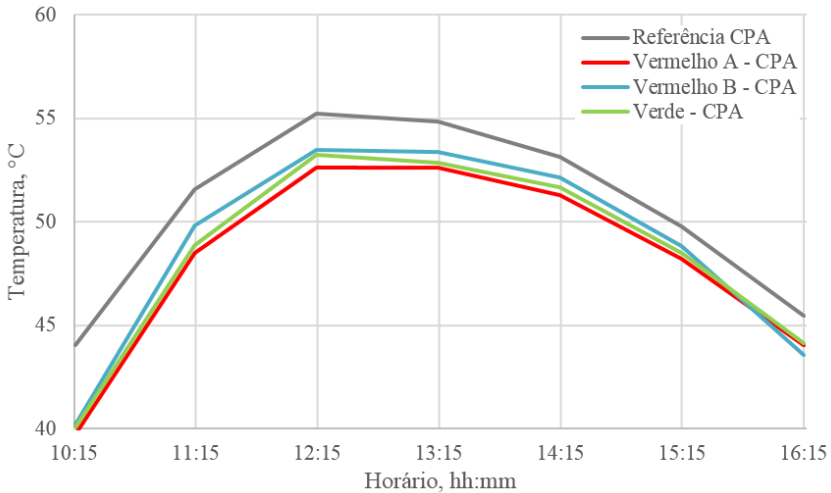
comportamento é diferente. As misturas CPA são mais frias após as 14h15, chegando a atingir temperaturas até 3 °C menores do que as misturas densas. A explicação para este fenômeno reside no fato de a mistura CPA ter uma estrutura muito porosa o qual facilita que as correntes de ar formem redemoinhos que esfriam a superfície e o interior das misturas. Da mesma forma, enquanto que a maior área superficial da mistura CPA favorece a absorção de uma maior quantidade de radiação solar durante a manhã, esta mesma área superficial favorece a dissipação do calor durante a tarde. As Figura 7.60 a Figura 7.62 mostram a evolução da temperatura nos revestimentos.



**Figura 7.60** – Temperatura superficial das misturas asfálticas CPA.



**Figura 7.61** – Temperatura a 1 cm de profundidade das misturas asfálticas CPA.

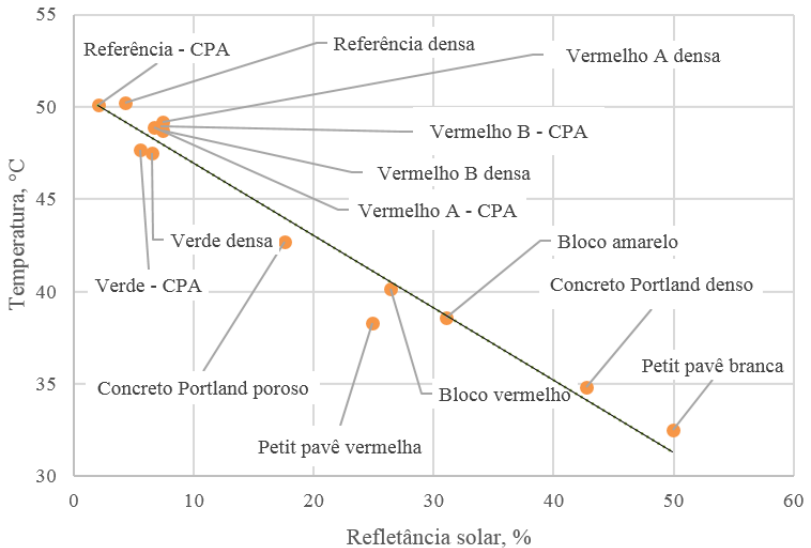


**Figura 7.62** – Temperatura a 3 cm de profundidade das misturas asfálticas CPA.

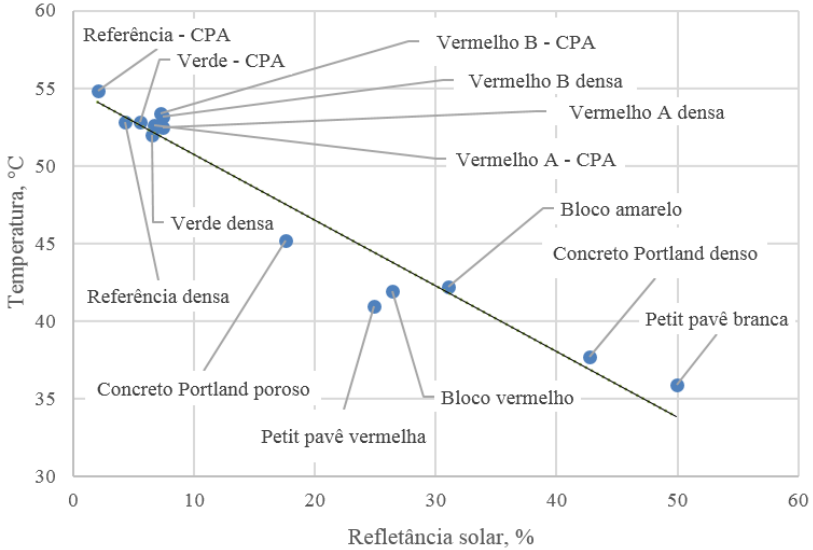
### 7.7.8 Relação entre Temperatura e Refletância Solar

As Figura 7.63 a Figura 7.65 mostram a relação entre a refletância e a temperatura, no horário crítico, dos revestimentos estudados. Segundo

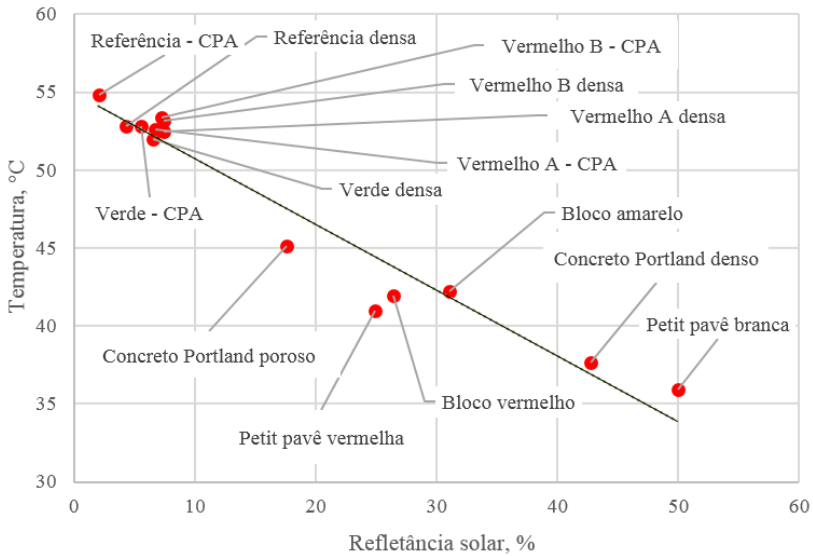
os dados mostrados, o uso de um revestimento de concreto Portland denso ao invés de uma mistura asfáltica densa convencional, reduziria a temperatura superficial em, aproximadamente, 15 °C. Esta é uma redução importante considerando que ambos são materiais utilizados na pavimentação. Esta redução de temperatura seria mais eficiente em locais onde o armazenamento de calor fosse maior como por exemplo, ruas com formato de cânion urbano. Se, por questões de saúde, não se pode utilizar uma superfície tão clara, a substituição da mistura asfáltica densa convencional por blocos de cor vermelha ou amarela, permitiriam uma redução de, aproximadamente, 10 a 12 °C na temperatura do local. Esta redução é também significativa.



**Figura 7.63** – Refletância solar e temperatura superficial dos revestimentos.



**Figura 7.64** – Refletância solar e temperatura a 1 cm de profundidade dos revestimentos.



**Figura 7.65** – Refletância solar e temperatura a 3 cm de profundidade dos revestimentos.

Baseado nos dados apresentado, pode-se estimar que, para as mesmas condições nas quais foram realizadas as medições dos revestimentos desta pesquisa, o revestimento de mistura Amarelo-albino (refletância solar = 12,53%) atingiria uma temperatura superficial de 46 °C, um temperatura de 50 °C a 1 cm de profundidade (Figura 7.64) e de 49 °C a 3 cm de profundidade (Figura 7.65).

Seguindo o mesmo raciocínio do parágrafo anterior, o revestimento de concreto Portland Vermelho denso (refletância solar = 23%), atingiria uma temperatura de 41, 45 e 44 °C na superfície, a 1 cm e a 3 cm de profundidade, respectivamente.

Os resultados apresentados na Figura 4.7, porém, não podem ser comparados com os obtidos nesta pesquisa devido a que ambos os estudos foram realizados em locais e situações climáticas diferentes.

## 7.8 ENSAIOS MECÂNICOS

### 7.8.1 Resistência à Tração

A Tabela 7.37 mostra a resistência à tração das misturas asfálticas. Os resultados dos ensaios mostram que as amostras com pigmentos atingem valores superiores aos da mistura sem pigmentos. O valor mais alto de resistência à tração evidencia um enrijecimento da mistura asfáltica, devido ao incremento do material fino (pigmento) nas misturas, endurecimento do ligante asfáltico pela adição de pigmento e à melhora da adesividade entre o ligante e o agregado granítico promovida pelo uso de pigmentos com carga elétrica positiva.

**Tabela 7.37** – Resistência à tração das misturas asfálticas.

Amostra	Vv, %	RT, Mpa	Amostra	Vv, %	RT, Mpa
Referência densa	<b>4,1</b>	<b>1,02</b>	Referência CPA	<b>23,5</b>	<b>0,39</b>
C	3,9	1,02	B	23,7	0,39
H	4,4	0,96	D	23,9	0,38
I	3,9	1,09	G	22,8	0,40
Verde densa	<b>4,0</b>	<b>1,22</b>	Verde CPA	<b>23,8</b>	<b>0,60</b>
A	3,9	1,24	A	24,0	0,58
B	4,1	1,20	B	24,3	0,60
C	4,1	1,22	I	23,2	0,63
Vermelho A densa	<b>3,9</b>	<b>1,44</b>	Vermelho A CPA	<b>23,1</b>	<b>0,71</b>
C	3,8	1,48	D	22,4	0,76
F	3,9	1,44	E	23,8	0,70
G	3,9	1,40	H	23,2	0,68
Vermelho B densa	<b>3,8</b>	<b>1,18</b>	Vermelho B CPA	<b>23,7</b>	<b>0,42</b>
A	3,7	1,17	A	23,4	0,39
F	4,0	1,18	B	24,0	0,39
G	3,8	1,20	I	23,7	0,49

Todas as misturas densas cumprem com o valor mínimo de resistência à tração de 0,6 MPa especificada pela norma DNIT 031/2004. No caso das misturas CPA, as amostras de Referência e Vermelho B não conseguiram atingir o valor entre 0,5 a 0,8 MPa, típicos para este tipo de mistura.

### 7.8.2 Ensaio Cântabro

Os resultados do ensaio Cântabro (Tabela 7.38) mostraram que as misturas asfálticas CPA com adição de pigmentos apresentaram um menor desgaste que seu par convencional. Das quatro misturas ensaiadas, as misturas de Referência de Vermelho A sobrepassaram o valor máximo admitido de 25% para misturas asfálticas porosas.



**Tabela 7.38** – Resistência à desagregação das misturas asfálticas.

Amostra	Vv, %	Desgaste, %
Referência CPA	<b>23,7</b>	<b>38,26</b>
A	24,7	35,87
H	23,4	40,09
I	23,0	38,81
Verde CPA	<b>22,7</b>	<b>23,44</b>
D	23,1	25,93
E	22,6	24,13
F	22,3	20,25
Vermelho A CPA	<b>23,0</b>	<b>35,77</b>
F	23,1	33,16
G	22,6	33,55
I	23,4	40,60
Vermelho B CPA	<b>23,4</b>	<b>18,78</b>
D	23,4	15,97
G	23,6	20,93
H	23,3	19,44

### 7.8.3 Módulo Resiliente

A adição de pigmentos incrementa o valor do módulo resiliente das misturas asfálticas (Tabela 7.39). As causas deste fenômeno são as mesmas que para os ensaios anteriores: aumento da consistência do ligante e melhora da adesividade entre o ligante e o agregado granítico.

**Tabela 7.39** – Módulo resiliente das misturas asfálticas.

Amostra	Vv, %	MR, Mpa	Amostra	Vv, %	MR, Mpa
Referência densa	<b>4,19</b>	<b>5314</b>	Vermelho A densa	<b>3,95</b>	<b>9710</b>
A	4,52	5135	A	3,88	9648
B	4,16	4972	B	4,06	9458
E	3,81	5559	D	3,73	9801
F	4,48	5537	H	4,22	9541
G	3,97	5367	I	3,89	10101
Verde densa	<b>4,05</b>	<b>9543</b>	Vermelho B densa	<b>3,94</b>	<b>8140</b>
D	3,73	9578	C	3,98	8362
E	4,18	9188	D	3,96	8008
F	4,19	8596	H	4,04	8073
H	4,12	9966	I	3,81	8117
I	4,03	10387			

Como já foi indicado anteriormente, um valor do módulo resiliente na faixa de 8 000 MPa corresponde a misturas que usam ligantes asfálticos de consistência dura. As misturas coloridas se encaixariam dentro deste critério.

## 7.8.4 Deformação Permanente

### 7.8.4.1 Misturas Asfálticas Densas

Os resultados do ensaio de deformação permanente nas misturas densas são mostrados na Tabela 7.41. Nos ensaios realizados a 60 °C, a adição de pigmentos diminuiu a deformação na trilha de roda das placas. Como já foi visto nos ensaios mecânicos anteriores, a adição de pigmento favorece o enrijecimento da mistura, tornando-a mais resistente à deformação permanente. Das sete misturas ensaiadas, somente a mistura de Referência apresentou um afundamento superior a 10%. Segundo a especificação francesa, a mistura de Referência seria susceptível à deformação permanente e não poderia ser empregada em uma rodovia de médio a elevado volume de tráfego.

O melhor obtido foi o da mistura Vermelho B densa a qual apresenta um valor que é menor que a metade do sofrido pela mistura de Referência. Há que considerar também, que além do enrijecimento da mistura asfáltica, a mistura ficou menos suscetível à temperatura pelo baixo teor de ligante na sua composição.

Considerando-se que a temperatura medida no interior das misturas asfálticas coloridas é inferior à temperatura medida na mistura de Referência, procurou-se avaliar o quanto esta menor temperatura poderia afetar no desempenho das misturas coloridas no ensaio de deformação permanente. Assim, de acordo com os resultados da Tabela 7.35, determinou-se qual a redução de temperatura para cada mistura colorida em relação à temperatura da mistura de Referência para o horário crítico de 13h15. Este valor foi subtraída da temperatura de referência deste ensaio (60°C) e definiu-se a temperatura do ensaio para cada mistura colorida, conforme apresentado na Tabela 7.40.

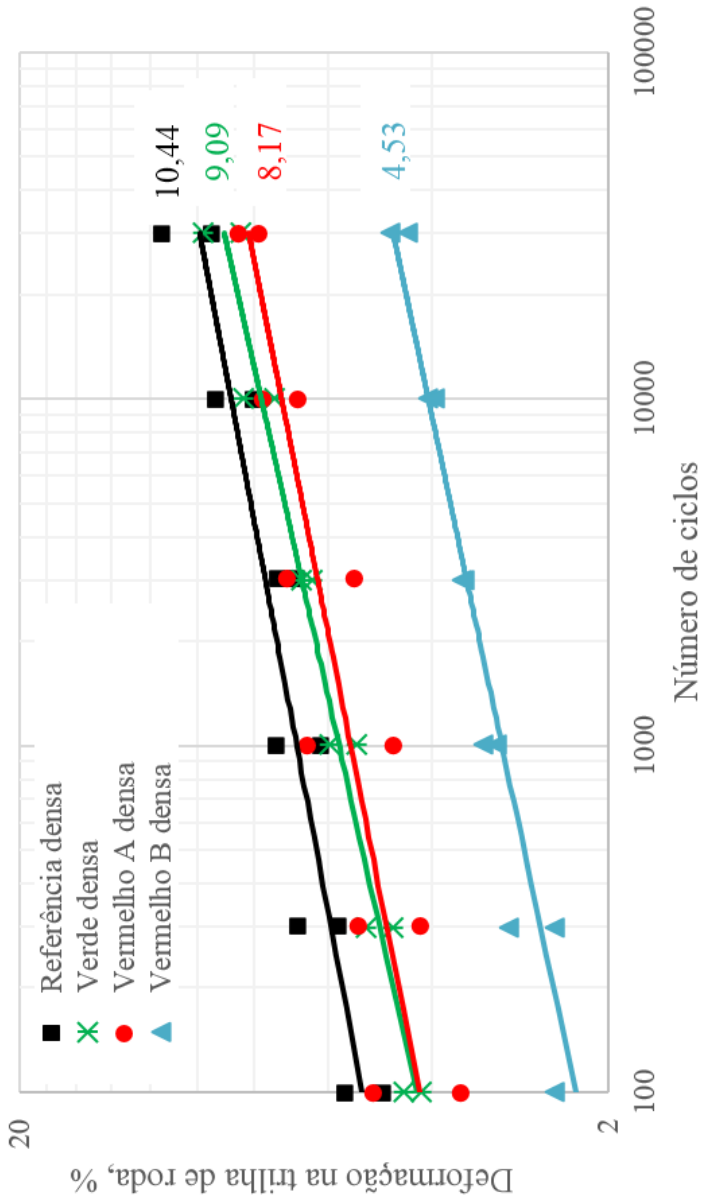
**Tabela 7.40** – Temperatura de ensaio das misturas coloridas densas.

Mistura	Temperatura a 1 cm de profundidade, °C	Diferença de temperaturas, °C	Temperatura de ensaio, °C
Referência densa	54,7	-	60,0
Verde densa	51,5	3,2	56,8
Vermelho A densa	52,5	2,2	57,8
Vermelho B densa	51,0	3,7	56,3

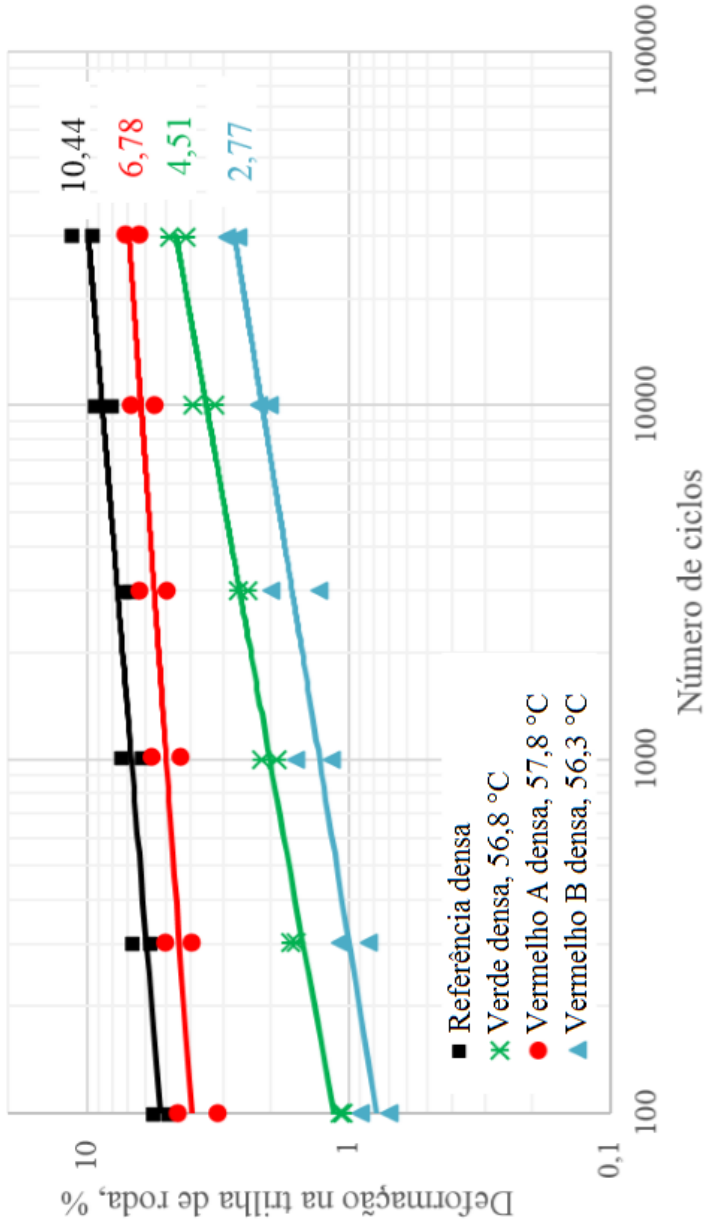
A Tabela 7.41 e as Figura 7.66 e Figura 7.67 apresentam os de deformação de trilha de roda obtidos durante os ensaios.

**Tabela 7.41** – Deformação permanente das misturas asfálticas densas.

Amostra	Vazios, %		Deformação na trilha de roda, %
	Inicial	Final	
Temperatura de ensaio, 60 °C			
Referência densa	5,81	5,17	10,44
Verde densa	5,77	5,07	9,09
Vermelho A densa	6,29	5,83	8,17
Vermelho B densa	5,41	5,06	4,53
Temperatura de ensaio inferior			
Verde densa - 56,7 °C	5,63	4,81	4,51
Vermelho A densa - 57,5 °C	5,26	4,63	6,78
Vermelho B densa - 56,5 °C	5,61	5,21	2,77



**Figura 7.66** – Deformação na trilha de roda, a 60°C, das misturas asfálticas densas, %.



**Figura 7.67** – Deformação na trilha de roda, a temperatura inferior a 60°C, das misturas asfálticas densas, %.

Os resultados mostram que as misturas coloridas tendem quase que dobrar a resistência à deformação permanente por absorver uma menor quantidade de radiação solar. Em consequência, o uso dos pigmentos nas misturas asfálticas permitiria, no campo, um incremento da vida útil dos revestimentos asfálticos quando ao fenômeno de deformação na trilha de roda.

#### 7.8.4.2 Misturas Asfálticas CPA

De forma similar acontecido com as misturas coloridas densas, nas misturas CPA, a temperatura medida no interior das misturas coloridas é inferior à temperatura medida na mistura de Referência. Portanto, procurou-se avaliar o quanto esta menor temperatura poderia afetar no desempenho das misturas coloridas no ensaio de deformação permanente. Assim, de acordo com os resultados da Tabela 7.36, determinou-se qual a redução de temperatura para cada mistura colorida em relação à temperatura da mistura de Referência para o horário crítico de 13h15. Este valor foi subtraída da temperatura de referência deste ensaio (60°C) e definiu-se a temperatura do ensaio para cada mistura colorida, conforme apresentado na Tabela 7.42.

**Tabela 7.42** – Temperatura de ensaio das misturas coloridas CPA.

Mistura	Temperatura a 3 cm de profundidade, °C	Diferença de temperaturas, °C	Temperatura de ensaio, °C
Referência CPA	54,9	-	60,0
Verde CPA	52,9	2,0	58,0
Vermelho A CPA	52,6	2,3	57,7
Vermelho B CPA	53,4	1,5	58,5

Os resultados do ensaio de deformação permanente nas misturas CPA são mostrados na Tabela 7.43 e nas Figura 7.68 e Figura 7.69.

**Tabela 7.43** – Deformação permanente das misturas asfálticas CPA.

Amostra	Deformação na trilha de roda, %
Temperatura de ensaio, 60 °C	
Referência CPA	12,01
Verde CPA	13,75
Vermelho A CPA	12,26
Vermelho B CPA	12,34
Temperatura de ensaio inferior	
Verde CPA - 58 °C	12,62
Vermelho A CPA - 57,4 °C	6,34
Vermelho B CPA – 58,3 °C	9,08



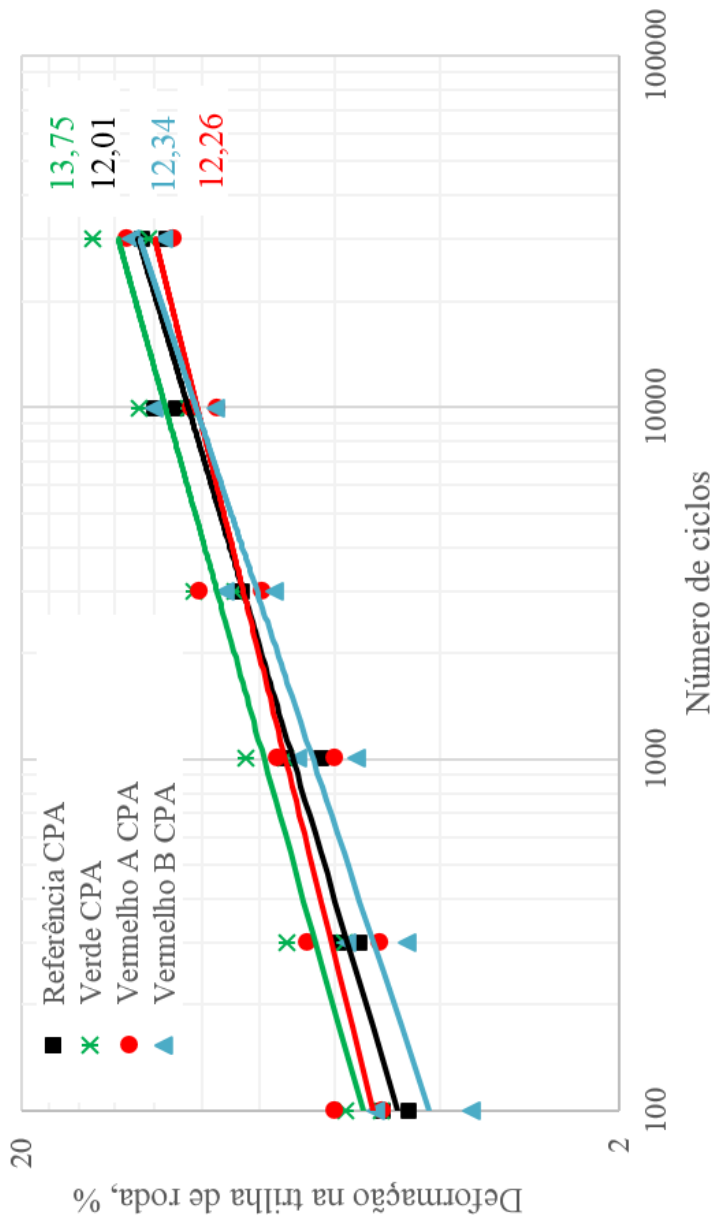
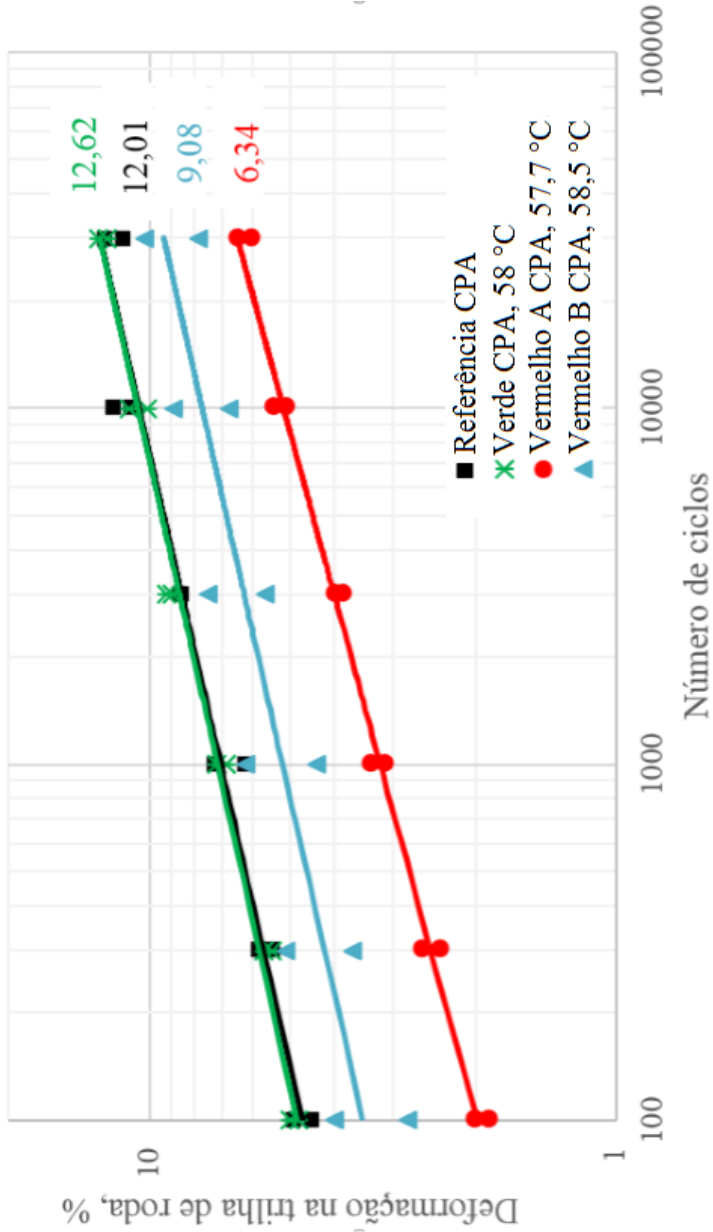


Figura 7.68 – Deformação na trilha de roda, a 60 °C das misturas asfálticas CPA, %.



**Figura 7.69** – Deformação na trilha de roda, a temperatura variável, das misturas asfálticas CPA, %.

Nos ensaios a 60 °C, a adição de pigmentos não fez diferença no desempenho das misturas asfálticas e nenhuma das misturas atenderia a especificação francesa. Diferente do observado com as misturas densas, onde a adição de pigmento melhorou o contato entre os agregados, nas misturas CPA, pelo alto volume de vazios, a adição de material fino não promoveu um maior contato intergranular, e o aumento da rigidez do ligante não foi o suficiente para inibir a deformação permanente. Então, se for projetar uma mistura colorida porosa, somente o pigmento não consegue atender o critério de deformação permanente sendo necessário a adição de polímero ou se trabalhar com um ligante mais duro.

Um melhor resultado se obteve para todas as placas ensaiadas a temperaturas menores a 60 °C. O menor desempenho foi o da mistura Verde CPA a qual teve uma diminuição de, aproximadamente, 1% no valor da deformação permanente quando foi ensaiada a 2 °C a menos do que a temperatura padrão. Como a deformação está relacionada com a temperatura de ensaio, a mistura Vermelho A foi a mais beneficiada neste sentido. Dita mistura apresentou uma deformação que é quase a metade do valor obtido para a mesma mistura ensaiada à temperatura padrão.

É possível que as misturas com pigmentos vermelhos consigam atender a especificação francesa. Em consequência, o uso dos pigmentos vermelhos, e possivelmente o Verde, nas misturas CPA permitiria, no campo, um incremento da vida útil dos revestimentos quando ao fenômeno de deformação na trilha de roda.

## 7.9 MODELAGEM CLIMÁTICA

A continuação são mostradas os resultados das simulações realizadas no pátio da Reitoria da UFSC (Figura 7.70) junto com os resultados de refletância solar dos revestimentos utilizados (Quadro 7.2) e da área modificada em cada simulação (Quadro 7.3). Para cada caso simulado são mostrados o mapa de temperatura superficial da região ao meio dia do 25 de janeiro de 2013 (Figura 7.71). A temperatura máxima média registrada pelos sensores localizados no Pátio da Reitoria para este dia foi de 35,34 °C, a qual é diferente da simulada pelo software computacional.



**Figura 7.70** – Pátio da Reitoria da UFSC.

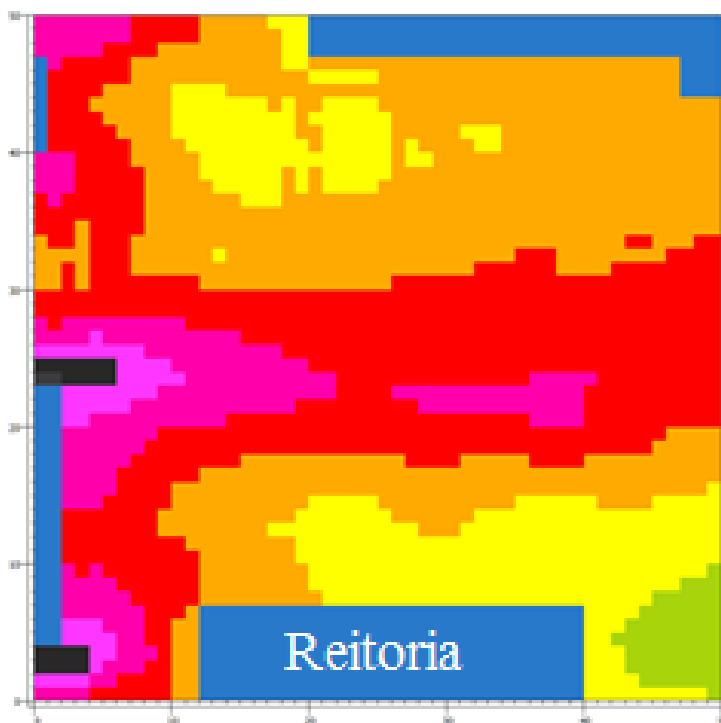
**Fonte:** Google Maps.

**Quadro 7.2** - Refletância solar dos revestimentos utilizados na modelagem climática.

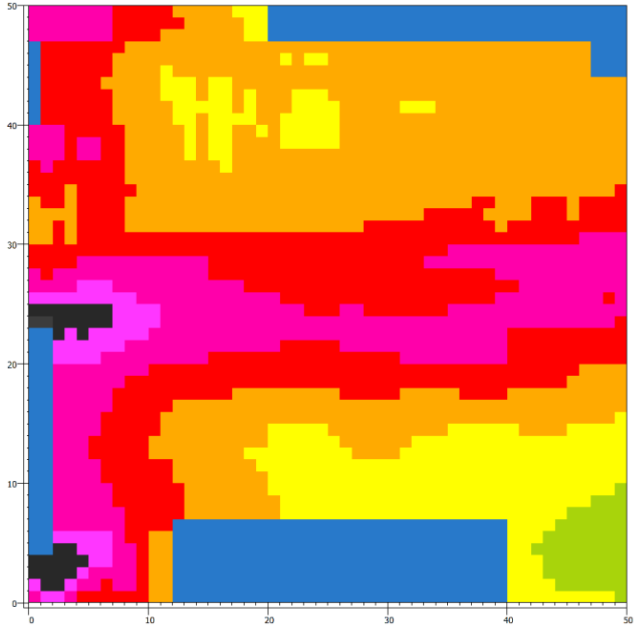
Revestimento	Refletância solar	Observação
Mistura asfáltica Amarelo-albino	12,53	Novo
Mistura asfáltica Vermelho B – Densa	7,41	Novo
Mistura asfáltica de Referência Densa	4,27	Novo
Mistura asfáltica envelhecida original	15,64	Existente no local
Concreto Portland Denso	42,75	Novo
<i>Petit pavê</i> branca nova	49,93	Novo
<i>Petit pavê</i> branca envelhecida original	24,87	Existente no local
<i>Petit pavê</i> vermelha envelhecida original	18,23	Existente no local
<i>Petit pavê</i> preta envelhecida original	9,84	Existente no local

**Quadro 7.3** - Revestimentos simulados no pátio da Reitoria da UFSC.

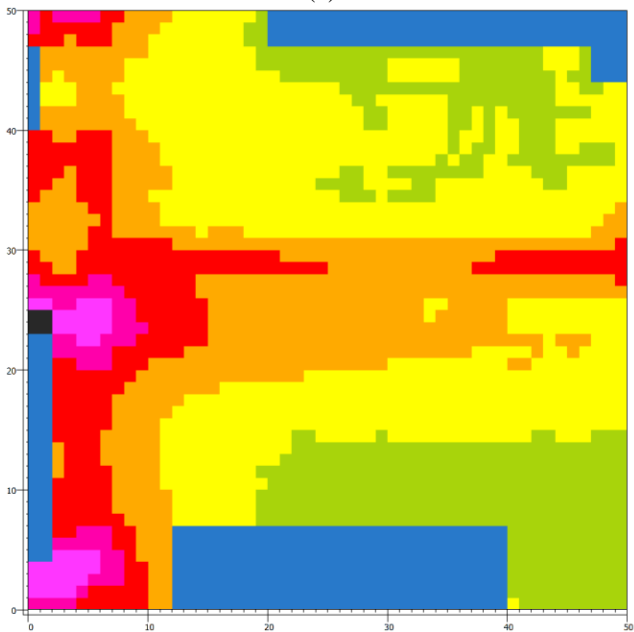
Simulação	Revestimento da rua	Revestimento do pátio	Área alterada (m <sup>2</sup> )
Primeira	Mistura asfáltica envelhecida original	<i>Petit pavê</i> envelhecida original	-
Segunda	Mistura asfáltica de Referência Densa	<i>Petit pavê</i> envelhecida original	800
Terceira	Mistura asfáltica Amarelo-albino	<i>Petit pavê</i> branca nova	29664
Quarta	Concreto Portland Denso	<i>Petit pavê</i> branca nova	29664
Quinta	Mistura asfáltica Vermelho B - Densa	<i>Petit pavê</i> branca nova	29664



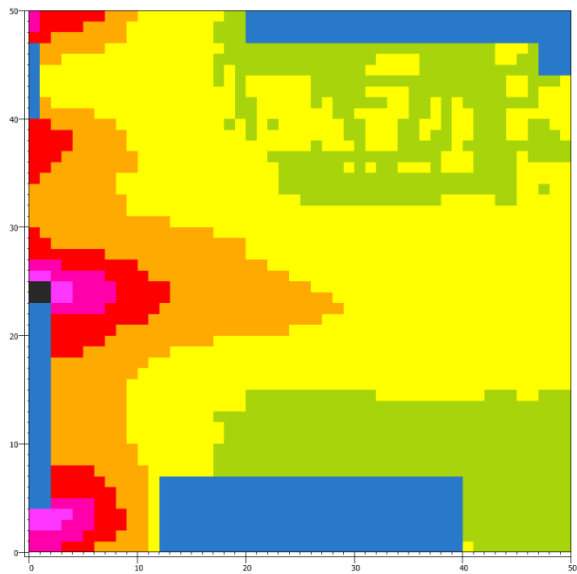
(a)



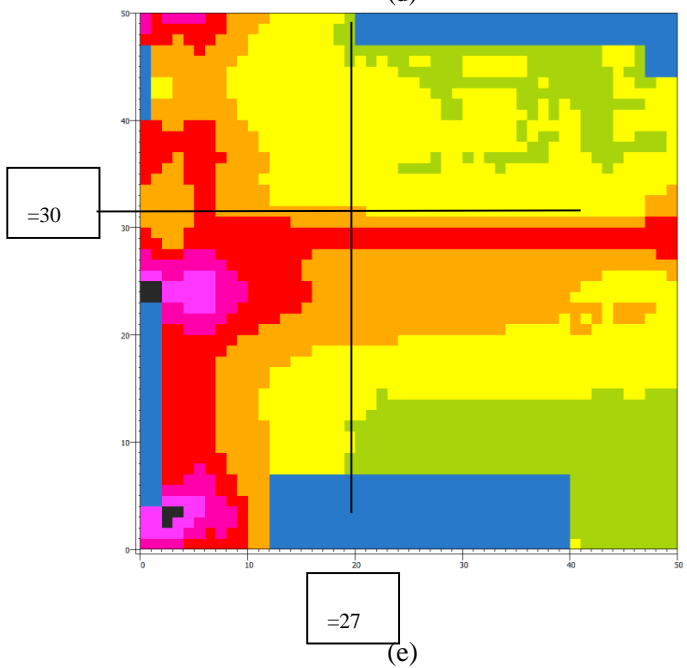
(b)



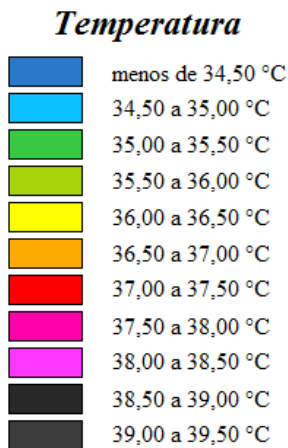
(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 7.71** – Mapa de temperatura superficial do local simulado. Primeira situação (a), segunda situação (b), terceira situação (c), quarta situação (d), quinta situação (e) e legenda de temperatura válida para todas as situações (f). Cada unidade no mapa corresponde a 4 m de comprimento na escala real.

Os resultados da simulação mostraram que o uso de revestimentos mais refletivos são eficientes na redução da temperatura do local modelado. A primeira e segunda situação simulada são as mais críticas por ser aquelas que implicam no uso de revestimentos de mistura asfáltica convencional *petit pavê* envelhecida. As três últimas situações mostraram uma diminuição de temperatura na área estudada devido ao uso de materiais mais refletivos.

Na primeira e segunda situação, devido à baixa refletividade da mistura asfáltica da pista que cruza o pátio da Reitoria da UFSC, existe um área considerável que atinge temperaturas de até 38 °C. Ao redor deste revestimento, a temperatura atinge 0,5 °C a menos. As áreas com revestimentos de pedra *petit pavê* envelhecida (estado atual-sujas) atingem temperaturas de até 37 °C, apresentando poucas áreas com temperatura de 36 a 36,5 °C.

Os resultados desta primeira situação não são muito diferentes do registrado pelos sensores localizados no Pátio da Reitoria. Para a data simulada, a temperatura média máxima foi de 35,34 °C às 13h00. Isto indica que o modelo climático e o software utilizado fornecem resultados



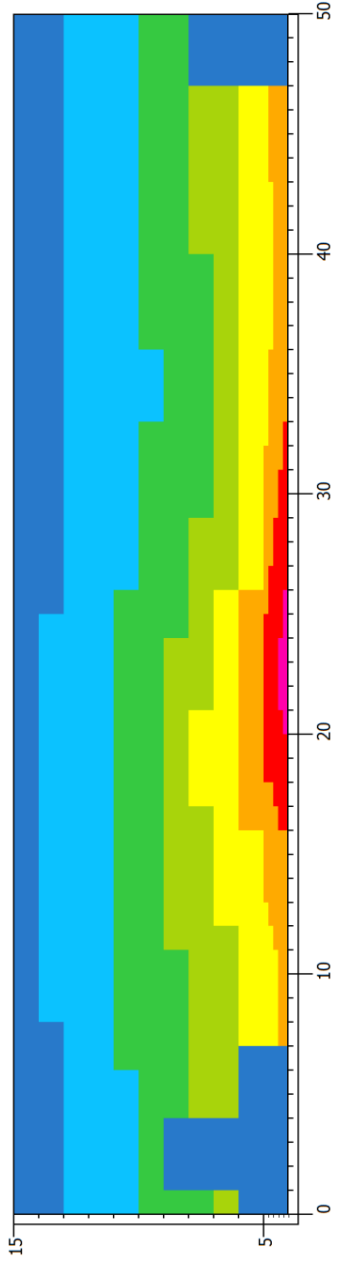
válidos para as condições simuladas, similares aos que são registrados em situações reais.

O uso dos revestimentos de mistura Amarelo-albino na terceira situação, ocasiona a diminuição da temperatura em  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aproximadamente, em relação à segunda situação. Na região do pátio, o uso de pedra *petit pavê* branca ocasiona uma diminuição de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  na temperatura superficial.

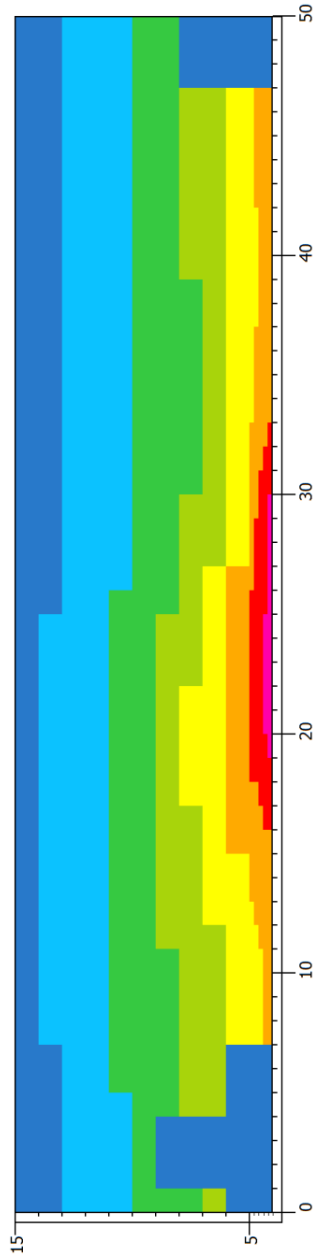
A quarta situação é a mais favorável das situações realizadas. O uso de um revestimento em concreto Portland denso ao invés de mistura asfáltica diminui a temperatura da via em até  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  em algumas regiões. É interessante se observar que o uso de concreto Portland denso tem, também, influência na temperatura superficial do revestimento de pedra *petit pavê* (comparativo entre situação 3 e 4).

Na quinta situação, o uso da mistura Vermelho B forneceu resultados similares aos da terceira situação. Na via, a diminuição da temperatura, com respeito à primeira e segunda situações, foi de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Combinada com o uso da pedra *petit pavê* branca, algumas regiões do pátio tiveram uma queda de até  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , em relação à primeira e segunda situações.

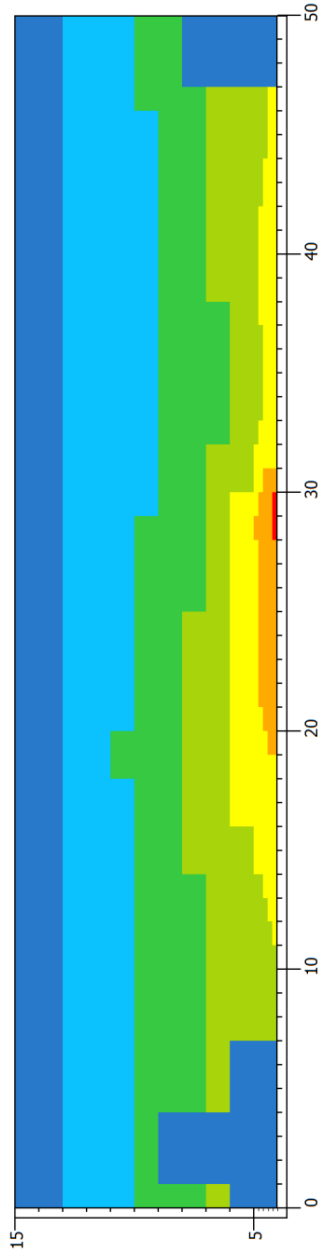
Um corte longitudinal na cota  $X = 27$  metros foi realizado para observar a influência da substituição dos revestimentos na temperatura a diversas alturas no pátio da Reitoria (Figura 7.72). É interessante notar o formato de “ilha de calor” que ocorre na região correspondente ao eixo da pista ( $Y = 30$ ).

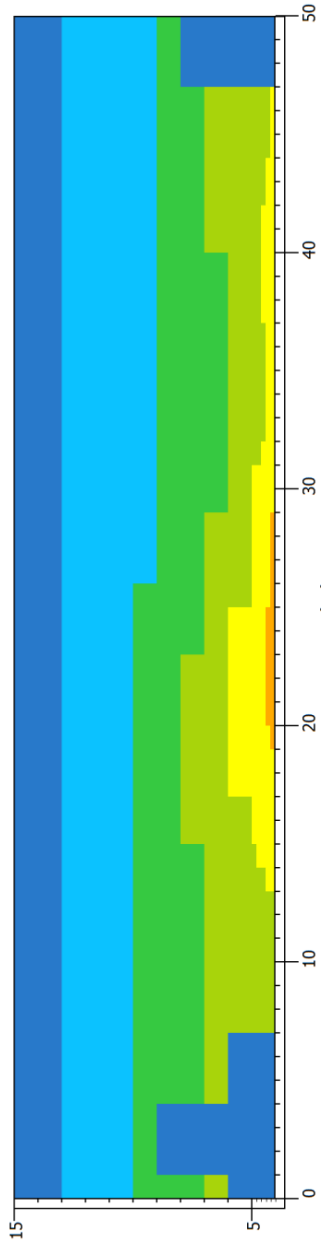


(a)

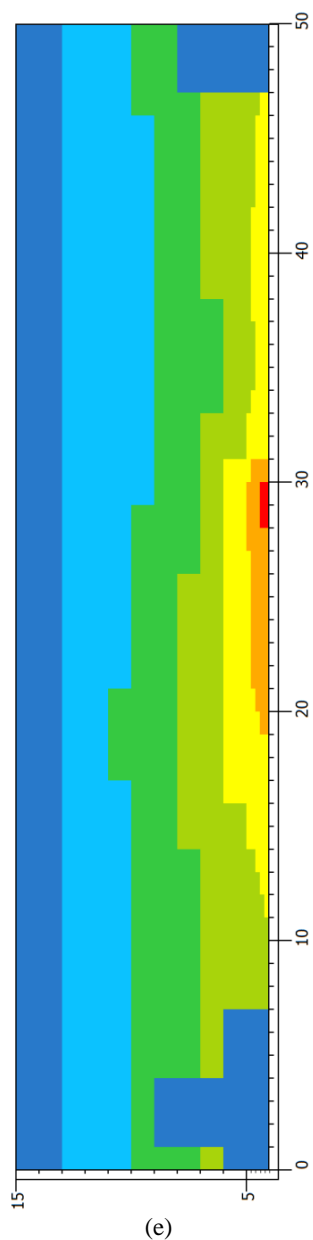


(b)





(d)



**Figura 7.72** – Mapa de temperatura a diferentes alturas do local simulado. Primeira situação (a), segunda situação (b), terceira situação (c), quarta situação (d) e quinta situação (e).

Percebe-se que o uso de revestimentos mais refletivos não afeta somente a temperatura superficial mas também a temperatura do ar acima da superfície. No corte efetuado (a qual corresponde ao eixo da pista (Y=27), o uso de revestimentos mais refletivos diminuí a temperatura em até 1 °C aproximadamente, com relação à primeira e segunda situação. Nas proximidades dos edifícios, a redução é também de até 1 °C. A redução de temperatura das proximidades dos edifícios, influiria não só no pátio, mas também, na sensação térmica dentro das salas de aula ou da Reitoria.

É importante se ressaltar que o pátio da Reitoria da UFSC é um local muito aberto e plan. A topografia do local favorece que durante a simulação, o vento esteja em contato com grande parte das superfícies e as esfrie. Da mesma forma, a considerável área de vegetação presente no local favorece que o mesmo se conserve mais frio que as áreas pavimentadas. Neste contexto, a redução de até 1,5 °C mediante a substituição dos revestimentos é considerada bastante satisfatória.

Uma maior redução de temperatura poderia ser esperada para locais urbanos menos arborizados e com uma topografia acidentada que dificultaria a exposição das superfícies ao vento ou à brisa. Alguns exemplos destes locais são as ruas do centro da cidade, sobretudo aquelas com presença de edifícios de grande altura que conformam o formato de cânion.

Com os ensaios realizados na presente pesquisa, os arquitetos e paisagistas têm a disposição um grande banco de dados sobre refletância que poderão ser utilizados no projeto construtivo de espaços públicos como praças, pátios, estacionamentos, etc. O uso dos materiais mais refletivos contribuirão para a mitigação da Ilha de Calor Urbana e o conforto térmico dos usuários.





## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 8.1 CONCLUSÕES

Os objetivos elencados no começo da pesquisa foram atingidos satisfatoriamente. Os resultados obtidos através dos ensaios em laboratório e em campo, indicam que o uso de pigmentos derivados de óxidos metálicos mistos, assim como os revestimentos mais refletivos apresentam potencial para, não somente a mitigar o efeito de Ilha de Calor Urbana, mas também melhorar algumas propriedades mecânicas e de desempenho das misturas coloridas. As principais conclusões do presente trabalho são as seguintes:

Por serem materiais em pó de tamanho micrométrico, a adição de pigmentos nos ligantes, CAP 50/70 e albino vegetal, aumentam consideravelmente a viscosidade dos mesmos. Para atingir os valores de viscosidade para as operações de usinagem e compactação, necessárias para a produção de misturas asfálticas, o uso de pigmentos incrementa a temperatura dos ligantes em de até 38 °C.

Os pigmentos Amarelo, Verde, Vermelho A e B apresentam uma carga elétrica superficial positiva, predominante. Uma vez adicionados na mistura asfáltica, os pigmentos conseguem alterar a carga elétrica da superfície do agregado, melhorando a adesividade com o ligante. A melhora da adesividade está relacionada com um melhor comportamento mecânico da mistura.

Os pigmentos com maior refletividade solar são o Amarelo, Verde, Vermelho A e B. No entanto, a refletividade ultravioleta de todos os ligantes coloridos foi menor à da amostra de Referência. Estes resultados mostram que os pigmentos não são tão eficientes na reflexão da radiação ultravioleta quanto o CAP 50/70.

A cor do ligante influencia os resultados de refletância solar das amostras. Este parâmetro ficou evidente ao se calcular o valor de refletância da amostra Amarelo-albino a qual foi quase três vezes o valor da amostra Amarelo. É possível que amostras elaboradas a partir da mistura de ligante albino com outros tipos de pigmentos, apresentem valores de refletância solar superiores aos coletados nesta pesquisa.

O incremento na proporção do pigmento no ligante colorido (de 4:4,9 para 6:4,9) não afeta significativamente o valor de refletância do mesmo. Desta forma, o uso de maiores teores de pigmento na mistura asfáltica não se mostra como uma alternativa efetiva para incrementar a refletividade da mesma.

A adição dos pigmentos em pó melhora a trabalhabilidade das misturas asfálticas durante o ensaio de compactação realizado na Prensa de Compactação Giratória. Por ser um material extremamente fino, o pigmento adicionado age como lubrificante dentro da mistura, favorecendo uma melhor distribuição e acomodação dos agregados minerais.

As resinas presentes na composição do pigmento Vermelho B favorecem a sua distribuição dentro da mistura asfáltica, em comparação com os outros pigmentos em pó. Em consequência, as misturas elaboradas com este pigmento apresentaram uma melhor trabalhabilidade, precisando, inclusive, de um menor teor de ligante para atingir o grau de compactação de 96% a 100 giros.

Os parâmetros de compactação dos corpos de prova de 100 mm de diâmetro não mostraram diferenças significativas com os calculados para os corpos de prova com diâmetro de 150 mm. Devido a esta similaridade, não foi necessário a moldagem de amostras de grande diâmetro para a execução dos ensaios de Lottman (dano por umidade induzida) ou de caracterização mecânica.

Nos ensaios em campo, como era esperado, as misturas asfálticas com pigmentos apresentaram maiores valores de refletância solar do que as misturas sem pigmento. No entanto, o valor da refletância não foi o mesmo apresentado pelos ligantes coloridos elaborados com as mesmas proporções de ligante a pigmento. A divergência nos resultados está relacionada com a textura superficial das amostras, tanto da mistura densa como da mistura CPA. Nos ligantes coloridos, a radiação incidente é refletida uma única vez pela superfície lisa da amostra. Nas misturas densas, por causa da textura grosseira da superfície, o raio incidente pode ser refletido com direção a outra região da superfície ocorrendo um fenômeno de reflexão e absorção múltipla da radiação solar. Nas misturas CPA, a reflexão e absorção atinge maiores profundidades dentro da amostra devido à sua alta porosidade. Por este motivo, o ligante colorido apresenta o maior resultado de refletância solar, seguido do resultado das

misturas densas e das misturas CPA em último lugar. Os valores de refletância dos ligantes coloridos são quase o dobro dos apresentados pelas misturas asfálticas coloridas.

A mistura asfáltica densa envelhecida (com idade superior a 20 anos) é acinzentada não só por causa do agregado exposto, mas também porque o ligante asfáltico ao sofrer a ação do meio ambiente oxida-se tendendo para uma coloração acinzentada. Assim, a combinação de agregados mais claros (granito rose, calcário), juntamente com pigmentos poderia levar à obtenção de uma superfície com maior refletância tanto no ano zero como ao longo do tempo.

Nos revestimentos de pedra *petit pavê*, a falta de manutenção e o envelhecimento dos revestimentos causa uma diminuição do valor de refletância solar. Os ensaios mostraram que o valor da refletância da amostra envelhecida branca do pátio da Reitoria de UFSC foi a metade daquela apresentada nas placas da área experimental (nova). É preciso que, para manter os valores de refletância de uma superfície nova, se realizem operações periódicas de manutenção e limpeza do pátio.

Nos ensaios de refletância solar, por causa da cor branca e clara, os revestimentos de pedra *petit pavê* branca e de concreto Portland denso foram as que apresentaram os maiores valores de refletância solar. Os menores valores foram obtidos para misturas asfálticas de Referência densa e CPA. A diferença nos valores de refletância entre estes dois grupos chega a ser de, aproximadamente, 48%.

Os blocos de concreto Portland denso, amarelo e vermelho, embora não apresentem valores de refletância solar similares aos do concreto Portland denso, constituem uma boa opção de revestimento urbano. Isto devido ao elevado valor de refletância solar, comparado com os revestimentos asfálticos, e ao fato de, pela pigmentação amarela e vermelha, não causar incomodação ocular aos usuários.

No caso das misturas asfálticas CPA, a refletância solar foi menor do que nas misturas densas porque a textura rugosa permite que uma maior quantidade de radiação seja absorvida não só pela superfície, mas também pelo interior das misturas.

O valor medido da temperatura dos revestimentos estudados não foi constante durante o dia e mudou dependendo do horário de medição e, sobretudo, segundo a intensidade solar incidente. Durante as horas

matutinas, a radiação solar aumenta gradualmente até atingir seu máximo ao meio dia, após do qual, a intensidade solar diminui. Essa tendência é acompanhada pela temperatura dos revestimentos, as quais aumentam durante a manhã e diminuem durante a tarde. A radiação solar, porém, não causa um incremento instantâneo da temperatura. A mesma vai se incrementando progressivamente até atingir seu máximo por volta das 13h15, uma hora após o meio dia solar.

Os revestimentos de pedra *petit pavê* branca e de mistura asfáltica de Referência CPA foram os que registraram o maior e valor menor de temperatura, superficial e interna, respetivamente. Esta diferença chegou a ser de, aproximadamente, 18 °C.

Em todos os revestimentos analisados, a temperatura superficial é menor do que a temperatura interna. O motivo para este comportamento é que a superfície dos revestimentos está submetida à ação dos ventos e brisas os quais ajudam no esfriamento e na troca de calor entre a superfície e o ar.

Com os dados obtidos de refletância solar e temperatura, foi possível construir uma linha de tendência que relaciona estes dois dados, tornando possível a estimativa da temperatura superficial e interna de um revestimento com base no valor da sua refletância solar. Esta condição terá variação segundo a posição e clima do local onde se pretende aplicar os revestimentos com o intuito de mitigar a Ilha de Calor Urbana.

As misturas asfálticas com adição de pigmentos tiveram um melhor desempenho durante os ensaios de caracterização mecânica em comparação com a mistura de Referência. Este comportamento está relacionado com o enrijecimento das misturas devido aumento da consistência do ligante asfáltico pela adição dos pigmentos, à melhora da adesividade entre o ligante e o agregado e ao incremento dos pontos de contato intergranulares promovidos pela adição de material fino (pigmento) na mistura.

No ensaio de deformação permanente, as misturas densas testadas à temperatura padronizada, apresentaram valores de deformação na trilha de roda inferiores aos da mistura de Referência de até 60% menor. Quando a temperatura de ensaio das amostras coloridas foi menor do que a padronizada, o valor da deformação na trilha de roda de todas as misturas coloridas diminui ainda mais, chegando a ser até 75% menor.

Neste último caso, o ligante ficou menos sucetível à temperatura, o que influenciou os resultados do ensaio. Com isto é de se esperar que as misturas coloridas teriam uma maior vida útil em campo quanto à formação de trilha de roda.

Nas misturas CPA, o ensaio de deformação permanente realizado à temperatura padronizada (60 °C) forneceu resultados similares para todas as misturas, com e sem adição de pigmentos, não atendendo as especificações francesas. Isso porque, devido à granulometria porosa da mistura, a adição de pigmentos não incrementa de forma considerável o atrito intergranular da mistura. Quando as misturas coloridas são ensaiadas a temperaturas menores à padronizada, existe uma diminuição da deformação da trilha de roda, sobretudo para as amostras com pigmentos de cor Vermelha. As misturas CPA coloridas só atenderiam as especificações francesas mediante uma redução da temperatura de ensaio e com o uso de fibras na misturas asfáltica.

O uso de revestimentos mais refletivos não afeta somente a temperatura superficial ou interna dos mesmos, mas também a temperatura do ar do meio ambiente que as rodeia. Nas simulações realiadas no software Envi-met, a temperatura superficial dos revestimentos diminui em até 1,5°C quando foi simulado o uso de revestimentos de concreto Portland denso e pedra *petit pavê* branca ao invés das tradicionais superfícies encontradas no local. O emprego dos materiais mais refletivos que se utilizam para a simulação afeta, também, a temperatura próxima às edificações. Nas situações realizadas, a diminuição da temperatura chegou a ser de, até, 1 °C. Esta diminuição não afeta somente a sensação térmica do espaço externo, mas pode afetar a senação do espaço interno da edificação. Uma maior redução de temperatura é esperada para simulações que considerem ambientes urbanos menos arborizados e com configurações diferentes aos apresentados no presente estudo, notadamente com a formação do cânion urbano.

É preciso ter uma evolução na composição dos pigmentos para conseguir valores de refletância solar similares so do Concreto Portland denso. Isto com a finalidade de que a indústria da pavimentação possa dispor de revestimentos frios para serem usados na mitigação da Ilha de Calor Urbana e na melhora das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

## 8.2 RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos alcançados com esta pesquisa é possível elencar uma série de questões que não foram pesquisadas ou esclarecidas no trabalho e que merecem ser investigadas. É recomendável para trabalhos futuros as seguintes investigações:

Estudar a refletância solar e a temperatura em campo e em laboratório de revestimentos elaborados a partir do ligante albino vegetal. Como já foi indicado, devido à cor translúcida do pigmento, é muito provável que as misturas elaboradas com este ligante apresentem valores de refletância solar muito superiores aos das misturas com ligante CAP.

Avaliar a influência da variação da proporção dos pigmentos dentro da mistura asfáltica nas propriedades mecânicas das mesmas. Na presente pesquisa foi utilizada uma porcentagem de 4% em relação à massa da mistura; no entanto, os ensaios de refletância solar em laboratório mostraram que o uso de 2 a 6% do pigmento não alteravam significativamente o valor da refletância. Esta variação, porém, pode influenciar o comportamento mecânico das misturas.

Avaliar a refletância solar das superfícies ao longo do tempo, considerando o envelhecimento e a sujeira acumulada nos materiais. Esta avaliação deve ser realizada não só com os materiais pesquisados no presente estudo, mas também com agregados coloridos utilizados na pavimentação tais como o granito róseo ou a pedra calcárea.

Recomenda-se o desenvolvimento de tintas à base de pigmentos com refletividade NIR elevada. O uso das tintas estaria indicado para o recobrimento de revestimentos asfálticos já existentes em áreas urbanas no sentido de, além de mitigar o efeito da Ilha de Calor Urbana, melhorar a saúde ocular da população.

Recomenda-se ampliar as simulações climáticas a outras localidades e a outras situações. As novas simulações devem simular localidades urbanas mais fechadas e menos arborizadas tais como as ruas com formato de cânion. As simulações devem incluir os ambientes externos e internos das residências. Os resultados deste estudo permitiram avaliar os benefícios do uso de revestimentos mais refletivos no conforto térmico da população.

## ANEXO

## 1.1 COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS DENSAS COM CAP 50/70 SEM PIGMENTO

### 1.1.1 Seleção da Granulometria

A proporção dos materiais utilizados, tanto em porcentagem como em massa, para os ensaios de compactação e de determinação da massa específica máxima são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** – Proporção dos materiais utilizados nas misturas de prova.

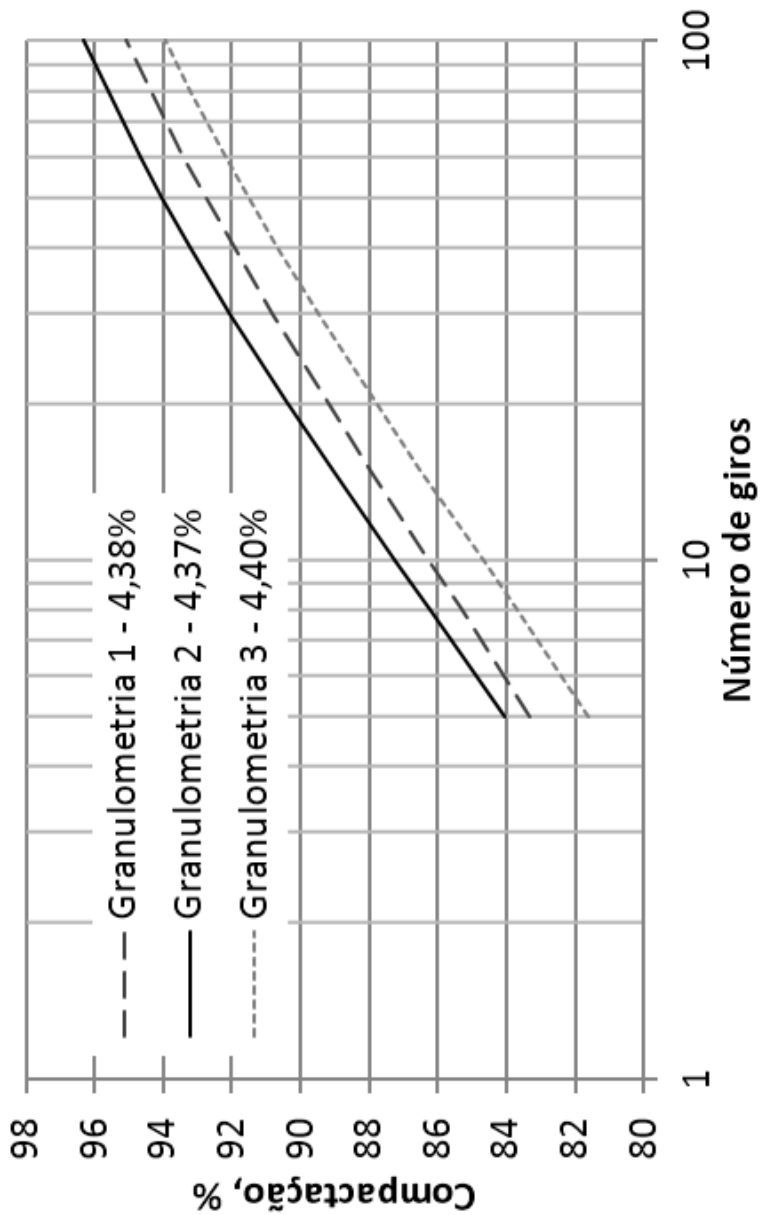
Material	Ligante	Pó de pedra	Pedrisco	Brita 1
<b>Granulometria 1</b>				
Porcentagem em massa do total do agregado, %		40	50	10
Porcentagem em massa do total da mistura, %	4,38	38,25	47,81	9,56
Massa para determinação da Gmm, g	87,7	764,9	956,2	191,2
Massa para ensaio de compactação, %	197,3	1721,1	2151,3	430,3
<b>Granulometria 2</b>				
Porcentagem em massa do total do agregado, %		45	41	14
Porcentagem em massa do total da mistura, %	4,37	43,04	39,21	13,39
Massa para determinação da Gmm, g	87,3	860,7	784,2	267,8
Massa para ensaio de compactação, %	196,4	1936,6	1764,5	602,5
<b>Granulometria 3</b>				
Porcentagem em massa do total do agregado, %		33	55	12
Porcentagem em massa do total da mistura, %	4,40	31,55	52,58	11,47
Massa para determinação da Gmm, g	88,0	631,0	1051,6	229,4
Massa para ensaio de compactação, %	198,0	1419,7	2366,1	516,2

Os dados de compactação das misturas de prova são mostrados na Tabela 2 e na Figura 1.

**Tabela 2**– Dados de compactação da misturas de prova.

Giros	Média 1 - 4,38%	Média 2 - 4,37%	Média 3 - 4,40%	
5	83,3	84,0	81,6	
8	85,3	86,2	83,7	N <sub>ini</sub>
10	86,3	87,2	84,7	
15	88,0	89,1	86,5	
20	89,2	90,4	87,8	
30	90,8	92,1	89,5	
40	91,9	93,2	90,7	
50	92,8	94,0	91,5	
60	93,4	94,7	92,2	
80	94,4	95,6	93,2	
100	95,1	96,3	94,0	
Gmb, g cm <sup>-3</sup>	2,428	2,4615	2,397	
Gmm, g cm <sup>-3</sup>	2,554	2,556	2,551	
%Gmm@Ndes	95,1	96,3	94,0	





**Figura 1** – Curva de compactação das mistura de prova, sem pigmento.

Como as três misturas compactadas tem um teor de ligante similar, a trabalhabilidade das amostras depende, principalmente, da estrutura granulométrica. A mistura mais fina, neste caso a 2, está constituída por 45% de pó de pedra, o que lhe confere a alta trabalhabilidade observada na Figura 1. As outras duas misturas são mais grossas e apresentam uma densificação menor.

Os resultados dos cálculos da avaliação das misturas de prova são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3**– Parâmetros de compactação das misturas de prova.

Mistura	Granulometria 1	Granulometria 2	Granulometria 3	Critério
Teor de ligante, %	4,38	4,37	4,40	
Gmm@Nini, %	85,3	86,2	83,7	
Gmm@Ndes, %	<b>95,1</b>	96,3	<b>94,0</b>	
Vazios, %	4,9	3,7	6,0	
VAM, %	14,59	13,43	15,73	
P <sub>0,075</sub> , %	6,2	6,8	4,8	
Propriedades estimadas				
Pb estimado, %	4,8	4,2	5,3	
VAM estimada, %	14,4	<b>13,5</b>	15,3	>14
RBV estimada, %	72,2	70,3	73,9	65-75
Gmm estimado @Nini, %	86,2	85,9	85,7	<89
Pbe, estimado, %	4,6	4,1	5,1	
Relação filer-betume	<b>1,35</b>	<b>1,66</b>	0,94	0,6-1,2

A avaliação das propriedades estimadas mostra que, segundo o critério de %VAM estimado, a mistura de granulometria 2 não cumpre com a porcentagem mínima de 14%. Este valor é em parte resultado do alto grau de compactação, maior a 96%, atingido pela mistura ao número de giros de projeto. Verificar-se que as misturas de granulometria 1 e 3, que apresentam valores aceitáveis de %VAM estimado, têm valores baixos de compactação, inferiores a 96%.

Tanto o valor de %RBV estimada e de %Gmm estimado @ Nini estão dentro dos critérios estabelecidos pela metodologia Superpave. No critério de teor de filer, as misturas de granulometria 1 e granulometria 2

não conseguiram se encaixar dentro do intervalo estabelecido. Isso como consequência da alta porcentagem de material passante pela peneira #200 que foi de 6,2% para a mistura de granulometria 1 e 6,8% para a mistura de granulometria 2. A mistura de granulometria 3 que tem 4,8% de material passante pela peneira #200 conseguiu se encaixar dentro do limite estabelecido e cumpre com todos os critérios da metodologia Superpave. Com base nestes resultados, a granulometria 3 foi a escolhida para dar continuidade aos ensaios.

### **1.1.2 Seleção do Teor de Ligante**

Para estimar o teor de ligante apropriado, uma série de 4 misturas adicionais foram compactadas utilizando-se a granulometria 3 com porcentagens variáveis de ligante. A proporção dos materiais utilizados é mostrada na Tabela 4.

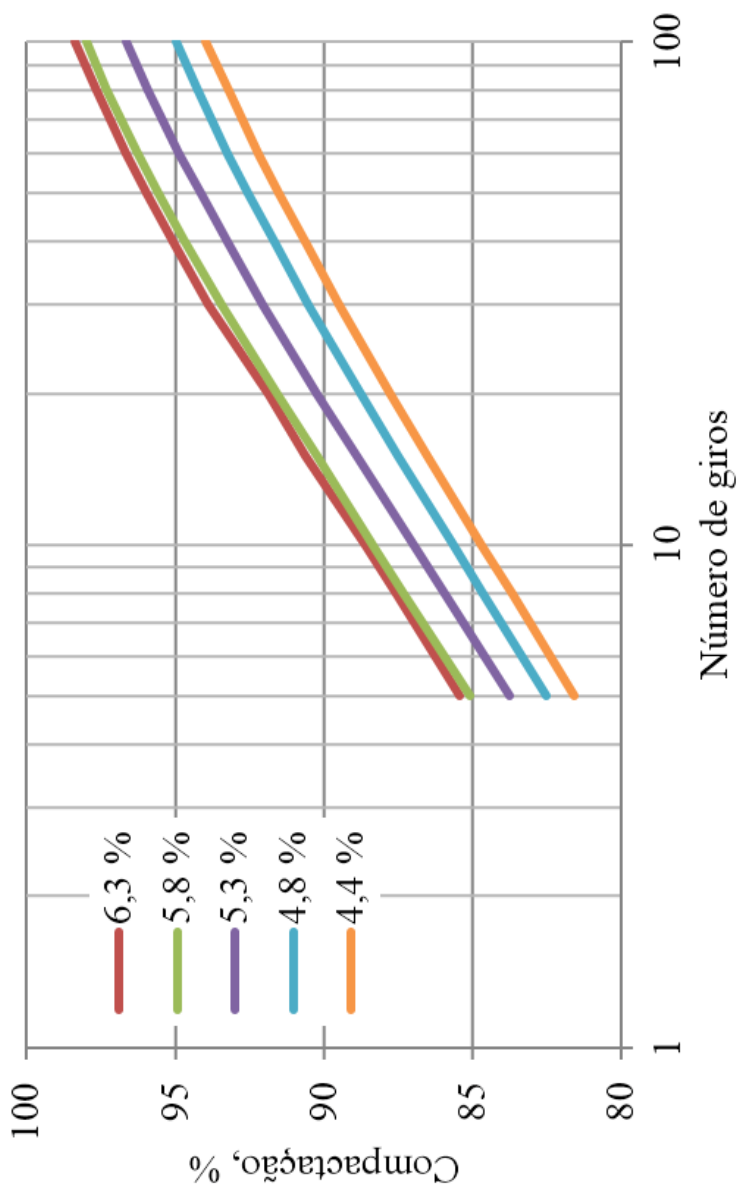
**Tabela 4**– Proporção dos materiais utilizados nas misturas de granulometria 3 com porcentagem variável de ligante.

Material	Ligante	Pó de pedra	Pedrisco	Brita 1
<b>Teor de ligante 4,8 %</b>				
Porcentagem em massa do total do agregado, %		33	55	12
Porcentagem em massa do total da mistura, %	4,80	31,42	52,36	11,42
Massa para determinação da Gmm, g	96,0	628,3	1047,2	228,5
Massa para ensaio de compactação, %	216,0	1413,7	2356,2	514,1
<b>Teor de ligante 5,3 %</b>				
Porcentagem em massa do total do agregado, %		33	55	12
Porcentagem em massa do total da mistura, %	5,30	31,25	52,09	11,36
Massa para determinação da Gmm, g	106,0	625,0	1041,7	227,3
Massa para ensaio de compactação, %	238,5	1406,3	2343,8	511,4
<b>Teor de ligante 5,8 %</b>				
Porcentagem em massa do total do agregado, %		33	55	12
Porcentagem em massa do total da mistura, %	5,80	31,09	51,81	11,30
Massa para determinação da Gmm, g	116,0	621,7	1036,2	226,1
Massa para ensaio de compactação, %	261,0	1398,9	2331,5	508,7
<b>Teor de ligante 6,3%</b>				
Porcentagem em massa do total do agregado, %		33	55	12
Porcentagem em massa do total da mistura, %	6,30	30,92	51,54	11,24
Massa para determinação da Gmm, g	126,0	618,4	1030,7	224,9
Massa para ensaio de compactação, %	283,5	1391,4	2319,1	506,0

Os resultados dos ensaios de compactação são mostrados na Tabela 5 e na Figura 2.

**Tabela 5**– Dados de compactação das misturas de granulometria 3 com percentagens variáveis de ligante.

Giros	Teor 4,40%	Teor 4,8%	Teor 5,3%	Teor 5,8%	Teor 6,3%	
5	81,6	82,5	83,7	85,1	85,4	
8	83,7	84,7	85,9	87,3	87,6	N <sub>ini</sub>
10	84,7	85,7	87,0	88,3	88,6	
15	86,5	87,5	88,9	90,3	90,6	
20	87,8	88,8	90,2	91,6	91,9	
30	89,5	90,5	92,0	93,4	93,9	
40	90,7	91,7	93,3	94,7	95,1	
50	91,5	92,6	94,2	95,6	96,0	
60	92,2	93,3	94,9	96,3	96,7	
80	93,2	94,3	95,9	97,3	97,7	
100	94,0	95,0	96,6	98,0	98,4	N <sub>des</sub>
Gmb, g cm <sup>-3</sup>	2,397	2,418	2,4365	2,462	2,459	
Gmm, g cm <sup>-3</sup>	2,551	2,545	2,521	2,512	2,501	
%Gmm@Ndes	94,0	95,0	96,6	98,0	98,3	



**Figura 2-** Curva de compactação das mistura de prova de Granulometria 3 com percentagens variáveis de ligante.

Como a estrutura granulométrica das misturas mostradas na Figura 2 é a mesma, a trabalhabilidade das amostras é influenciada pelo teor de ligante. Quando este teor aumenta, o grau de compactação para um mesmo número de giros é maior. As propriedades volumétricas de cada mistura de prova foram determinadas e utilizadas na avaliação das misturas de prova. Os resultados são mostrados na Tabela 6.

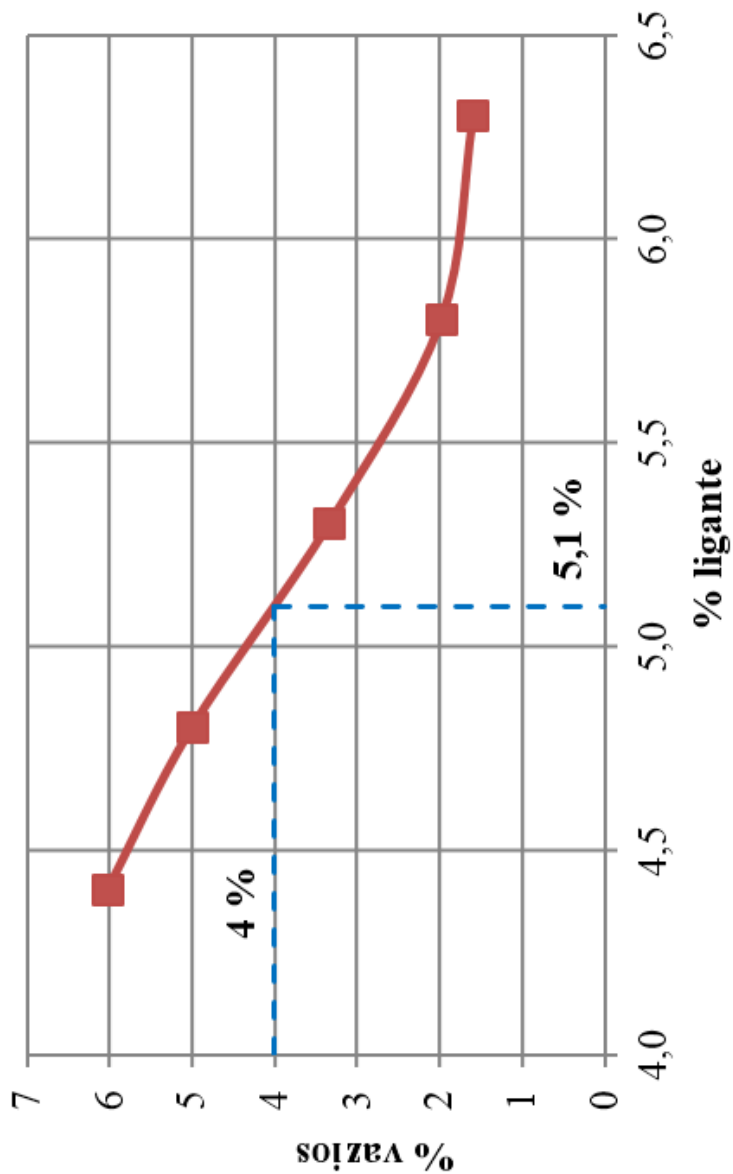
**Tabela 6-** Parâmetros de compactação das misturas de prova de Granulometria 3 com diversos teores de ligante.

Parâmetro	4,8%	5,3%	5,8%	6,3%	Critério
Gmm@Nini, %	84,7	85,9	87,3	87,6	
Gmm@Ndes, %	95,0	96,6	98,0	98,4	
Vv, %	5,0	3,4	2,0	1,6	
VAM, %	15,37	15,15	14,72	15,20	
P <sub>0,075</sub> , %	4,8		4,8	4,8	4,8
Propriedades estimadas					
Pb estimado	5,2	5,0	5,0	5,3	
%VAM estimada	15,2	15,2	14,9	15,4	>14
%RBV estimada	73,6	73,7	73,2	74,1	65-75
%Gmm estimado @Nini	85,7	85,3	85,3	85,2	<89
Pbe, estimado	5,0	4,9	4,8	5,2	
Relação filer-betume	0,96	0,99	1,00	0,93	0,6-1,2

Os resultados mostram que todas as misturas elaboradas cumprem com os critérios requeridos. No entanto, nenhuma delas atingiu um grau de compactação de 96% a 100 giros. Para estimar o teor de ligante que permitiria atingir este valor, foi plotado um gráfico que relaciona o teor de ligante utilizados com a porcentagem de vazios das misturas de prova elaboradas (Tabela 7 e Figura 3).

**Tabela 7-** Teor de ligante e porcentagem de vazios das misturas de prova de Granulometria 3.

Teor de ligante, %	Vazios, %
4,4	6,0
4,8	5,0
5,3	3,4
5,8	2,0
6,3	1,6



**Figura 3**– Variação da porcentagem de vazios com o teor de ligante para a mistura de prova de Granulometria 3.



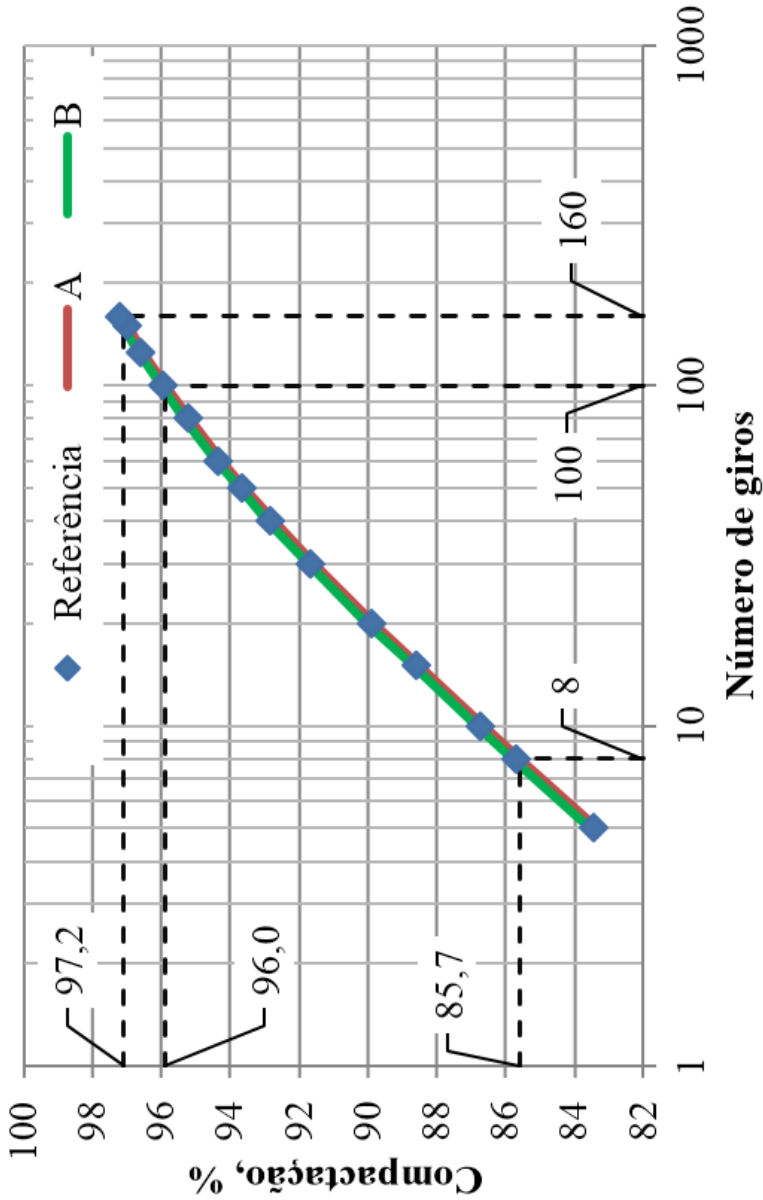
O teor de ligante para atingir 4% de vazios a 100 giros foi estimado em 5,1%. Com este teor, uma nova mistura foi compactada mas desta vez até os 160 giros ( $N_{max}$ ). A proporção dos materiais utilizados nesta mistura são mostrados na Tabela 8; os resultados da compactação são mostrados na Tabela 9 e na Figura 4.

**Tabela 8**– Proporção dos materiais utilizados na misturas de prova de Granulometria 3 com 5,1% de ligante.

Material	Ligante	Pó de pedra	Pedrisco	Brita 1
Porcentagem em massa do total do agregado, %		33	55	12
Porcentagem em massa do total da mistura, %	5,10	31,32	52,20	11,39
Massa para determinação da Gmm, g	102,0	626,3	1043,9	227,8
Massa para ensaio de compactação, %	229,5	1409,3	2348,8	512,4

**Tabela 9**- Dados de compactação da mistura de prova de Granulometria 3 com teor de ligante de 5,1% a 160 giros (duas amostras).

Giros	A		B		Granulometria 3 - 5,1%	
	H (mm)	%Gmm	H (mm)	%Gmm		
5	121,26	83,4	121,68	83,6	83,5	
8	118,12	85,6	118,53	85,8	85,7	$N_{ini}$
10	116,7	86,6	117,13	86,8	86,7	
15	114,2	88,5	114,62	88,7	88,6	
20	112,54	89,8	112,96	90,0	89,9	
30	110,39	91,6	110,84	91,7	91,7	
40	109,02	92,7	109,43	92,9	92,8	
50	108,02	93,6	108,48	93,7	93,7	
60	107,25	94,2	107,69	94,4	94,3	
80	106,18	95,2	106,63	95,4	95,3	
100	105,41	95,9	105,89	96,0	96,0	$N_{des}$
125	104,73	96,5	105,19	96,7	96,6	
150	104,23	97,0	104,68	97,1	97,1	
160	104,06	97,1	104,51	97,3	97,2	$N_{max}$
Gmb, g cm <sup>-3</sup>	2,468		2,472		2,470	
Gmm, g cm <sup>-3</sup>	2,541		2,541		2,541	
%Gmm@ $N_{max}$	97,1		97,3		97,2	



**Figura 4-** Curva de compactação da mistura de prova de Granulometria 3 com 5,1% de ligante a 160 giros.

O cálculo e a comparação dos parâmetros de compactação são mostrados na Tabela 10.

**Tabela 10-** Parâmetros de compactação da misturas de prova de Granulometria 3 com 5,1% de ligante.

Parâmetro	Resultado	Critério
%Gmm@Nini	85,7	<89%
%Gmm@Ndes	96,0	96%
%Gmm estimado @Nmax	97,2	<98%
%Va	4,0	4%
%VAM	14,91	>14
%RBV	73,20	65-75
Relação filer-betume	1,1	0,6-1,2

Os resultados da Tabela 10 mostram que, efetivamente, a porcentagem escolhida de ligante conseguiu satisfazer os critérios da metodologia Superpave. A porcentagem de vazios a 100 giros foi de 4%. O grau de compactação no número de giros inicial, 85,7%, se manteve abaixo do valor recomendado de 89%. A porcentagem de vazios a 160 giros, 2,8%, satisfiz o critério de ser menor que 2%. Esta mistura foi denominada de mistura de Referência densa.

## 1.2 COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS COLORIDAS DENSAS

O valor do teor de ligante das misturas coloridas foi igual à multiplicação do teor de ligante de referência (5,1%) por 0,96; o resultado foi de 4,90%. Para o cálculo das porcentagens dos agregados foi realizada a mesma operação, multiplicando os valores dos materiais na mistura de referência por 0,96; estes valores passaram de 31,32%, 52,20% e 11,39% para 30,06%, 50,11% e 10,93% para os agregados Pó de pedra, Pedrisco e Brita 1, respectivamente. A soma das porcentagens de todos os materiais continuou sendo 100%. A proporção final dos materiais nas misturas coloridas com pigmento em pó é mostrada na Tabela 11.

**Tabela 11** - Proporção dos materiais utilizados nas misturas coloridas com pigmento em pó.

Material	Ligante	Pó de pedra	Pedrisco	Brita 1	Pigmento
Porcentagem em massa do total do agregado, %		33	55	12	
Porcentagem em massa do total da mistura, %	4,90	30,06	50,11	10,93	4
Massa para determinação da Gmm, g	97,9	601,3	1002,1	218,6	80,0
Massa para ensaio de compactação, %	220,3	1352,9	2254,8	492,0	180,0

Os resultados dos ensaios de compactação são mostrados na Tabela 12 e na Figura 5. Os parâmetros de compactação das misturas são mostrados na Tabela 13. Para a usinagem e compactação das misturas foram utilizadas as temperaturas de trabalho da mistura de Referência densa.

**Tabela 12**– Dados de compactação da mistura Verde.

Giros	Verde	Vermelho A	
5	83,3	83,4	
8	85,7	85,6	N <sub>ini</sub>
10	86,8	86,7	
15	88,9	88,6	
20	90,3	89,9	
30	92,3	91,7	
40	93,6	92,9	
50	94,5	93,8	
60	95,2	94,5	
80	96,3	95,5	
100	97,0	96,2	N <sub>des</sub>
125	97,6	96,8	
150	98,2	97,3	
160	98,3	97,5	N <sub>max</sub>
Gmb, g cm <sup>-3</sup>	2,536	2,526	
Gmm, g cm <sup>-3</sup>	2,579	2,591	
%Gmm@Nmax	98,3	97,5	

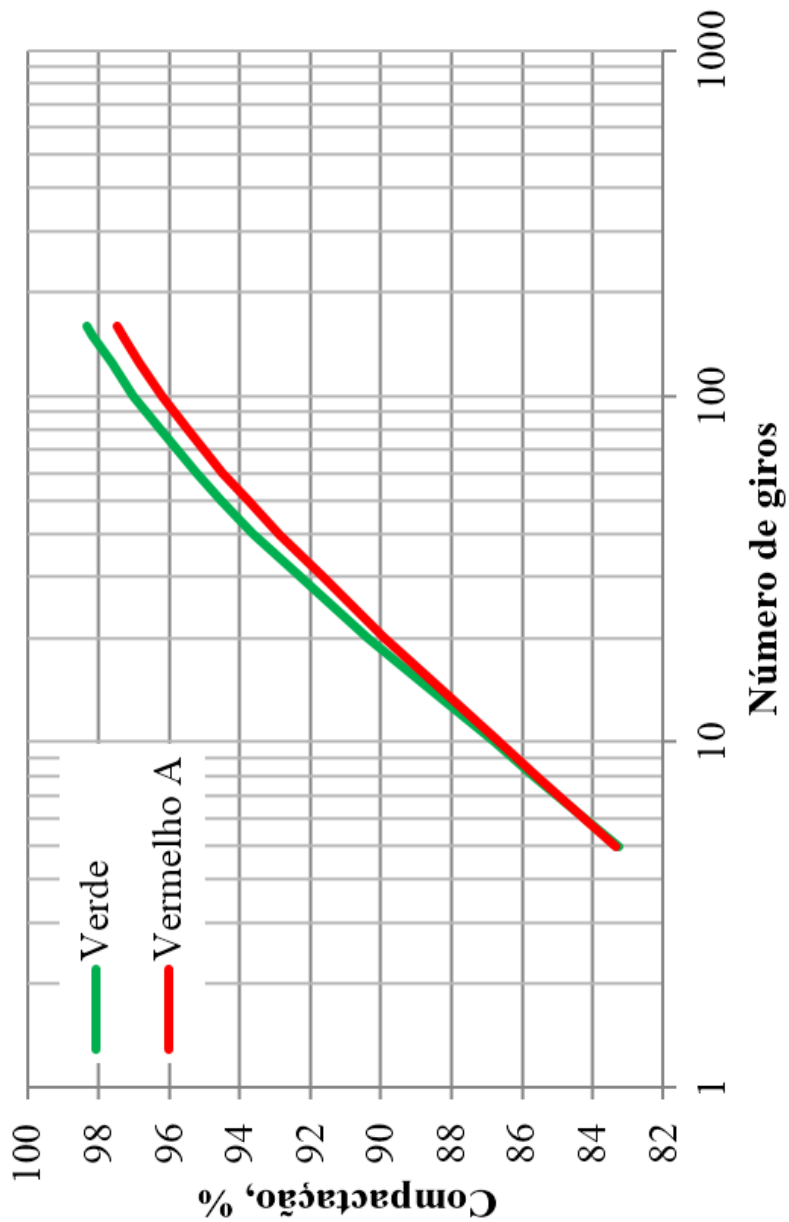


Figura 5- Curva de compactação da mistura Verde e Vermelho A a 160 giros.

**Tabela 13-** Parâmetros de compactação da misturas Verde e Vermelho A.

Parâmetro	Verde	Vermelho A	Critério
%Gmm@Nini	85,7	85,6	<89%
%Gmm@Ndes	97,0	96,2	96%
%Gmm @Nmax	98,3	97,5	<98%
%Va	3,0	3,8	4%
%VAM	16,3	16,5	>14
%RBV	75,4	75,8	65-75
Relação filer-betume (passante da peneira #200/teor de ligante)	2,47	2,26	0,6-1,2

Os resultados mostram que as misturas Verde e Vermelho A atingem um grau de compactação maior a 96% a 100 giros. A mistura Vermelho A, porém, possui uma porcentagem de vazios mais próxima do critério de 4%. Isso indicaria que o uso do pigmento Verde permite uma maior trabalhabilidade na mistura do que o uso do pigmento Vermelho A. A melhor trabalhabilidade estaria relacionada com o aumento do teor de material fino dentro da mistura (pigmento), os quais teriam um efeito lubrificante dentro da mistura favorecendo o acomodamento mais eficiente dos agregados.

Outro parâmetro que está fora do critério da metodologia Superpave é a relação filer-betume tem um valor alto para as duas misturas devido ao uso dos pigmentos em pó, os quais tem um tamanho menor do que 0,075 mm. Mas fica na dúvida se o pigmento efetivamente se comporta como um filer na mistura

Para calcular o traço da mistura com pigmento Vermelho B, foi seguido o mesmo raciocínio que para as misturas com pigmento em pó. As proporções da mistura foram: pigmento – 2,4%, ligante 4,98%, pó de pedra – 30,57%, pedrisco – 50,94% e brita - 11,11%. Durante a usinagem e compactação, esta mistura apresentou uma textura muito fechada, evidenciando excesso de ligante; por este motivo, a compactação foi realizada inicialmente a 100 giros.

No entanto, os resultados do ensaio de compactação da mistura Vermelho B com 4,98% de ligante foram pouco satisfatórios porque a mesma atingiu um grau de compactação de 97,3% aos 100 giros, valor mais alto que a mistura Verde, Vermelho A e, inclusive, que a mistura de

Referência, a qual têm um teor de ligante de 5,1%. A alta trabalhabilidade não poderia ser atribuída à porcentagem de pigmento já que a mistura contém somente 2,4% deste material, valor menor que o 4% utilizado nas misturas com pigmento em pó.

Considerando que o pigmento é composto por 80% de óxido de ferro e 20% de resinas, um novo traço foi utilizado, considerando desta vez que os 20% de resinas estariam substituindo uma porção do ligante asfáltico. Para o novo traço foi descontado do valor de 4,98% de ligante, anteriormente calculado, o 20% da porcentagem de pigmento (2,4%). Desta forma a proporção dos materiais passou a ser: ligante – 4,5%, pó de pedra 30,72%, pedrisco – 51,21%, brita 11,17% e pigmento – 2,4%. A proporção dos materiais utilizados nas misturas são mostrados na Tabela 14. Os resultados do ensaio de compactação são mostrados na Tabela 15 e na Figura 6.

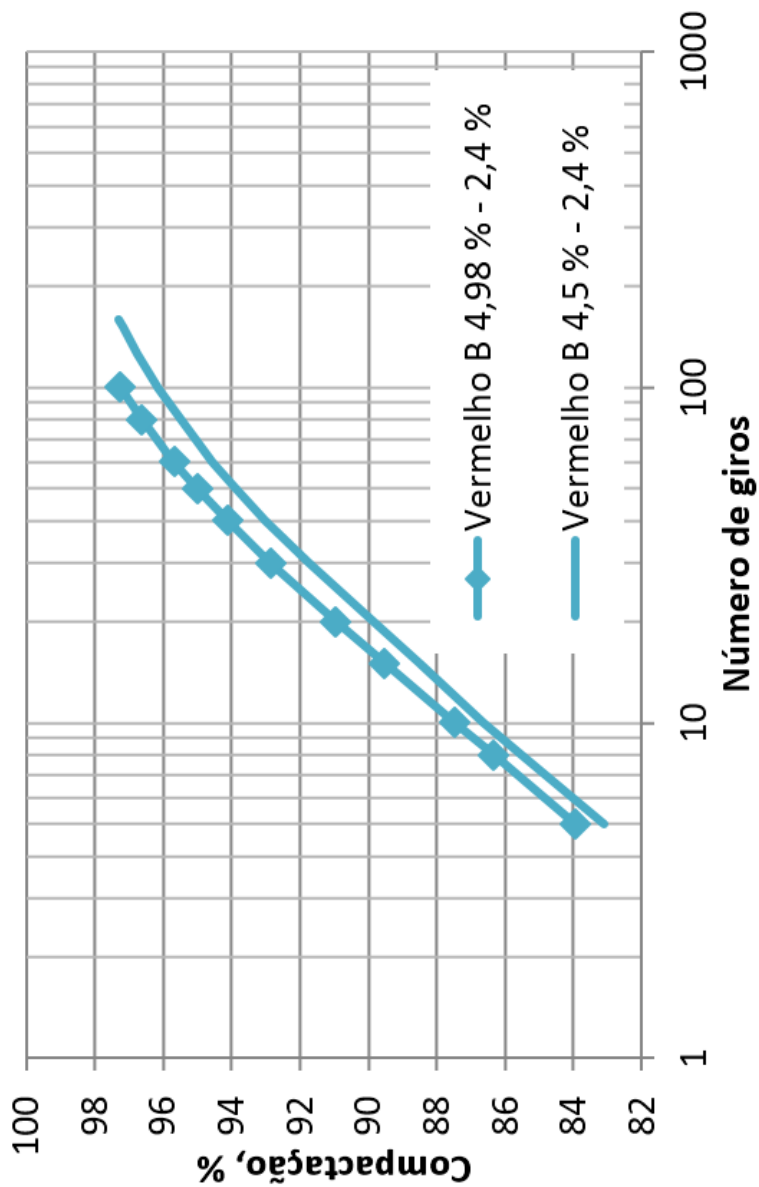
**Tabela 14-** Proporção dos materiais utilizados na mistura Vermelho B – 4,98% de ligante asfáltico.

Material	Ligante	Pó de pedra	Pedrisco	Brita 1	Pigmento
Mistura Vermelho B – 4,98% de ligante e 2,4% de pigmento					
Porcentagem em massa do total do agregado, %		33	55	12	
Porcentagem em massa do total da mistura, %	4,98	30,57	50,94	11,11	2,4
Massa para determinação da Gmm, g	99,6	611,3	1018,8	222,3	48,0
Massa para ensaio de compactação, %	224,0	1375,4	2292,4	500,2	108,0
Mistura Vermelho B – 4,50% de ligante e 2,4% de pigmento					
Porcentagem em massa do total do agregado, %		33	55	12	
Porcentagem em massa do total da mistura, %	4,50	30,72	51,21	11,17	2,4
Massa para determinação da Gmm, g	90,0	614,5	1024,1	223,4	48,0
Massa para ensaio de compactação, %	202,4	1382,6	2304,3	502,8	108,0

**Tabela 15**– Dados de compactação da mistura Vermelho B com 4,98 e 4,50% de ligante asfáltico.

Giros	Vermelho B 4,98 % - 2,4 %	Vermelho B 4,5 % - 2,4 %	
5	83,9	83,1	
8	86,3	85,5	N <sub>ini</sub>
10	87,5	86,6	
15	89,5	88,5	
20	91,0	89,9	
30	92,9	91,8	
40	94,1	93,0	
50	95,0	93,9	
60	95,7	94,5	
80	96,6	95,5	
100	97,3	96,2	
125		96,8	N <sub>max</sub>
150		97,3	
160		97,5	
Gmb, g cm <sup>-3</sup>	2,470	2,507	
Gmm, g cm <sup>-3</sup>	2,539	2,576	
%Gmm@Nmax	97,3	97,3	





**Figura 6-** Curva de compactação da mistura Vermelho B com 4,98 e 4,50% de ligante asfáltico.

Os resultados do ensaio de compactação da mistura Vermelho B com 4,50% de ligante asfáltico foram mais satisfatórios que seu par com 4,98% de ligante. A 100 giros, o grau de compactação desta mistura é de 96,2% o qual é um valor aceitável e coerente com os valores estimados para as outras misturas coloridas.

O valor da relação filer-betume calculado para esta última mistura foi de 2,32, o qual, de forma similar ao acontecido com as misturas Verde e Vermelho A, excedem o critério da metodologia Superpave. Entretanto, acredita-se que os pigmentos não estão propriamente atuando como um filer dentro da mistura.

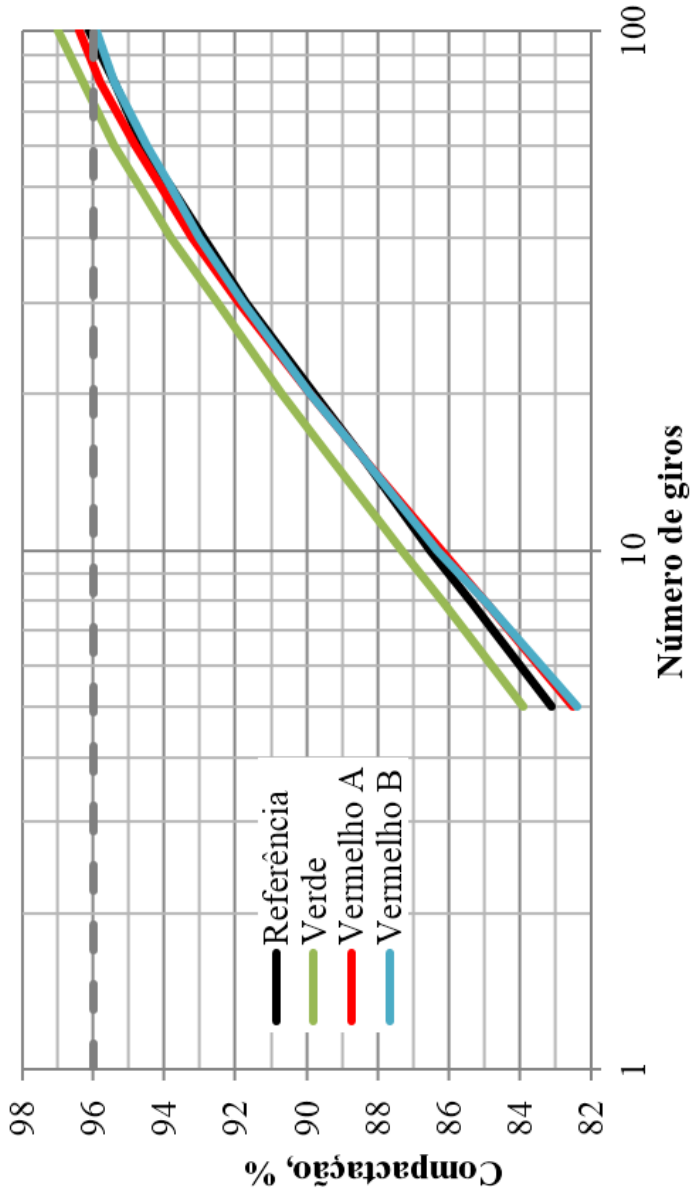
A alta trabalhabilidade apresentada pelas misturas no laboratório indicaria um menor tempo de compactação das mesmas no campo, o qual estaria relacionada com uma economia de energia e de tempo. No decorrer da pesquisa, os corpos de prova cilíndricos utilizados nos ensaios mecânicos, foram moldados a um número menor de giros com o objetivo de acertar o valor de 4% de vazios requerido.

### **1.3 COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM DIÂMETRO DE 100 MM**

A finalidade desta etapa foi verificar se corpos de prova de tamanho reduzido apresentariam os mesmos parâmetros de compactação que as misturas com 150 mm de diâmetro. Os resultados do ensaio de compactação são mostrados na Tabela 16 e na Figura 7.

**Tabela 16**– Dados de compactação da mistura asfálticas coloridas com diâmetro de 100mm.

Giros	% Gmm			
	Referência	Verde	Vermelho A	Vermelho B
5	83,1	83,9	82,5	82,4
$N_{ini} = 8$	85,4	86,2	85,0	85,0
10	86,5	87,3	86,2	86,3
15	88,4	89,3	88,4	88,4
20	89,8	90,7	89,9	89,9
30	91,7	92,5	91,9	91,8
40	92,9	93,8	93,2	93,0
50	93,8	94,7	94,1	93,8
60	94,6	95,4	94,8	94,5
80	95,4	96,3	95,8	95,4
$N_{des} = 100$	96,1	97,0	96,4	95,9
Gmb	2,442	2,502	2,499	2,471
% Gmm@Nmax	2,541	2,579	2,591	2,576
Gmm	96,1	97	96,4	95,9



**Figura 7** - Curva de compactação da mistura asfálticas coloridas com 100 mm de diâmetro.

A Tabela 17 mostra os parâmetros de compactação das misturas com 150 e 100 mm. Os resultados evidenciam que existem algumas variações no parâmetro de %Gmm@Nini entre as amostras com 150 e 100 mm e esta variação é da ordem de 0,3 a 3,1%. A diferença pode ser atribuída à acomodação inicial do material causado pela distribuição da amostra no molde antes da compactação, já que tal distribuição é realizada manualmente e neste momento não se dispõe de um procedimento que permita controlar a altura inicial da massa da amostra dentro do molde. Em contrapartida, a variação do parâmetro de %Gmm@Ndes entre as amostras de diferente diâmetro é pequena, chegando a estar entre 0,1 e 0,3%.

**Tabela 17**– Parâmetros de compactação das misturas asfálticas densas com 150 e 100 mm de diâmetro.

Amostra	%Gmm@Nini		%Gmm@Ndes	
	D = 150 mm	D = 100 mm	D = 150 mm	D = 100 mm
Referência	85,7	85,4	96,0	96,1
Verde	85,7	86,2	97,0	97,0
Vermelho A	85,6	82,5	96,2	96,4
Vermelho B	85,5	85,0	96,2	95,9

Com base nos resultados, se concluiu que as amostras de 100 mm podem ser utilizadas nos ensaios posteriores já que não apresentam diferenças significativas, nos parâmetros de compactação, com as amostras de 150 mm de diâmetro.