

## 4

### Acoplamento entre água superficial – água subterrânea

Os processos hidrológicos presentes no modelo proposto, incluem a precipitação, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo de acordo com a Figura 4.1. O processo de extração de água pelas plantas, está implementado no SWMS3D. No entanto, não foi utilizado em nenhuma simulação do modelo acoplado.

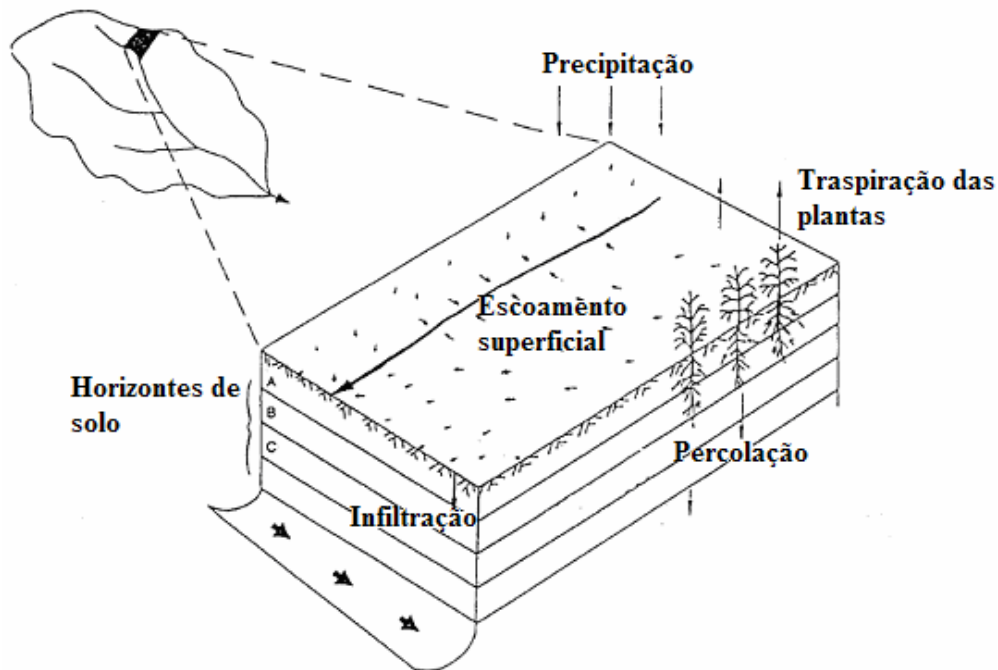


Figura 4.1 - Representação dos processos hidrológicos abordados, para uma fatia de solo em uma bacia hidrográfica. (Fonte USDA, 1995)

#### 4.1.

#### Conceitos gerais da interação água superficial – subterrânea

Inicialmente, cabe definir o conceito de água superficial, como a parcela armazenada ou fluindo sobre a superfície, que está continuamente interagindo com a atmosfera e com o solo (Chow *et al.*, 1988). Sua ocorrência é espacialmente e temporalmente distribuída, dependendo de fatores climáticos,

topográficos, tipo de cobertura vegetal e das propriedades hidráulicas do solo (Kollet *et al.*, 2005).

Horton (1933) sugere a seguinte definição para escoamento superficial: “Negligenciando a interceptação pela vegetação, escoamento superficial é a parcela de chuva que não é absorvida pelo solo através da infiltração. Se o solo tem uma capacidade de infiltração  $f$ , expressa por comprimento da lâmina de água absorvida por tempo, então, quando a intensidade de chuva  $i$  é menor que  $f$  a precipitação é totalmente absorvida, não havendo empoçamento. No entanto, se a precipitação  $i$  for maior que a infiltração  $f$ , o empoçamento vai ocorrer na taxa  $(i-f)$ ”.

Escoamento superficial hortoniano raramente ocorre em superfícies com densa vegetação em regiões úmidas. Abaixo destas condições, a capacidade de infiltração do solo excede a intensidade de precipitação. Nestas situações, o fluxo subsuperficial passa a ser o principal mecanismo de transporte de águas de chuva para rios. (Chow *et al.*, 1988).

Modelos acoplados são comumente baseados no conceito de condutância, que presume uma distinta interface entre a superfície do solo e o domínio do subsolo. Estes tipos de modelos ligam o domínio superficial ao subterrâneo via fluxos, dependentes das direções e magnitude do gradiente hidráulico e da constante de proporcionalidade ou condutividade do meio (Kollet *et al.*, 2005)

Diferentes formas de escoamento podem ser desenvolvidas sobre uma bacia hidrográfica, tais como: rios, lagos ou escoamentos lentos em regiões pantanosas, os quais estão diretamente ligados às características de drenagem da bacia e hidráulicas do solo.

#### **4.1.1. Interação entre escoamentos em rios e solo**

Considerando a relação entre um rio perene ou canal aberto, conectado ao lençol freático, o padrão de fluxo pode ocorrer de duas formas básicas como apresentado na Figura 4.2 (USGS, 1998).

No caso onde, o nível piezométrico da água subterrânea é maior que o nível do rio, esse é abastecido ou alimentado pelo lençol freático, como mostra a Figura 4.2A.

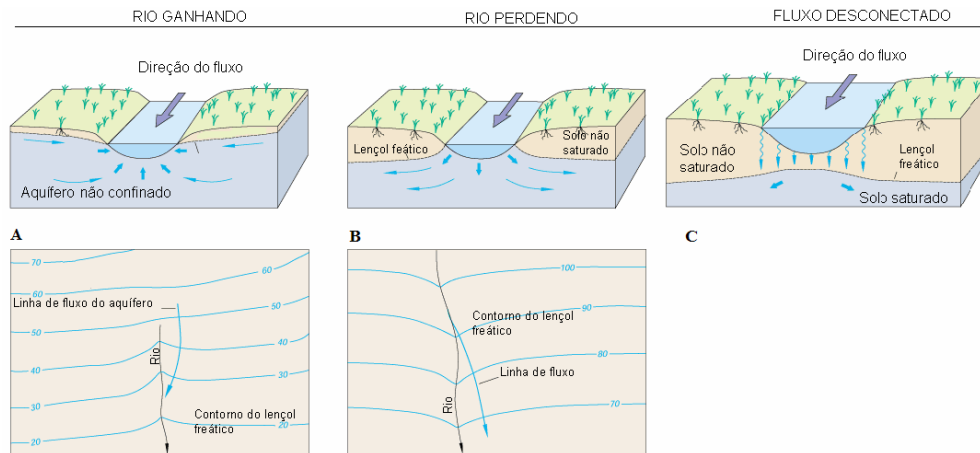


Figura 4.2 - Fluxo entre rio e lençol freático conectados. (A) Sentido de fluxo solo – superfície. (B) Sentido de fluxo superfície – solo. (C) Rios desconectados são separados do nível freático através de uma zona não saturada (fonte USGS 1998).

Uma segunda situação, ou a situação inversa, ocorre quando o nível do lençol freático está abaixo do nível do rio, fazendo com que o sentido do fluxo aponte do rio para o solo, como mostra a Figura 4.2B. Contudo, situações onde não há fluxo entre os sistemas ou mistas também podem ocorrer.

A situação mista retrata o fluxo no sentido solo – rio, em um lado da margem e no sentido oposto na outra margem.

O equilíbrio do sistema pode ocorrer quando não há gradiente de pressão, de modo que o nível do lençol freático iguale-se ao nível da água no rio.

Tanto a Figura 4.2A quanto Figura 4.2B, trazem um mapa simbólico de curvas de nível para cargas totais, mostrando o sentido do fluxo subterrâneo em planta.

Nem sempre encontramos o solo abaixo de um rio completamente saturado. Nesse caso, o aquífero e o rio encontram-se desconectados, como mostra a Figura 4.2C. Neste caso o fluxo superficial contribui com o soerguimento do nível freático. Esta contribuição ocorre através de fluxo descendente na zona não saturada.

#### 4.1.2. Interação entre escoamentos superficiais lentos e solo

Os tipos de interação entre fluxo subterrâneo e lagos são similares às interações descritas no item anterior. A principal diferença, é que lagos em geral, possuem uma extensa área de fundo e um padrão de circulação na superfície lento, propiciando o acúmulo de sedimentos de baixa permeabilidade. A

velocidade de percolação é frequentemente maior ao redor dos lagos, onde as ações das ondas podem restringir a deposição de sedimentos finos (USGS, 1998).

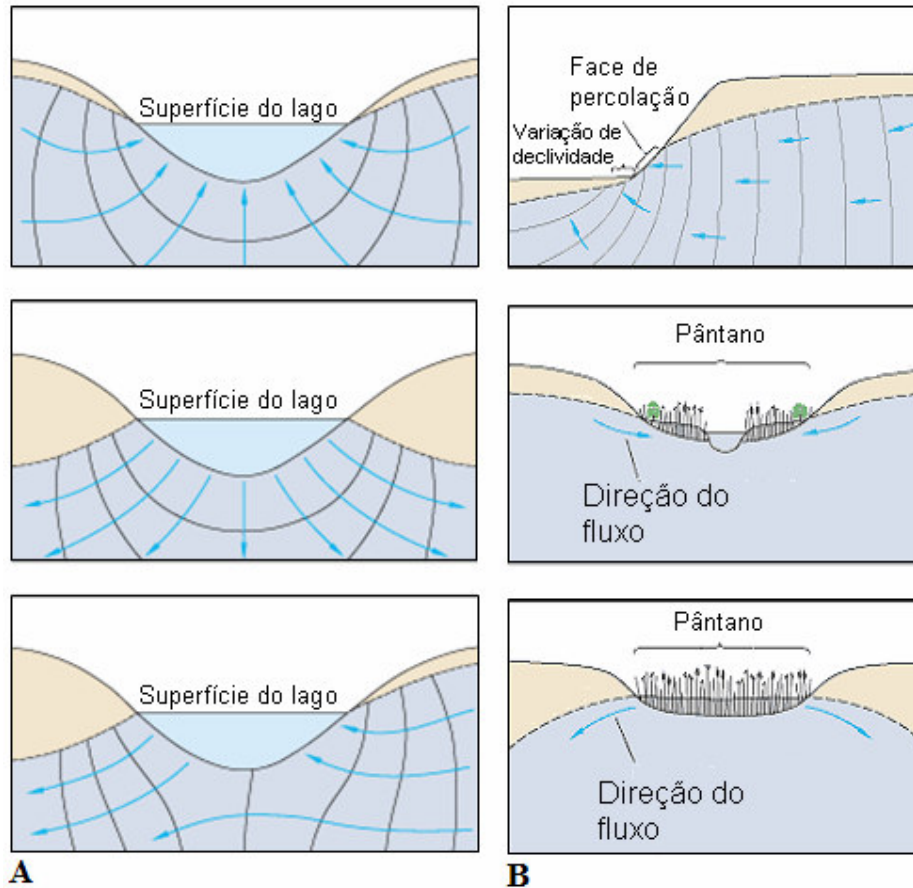


Figura 4.3 - Interações entre lago – solo e pântanos – solo.

Regiões pantanosas podem ocorrer em baixadas ou zonas de baixa declividade, formando zonas com características hidráulicas particulares, com muita resistência ao escoamento e ambiente de baixo gradiente hidráulico, os quais controlam o escoamento superficial (Feng *et al*, 1998).

Muitas vezes, todas essas situações podem estar presentes em uma bacia hidrográfica, mostrando a dificuldade de retratá-la como ilustrada na Figura 4.4. Desta forma, a escolha do modelo e sua implementação, devem ser coerentes com a realidade, observando as simplificações adotadas e relacionando-as com a possibilidade de estar aferindo bons resultados na simulação.

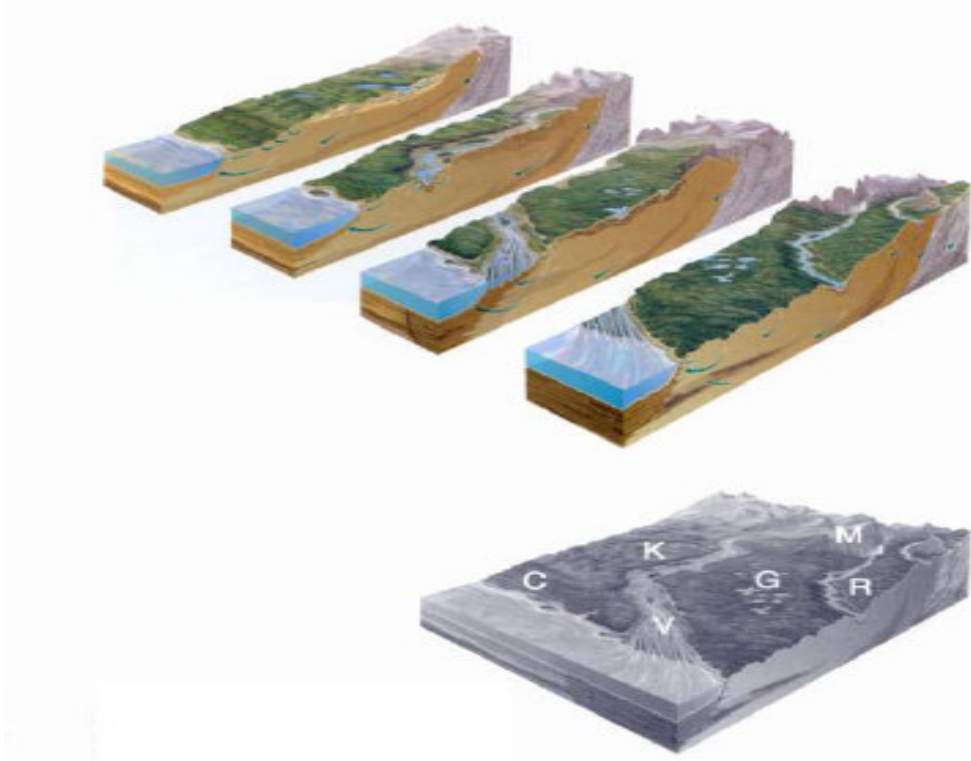


Figura 4.4 – Água subterrânea e superficial interagindo através do relevo, na direção das montanhas para o oceano. Descrição do modelo conceitual: M – Montanhas; K – Karst, G – Glacial; R – rio de vale pequeno; V – rio de vale largo; C – costa oceânica. (fonte USGS, 1998)

### 4.1.3. Infiltração

O ponto central no processo de interação entre água superficial e subterrânea é o fenômeno de infiltração, que pode ser definida como o processo de penetração de água no estado líquido da superfície do solo para seu interior. Muitos fatores influenciam sua taxa, incluindo as condições da superfície do solo, sua cobertura vegetal e suas propriedades hidráulicas, como porosidade, condutividade hidráulica e umidade (Chow *et al.*, 1988). A água é absorvida pelo solo não saturado, em função da ação gravitacional e da umidade do solo, constituindo-se de um processo tipicamente transiente (Prevedello, 1996)

Em condições de não saturação, a permeabilidade do solo é inferior à sua permeabilidade de saturação e pode ser escrita em função da carga de pressão ou da umidade volumétrica do solo. No entanto, esse efeito é inverso para o potencial de infiltração no solo. Quando o solo não está saturado, a carga de pressão é negativa e os vazios entre os grãos do solo atuam como tubos

capilares que “succionam” a água da superfície. Quando os vazios estão preenchidos apenas por água, o fluxo é geralmente ocasionado pelo efeito da força gravitacional ou cargas impostas.

A infiltração é um processo que ocorre somente na direção vertical, simplificando a equação de Richards. Contudo, trata-se de uma equação diferencial parcial de segunda ordem, não linear. Devido a não linearidade, sua solução analítica geral não é conhecida. Uma alternativa para contornar esse problema é procurar simplificações que visem linearizá-la e tornar o problema solúvel, sem, contudo comprometer as características essenciais do processo de fluxo. Outra alternativa é fazer uso do cálculo numérico (Prevedello, 1996).

Após um determinado período de tempo de infiltração num perfil de solo uniforme, a distribuição da umidade com a profundidade pode ser caracterizada pelas seguintes zonas: zona saturada, zona de transição, zona de transmissão, zona de molhamento e frente de molhamento.

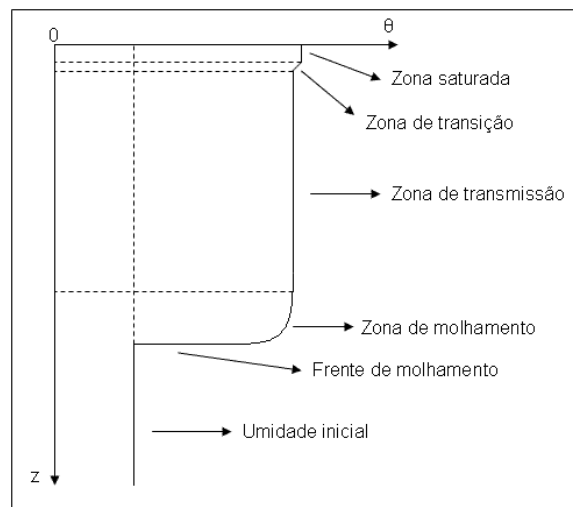


Figura 4.5 - Perfil de umidade e suas características, após algum tempo de iniciada a infiltração (Fonte Prevedello, 1996, modificada).

A zona saturada é normalmente próxima à superfície, seguida da zona de transição caracterizada como pouco espessa e de decréscimo de umidade, muitas vezes imperceptível. Na zona de transmissão ocorre fluxo não saturado, com pouca variação de umidade ao longo da profundidade, mas com variação significativa de espessura. A zona de molhamento apresenta uma variação brusca de umidade e pouca espessura. Por fim, a frente de molhamento, limite visível da penetração da água, apresenta grande gradiente de pressão.

A infiltração acumulada  $F$  [L] é a coluna de água acumulada durante um período de tempo ou o volume de água que penetrou no solo por unidade de área de infiltração. A infiltração acumulada pode ser escrita em função da infiltração  $f$  [L/T], pela sua integral no tempo dada por:

$$F(t) = \int_{t_0}^{t_f} f(t) dt \quad (4.1)$$

Segundo Prevedello (1996) a infiltração acumulada para um intervalo de tempo definido pode ser expressa da forma:

$$F = \int_{z=0}^{z=z} (\theta - \theta_i) dz.$$

Onde  $z$  é a profundidade na direção do fluxo,  $\theta$  é a umidade volumétrica ao longo da profundidade e  $\theta_i$  é a umidade volumétrica inicial do perfil.

A velocidade de infiltração para um solo não saturado pode ser relacionada com o tempo ou com a infiltração acumulada. O aumento da umidade ou decréscimo do potencial mátrico do solo, com relação à infiltração acumulada, é apresentado na Figura 4.9. O início do gráfico representa uma situação de solo seco onde o potencial de infiltração é muito grande e à medida que o solo umedece, pela imposição de uma carga na superfície, a velocidade de infiltração decai até atingir uma taxa constante.

Diversos autores que desenvolveram modelos acoplados, baseados na visão hortoniana, utilizam soluções analíticas para o cálculo da velocidade de infiltração (Lança, 2000; Fiedler *et al.*, 2000; Flanagan, 1995). Neste trabalho, o cálculo da infiltração é feito numericamente pelo programa SWMS3D modificado. Os modelos analíticos como de Horton (1933,1939), Philip (1957) e Green-Ampt (1911), supõem uma pequena e constante lâmina d'água na superfície do solo (Chow *et al.*, 1988). No entanto, durante um evento de chuva, só haverá empoçamento se a precipitação for maior que a capacidade de infiltração do solo. O tempo para iniciar o empoçamento a partir do início de um evento constante de precipitação é denominado tempo de empoçamento ( $t_e$ ).

Considerando que, um evento de chuva inicia-se com a superfície do solo inicialmente seca e um perfil de umidade como mostra a Figura 4.6, a capacidade de infiltração do solo pode ser maior que a intensidade da chuva,

enquanto o tempo de precipitação ( $t_p$ ) for menor que o tempo de empoçamento ( $t_p < t_e$ ). Quando a duração da chuva se iguala ao tempo de empoçamento ( $t_p = t_e$ ), imediatamente a superfície do solo passa de não saturada para saturada. Com a continuidade da precipitação ( $t_p > t_e$ ) a zona saturada estende-se no perfil do solo e o excesso de precipitação gera o escoamento superficial segundo Horton (1933).

No modelo acoplado desenvolvido pode ocorrer a presença de cargas na superfície, fluxo imposto ou uma condição sem fluxo no contorno. Esta última condição permite uma redistribuição natural da umidade no solo, tendendo para um conceito muito utilizado na agricultura que é o de capacidade de campo, definida na física do solo como a máxima quantidade de água que o solo pode reter contra a ação da força gravitacional terrestre (Prevedello, 1996).

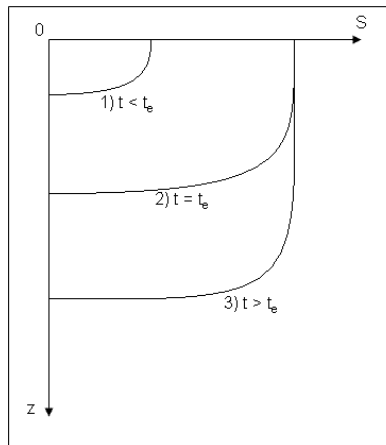


Figura 4.6 – Perfis de grau de saturação em relação ao tempo de empoçamento.

Considerando uma precipitação  $p$  [L/T] sobre um solo com perfil dado pela curva 1 da Figura 4.6, a capacidade de infiltração do solo é maior que a intensidade da chuva  $p$ . Desta forma, a velocidade de infiltração  $i$  [L/T] é dada por  $p$  sendo  $i = p$ , como mostra a Figura 4.7A. Quando as curvas  $a$  e  $b$  (Figura 4.7A) se encontram, ocorre o início do empoçamento ( $t_e$ ) e a capacidade de infiltração passa a ser inferior a precipitação, ocasionando um déficit na infiltração e a saturação da superfície. É neste ponto que um modelo acoplado passa a ser mais realista que um modelo unicamente de meios porosos. No modelo acoplado o empoçamento é considerado, gerando uma carga na superfície, que é tratada pelo modelo superficial. Desta forma, a velocidade de infiltração calculada pelo SWMS3D modificado, passa a considerar o efeito do empoçamento, ao contrário dos modelos analíticos citados.



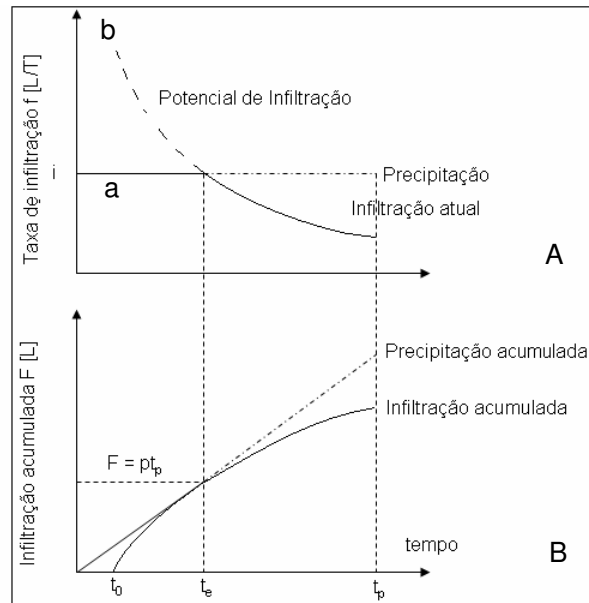


Figura 4.7 – Velocidade de infiltração e infiltração acumulada dada um valor constante de precipitação.

No instante do empoçamento, a infiltração acumulada é dada pela expressão  $F = p \cdot t_p$  tendo um comportamento linear até este ponto. O tempo  $t_0$  ilustrado na Figura 4.7B representa o tempo inicial equivalente que um evento de precipitação  $p$  teria para que toda a capacidade de infiltração do solo fosse utilizada.

Se ao invés de um fluxo prescrito houvesse uma carga imposta na superfície, a capacidade de infiltração seria totalmente aproveitada ao longo do tempo.

## 4.2.

### Descrição da implementação numérica de acoplamento

Visto algumas características da interação entre os sistemas, este trabalho partiu de uma abordagem tratando-os como independentes e interligados através de uma rotina de acoplamento que atua entre as interfaces. Essa idéia está apoiada na solução numérica adotada, interpretando que um sistema atua diretamente no outro, de forma a condicionar as trocas de fluxos através das variáveis de contorno.

Dessa forma, o modelo acoplado gerado pode ser dividido em três módulos principais: o módulo de fluxo em meios porosos (SWMS3D' ou

SWMS3D modificado), de escoamento superficial (SURF) e módulo de interação.

Inicialmente, adotou-se como modelo de fluxo em meios porosos, o programa SWMS3D desenvolvido por Simunek *et al.*, (1995), intitulado pelos autores como código de domínio público, podendo ser copiado e utilizado livremente. Este programa simula transporte de água e soluto nas três dimensões em um meio de saturação variável. O programa resolve numericamente a equação de Richards, para fluxo em meio saturado e não saturado e a equação do transporte de soluto. A região de fluxo, considerada no modelo, pode ser composta de solos heterogêneos e anisotrópicos, permitindo atribuir às condições de carga, fluxo ou gradientes, nos contornos, sendo os dois primeiros constantes ou variáveis (controlados por condições atmosféricas).

O programa de escoamento superficial foi desenvolvido em dois submódulos distintos baseados nas equações de Saint Venant, sendo estes: o modelo da onda cinemática e o modelo difusivo. O modelo da onda cinemática permite a imposição de cargas ou fluxos a montante do seu contorno e chuvas distribuídas em todo seu domínio, considerando o modelo hortoniano de escoamento superficial. Neste modelo, as características físicas da bacia são atribuídas ao coeficiente de Manning e declividade.

Esse modelo, apesar de suas limitações físicas (descritas no capítulo 2), foi amplamente utilizado na literatura. O modelo cinemático foi implementado, dada sua simplicidade e por se enquadrar a casos como escoamentos em micro bacias ou encostas, atribuídos à chuva efetiva. A direção do fluxo superficial é fixa tomando o sentido da declividade nodal. Cabe lembrar, que no modelo cinemático, a declividade da superfície da carga total é igual à declividade topográfica.

O modelo de difusão abrange o modelo da onda cinemática e extrapola seus conceitos, incorporando o efeito de gradiente de pressão na superfície d'água, além de permitir efeitos de jusante como marés, zonas com superfície fraturada ou barramento de fluxo.

A ordem de execução dos módulos principais durante a solução do problema transiente, é cíclica e está representada pelo fluxograma de Figura 4.8. Cada ciclo completo representa a evolução de um passo de tempo do modelo acoplado.

Este fluxograma é um esquema macro de interações entre os módulos, não discriminando as variáveis de intercâmbio, simbolizando apenas a ordem dos chamados das rotinas no modelo acoplado.

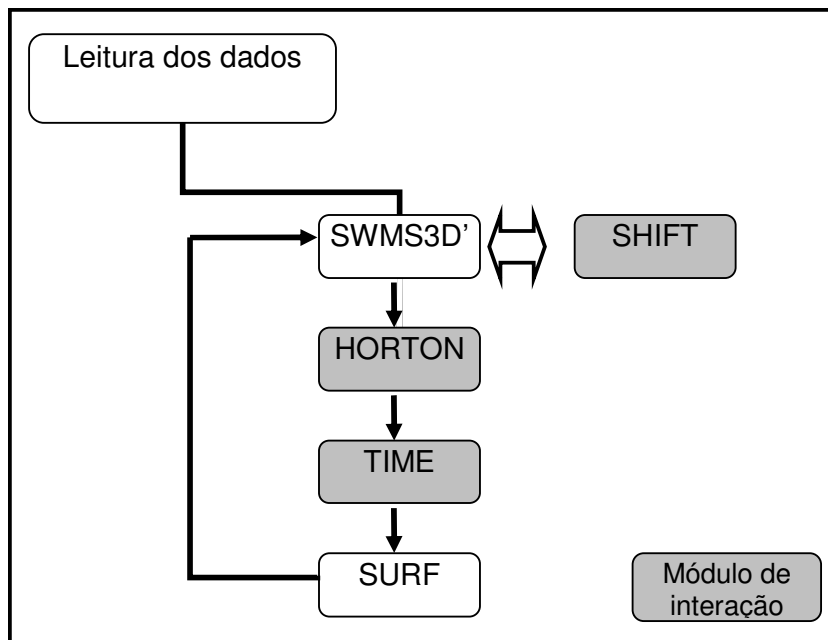


Figura 4.8 – Fluxograma de interação entre os módulos principais.

Os quadros preenchidos de cor cinza fazem parte do módulo de interação e será descrito com detalhe neste capítulo.

O início do ciclo é dado após a leitura dos dados de entrada de forma independente para cada sistema. Em seguida, o programa inicia o módulo SWMS3D', para a montagem do sistema de equações, referente ao intervalo de tempo  $t+dt$  do meio poroso. Suas atribuições de condições de contorno são feitas pela função SHIFT. Estas atribuições fazem à interação nos sentidos, superfície-solo e solo-superfície, retornando ao SWMS3D', para a solução do sistema de equações e verificação do teste de convergência em cada iteração. Caso não haja a convergência do método, extrapolando o número máximo de iterações permitidas, o módulo SWMS3D' diminui o intervalo de tempo utilizado, mantendo as condições de contorno fixas, sempre retornando a função SHIFT. Na seqüência, o programa chama a função HORTON, que calcula o valor do escoamento hortoniano e a função TIME que determina o número de passos de tempo a rodar do módulo SURF, a partir da defasagem temporal entre os modelos. Para fechar um ciclo, o programa resolve o escoamento superficial através da rotina SURF, retornando para o módulo SWMS3D'.

Desta forma, o modelo acoplado é o produto final da junção dos modelos de escoamento superficial e do programa SWMS3D'. O módulo de interação

representa o meio de comunicação entre os modelos, assumindo o papel de gerenciá-lo e coordená-los.

### 4.3. Módulo de interação

O módulo de interação consiste em três rotinas principais: SHIFT, HORTON e TIME.

TIME: Esta rotina está implementada no módulo de escoamento superficial e calcula o número de iterações no tempo para que haja uma sincronia temporal entre os modelos. Essa rotina será discutida na seção 4.3.1. e faz a acoplagem no sentido solo - superfície.

HORTON: função responsável pelo chamado do módulo superficial pelo SWMS3D'. Nela está o cálculo do escoamento hortoniano, passando para o módulo superficial à precipitação líquida, podendo ser positiva, quando a taxa de chuva é maior que a velocidade de infiltração, negativa na situação oposta, ou nula quando o solo permite toda a infiltração da água da chuva. Esta função faz o acoplamento no sentido solo - superfície.

SHIFT: Rotina implementada no SWMS3D', responsável pela acoplagem em ambos os sentidos, tanto solo-superfície como superfície-solo. Baseada na condição de contorno atmosférica do SWMS3D', esta rotina visa impor as condições de carga ou de fluxo no contorno superior do domínio subterrâneo, de acordo com as condições apresentadas no módulo superficial, além de atribuir a todo o domínio superficial do relevo, uma possível condição de superfície de percolação, isto é, possibilitando o afloramento do lençol freático na superfície.

A função HORTON calcula a precipitação líquida através da equação:

$$R_n = P_n - I_n \quad (4.2)$$

Onde  $R$  é a precipitação líquida que será atribuída ao sistema superficial [L/T], podendo ser positiva, negativa ou nula,  $P$  é a precipitação conhecida [L/T] e  $I$  é a infiltração calculada pelo SWMS3D' [L/T]. O contador  $n$  representa o nó

da malha na superfície topográfica. O valor do índice  $n$  varia de acordo com o sistema, para um mesmo nó.

Os valores de precipitação no tempo são dados inicializados pelo SWMS3D', sendo necessário fornecer o período de cada precipitação, isto é, o tempo de início e término de cada taxa de chuva, sendo que um evento de precipitação, pode ter taxas variadas, contanto que esses valores sejam indicados temporalmente. No entanto, a limitação vem do fato da precipitação ser considerada constante no espaço.

A função SHIFT, responsável pela interação em ambos os sentidos, é implementada inteiramente no módulo subterrâneo. Sua função é atribuir nas condições de contorno do SWMS3D' as condições superficiais. Na existência de carga positiva na superfície em um dado nó, esta será prioritariamente imposta ou na existência de carga negativa a condição de fluxo será imposto. No caso de imposição de fluxo, este será o valor da precipitação, podendo ser nulo nos tempos onde não ocorre chuva.

O algoritmo da função SHIFT baseia-se na hipótese, de que a condição de contorno pode ser de fluxo (Neumann) ou de carga (Dirichlet). A cada interação do modulo SWMS3D', as condições de contorno são impostas e as trocas seguem o seguinte algoritmo base:

- Se a condição é do tipo de Dirichlet, testa-se sua conversão para condição de fluxo;
- Se a condição é do tipo de Neumann, testa-se sua conversão para condição de Dirichlet.

No processo iterativo a cada atribuição de contorno, a função SHIFT é chamada para avaliar as atribuições de contorno a cada nó. O fluxograma da Figura 4.9 mostra a interação entre o módulo SWMS3D' e a função SHIFT (representada pelos quadros brancos), apresentando a implementação detalhada do algoritmo descrito acima.

De acordo com a Figura 4.9, a primeira avaliação da rotina é verificar se a condição nodal atual é de Dirichlet (carga prescrita). Caso seja verdadeiro e não havendo cargas de pressão positivas na superfície, é feita a transferência de condição de Dirichlet para Neumann (fluxo prescrita). Nota-se que, se a precipitação for nula, a última verificação sempre será atendida e uma situação

de fluxo zero é imposta, ocorrendo à redistribuição natural da umidade no solo.

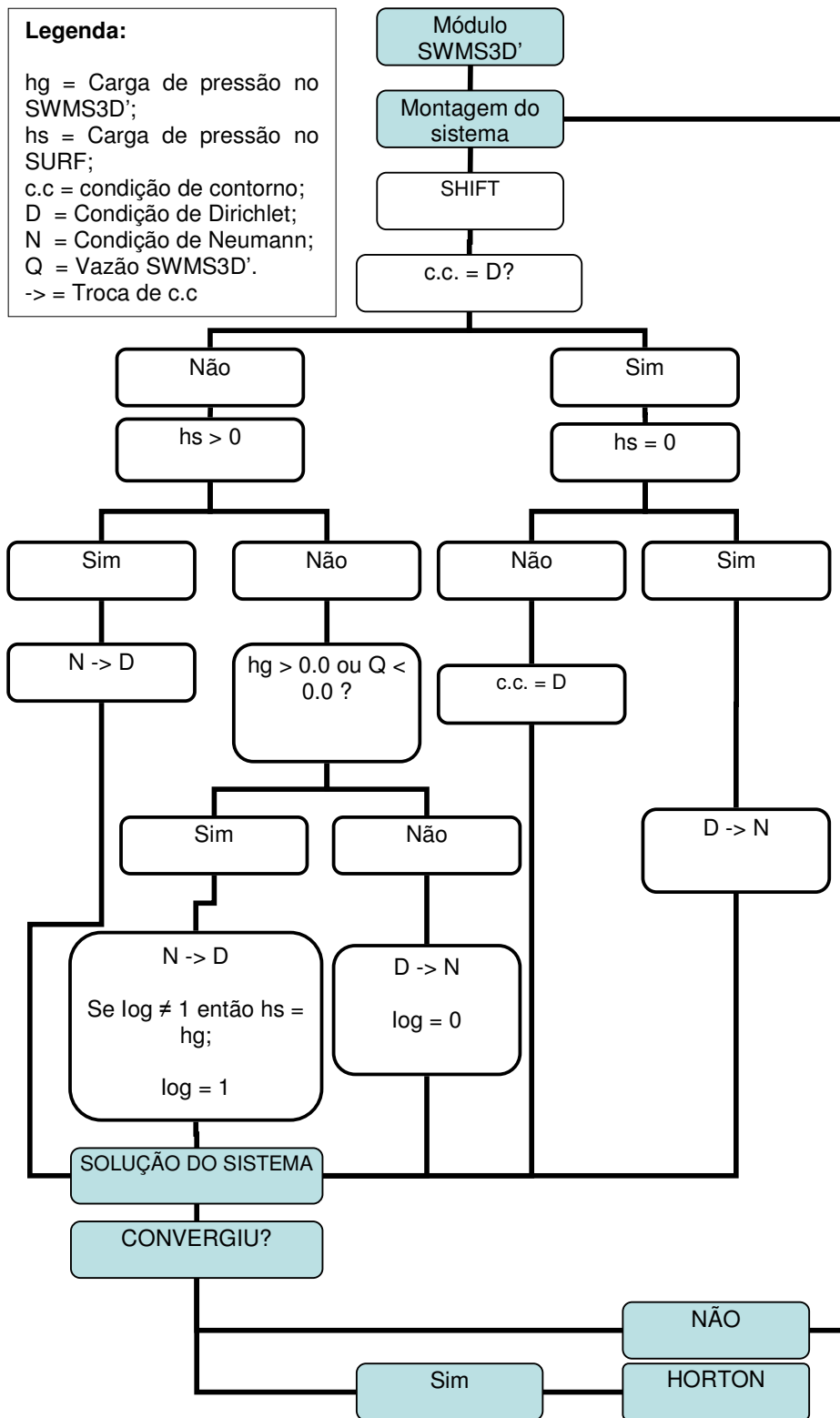


Figura 4.9 – fluxograma de ações da rotina SHIFT.

No entanto, se a verificação de carga não for verificada, a condição de Dirichlet se mantém e a carga do sistema superficial é imposta no sistema subterrâneo.

Se a primeira verificação não for verdadeira, isto é, não há uma atribuição para condição nodal de Dirichlet, o programa entrará no segundo item do algoritmo base descrito acima e fará a verificação para transferência da condição de Neumann para Dirichlet. Esse procedimento se inicia pelo questionamento prioritário, da existência de lâmina de água na superfície. Caso seja verdadeira, ocorre à transferência de condição de fluxo para carga.

Uma variável lógica (log) foi criada para o auxílio na identificação de superfícies de percolação e início de empoçamento. Seus valores nodais atribuídos são 0 para nós sem afloramento de água na superfície e 1 para nós que estão em processo de percolação no sentido solo - superfície.

Para um nó com condição de contorno de Neumann e carga nula no modelo superficial, onde, verifica-se que a carga calculada pelo SWM3D' é positiva, ou o fluxo no contorno aponta para fora do domínio, a condição de contorno é automaticamente transformada para uma condição de Dirichlet. Se a variável lógica for nula, a carga calculada pelo SWMS3D' é imposta no vetor do sistema superficial. Após essa etapa, a carga na superfície do módulo SWMS3D` é igualada a carga do modelo superficial e o programa segue suas iterações.

A variável lógica (log) atribuída por nó da malha (inicializada com zero), e retrata a informação do momento e do ponto onde ocorre o afloramento de água ou o início do empoçamento, tornando espacialmente variável esse fenômeno. Após a mudança de valor da variável log de 0 para 1 e impondo a condição de Dirichlet, sua imposição de carga refletirá no cálculo de uma vazão que será atribuída ao módulo superficial. A vazão tenderá a ser negativa ou de saída do sistema subterrâneo, contribuindo para o fluxo superficial.

Após a formação de fluxo superficial e o término da precipitação, se um agente drenante estiver atuando no sistema subterrâneo, a vazão de percolação passará a ser positiva, ou seja, ao invés de fluxo de saída haverá uma tendência de fluxo de entrada no domínio subterrâneo. Caso não haja precipitação, o fluxo para o solo é nulo, causando o rebaixamento do nível do lençol freático e conseqüentemente, do nível da água na superfície do terreno. Quando a lâmina de água na superfície infiltrar no solo ou escoar pela superfície por completo, a variável lógica voltará a ser 0 (nula), podendo admitir fluxo imposto no terreno. Situação que pode ser interpretada como a passagem do solo do estado de

saturado para não saturado na superfície e com capacidade de infiltração maior que a precipitação prescrita.

Ao fim da função SHIFT o sistema de equações é resolvido e testa-se a convergência da solução. Se o erro da solução não convergir para uma determinada tolerância, reinicia o processo iterativo. Caso contrário, o programa segue para o módulo superficial (SURF), passando antes pelo módulo de interação chamando a rotina HORTON e TIME, essa que será abordada no próximo item.

Cabe ressaltar, que essas rotinas de acoplamento são baseadas na condição de que, quando existe carga imposta na superfície, o programa SWMS3D' retorna uma vazão e quando há uma vazão prescrita, o programa retorna uma carga calculada, sempre avaliando os valores nodalmente.

#### **4.3.1. Acoplamento temporal**

A escala temporal das variações do fluxo superficial é da ordem dos minutos e horas enquanto que a escala para meios porosos geralmente varia na escala de horas, dias ou meses (USGS, 1996). Assim, é necessário permitir que decorram vários passos de tempos no modelo superficial, para que haja a sincronia com um único intervalo de tempo do modelo subterrâneo.

Ao fim de cada passo de tempo do SWMS3D', é feita uma chamada ao modelo superficial, o qual roda o número de passos de tempo que correspondem ao tempo simulado pelo SWMS3D'. Esse esquema requer que o intervalo de tempo do modelo superficial seja menor ou igual ao modelo de meios porosos. A necessidade da existência de um intervalo de tempo para o modelo superficial maior que o de água subterrânea é descartado.

O modelo de acoplamento desenvolvido pela USGS denominado MODBRANCH faz a integração do programa MODFLOW (fluxo em meio porosos) e BRANCH (fluxo em canais abertos) (Swain *et al*, 1996), fazendo uso da relação entre as escalas temporais descritas acima, com a restrição de serem múltiplas. Esse modelo calcula o fluxo entre rios e aquíferos a partir dos gradientes de cargas totais entre eles, onde cabe salientar, que o modelo BRANCH não possuía, em sua versão inicial, a consideração de perdas por percolação. Assim, após essa implementação é referenciado como BRANCH'.

O esquema de interação desenvolvido para o MODBRANCH é iterativo. No qual, cargas totais no início e no fim de um passo de tempo são inicializadas



com os valores do fim do passo de tempo anterior. O BRANCH' é chamado, e com a interpolação das cargas do modelo subterrâneo no tempo, os fluxos superficiais são calculados para cada intervalo de tempo do modelo BRANCH'. A percolação total é calculada simultaneamente. O modelo retorna para o início do passo de tempo do MODFLOW e as cargas são recalculadas com a imposição da percolação gerada. O modelo BRANCH' é chamado novamente, suas cargas e fluxos retornam aos valores referentes ao início do passo de tempo do modelo subterrâneo e suas cargas e fluxos são recalculados utilizando os novos valores das cargas do modelo de água subterrânea (Figura 4.10). Esse processo é repetido até atingir o critério de convergência baseado nas cargas e fluxos calculados (Swain *et al*, 1996). Aprovado o critério, inicia-se o próximo passo de tempo, voltando ao processo iterativo.

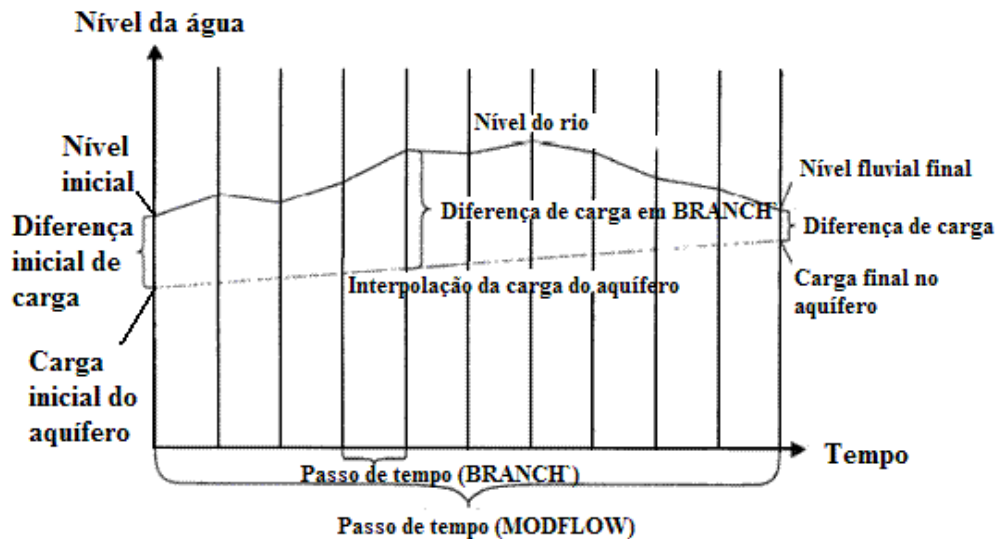


Figura 4.10 – Diferenças de cargas entre os modelos BRANCH' e MODFLOW (Fonte USGS, 1996).

A escala de tempo sugerida neste trabalho utiliza uma formulação semelhante à apresentada no modelo MODBRANCH. A mudança é referente à relação entre os intervalos de tempo que não precisam ser múltiplos entre si. A evolução no tempo dos sistemas é ditada pelo SWMS3D', que a cada interação chama o modelo de escoamento superficial e passa o valor do passo de tempo. Este é comparado com o valor inicial do modelo superficial, se o valor passado for menor, igualam-se os intervalos, no entanto, se o passo de tempo for maior, o programa calcula o número de iterações necessárias para a sincronia dos modelos. O cálculo do número de iterações (representado na Figura 4.11 por  $n$

$dt\_SURF$ , onde,  $n$  representa o número de intervalos e  $dt\_SURF$ , o valor do intervalo de tempo do modelo superficial) é dado pela razão entre os intervalos, com o passo de tempo do SWMS3D' no numerador. O resto da divisão é incrementado no último passo de tempo do modelo superficial (representado pelo passo  $dt_+$  na Figura 4.11).

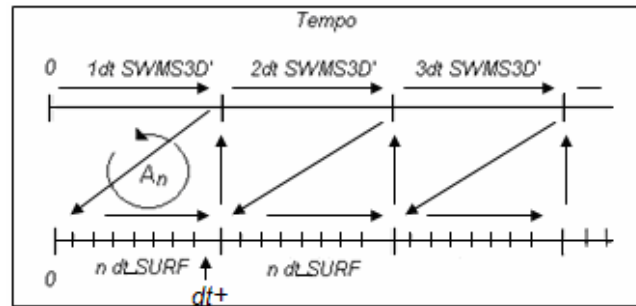


Figura 4.11 – Sincronia temporal entre os modelos superficial e subterrâneo.

O passo de tempo do SWMS3D' é dinâmico e varia em função da convergência do método iterativo de solução da não linearidade, fazendo com que o intervalo de tempo do modelo superficial seja adaptável. O intervalo de tempo é lido nos arquivos de entrada e seus incrementos ou decrementos são ajustados automaticamente de acordo com a seguinte regra:

- A discretização da solução numérica deve coincidir com a prescrita para as condições de contorno e de plotagem;
- O intervalo de tempo calculado entre as iterações deve estar entre os valores de máximo e mínimo atribuídos nos arquivos de entrada;
- Se durante um particular passo de tempo, o número de iterações necessárias para obter a convergência for menor ou igual a 3, o passo de tempo é acrescido entre 20 a 50% do seu valor. Se o número de iterações for menor que 7 o passo de tempo é decrescido de 10 a 70% do seu valor;
- Se durante um particular passo de tempo, o número de iterações for maior que um número definido pelo usuário (usualmente entre 10 e 50), o passo de tempo atual é interrompido, o passo de tempo é dividido por 3 e o passo é reiniciado.

No modelo acoplado a rotina do SWMS3D' foi preservada, definindo um intervalo de tempo dinâmico para o sistema de fluxo em meios porosos e um passo de tempo adaptável para o modelo de escoamento superficial.

#### 4.4. Geração das malhas dos modelos

A utilização de elementos tetraédricos no domínio subterrâneo implica em uma malha de elementos triangulares na superfície. Este fato foi o motivo da adoção de elementos triangulares no desenvolvimento dos modelos superficiais. No método dos elementos finitos, a solução das cargas é atribuída nos nós e os fluxos que cortam os contornos são atribuídos nos nós referentes, os quais recebem uma parcela da área ou da linha do contorno a que fazem parte. Dessa forma, definida uma malha para todo o domínio tridimensional do problema, esta será utilizada tanto para o sistema superficial quanto para o sistema subterrâneo, descartando a geração de duas malhas distintas e a necessidade de interpolações dos resultados nas passagens de fluxo de um sistema para outro.

A malha para o modelo acoplado é formada pela malha tridimensional de elementos tetraédricos, da qual é extraída a malha de elementos triangulares para o escoamento superficial, como simbolizado na Figura 4.12. Na realidade, obtêm-se duas malhas que se sobrepõem identicamente na superfície e possuem uma correspondência de identificação entre os nós dos sistemas. Em outras palavras, um nó na superfície superior da malha tridimensional possui dois valores de identificação, um para cada sistema. A numeração dos elementos é diferente entre os sistemas, não havendo a necessidade da correspondência entre o elemento tetraédrico degenerado e o elemento triangular criado. Cada sistema possui sua conectividade de acordo com o elemento que utiliza e da numeração dos nós em seu sistema.

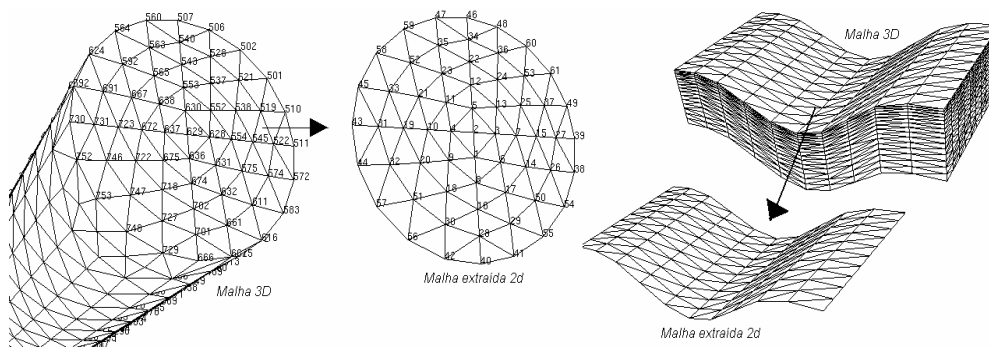


Figura 4.12 - Extração da malha superficial.

A correspondência nodal, é dada por um vetor que relaciona os identificadores (IDs) entre os nós dos sistemas, como ilustrado na Figura 4.13.

Os nós que não possuem correspondência, isto é, aqueles que não estão na superfície, possuem um ID referente ao domínio subterrâneo e um ID de correspondência com valor nulo para o sistema superficial, não sendo contabilizado para este sistema.

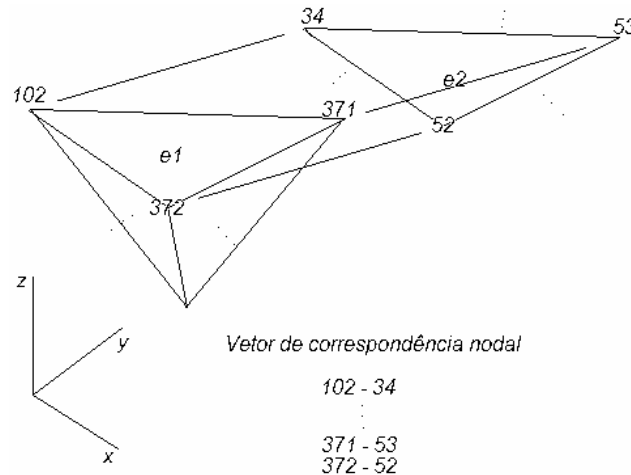


Figura 4.13 – Correspondência nodal na superfície de escoamento do domínio.

A rotina de extração da malha superficial identifica os nós superficiais, de uma malha tridimensional gerada pelo Software MG (Tecgraf), atribuindo a condição de contorno de imposição à translação na direção  $z$ . A partir destes dados e da conectividade dos elementos tetraédricos, é possível identificar os elementos que possuam três de seus nós marcados como nós da superfície. Identificado este elemento, basta tirar o nó que não pertence a este conjunto de nós superficiais e montar a conectividade do elemento triangular baseada no elemento tetraédrico. O algoritmo desta rotina está apresentado abaixo mostrando o “loop” que percorre toda a conectividade da malha 3D, comparando e extraíndo a malha superficial.

- Toma o nó  $N_k$  do elemento  $E_i$  da matriz de conectividade; ( $i=1, k=1$ );
- Toma o nó  $N_j$  do vetor dos nós da superfície; ( $j=1$ );
- Compara  $N_k$  com  $N_j$ ;
- Se  $N_k = N_j$ : contador = contador +1,  $k = k+1$ ;
- Se contador = 3: extrai elemento superficial; ( $k=1, i=i+1, j=1$ );
- Se  $N_k \neq N_j$ :  $j=j+1$ ;
- Se  $j = \text{número de nós do contorno}$ :  $k=k+1$
- Se  $k = 4$ :  $i = i+1$ ; ( $k=1$ );