

## METODOLOGIA ANALÍTICA PARA ESTIMATIVA DA LÂMINA D'ÁGUA EM PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Lucius de Albuquerque Prado<sup>1</sup>

Giovano Palma<sup>2</sup>

Artigo submetido em: 21/12/2011

Aceito para publicação em: 12/04/2012

**RESUMO:** Este trabalho objetiva deduzir uma equação para estimar a espessura da lâmina d'água em pavimentos aeroportuários considerando as equações da hidráulica como, por exemplo, a equação de Manning. O fenômeno da aquaplanagem está relacionado à ocorrência de água na interação entre o pavimento e o pneu de uma aeronave. Chuvas de grande intensidade podem provocar a formação de lâmina d'água, aumentando o risco de perda do controle direcional da aeronave, o que pode ter consequências catastróficas. A avaliação da profundidade da lâmina d'água requer atenção por parte dos operadores de aeródromos, tendo em vista a segurança das operações na aviação civil. A *International Civil Aviation Organization* - ICAO estabelece que medidas corretivas de manutenção devam ser reportadas sempre que for constatada depressão na pista de pouso e decolagem que permita empoçamento de água com lâmina superior a 3,0 mm acima da superfície do pavimento. A determinação da altura da lâmina d'água em pavimentos pode se dar por meio de instrumentação ou ser estimada através de equações empíricas e analíticas, das quais se comenta no decorrer deste trabalho. É ainda comentado sobre as desvantagens decorrentes da instrumentação bem como as peculiaridades existentes em cada método empírico e analítico abordado. A proposta aqui apresentada pode ser utilizada para estimar a altura da lâmina d'água em pavimentos, de modo a subsidiar decisões de operadores de aeródromos.

**PALAVRAS CHAVE:** Aquaplanagem. Lâmina d'água. Pavimentos aeroportuários. Intensidade de chuva.

### 1 INTRODUÇÃO

A existência de uma lâmina d'água sobre a superfície do pavimento provoca redução das características de aderência entre esta e o pneu da aeronave e, desta forma, a pista pode tornar-se escorregadia, além de estabelecer condições propícias para a perda de contato entre o pneu e o pavimento, levando ao fenômeno conhecido como aquaplanagem.

---

<sup>1</sup> Técnico em Saneamento, Graduado em Engenharia Civil, Mestre em Engenharia Civil e Especialista em Regulação da Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC. luciusap@gmail.com

<sup>2</sup> Técnico em Mecânica, Graduado em Engenharia Civil, Mestre em Engenharia Civil e Especialista em Regulação da Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC. giovanopalma@gmail.com

O fenômeno ocorre pela existência de uma condição na qual a força de sustentação hidrodinâmica desenvolvida entre a banda de rodagem e o fluido que cobre a superfície de rolamento iguala ou excede a reação normal do peso da aeronave que atua na banda, capaz de levantar e separar o pneu do pavimento. Assim, perde-se o contato entre a banda de rodagem e a superfície de rolamento quando a banda de rodagem galga a lâmina d'água, podendo resultar em perda do controle direcional e, levando ao acontecimento de incidentes e acidentes com a consequente perda de vidas humanas.

Este trabalho tem por objetivo deduzir uma equação para estimar a espessura da lâmina d'água considerando as equações da hidráulica, sendo que para o cálculo dessa espessura será utilizada a equação de Manning, aplicada para o dimensionamento de condutos livres (Equação da Resistência).

Ressaltamos que quando uma aeronave aquaplanada pode ocorrer a perda de seu controle direcional e, desse modo, levar ao acontecimento de incidentes ou acidentes graves. Dessa forma, se faz mister manter o controle dos fatores que podem levar ao surgimento desse fenômeno a fim de mitigar ou até mesmo eliminar sua ocorrência e potenciais consequências.

O controle direcional pode ser perdido, principalmente, em decorrência da aquaplanagem dinâmica ou aquaplanagem viscosa. A primeira está relacionada à separação do pneu do pavimento em função de uma lâmina d'água. Desse modo, tem-se uma lâmina d'água espessa (devido à drenagem superficial insuficiente sob chuva) associada à alta velocidade da aeronave para a situação. A segunda decorre da existência de um filme fino de contaminantes, o que pode ser resolvido mantendo-se a superfície limpa de óleo, graxa, ou outros materiais derrapantes, como é o caso do próprio asfalto, quando têm sua exsudação na superfície.

A equação que será aqui desenvolvida poderá ser utilizada por operadores de aeródromos para tomada de decisões no tocante à suspensão/liberação da operação em pista de pouso e decolagem durante ou após a ocorrência de chuvas no aeródromo, visando à segurança das operações na localidade.

Dessa forma, antes de se apresentar a metodologia adotada neste trabalho, efetuar-se-á uma revisão das metodologias desenvolvidas no passado e que são utilizadas até hoje em diversos países. Também serão apresentados alguns estudos recentes relacionados a esse assunto que foram desenvolvidos e cujos resultados serão objetos de comparação com os dados resultantes da equação que será aqui demonstrada.

## 2 IMPORTÂNCIA DO TEMA

A aquaplanagem vem sendo objeto de estudo de pesquisadores em diversos locais do mundo, entretanto, nem todos os fatores que envolvem este fenômeno encontram-se completamente compreendidos.

A presença de lâmina d'água em pistas de pouso e decolagem pode representar risco à segurança das operações nos aeródromos. A *International Civil Aviation Organization - ICAO* estabelece, no item 2.4 da Parte 2 do Doc. 9137 que medidas corretivas de manutenção devem ser reportadas sempre que for constatada depressão na pista de pouso e decolagem que permita empoçamento de água com lâmina superior a 3,0 mm de espessura, denominada espessura crítica de hidroplanagem (ICAO, 2002).

Diante disso, operadores de aeródromos, projetistas e responsáveis pela manutenção e operação, necessitam de métodos apropriados para que essa avaliação seja eficaz, de forma a atender às legislações vigentes, bem como, a segurança das operações aéreas.

Um dos métodos utilizados para se determinar a espessura da lâmina d'água no pavimento pode ser feita por meio da utilização de instrumentos de medição pontuais como réguas, paquímetros etc. Entretanto, seu emprego apresenta alguns inconvenientes e, segundo Palma e Prado (2011), sua utilização como instrumento principal não parece ser viável operacionalmente, considerando-se a morosidade e o impacto nas operações devido à necessidade de leituras pontuais em vários locais da pista e, principalmente, a dificuldade em se avaliar uma grandeza milimétrica sob condições adversas.

Outro método de se fazer essa avaliação consiste na formulação de equações empíricas ou analíticas que tem como finalidade principal estimar: a velocidade de aquaplanagem; a espessura da lâmina d'água; a distância de visibilidade entre outros fatores. Nesse sentido, Palma e Prado (2011) afirmaram que a associação da intensidade de chuva com a espessura da lâmina d'água em uma pista de pouso e decolagem pode ser uma alternativa mais precisa e viável, tanto técnica quanto operacionalmente, para a tomada de decisões relacionadas à manutenção das operações aéreas em relação à aquaplanagem.

Sendo assim, o presente trabalho visa contribuir com os estudos referentes à previsão do acúmulo de água em pavimentos aeroportuários por meio da proposição de um modelo matemático capaz de estimar a espessura da lâmina d'água em pavimentos, fundamentado nas leis da hidrodinâmica dos fluidos.

### **3 FATORES QUE CONTRIBUEM PARA A AQUAPLANAGEM DINÂMICA**

De acordo com Chesterton, Nancekivell e Tunnicliffe (2006) o risco da aquaplanagem dinâmica é diretamente proporcional à espessura da lâmina d'água no pavimento. Essa espessura é afetada por alguns fatores tais como: projeto geométrico do pavimento; os materiais envolvidos; o ambiente; o projeto de drenagem e manutenção; e por características específicas das aeronaves.

#### **3.1 O PROJETO GEOMÉTRICO**

Na opinião de Chesterton, Nancekivell e Tunnicliffe (2006) a geometria do pavimento exerce grande influência sobre a espessura da lâmina d'água e é o fator sobre o qual o projetista possui o maior controle. De fato, a altura da lâmina d'água é influenciada pelo período de tempo que a água permanece sobre o pavimento. Pode-se perceber que quanto mais tempo a água demorar a ser drenada, maior será o acúmulo de água pluvial sobre sua superfície, e isso está diretamente relacionado ao comprimento do caminho de escoamento do fluido.

Maiores comprimentos de trechos de pavimentos fazem com que a água leve mais tempo para ser captada pelo sistema de drenagem, pois permanecerá escoando

sobre a superfície por maior tempo, aumentando a altura da lâmina d'água no bordo do pavimento, considerando uma pista abaulada.

Destacam-se, entre a geometria do pavimento, as declividades transversal e longitudinal da pista de pouso e decolagem, fatores importantes para estimativa da lâmina d'água. Uma declividade transversal maior possibilita menor altura da lâmina d'água, tendo em vista o aumento na velocidade de escoamento do fluido sobre o pavimento, diminuindo seu tempo de permanência sobre a pista.

### 3.2 OS MATERIAIS ENVOLVIDOS

A textura superficial do pavimento afeta a espessura da lâmina d'água. Dois dos fatores que afetam o coeficiente de atrito e a profundidade da lâmina d'água são a microtextura e a macrotextura. De acordo com a ICAO (2002) a microtextura é a textura caracterizada pela superfície das partículas individuais que podem ser sentidas pelo tato, além de poder ser classificada como lisa ou áspera. Já a macrotextura é representada pela altura média, em mm, do relevo da superfície, conforme mostra a Figura 1 (RODRIGUES FILHO, 2006, *apud* OLIVEIRA, 2009). Portanto, superfícies com macrotextura aberta facilitam o escoamento da água pelos próprios canais de sua estrutura.

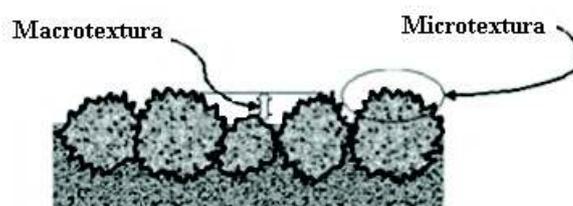


FIGURA 1 - Detalhe: macrotextura e microtextura (RODRIGUES FILHO, 2006, *apud* OLIVEIRA, 2009).

Uma das formas de se facilitar o escoamento da água sobre o pavimento é a colocação de uma camada porosa de atrito (CPA). De acordo com Rodrigues (2007) a utilização dessa camada tem como finalidade evitar o fenômeno da aquaplanagem, manter o coeficiente de atrito em níveis aceitáveis nos momentos críticos (imediatamente quando começa a chover), reduzir a infiltração de água para as camadas subjacentes do pavimento e, no caso de pavimento rodoviário, melhorar as condições de visibilidade sob

chuvas intensas (por evitar o *spray* ou névoa que os veículos produzem com sua passagem para os veículos de trás).

### **3.3 O MEIO AMBIENTE**

A intensidade de chuva é o fator ambiental mais importante para o acúmulo de água. Na aviação, pistas escorregadias representam perigo iminente para as aeronaves, situação que se agrava para as regiões com grandes índices pluviométricos, ou que possuem estação chuvosa mais prolongada.

### **3.4 PROJETO DE DRENAGEM E SUA MANUTENÇÃO**

Outro fator que pode aumentar o risco de aquaplanagem é um projeto de drenagem ineficiente. Durante chuvas intensas as valas de drenagem podem receber um volume de água superior à que foram dimensionadas. Essa situação leva ao transbordamento pelas sarjetas e outros dispositivos de drenagem do pavimento, fazendo com que acumule água na superfície da pista de pouso e decolagem. A manutenção desses dispositivos deve ser realizada em periodicidade adequada e programada, como forma de assegurar o efetivo escoamento da água em seu interior, razão pela qual foram instaladas.

Em relação ao pavimento, inspeções periódicas devem ser realizadas de forma a identificar eventuais defeitos que possam ampliar a possibilidade de acúmulo de água, tais como: afundamentos por trilhas de roda; deformações plásticas etc.

### **3.5 CARACTERÍSTICAS DAS AERONAVES**

A velocidade de aquaplanagem de uma aeronave, isto é, a velocidade mínima na qual a aeronave deve estar para que se inicie a aquaplanagem é proporcional à raiz quadrada da pressão dos pneus. Esse fenômeno deriva, então, da combinação entre a velocidade de aquaplanagem, a espessura da lâmina d'água sobre o pavimento e o peso da aeronave. Este último determina qual a intensidade da força de levantamento necessária, decorrente da espessura da lâmina d'água existente, para induzir a separação entre o pneu e o pavimento.

A pressão dos pneus também exerce influência na aquaplanagem. Pressões elevadas nos pneus aumentam a velocidade de aquaplanagem, tendo em vista a redução da área de contato entre o pneu e o pavimento. De fato, aeronaves mais leves e com pneus com pouca pressão estão mais propícias a aquaplanar em baixas velocidades, conforme Chesterton, Nancekivell e Tunnicliffe (2006).

## 4 MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA AVALIAÇÃO DA AQUAPLANAGEM

### 4.1 MÉTODOS EMPÍRICOS

#### 4.1.1 MÉTODO DO LABORATÓRIO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS DA NOVA ZELÂNDIA (ROAD RESEARCH LABORATORY) – RRL (1968)

Este método pode ser encontrado no guia “*Design Guide for Highways with a Positive Collection System*” (1977), do Ministério do Trabalho e Desenvolvimento da Nova Zelândia, e foi desenvolvido por Russan e Ross (1968).

Para a determinação da espessura da lâmina d’água sobre o pavimento, este método leva em consideração a inclinação, o comprimento de escoamento do fluxo e a intensidade de chuva. A *Equação i* apresenta a estimativa da espessura da lâmina d’água por este método, enquanto a Figura 2 ilustra os parâmetros utilizados.

$$d = \frac{0,046 \cdot (L_f \cdot I)^{\frac{1}{2}}}{S_f^{\frac{1}{5}}}$$

[Equação i]

Onde: d: altura da lâmina d’água no fim do percurso de escoamento [mm];  
 0,046: constante [ $h^{1/2} \cdot mm^{1/2} \cdot m^{-1/2}$ ];  
 $L_f$ : comprimento do percurso de escoamento [m];  
 I: intensidade de chuva [mm/hora];  
 $S_f$ : inclinação do comprimento do percurso de escoamento [m/m].

Para o cálculo da inclinação do comprimento do percurso de escoamento considera-se a inclinação longitudinal e transversal, ou seja:

$$S_f = (S_i^2 + S_c^2)^{\frac{1}{2}}$$

[Equação ii]

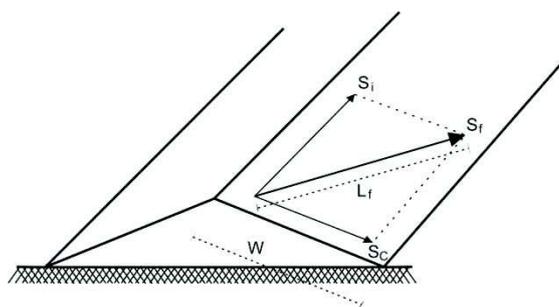
Onde:  $S_i$ : inclinação longitudinal [m/m];

$S_c$ : inclinação transversal [m/m].

$$L_f = W \cdot \frac{S_f}{S_c}$$

[Equação iii]

Onde:  $W$ : comprimento do pavimento que contribui para o fluxo [m].



CORTE TRANSVERSAL DA PISTA

FIGURA 2 - Ilustração dos parâmetros utilizados no método do RRL.

De acordo com Lugão (2008) esse método recomenda, ainda, uma duração de chuva 5 minutos e um período de retorno de 2 anos para a obtenção da intensidade de chuva, além de ser utilizado para o cálculo de lâmina d'água de até 4 mm.

Define-se período de retorno como o período de tempo médio que um determinado evento hidrológico é igualado ou superado pelo menos uma vez. Dessa forma, um período de retorno de 2 anos com uma duração de chuva de 5 minutos significa que, probabilisticamente, espera-se que, dentre de 2 anos, ocorrerá uma chuva que igualará ou superará os registros hidrológicos históricos para uma duração de chuva de 5 minutos.

#### 4.1.2 IVEY ET AL (1968)

Ivey *et al* (1975) *apud* Chesterton, Nancekivell e Tunnicliffe (2006) propôs uma relação empírica entre a intensidade de chuva, distância de visibilidade e velocidade. Essa relação geralmente é combinada com a equação de Gallaway (ver item 4.1.3), conforme uma Circular de Engenharia Hidráulica (1993) da *Federal Highway Administration*, dos Estados Unidos. A equação de Ivey *et al* é dada pela seguinte expressão:

$$S_v = \frac{2000}{i^{0,68}} \cdot \frac{40}{V_i}$$

[Equação iv]

Onde:  $S_v$ : distância de visibilidade [em pés];  
 $i$ : intensidade de chuva [polegadas/hora];  
 $V_i$ : velocidade do veículo [milhas/hora].

Em projetos rodoviários essa equação pode ser rearranjada para fornecer a máxima intensidade de chuva permitida para uma velocidade específica de projeto.

#### 4.1.3 GALLAWAY (1979)

De acordo com Chesterton, Nancekivell e Tunnicliffe (2006) este método foi desenvolvido por Gallaway B.M. *et al* para o Departamento de Transportes dos Estados Unidos, após processar mais de 1000 leituras de lâminas d'água em vários tipos de pavimentos rodoviários. Este método foi apresentado no Manual de Projetos Hidráulicos do Departamento de Transportes do Texas, em 2004. A intensidade de chuva de projeto e a geometria do pavimento são, primeiramente, utilizadas na *Equação ix* para obter a espessura da lâmina d'água. Essa espessura é, então, confrontada com a velocidade de aquaplanagem fornecida pela *Equação v*, a qual também é confrontada com a velocidade de projeto, para assegurar que a aquaplanagem não ocorra para aquela intensidade de chuva de projeto.

$$V = 0,9143 \cdot SD^{0,04} \cdot P^{0,3} \cdot (TD + 0,794)^{0,06} \cdot A$$

[Equação v]

Onde:  $V$ : velocidade de aquaplanagem do veículo [km/hora];  
0,9143: constante cuja dimensão possibilita ao resultado ser expresso em km/hora.

$$SD = \left( \frac{W_d - W_w}{W_d} \right) \cdot 100$$

[Equação vi]

Onde:  $SD$ : porcentagem de giro de roda [%], a qual descreve a mudança no rolamento rotacional livre do pneu no momento em que o mesmo perde contato com a superfície do pavimento;  
 $W_d$ : velocidade de rotação da roda sobre o pavimento seco [km/hora];

$W_w$ : velocidade de rotação da roda depois do *spin down* devido ao contato com o pavimento alagado [km/hora];

P: pressão do pneu [Kpa] (165 Kpa é o valor de projeto recomendado para veículos rodoviários);

TD: profundidade da banda de rodagem [mm] (0,5 mm é o valor recomendado para projeto);

A: o maior valor entre as *Equações vii e viii*.

$$A = \frac{12,639}{WFD^{0,06}} + 3,50$$

[Equação vii]

$$A = \left[ \frac{22,351}{WFD^{0,06}} - 4,97 \right] \cdot TXD^{0,14}$$

[Equação viii]

Onde: TXD: profundidade da textura do pavimento [mm];

WFD: profundidade da lâmina d'água na superfície do pavimento obtida da *Equação ix* [mm].

$$WFD = z \cdot \left[ \frac{TXD^{0,11} \cdot L^{0,43} \cdot I^{0,59}}{S^{0,42}} \right] - TXD$$

[Equação ix]

Onde: WFD: altura da lâmina d'água na superfície do pavimento [mm];

z: 0,01485 é uma constante [ $h^{0,59} \cdot mm^{0,30} \cdot m^{-0,43}$ ];

L: comprimento de escoamento do fluxo de água sobre o pavimento [m];

I: intensidade de chuva [mm/hora];

S: inclinação transversal do pavimento [m/m];

TXD: profundidade da textura do pavimento [mm].

#### 4.1.4 VERT (2000)

De acordo com Domenichini e Loprencipe (2003) outra formulação empírica foi desenvolvida em um projeto denominado VERT, na Università degli Studi di Firenze, Itália. A *Equação x* apresenta o resultado obtido.

$$WD = 0,016405 \cdot \left[ \frac{L^{0,4} \cdot I^{0,4} \cdot MTD^{0,4}}{S^{0,3}} \right]$$

[Equação x]

Onde: WD: altura da lâmina d'água na superfície do pavimento [cm];

0,016405 é uma constante [ $h^{0,4} \cdot mm^{-0,4} \cdot cm^{0,6} \cdot m^{-0,4}$ ];

L: comprimento de escoamento do fluxo de água sobre o pavimento [m];

I: intensidade de chuva [cm/hora];

S: inclinação transversal do pavimento [%];  
 MTD: profundidade da textura do pavimento [mm].

## 4.2 MÉTODOS ANALÍTICOS

### 4.2.1 HORNE (1962)

Este método é baseado em estudos realizados pelo Centro de Pesquisas Langley da NASA, em 1962. A fórmula publicada sobre a aquaplanagem é baseada nas forças hidrodinâmicas as quais um pneu de aeronave encontra-se submetido. Basicamente, a equação é deduzida a partir do balanceamento entre a força que tende a empurrar a aeronave para baixo com a força hidrodinâmica que tende a levantar o pneu do pavimento. A *Equação xi* descreve o resultado desse balanceamento.

$$V_p = K \cdot \sqrt{P}$$

[Equação xi]

Onde:  $V_p$ : velocidade de aquaplanagem [milha/hora];  
 K: constante dependente do fluido e fluxo dinâmico determinado através de dados experimentais para combinações específicas de pneus e pavimento, sendo expressa em [milha.h<sup>-1</sup>.psi<sup>-1/2</sup>];  
 P: pressão dos pneus [psi].

Segundo Horne *et al* (1963) *apud* Chesterton, Nancekivell e Tunnicliffe (2006) o fenômeno da aquaplanagem pode ser iniciado a partir de uma lâmina d'água da ordem de 2,45 mm em diante. Horne constatou que um valor de  $K = 10,35$  promoveu um bom ajuste aos resultados experimentais obtidos a partir de dados de aquaplanagem de aeronave.

Ressalta-se que essa equação não leva em consideração a profundidade da macrotextura ou os diferentes tipos de pneus utilizados, não considerando, por exemplo, a profundidade da banda de rodagem do pneu.

### 4.2.2 ANDREATINI (1986)

Andreatini (1986) *apud* Lugão (2008) considerou, para o cálculo da lâmina d'água, o regime de escoamento como um canal aberto de seção retangular com a vazão variando linearmente ao longo do próprio canal. Estimou também o tempo de equilíbrio da

lâmina d'água, ou seja, o tempo desde o início da chuva até o equilíbrio da altura da lâmina d'água.

O cálculo da espessura máxima da lâmina d'água e o tempo de equilíbrio podem ser obtidos por meio das *Equações xii e xiii*:

$$LA = (1,6135 \times 10^{-4} \cdot ip + 5,8548 \cdot C) \cdot ip^{\frac{1}{3}} \cdot i^{-\frac{1}{3}} \cdot L^{\frac{1}{3}}$$

[Equação xii]

$$t_e = (0,0145 \cdot ip + 527 \cdot C) \cdot ip^{\frac{1}{3}} \cdot i^{-\frac{1}{3}} \cdot L^{\frac{1}{3}}$$

[Equação xiii]

Onde: LA: altura da lâmina d'água [mm];

$t_e$ : tempo de equilíbrio [s];

i: declividade transversal [%];

L: comprimento do fluxo de escoamento [m];

ip: intensidade de precipitação [mm/h]; e

C: coeficiente relativo à rugosidade do revestimento:

revestimento asfáltico de baixa rugosidade = 0,006 a 0,007;

revestimento asfáltico de média rugosidade = 0,007 a 0,008;

revestimento asfáltico de alta rugosidade = 0,010 a 0,012;

pavimento de concreto = 0,012.

#### 4.2.3 PAVDRN, NCHRB WEB REPOR 16 (1988)

PAVDRN é um *software* desenvolvido pela Universidade da Pennsylvania em 1988. Ele considera uma equação unidimensional da onda cinemática para calcular a espessura da lâmina d'água. Esta equação inclui o coeficiente de Manning [n] para a determinação da espessura da lâmina d'água.

$$WFD = \left[ \frac{n \cdot L \cdot I}{105,425 \cdot S^{0,5}} \right]^{0,6} - MTD$$

[Equação xiv]

Onde: WFD: altura da lâmina d'água [mm];

MTD: profundidade média da macrotextura [mm];

105,425: constante [h. s<sup>-1</sup>.mm<sup>2/3</sup>.m<sup>-2/3</sup>];

L: comprimento do percurso de escoamento [m];

S: inclinação transversal do pavimento [m/m];

I: (i-f) taxa de excesso de chuva [mm/hora];

i: intensidade de chuva [mm/hora];

f: taxa de infiltração ou de permeabilidade do pavimento [mm/hora];

$n$ : coeficiente de rugosidade de Manning [ $s/m^{1/3}$ ].

$$n = \frac{1,49 \cdot S^{0,306}}{N_R^{0,424}} \quad (\text{para pavimento de asfalto poroso})$$

[Equação xv]

$$N_R = \frac{q}{\nu}$$

[Equação xvi]

Onde:  $N_R$ : número de Reynolds [adimensional];  
 $q$ : vazão por unidade de comprimento [ $m^3/s/m$ ];  
 $\nu$ : viscosidade cinemática da água [ $m^2/s$ ].

De acordo com Chesterton, Nancekivell e Tunnicliffe (2006) o programa também leva em consideração as fórmulas de Gallaway (1979), Huebner (1980) e Henry (1986) para determinar a relação entre a velocidade na qual se inicia a aquaplanagem e a espessura da lâmina d'água.

Para lâminas d'água abaixo de 2,41 mm utiliza-se a *Equação xvii*, enquanto que para lâminas d'água acima de 2,41 mm utiliza-se a equação de Gallaway que determina a velocidade de aquaplanagem (*Equação v*).

$$HPS = 26,04 \cdot WFD^{-0,259} \quad WFD \text{ [in]} < 0,095 \text{ in ou } 2,41 \text{ mm}$$

[Equação xvii]

Onde: HPS: velocidade de aquaplanagem [mph];  
 26,04: constante [ $mph \cdot mm^{0,259}$ ];  
 WFD: altura da lâmina d'água [mm].

#### 4.2.4 ANDERSON (1998)

De acordo com Soares (2011) Anderson apresentou, com base em resultados experimentais de ocorrências de águas pluviais sobre diversos tipos de pavimentos, uma equação unidimensional da onda cinemática que relaciona a espessura da lâmina de água ao longo do caminho do fluxo com uma determinada taxa de precipitação, taxa de infiltração, e tipo de camada de desgaste do pavimento (concreto de cimento, concreto betuminoso e concreto betuminoso drenante).

Segundo Soares (2011) a grande evolução desse estudo consiste na introdução da temperatura da água, bem como o comportamento da água em face de cada tipo de pavimento, sendo, assim, possível determinar a espessura da lâmina de água para cada tipo de pavimento. Essa mesma expressão inclui a variável  $[\eta]$  de Manning que permite calcular coeficientes de rugosidade de escoamentos superficiais.

$$h = \left[ \frac{n \cdot Lw \cdot ip_e}{36,1 \cdot iw^{0,5}} \right]^{0,6} - Aa$$

[Equação xviii]

Onde:  $h$ : altura da lâmina d'água acima das asperezas do pavimento [mm];  
 36,1: constante [ $\text{h} \cdot \text{mm}^{2/3} \cdot \text{m}^{-2/3} \cdot \text{s}^{-1}$ ];  
 $n$ : coeficiente de rugosidade de Manning [ $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ ];  
 $Lw$ : comprimento da linha de água [m];  
 $Aa$ : profundidade da macrotextura [mm];  
 $ip_e$ : intensidade de precipitação efetiva [mm/hora];  
 $iw$ : inclinação da linha de água [m/m].

Com:

$$ip_e = ip - f$$

[Equação xix]

Onde:  $ip$ : intensidade de precipitação [mm/hora];  
 $f$ : taxa de infiltração ou permeabilidade do pavimento [mm/hora].

Anderson, para distinguir os escoamentos superficiais entre pavimentos, também determinou os seguintes coeficientes de rugosidade:

a) Pavimento em concreto de cimento

$$n = \frac{0,319}{N_R^{0,480}} \quad N_R < 1000$$

[Equação xx]

$$n = \frac{0,345}{N_R^{0,502}} \quad N_R < 500$$

[Equação XXI]

b) Pavimento em concreto betuminoso

$$n = 0,0823 \cdot N_R^{-0,174}$$

[Equação xxii]

c) Pavimento em concreto betuminoso drenante

$$n = \frac{1,49 \cdot iW^{0,306}}{N_R^{0,424}}$$

[Equação xxiii]

Onde:

 $N_R$ : número de Reynolds, determinado conforme a Equação xvi;n: coeficiente de rugosidade de Manning [s/m<sup>1/3</sup>].

A viscosidade cinemática da água é utilizada para calcular o número de Reynolds que por sua vez, é usado para determinar [n], coeficiente de rugosidade do pavimento. Como tal, verifica-se que a espessura da lâmina de água é afetada pela viscosidade da água (SOARES, 2011). As temperaturas da água utilizadas e as respectivas viscosidades cinemáticas são apresentadas no Quadro 1.

QUADRO 1 - Viscosidades da água sob condições normais de temperatura e pressão

Temperatura [°C]	Viscosidade cinemática [v] [10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]
0	1,785
5	1,547
10	1,308
15	1,140
20	1,003
25	0,893
30	0,801

Fonte: Lencastre (1996) *apud* Soares (2011).

## 5 MÉTODO PROPOSTO NESTE TRABALHO

A metodologia adotada neste trabalho consiste em deduzir uma equação para determinar a espessura da lâmina d'água considerando as equações da hidráulica, sendo que para o cálculo dessa espessura será utilizada a equação de Manning, aplicada para o dimensionamento de condutos livres (Equação da Resistência).

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_H^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

[Equação xxiv]

Onde: V: velocidade de escoamento [m/s];

n: coeficiente de rugosidade de Manning [s/m<sup>1/3</sup>];  
 R<sub>H</sub>: raio hidráulico [m];  
 I: declividade do canal de escoamento [m/m].

A determinação da vazão a qual o pavimento encontra-se submetido foi estimada com base no Método Racional, que relaciona a precipitação com o escoamento, considerando características como área e permeabilidade.

De acordo com Tomaz (2002) o método racional é um método indireto e foi apresentado pela primeira vez em 1851 por Mulvaney e usado por Emil Kuichling em 1889 e estabelece uma relação entre chuva e o escoamento superficial (deflúvio). É usado para calcular a vazão de pico de uma determinada bacia, considerando uma seção de estudo. A chamada fórmula racional é a seguinte:

$$Q = 0,275 \cdot C \cdot i \cdot A_c$$

[Equação xxv]

Onde: Q: vazão superficial máxima [m<sup>3</sup>/s];  
 0,275: constante [h.s<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>.m<sup>3</sup>.km<sup>-2</sup>];  
 C: coeficiente de escoamento superficial;  
 i: intensidade de chuva [mm/hora];  
 A<sub>c</sub>: área de contribuição [km<sup>2</sup>].

Como a equação de Manning possui como um dos parâmetros de entrada a “velocidade” de escoamento, utilizou-se a Equação da Continuidade para determinação desse valor.

$$Q = V \cdot A$$

[Equação xxvi]

Onde: Q: vazão [m<sup>3</sup>/s];  
 V: velocidade de escoamento [m/s];  
 A: área da seção molhada [m<sup>2</sup>].

Uma vez que a metodologia proposta neste trabalho faz uso da equação de Manning é necessário estar alerta sobre os cuidados que se deve ter ao aplicar tal equação, o que, de acordo com CHIN (2000), somente é válida quando:

$$n^6 \cdot (R_H \cdot I)^{0,5} \geq 1,9E^{-13}$$

[Equação xxvii]

O procedimento adotado para a estimativa da lâmina d'água sobre o pavimento é descrito abaixo. A Figura 3 ilustra as variáveis utilizadas para a formulação proposta.

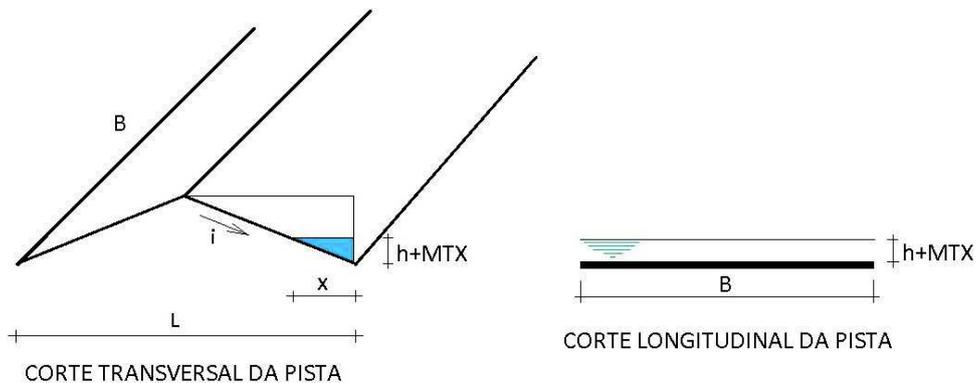


FIGURA 3 - Cortes transversal e longitudinal de uma seção de pista de pouso e decolagem.

Da *Equação xxv* tem-se que:

$$Q = 0,275 \cdot C \cdot i \cdot B \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{1000^2}$$

[*Equação xxviii*]

Sendo que a área de contribuição para a formação da lâmina d'água é expressa por:  $A_c = B \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{1000^2}$ , com a unidade de área dada em  $\text{km}^2$ .

Ressalta-se que não foi considerado o precisismo de se encontrar a medida exata da meia largura da pista – que é o percurso de escoamento do fluido –, tendo em vista que essa diferença pode ser considerada desprezível para essa situação. Portanto, substituindo o valor de  $Q$  na *Equação xxvi* e, na sequência, o valor de  $V$  da *Equação xxiv*, tem-se que:

$$\frac{1}{1000^2} \cdot 0,275 \cdot C \cdot i \cdot B \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{A} = \frac{1}{n} \cdot R_H^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

[*Equação xxix*]

$$0,1375 \cdot C \cdot i \cdot n \cdot B \cdot L = 1000^2 \cdot R_H^{\frac{2}{3}} \cdot A \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

[*Equação xxx*]

No entanto, a área da seção transversal (corte longitudinal da pista) é dada por:

$$A = B \cdot (h + MTX)$$

Assim, tem-se que:

$$0,1375 \cdot C \cdot i \cdot n \cdot B \cdot L = 1000^2 \cdot R_H^{\frac{2}{3}} \cdot B \cdot (h + MTX) \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

[Equação xxxi]

$$0,1375 \cdot C \cdot i \cdot n \cdot L = 1000^2 \cdot R_H^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot (h + MTX)$$

[Equação xxxii]

Ainda segundo Tomaz (2002) o  $R_H$  é dado por:

$$R_H = \frac{A_M}{P_M}$$

[Equação xxxiii]

$$A_M = B \cdot (h + MTX)$$

$$P_M = B$$

Portanto,

$$R_H = \frac{B \cdot (h + MTX)}{B} = h + MTX$$

[Equação xxxiv]

$$0,1375 \cdot C \cdot i \cdot n \cdot L = 1000^2 \cdot (h + MTX)^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot (h + MTX)$$

[Equação xxxv]

$$0,1375 \cdot C \cdot i \cdot n \cdot L = 1000^2 \cdot (h + MTX)^{\frac{5}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad \text{[Equação xxxvi]}$$

$$(h + MTX)^{\frac{5}{3}} = \left[ \frac{0,1375 \cdot C \cdot i \cdot n \cdot L}{1000^2 \cdot I^{\frac{1}{2}}} \right]$$

[Equação xxxvii]

A solução dessa equação é dada por:

$$h = 0,07638 \cdot \left[ \frac{(C \cdot i \cdot n \cdot L)^{\frac{3}{5}}}{I^{0,3}} \right] - MTX$$

[Equação xxxviii]

Desse modo, tem-se que a espessura da lâmina d'água sobre a superfície de um pavimento pode ser estimada por:

$$h = k \cdot \left[ \frac{(C \cdot i \cdot n \cdot L)^{0,6}}{I^{0,3}} \right] - MTX$$

[Equação xxxix]

Onde: h: estimativa da lâmina d'água [mm];  
 k: 0,07638 é uma constante [ $h^{3/5} \cdot s^{-3/5} \cdot mm^{2/5} \cdot m^{-2/5}$ ];  
 C: coeficiente de escoamento superficial;  
 i: intensidade de chuva [mm/hora];  
 n: coeficiente de rugosidade de Manning [ $s/m^{1/3}$ ];  
 L: largura da pista [m];  
 I: declividade transversal da pista [m/m];  
 MTX: profundidade média da macrotextura do pavimento [mm].

## 6 COMPARAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO COM OS DEMAIS MÉTODOS DESCRITOS

Com o intuito de comparar os resultados obtidos pelos diversos métodos entre si com a proposta dos autores deste trabalho, elaborou-se o Quadro 2 e a Figura 4 que apresentam valores calculados da espessura da lâmina d'água para intensidades de chuva variando de 1 até 100 mm/h. Para o cálculo foram estabelecidos alguns parâmetros como coeficiente de escoamento, inclinação transversal entre outros, com o objetivo de viabilizar a resolução das diversas equações.

QUADRO 2 - Valores estimados de altura da lâmina d'água em função da intensidade de chuva.

Intensidade de chuva [mm/hora]	Altura da lâmina d'água [mm]							
	Prado & Palma	Validade do resultado [ver Equação xxvii]	RRL	Galloway	PAVDRN	Andreatini	VERT	Anderson
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
0	-	0 [não válida]	0,00	-	-	0,00	0,00	-
1	-	1,19E-13[não válida]	0,51	-	-	0,67	0,65	-
2	-	1,46E-13[não válida]	0,71	-	-	0,85	0,86	-
3	-	1,65E-13[não válida]	0,88	0,00	-	0,97	1,01	-
4	-	1,80E-13[não válida]	1,01	0,11	-	1,08	1,14	-
5	0,00	1,92E-13 [válida]	1,13	0,21	-	1,16	1,24	0,00
10	0,31	2,37E-13 [válida]	1,60	0,62	-	1,48	1,64	0,32
15	0,56	2,67E-13 [válida]	1,96	0,94	0,01	1,72	1,93	0,57
20	0,78	2,92E-13 [válida]	2,26	1,23	0,13	1,92	2,16	0,79
25	0,98	3,12E-13 [válida]	2,53	1,49	0,24	2,09	2,36	0,99

30	1,16	3,29E-13 [válida]	2,77	1,72	0,33	2,25	2,54	1,17
35	1,34	3,45E-13 [válida]	2,99	1,95	0,42	2,40	2,70	1,34
40	1,50	3,59E-13 [válida]	3,20	2,15	0,51	2,54	2,85	1,51
45	1,65	3,72E-13 [válida]	3,39	2,35	0,59	2,68	2,99	1,66
50	1,80	3,84E-13 [válida]	3,57	2,54	0,67	2,81	3,12	1,81
60	2,07	4,05E-13 [válida]	3,91	2,90	0,81	3,06	3,35	2,09
70	2,33	4,25E-13 [válida]	4,23	3,23	0,95	3,29	3,57	2,35
80	2,58	4,42E-13 [válida]	4,52	3,55	1,08	3,52	3,76	2,59
90	2,81	4,58E-13 [válida]	4,79	3,84	1,20	3,75	3,94	2,83
100	3,03	4,72E-13 [válida]	5,05	4,13	1,32	3,97	4,11	3,05

**Variáveis:** Macrot textura = 0,6 mm

$n = 0,02$

Inclinação transversal = 1,5 %

Coefficiente de escoamento = 0,85

Percurso de escoamento = 22,5 m

Intensidade de chuva = variável

$C(\text{Andreatini}) = 0,010$

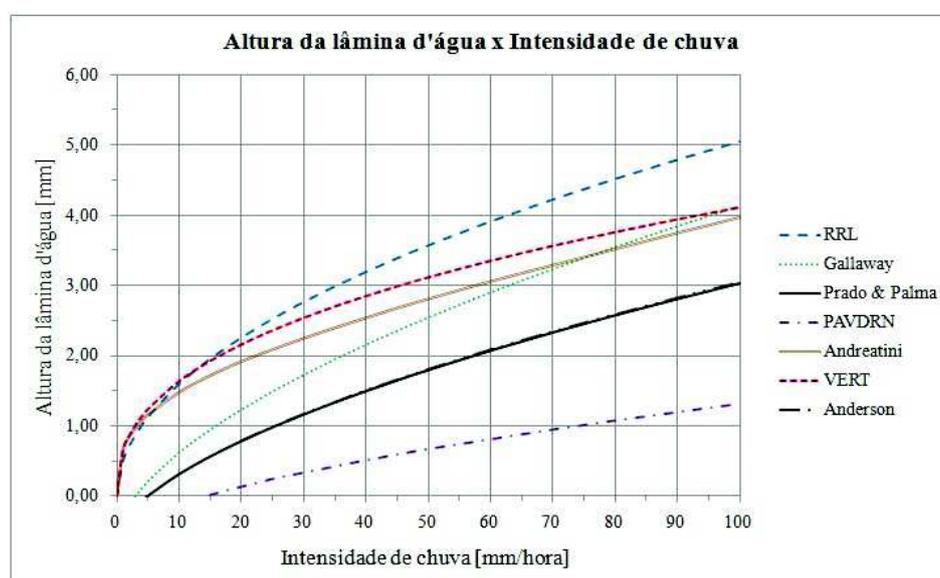


FIGURA 7 - Representação gráfica dos valores constantes do Quadro 1.

**Variáveis:** Macrot textura = 0,6 mm

$n = 0,02$

Inclinação transversal = 1,5 %

Coefficiente de escoamento = 0,85

Percurso de escoamento = 22,5 m

Intensidade de chuva = variável

$C(\text{Andreatini}) = 0,010$

Da análise da Figura 4 infere-se que os métodos empíricos (RRL, Gallaway e VERT) para estimativa da lâmina d'água são mais conservadores que os métodos analíticos (PRADO; PALMA, 2001, PAVDRN e ANDERSON, 1998). Percebe-se também que os resultados obtidos pela equação proposta neste trabalho se sobrepõem aos dados obtidos com a equação desenvolvida por Anderson (1998). A exceção é a equação de Andreatini que, apesar de analítica, apresentou curva mais próxima às fornecidas pelas equações empíricas.

Convém salientar que deformações no pavimento – devido a afundamentos por

trilhas de roda ou remendos mal executados – superiores a 2,0 mm podem levar a empoçamentos com profundidades de lâmina d'água acima de 3,0 mm na ocorrência de precipitação com intensidade superior a 25 mm/hora, uma vez que a lâmina d'água estimada para esses casos é maior que 1 mm, conforme mostram as curvas de Prado e Palma (2011) e de Anderson (1998), na Figura 4.

Isso significa que, para adequar a altura máxima de água, na superfície de um pavimento, fornecida por uma equação que é muito conservadora, o projetista poderá necessitar de ajustes desnecessários à geometria do pavimento e aos materiais que o compõe. No tocante a operações aeroportuárias, o mesmo pode ser dito sobre a utilização dessas equações como forma de monitorar a intensidade de chuva sobre a pista de pouso e decolagem e, assim, fechá-la para pousos e decolagens a partir de determinada intensidade, visando sempre à segurança operacional.

Com o intuito de verificar a influência do parâmetro declividade nos equacionamentos propostos pelos diversos autores, foi elaborado o gráfico da Figura 5 que apresenta os dados da estimativa da lâmina d'água em pavimentos em função das variações nos valores da inclinação do fluxo de água.

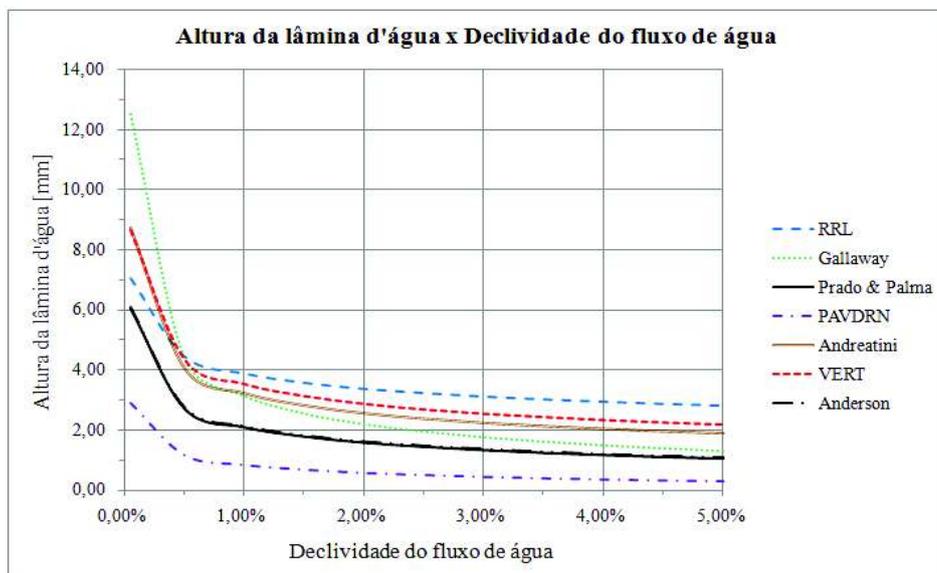


FIGURA 5 - Variação da lâmina d'água em função da declividade do fluxo.

**Variáveis:** *Macrotextura = 0,6 mm*    *n = 0,02*    *Inclinação transversal = Variável*  
*Coefficiente de escoamento = 0,85*    *Percurso de escoamento = 22,5 m*  
*Intensidade de chuva = 50 mm/hora*    *C(Andreatini) = 0,010*

De forma análoga à abordagem feita na Figura 4, é notório que as equações empíricas apresentam valores da estimativa de lâmina d'água em função da declividade do fluxo d'água no pavimento superiores às desenvolvidas por meio de metodologia analítica, sendo a exceção a equação de Andreatini que, apesar de analítica, apresentou curva mais próxima às desenvolvidas pelos métodos empíricos.

Verificou-se, ainda, a superposição dos resultados obtidos com o uso da equação proposta neste trabalho com os resultados da equação desenvolvida por Anderson (1998). Considerando os parâmetros apresentados na Figura 5, uma declividade da ordem de 2 %, utilizando a equação aqui proposta, resulta em uma estimativa da altura da lâmina d'água inferior a 2,0 mm na borda da pista de pouso e decolagem, para uma intensidade de chuva de 50 mm/h. Nesse caso, na ausência de deformações no pavimento, mesmo com essa intensidade de chuva considerável a altura da lâmina d'água não comprometeria a segurança das operações.

De acordo com Chesterton, Nancekivell e Tunnicliffe (2006) a equação do RRL utilizada na Nova Zelândia tem-se mostrado muito conservadora e que esse conservadorismo criou dificuldades para o projeto geométrico de pavimentos, acrescentando custos desnecessários aos projetos rodoviários da Nova Zelândia, assim como, fazendo com que os projetistas de rodovias precisassem manipular a geometria e os materiais envolvidos no projeto de forma a atender aos requisitos de lâmina d'água estabelecidos pela legislação daquele país.

Diante o exposto, Chesterton, Nancekivell e Tunnicliffe (2006) recomendaram a substituição do método adotado na Nova Zelândia pela fórmula de Gallaway, utilizada nos Estados Unidos e na Austrália, tendo em vista que esta se mostrou menos conservadora quando da análise da altura da lâmina d'água em um determinado projeto na Nova Zelândia e, ainda assim, adequada para este fim, conforme estudo de caso que os referidos autores publicaram. Todavia, Chesterton, Nancekivell e Tunnicliffe (2006) não abordaram, em seu trabalho, as equações mais recentes para estimativa da lâmina d'água.

Dessa forma, a equação que se vier a utilizar para estimar a lâmina d'água em

um pavimento aeroportuário pode implicar em maior ou menor restrição às operações, ou seja, uma equação muito conservadora pode manter uma pista de pouso e decolagem fechada por um período de tempo maior e de forma desnecessária. Portanto, uma adequada avaliação técnica e validação das equações devem ser feitas para o caso concreto.

Tendo em vista que a macrotextura é um dos principais fatores para a eliminação da água entre o pneu e o pavimento, produziu-se o gráfico apresentado na Figura 6 contendo a variação da lâmina d'água em função da profundidade da macrotextura. Cumpre salientar que as equações propostas por Gallaway e VERT (empíricas), PAVDRN, Anderson (1998) e Prado e Palma (2011) (analíticas) levam em consideração a profundidade da macrotextura.

Da análise do gráfico da Figura 6, nota-se que a altura da lâmina d'água estimada pelas equações do RRL e de Andreatini não sofrem influência da macrotextura, enquanto que a equação do VERT apresenta aumento na estimativa da lâmina d'água com relação à profundidade da macrotextura, destoando das demais equações. De modo semelhante ao ocorrido nos gráficos anteriores, a equação de Anderson se sobrepõe à equação de Prado & Palma.

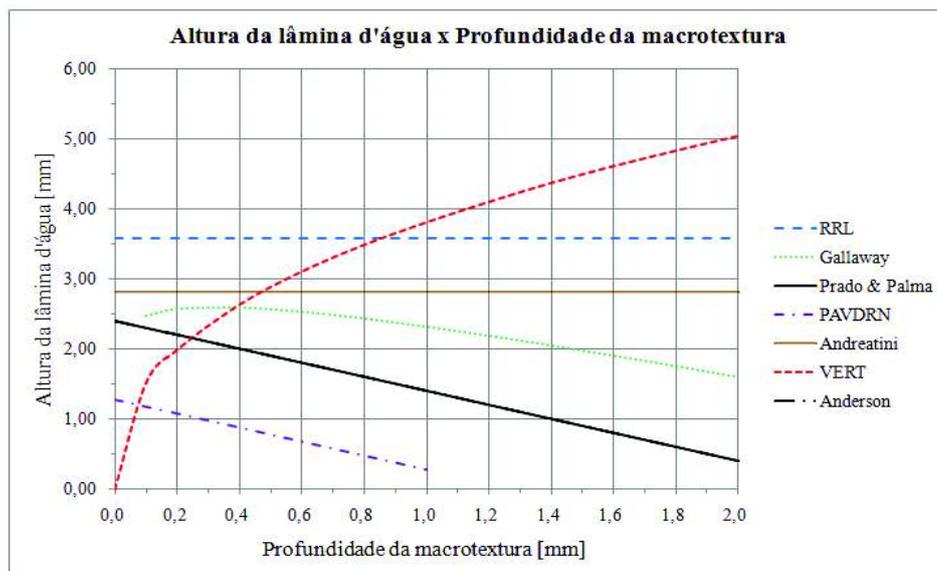


FIGURA 6 - Variação da lâmina d'água em função da profundidade da macrotextura.

**Variáveis:** *Macrotextura = Variável*     $n = 0,02$     *Inclinação transversal = 1,5 %*  
*Coefficiente de escoamento = 0,85*    *Percurso de escoamento = 22,5 m*

Intensidade de chuva = 50 mm/hora

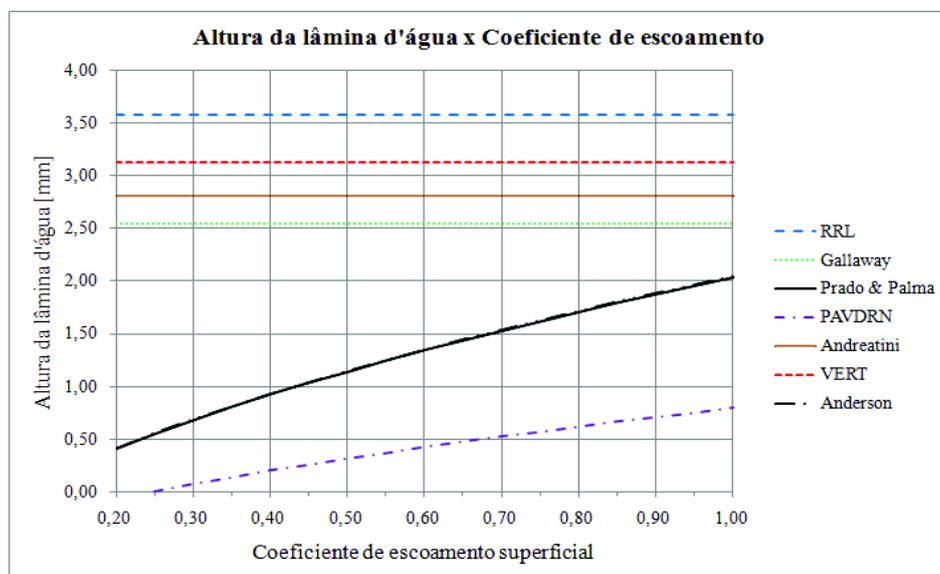
 $C(\text{Andreatini}) = 0,010$ 

FIGURA 7 - Variação da lâmina d'água em função do coeficiente de escoamento.

**Variáveis:** *Macrotextura* = 0,6 mm    *n* = 0,02    *Inclinação transversal* = 1,5 %  
*Coeficiente de escoamento* = Variável    *Percurso de escoamento* = 22,5 m  
*Intensidade de chuva* = 50 mm/hora     $C(\text{Andreatini}) = 0,010$

Uma análise adicional realizada foi a da verificação da influência do coeficiente de escoamento na altura da lâmina d'água sobre a superfície do pavimento, conforme mostrado no gráfico da Figura 7. Uma vez que as equações propostas pelo RRL, VERT, Andreatini e Gallaway não permitem - como um dos parâmetros de entrada para solução das equações - variar o coeficiente de escoamento, têm-se valores constantes para essas correlações e em função das variáveis estabelecidas no gráfico da Figura 7.

Já no tocante às equações de Prado e Palma (2011), Anderson(1998) e PAVDRN percebe-se que, quanto maior o coeficiente de escoamento superficial maior a altura da lâmina d'água, o que não poderia ser diferente, uma vez que quanto maior o coeficiente de escoamento menor é a quantidade de água que infiltra no pavimento, ficando a mesma livre para escoar superficialmente até alcançar o sistema de drenagem.

Novamente é possível verificar a superposição dos resultados obtidos por Prado e Palma (2011) com os resultados de Anderson (1998). Além disso, ainda é possível notar que em função das variáveis utilizadas para a elaboração do gráfico da Figura 7, os resultados do PAVDRN são menos conservadores que aqueles citados.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A equação desenvolvida pelos autores deste trabalho visa contribuir para a estimativa da espessura da lâmina d'água sobre a superfície de pavimentos aeroportuários, não impedindo sua aplicação também em pavimentos rodoviários. Tendo em vista que a aquaplanagem representa perigo para as operações aéreas, bem como para os veículos terrestres, e considerando a recomendação da ICAO de se limitar a espessura da lâmina d'água a no máximo 3,0 mm em pistas de pouso e decolagem, a formulação proposta visa facilitar a avaliação da espessura da água sobre pavimentos.

Recomenda-se que o valor do coeficiente de escoamento presente na *Equação xxxix* seja determinado por meio de ensaio específico para o pavimento em avaliação, apesar da existência de diversas tabelas relacionando o tipo de material e seu respectivo coeficiente de escoamento na literatura técnica da área. Em muitas pistas de pouso e decolagem existem ranhuras transversais (*grooving*) que se tornam facilitadoras para o escoamento superficial, bem como uma camada porosa de atrito, a qual, devido à macrotextura aberta, também facilita o escoamento na superfície.

O coeficiente de rugosidade de Manning também pode ser encontrado em tabelas da literatura técnica sobre escoamento superficial. No entanto, de forma análoga ao coeficiente de escoamento, a sensibilidade na estimativa desse coeficiente reflete na estimativa da lâmina d'água. Assim, recomenda-se que seja realizada uma média dos valores de rugosidade de Manning [n] referentes às áreas que contribuem para a vazão longitudinal do sistema de drenagem, ou seja, uma média do valor de [n] considerando a pista de pouso e decolagem e o acostamento.

Ressalta-se, ainda, que defeitos na superfície do pavimento podem induzir a formação de empoçamentos de água em pontos isolados. Dessa forma, a manutenção adequada dos pavimentos de modo a garantir a inclinação de projeto e a correção de eventuais deformações tem papel fundamental para a correta estimativa do valor da lâmina d'água, a qual se destina este trabalho.

A utilização de equipamentos específicos para se medir a irregularidade

combinado com uma adequada gerência de pavimentos e de manutenção tende a proporcionar maior segurança para as operações aéreas e terrestres, garantindo também a segurança dos seus usuários.

Conforme ilustrado na Figura 4, e considerando a equação dos autores deste trabalho, constata-se que os pavimentos projetados e mantidos de acordo com as normas estabelecidas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) – especificamente no tocante à profundidade da macrotextura e às declividades transversal e longitudinal – não apresentam indícios de possibilidade de formação de lâmina d'água superior a 3,0 mm. Apenas no caso de uma ocorrência de precipitação muito intensa, da ordem dos 100 mm/hora, é que seria obtida uma lâmina d'água superior a 3,0 mm. No entanto, uma deformação de 1,5 mm combinada com uma intensidade de chuva de 45 mm/hora já é suficiente para que se atinja o limite de lâmina d'água tolerável.

É importante frisar que a *Equação xxxix*, desenvolvida, é um meio para se avaliar a profundidade da lâmina d'água em pavimentos aeroportuários e necessita ser validada na prática, ficando como sugestão para trabalhos futuros. Nos dias de hoje, a existência de sensores e equipamentos mais modernos para se estimar essa lâmina d'água apresenta-se como uma forma de se validar a equação proposta, realidade bem diferente quando da elaboração, principalmente, dos modelos empíricos, há mais de 30 anos.

Por fim, apesar das equações aqui apresentadas considerarem a intensidade de chuva em uma taxa horária [mm/hora], para os casos de aplicação dessas equações em pavimentos aeroportuários com intuito de subsidiar a tomada de decisões operacionais, recomenda-se a utilização de uma resolução temporal mais alta, com taxa de, pelo menos, 10 minutos, e preferencialmente de 5 minutos.

## **ANALYTICAL METHODOLOGY FOR ESTIMATION OF WATER FILM DEPTH ON AIRPORT PAVEMENTS**

**ABSTRACT:** This work aims at deducing an equation to estimate water film depth on airport pavements, considering hydraulic equations, such as, for instance, the Manning's equation. The aquaplaning phenomenon is related to the occurrence of water in the interaction between the pavement and the aircraft tire. High-intensity rainfall can cause water film formation, increasing

the risk of aircraft directional control loss, which can have catastrophic consequences. Evaluation of the water film depth requires attention by aerodrome operators, in view of civil aviation operations safety. The International Civil Aviation Organization - ICAO - states that corrective maintenance measures should be put in action whenever a runway depression is such that allows the formation of water puddles with a depth greater than 3.0 mm. The determination of the water film depth on a pavement can either be done by instrumentation or be estimated through empirical and analytical equations, which are mentioned in this article. Comments are made on the disadvantages of instrumentation, as well as on the peculiarities of each empirical and analytical method addressed. The proposal shown in this article can be used to estimate the water film depth on pavements, in order to support decisions to be made by aerodrome operators.

**KEY WORDS:** Aquaplaning. Water film depth. Airport pavement. Rainfall intensity.

## REFERÊNCIAS

ANDERSON, D. et al. **Improved Surface Drainage of Pavement, Final Report.** NCHRP - National Cooperative Highway Research Program. TRB - National Research Council, Washington, 1998.

CHESTERTON, J.; NANCEKIVELL, N.; TUNNICLIFFE, N. The Use of the Gallaway Formula for Aquaplaning Evaluation. In: NZIHT & TRANSIT NZ ANNUAL CONFERENCE, 8., 2006.

CHIN, DAVID A. **Water- Resources Engineering.** New Jersey: Prentice Hall, 2000,

DOMENECHINI, L., LOPRENCIPE, G. **Validation of DEFSTRA Water Film Depth Prediction Model.** Università degli Studi di Firenze, Università degli Studi di Roma La Sapienza. Itália, 2003.

GALLAWAY, B. M., et. al., **Pavement and Geometric Design Criteria for Minimizing Hydroplaning.** Federal Highway Administration. Report N°. FHWARD-79-31, 1979.

HUEBNER, R. S. Reed, J.R., and Henry, J.J., Criteria for Predicting Hydroplaning Potential. **ASCE Journal of Transportation Engineering**, v. 12, n. 5, Sept., 1986.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Airport Service Manual: Pavement Surface Conditions ( DOC 9137, Part 2.)** 4. ed. Montreal: ICAO, 2002.

LUGAO, W.G. **Análise da aderência entre pneu e pavimento com camada porosa de atrito no Aeroporto Internacional Tancredo Neves – MG.** 2008. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2008.

OLIVEIRA, F. H. L. **Proposição de estratégias de manutenção de pavimentos aeroportuários baseadas na macrot textura e no atrito:** estudo de caso do aeroporto internacional de Fortaleza. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2009.

**PALMA, G., PRADO, L. A .CONSIDERAÇÕES SOBRE A FORMAÇÃO DE LÂMINA D'ÁGUA EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM DE AEROPORTOS. REVISTA CONEXÃO SIPAER V.3, N.1, NOV. 2011.**

**RODRIGUES FILHO, O. S. Características de Aderência de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários – Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas.** 2006. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2006.

**RODRIGUES, R. M. Parte II – Gerência de Pavimentos.** Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP, 2007.

**RUSSAM, K.; ROSS, N. F. The Deph of Rain Water on Road Surfaces.** Road Research Laboratory, Ministry of Transport Report No. LR 236. 1968.

**SOARES, A.F.S. Análise da ocorrência de hidroplanagem num caso real.** 2011. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal, 2011.

**TOMAZ, Plínio. Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais.** São Paulo: Navegar, 2002.

**YOUNG, G.K., WALKER, F. CHANG S.E. Design of Bridge Deck Drainage Hydraulic Engineering Circular 21.** Federal Highway Administration, FHWA-SA-92-010, May, 1993.