

Comparação entre o Raio de Influência Calculado por Sichardt e os Obtidos na Análise de Percolação Transiente para Diferentes Permeabilidades

Gabriela Piazzetta

Geóloga M.e, CJC Engenharia e Projetos e UTFPR, Curitiba, Brasil, grpiazzetta@gmail.com

Maria Fernanda Farias dos Santos

Engenheira Civil, CJC Engenharia e Projetos e EESC-USP, São Paulo, Brasil, maria.fernanda@cjceng.com.br

Pedro Teodoro França

Engenheiro Civil M.e, Diretor CJC Engenharia e Projetos, São Paulo, Brasil, pedro.franca@cjceng.com.br

RESUMO: O rebaixamento temporário do nível freático nas obras de engenharia é um problema complexo e abrangente. Uma das variáveis que deve ser definida é o raio de influência do rebaixamento (R_i), já que essa distância afeta tanto no dimensionamento do sistema de poços quanto na extensão do recalque gerado pelo rebaixamento. No contexto das obras provisórias, o método mais empregado para o cálculo do R_i é a equação empírica de Sichardt. Essa equação considera a permeabilidade do solo e a carga hidráulica a ser rebaixada (ΔH), além de um fator empírico que engloba a experiência do autor. Outra maneira para a determinação do R_i é o desenvolvimento dos modelos numéricos. As análises permitiram a comparação dos raios de influência calculados pelo método empírico de Sichardt e obtidos através das análises numéricas de percolação transiente. Nessa comparação, para cada permeabilidade definiram-se duas zonas, uma onde o $R_{Sichardt}$ é superior ao raio obtido no modelo transiente ($R_{transiente}$) e outra onde o $R_{Sichardt}$ é inferior ao $R_{transiente}$. Dessa maneira, as análises podem fornecer valores de raio de influência alternativos aos calculados por Sichardt para diferentes permeabilidades, ΔH e tempos de obra.

PALAVRAS-CHAVE: Rebaixamento temporário, Sichardt, Análise de percolação transiente.

ABSTRACT: Temporary groundwater level drawdown in engineering works is a complex and comprehensive problem. One of the variables that must be defined is the drawdown influence radius (R_i), as this distance affects both the design of the well system and the extent of the settlement generated by the drawdown. In the context of temporary works, the most used method for calculating R_i is Sichardt's empirical equation. This equation considers the soil permeability and the hydraulic load to be drawn down (ΔH), as well as an empirical factor that incorporates the author's experience. Another way to determine R_i is through the development of numerical models. The analyses allowed for the comparison of the radii of influence calculated by the empirical Sichardt method and obtained through transient percolation numerical analyses. In this comparison, for each permeability, two zones were defined: one where $R_{Sichardt}$ is greater than the radius obtained in the transient model ($R_{transiente}$) and another where $R_{Sichardt}$ is less than $R_{transiente}$. In this way, the analyses can provide alternative radius of influence values to those calculated by Sichardt for different permeabilities, ΔH , and construction times.

KEYWORDS: Drawdown, Sichardt equation, Seepage analysis, Groundwater numerical analysis.

1 INTRODUÇÃO

O rebaixamento temporário do nível freático é uma técnica comumente utilizada em obras de engenharia para permitir a escavação e a construção de estruturas subterrâneas. Essa técnica consiste na retirada de água do subsolo, usualmente por meio de poços e ponteiros filtrantes, resultando no rebaixamento do nível freático na região de influência do sistema (Somerville e Large, 1986; Alonso, 2018).

Qualquer sistema de rebaixamento atua reduzindo a propressão no solo, o que, conseqüentemente, gera um aumento nas tensões efetivas. O acréscimo de tensões efetivas gera recalques, muitas vezes indesejáveis, às estruturas situadas no raio de influência do rebaixamento (Velloso, 1988; Alonso, 2018).

O raio de influência (R_i) é definido como a distância a partir da parede de poço na qual o rebaixamento não influi mais no nível freático. O dimensionamento de um sistema de rebaixamento se inicia com o cálculo da vazão necessária a ser retirada do subsolo. O cálculo da vazão, no caso de um poço circular, é feito pela equação de Darcy e da hipótese de Dupoit (Alonso, 2018). Nesse cálculo, na engenharia prática, a estimativa de R_i pela expressão empírica de Sichardt resulta em valores satisfatórios de vazão total do sistema, aderente com o observado (Rosa Filho, 1982).

A equação de Sichardt não considera o tempo de execução da obra. Nos rebaixamentos temporários realizados em áreas urbanas densamente povoadas, a área de influência (definida pelo parâmetro R_i), determina a escolha e quantidade de instrumentação instalada, o cálculo dos recalques e distorções esperados, bem como a identificação de possíveis danos às estruturas existentes. Nesse contexto, variações no parâmetro R_i podem significar impactos econômicos significativos. A consideração do tempo de execução da obra na determinação do R_i representa um refinamento de cálculo quando esse parâmetro tem impacto econômico considerável. Por isso, embora o método de Sichardt seja adequado para determinar a vazão total do sistema, um método que considere o tempo de execução da obra na avaliação do raio de influência pode proporcionar melhorias substanciais e otimizações nesses projetos.

Diante da necessidade de avaliar o impacto do tempo de obra na definição do R_i , uma alternativa à utilização dos métodos empíricos é a realização de análises numéricas de percolação com regime transiente. Essas análises de percolação permitem prever o comportamento e posição do nível d'água no interior do maciço a partir de teorias de fluxo desenvolvidas para meios porosos, considerando a variação do fluxo ao longo do tempo.

Embora possam considerar um maior número de variáveis, como o tempo, as análises numéricas envolvem a determinação de parâmetros adicionais, muitas vezes não disponíveis no contexto das obras, além de softwares específicos e capacidade computacional de processamento. Por isso, a utilização dessas análises ainda é restrita, não sendo uma prática usual nas obras nacionais de engenharia com rebaixamento temporário.

Visando contribuir para a estimativa do R_i nas obras onde não se tem acesso às análises numéricas, esse artigo compara o raio de influência calculado pela expressão empírica de Sichardt e o tempo equivalente obtido na análise de percolação transiente para diferentes permeabilidades e ΔH , permitindo considerar, de maneira quantitativa, a variável “tempo” na determinação do R_i .

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Fluxo em poço circular

O cálculo da vazão no caso de um poço circular é feito pela equação de Darcy (Eq. 1) e da hipótese de Dupoit (Alonso, 2018). A Figura 1 apresenta a geometria e as variáveis do sistema.

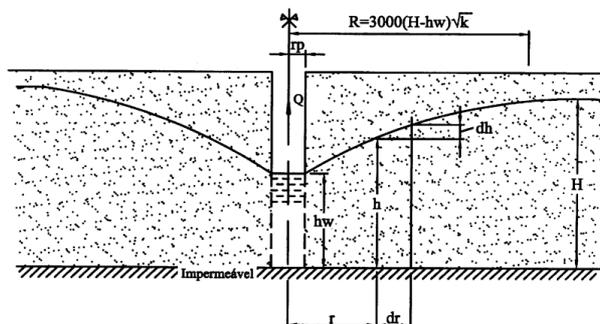


Figura 1. Fluxo gravitacional em poço circular (Alonso, 2018).

$$Q = k \frac{dh}{dr} A \quad (1)$$

Onde: k é a permeabilidade do meio, h é a carga total aplicada, r é o raio de distância do poço e A é a área do cilindro por onde se processa o fluxo. Para um aquífero gravitacional, a área corresponde a uma superfície cilíndrica. Integrando as expressões, tem-se:

$$Q = \frac{k\pi(H^2 - h_{w2})}{\ln \frac{R_i}{r_p}} A \quad (2)$$

Com base na equação 2 pode-se obter o valor de R_i pela expressão:

$$\frac{R_i}{r_p} = e^{\frac{k\pi}{Q}(H^2 - h_{w2})} \quad (3)$$

Onde: Q é a vazão, k é a permeabilidade do meio, H é o nível d'água, h_w é o nível de água rebaixado, r_p é o raio do poço, R_i é o raio de influência do rebaixamento, e A é a área do cilindro por onde se processa o fluxo.

As equações 2 e 3 mostram uma relação entre a vazão e o raio de influência. Nota-se que uma variação de 100% no R_i resulta numa variação de apenas 20% no valor da vazão. Na engenharia prática, o dimensionamento do sistema de rebaixamento tendo-se em conta a estimativa de R_i pela expressão empírica de Sichardt resulta em valores satisfatórios de vazão total do sistema.

2.2 Método empírico de Sichardt

Apesar de bem consolidada na prática da engenharia, as hipóteses levaram ao desenvolvimento da fórmula de Sichardt são raramente apresentadas. Desens e Houben (2021) apresentam uma revisão na qual citam que muitos referenciam a equação erroneamente à publicação de Willy Sichardt (1928) que não traz a fórmula. A fonte correta seria a segunda edição do livro "Grundwasserabsenkung bei Fundierungsarbeiten" (tradução livre: Rebaixamento de águas subterrâneas em obras de fundação) de Wilhem Kyrieleis e Willy Sichardt (1930). O engenheiro Willy Sichardt trabalhou com projetos de rebaixamento em aquíferos arenosos e cascalhosos no norte da Alemanha, e de suas observações derivou uma fórmula que descreve o raio de influência a partir da carga hidráulica a ser rebaixada (s), da permeabilidade do meio e de uma constante que é igual a 3000 (Eq. 4).

$$R_{Sichardt} = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{K} \quad (4)$$

Onde $R_{Sichardt}$ é o raio de influência calculado pela expressão de Sichardt, s é a carga hidráulica a ser rebaixada ($H-h_w$), denominada ΔH , em metros, e K é a permeabilidade do aquífero em m/s.

Desens e Houben (2021) avaliaram a equação através da comparação com modelo analítico de escoamento de poço, com o objetivo de identificar em qual cenário a equação de Sichardt seria comprovadamente válida e, como esperado, identificaram os aquíferos arenosos e pedregosos com porosidades em torno de 30% e espessuras de 15 m, meio onde Sichardt desenvolveu seus estudos. Os autores avançaram de maneira a propor um fator de correção que pudesse ser aplicado para extrapolar a aplicação a outros meios, assunto que não será explorado nesse artigo.

A equação de Sichardt não leva em consideração o tempo de obra. Por isso, no contexto dos rebaixamentos temporários realizados em obras executadas em centros urbanos densamente povoados, onde a área de influência, definida pelo R_i , impacta no tipo e quantidade de instrumentação instalada, no cálculo dos recalques e distorções previstas e na identificação de danos potenciais a edificações; variações do R_i resultam em um impacto econômico significativo. Embora, a avaliação do R_i pelo método de Sichardt seja satisfatória para obtenção da vazão total do sistema, um método que possibilite avaliar o impacto do tempo de obra no raio de influência pode trazer otimizações expressivas.

2.3 Modelo numérico transiente

Os modelos numéricos foram feitos no software RS2 versão 11.023 (Rocscience, 2024). O RS2 é um programa bidimensional que realiza a análise de percolação pelo método de elementos finitos, para determinar a distribuição de poropressão, com base nas condições de contorno da água subterrânea definidas no modelo. Foram realizadas análises axissimétricas, com o eixo do poço na posição $x = 0$. Os modelos possuem dimensão de 1000 m na horizontal e 100 m na vertical (superfície do terreno $y=0$), com malha uniforme formada por elementos triangulares de 6 nós, com uma média de 5000 elementos por modelo (Figura 2).

As análises de percolação foram realizadas pelo método transiente, considerando 12 estágios de tempo, variando de 1 dia a 100 anos (Figura 3). Não foi considerada a análise de sólidos, por isso não são apresentados os parâmetros geotécnicos do material.

Foram construídos 20 modelos considerando ΔH de 5, 10, 20 e 30 m e, para cada ΔH , foram analisadas as permeabilidades de 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} e 10^{-9} m/s (Tabela 1).

Tabela 1. Modelos numéricos para diferentes permeabilidades e ΔH .

k (m/s) ΔH (m)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
5	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
10	Modelo 6	Modelo 7	Modelo 8	Modelo 9	Modelo 10
20	Modelo 11	Modelo 12	Modelo 13	Modelo 14	Modelo 15
30	Modelo 16	Modelo 17	Modelo 18	Modelo 19	Modelo 20

A condição de contorno da água subterrânea na etapa inicial (sem rebaixamento) foi definida pela aplicação da carga hidráulica (*total head*) igual a zero, que corresponde ao nível de água na superfície do modelo, nas bordas direita e esquerda do modelo. O rebaixamento no poço, etapa 2, foi feito pela definição da carga hidráulica correspondente ao ΔH (-5, -10, -20, -30 m), na borda esquerda do modelo ($x=0$) (Figura 2).

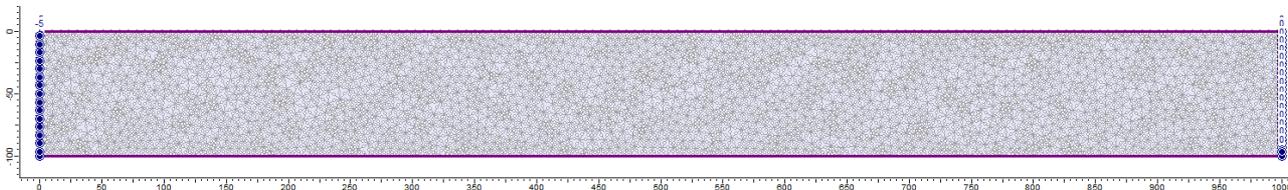


Figura 2. Geometria genérica dos modelos numéricos.

#	Name	Time (days)
1		0
2	1 dia	1
3	7 dias	7
4	15 dias	15
5	30 dias	30
6	90 dias - 3 meses	90
7	180 dias - 6 meses	180
8	360 dias - 1 ano	360
9	1080 dias - 3 anos	1080
10	1800 dias - 5 anos	1800
11	3600 dias - 10 anos	3600
12	36000 dias - 100 anos	36000

Figura 3. Fases do modelo numérico.

3 RESULTADOS

3.1 Raio de influência calculado por Sichardt

A Figura 4 apresenta o cálculo do raio de influência pela expressão empírica de Sichardt (Equação (4)) para diferentes permeabilidades e ΔH . A Tabela 2 apresenta os valores de $R_{Sichardt}$, calculado pela equação de Sichardt para os mesmos valores de permeabilidade e ΔH considerados nos modelos numéricos (20 modelos).

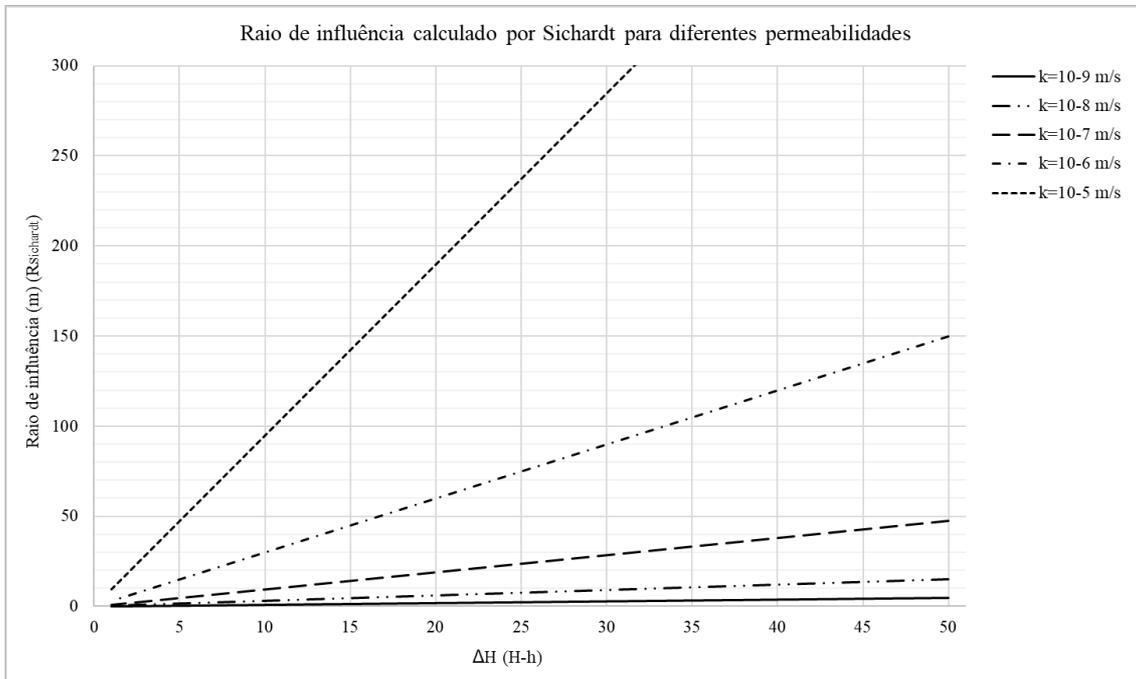


Figura 4. Raio de influência calculado por Sichardt ($R_{Sichardt}$) para diferentes permeabilidades e ΔH .

Tabela 2. $R_{Sichardt}$ para as permeabilidades e ΔH consideradas nos modelos numéricos.

k (m/s)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
ΔH (m)					
5	47	15	5	2	0
10	95	30	9	3	1
20	190	60	19	6	2
30	285	90	28	9	3

3.2 Resultados gráficos do modelo numérico

Na Figura 5 apresenta-se, como exemplo, o resultado de poropressão no modelo 8, com ΔH igual a -10 m, permeabilidade de 10^{-7} m/s e no tempo de 1 ano (fase 8). Por convenção, o sinal negativo de poropressão indica sucção (rebaixamento), ou seja, se o ΔH é igual a -10 m (*total head* = -10 m) no poço, a poropressão nesse ponto na superfície é -100 kPa. Admitiu-se como limite para o raio de influência ($R_{transiente}$) o ponto onde o valor de poropressão é superior a -1 kPa na superfície do modelo.

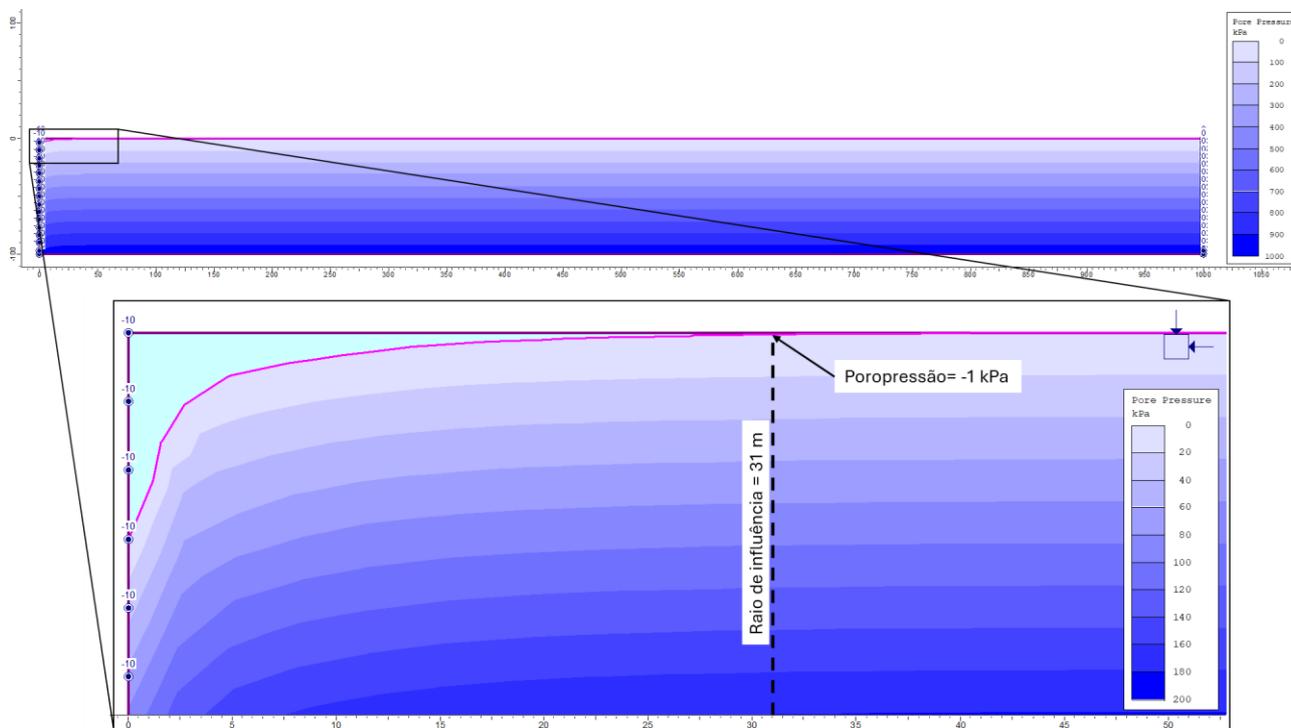


Figura 5. Resultado do modelo numérico com $\Delta H = -10$ m, $k = 10^{-7}$ m/s, fase com 8 (tempo = 1 ano).

3.3 Raios de influência calculados pelo modelo numérico transiente

Na Figura 6 apresentam-se as curvas de correlação entre o tempo de rebaixamento, escala log, e o raio de influência calculado nos modelos numéricos transientes ($R_{transiente}$). Cada permeabilidade corresponde a uma faixa de valores de $R_{transiente} \times$ tempo, onde o limite superior equivale ao ΔH igual a 5 m e o limite inferior ao ΔH igual a 30 m.

As subdivisões dentro da faixa de mesma permeabilidade representam duas zonas: na região inferior da faixa o $R_{Sichardt}$ é superior ao raio obtido no modelo transiente ($R_{transiente}$), na região superior, o $R_{Sichardt}$ é inferior ao $R_{transiente}$. A linha contínua representa a conexão dos pontos de interseção do $R_{Sichardt}$ apresentados na (Tabela 2) com as linhas de ΔH de cada permeabilidade.

A partir do gráfico e das duas zonas definidas em cada faixa, pode-se avaliar, de acordo com o tempo de obra, se os valores obtidos nos modelos numéricos estão sub ou superestimados em relação ao Sichardt.

De maneira geral, o $R_{Sichardt}$ seria equivalente aos raios obtidos no modelo numérico em obras de curta duração (<6 meses) e ΔH médio (<20 m), e média duração (de 6 meses a 1 ano) e ΔH alto (>20m). Para obras de longa duração (>1 ano), os valores obtidos nos modelos numéricos são muito superiores aos valores de Sichardt, independentemente do ΔH . Para permeabilidades baixas e muito baixas (< 10^{-8} m/s) a variação do R_i ao longo do tempo pode ser considerada insignificante, havendo variação significativa apenas para tempo de obra acima de 3 anos.

4 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Na engenharia prática, o dimensionamento do sistema de rebaixamento tendo-se em conta a estimativa de R_i pela expressão empírica de Sichardt resulta em valores satisfatórios de vazão total do sistema, aderente com o observado. A expressão de Sichardt não considera a variável “tempo de obra”, por isso, quando se avaliam obras de rebaixamento temporário em ambientes urbanos, onde o R_i implica na extensão da área instrumentada e análise de risco de danos aos edifícios, refinar o valor de R_i de acordo com o tempo de obra pode resultar otimizações significativas.

Para analisar isso, desenvolveram-se modelos numéricos de percolação transiente, através dos quais foi possível avaliar o raio de influência ao longo do tempo para diferentes permeabilidades e ΔH . Os valores foram plotados num gráfico tempo (log) x raio de influência (Figura 6).

A partir desse gráfico, estabeleceu-se o impacto de cada variável no raio de influência para as análises numéricas e comparar com o impacto de cada variável no método empírico de Sichardt (Tabela 3). A correlação entre cada variável e o raio de influência foi qualitativamente classificada como muito alta, alta, baixa e nula, de acordo com o impacto que a variação de cada uma gera no raio de influência. Por exemplo, variando o tempo de obra de 1 a 100 dias, o valor de R_i aumenta em 150x para permeabilidade alta, ou seja, variações no tempo geram um impacto muito alto no valor de R_i . Enquanto variações no ΔH resultam num aumento de apenas 1,5x o raio de influência, ou seja, o impacto de variações do ΔH sobre o R_i é baixo.

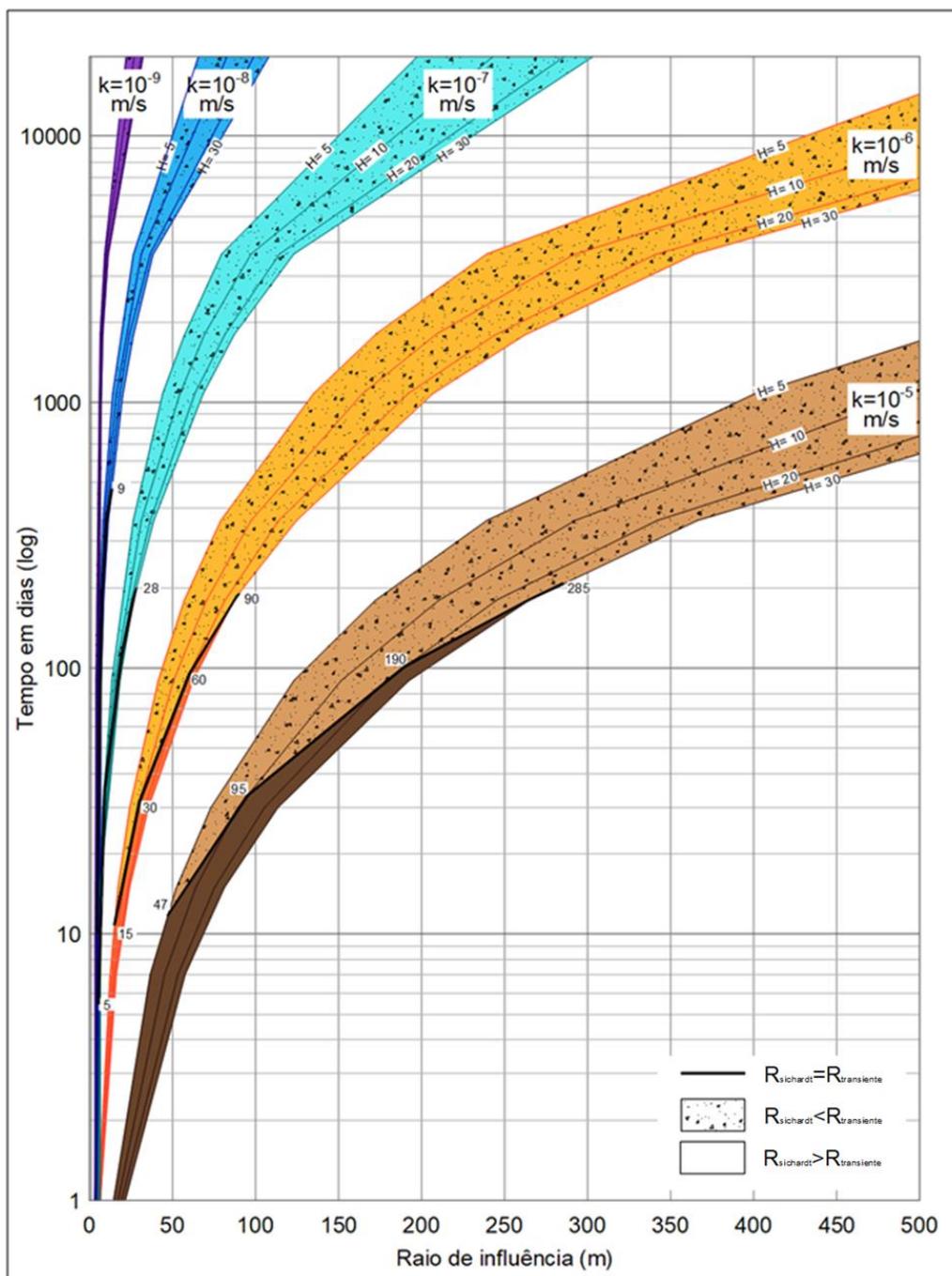


Figura 6. Gráfico de correlação entre o tempo e o $R_{transiente}$ para diferentes ΔH e associação ao $R_{Sichardt}$.

Tabela 3. Comparação entre a correlação das variáveis tempo, altura rebaixada e permeabilidade com o raio de influência.

Variáveis	Modelo numérico Análise transiente	Método Empírico Equação de Sichardt
	Muito alta	
Tempo de rebaixamento/obra	Para a variação de tempo de 1 dia a 100 anos, na permeabilidade baixa, o R_i aumenta 10x, na permeabilidade alta o R_i aumenta 150x	Nula Não é considerado
	Baixa	
ΔH Altura rebaixada	Para uma variação de 25 m na altura rebaixada (entre 5 e 30 m), o raio de influência aumenta aproximadamente 1,5 vezes, independentemente da permeabilidade.	Alta Diretamente proporcional ao raio de influência
	Variável de baixa a alta em função do tempo	
Permeabilidade	O R_i da permeabilidade 10^{-5} m/s é de 5 a 80x o valor do R_i da permeabilidade 10^{-9} m/s, sendo 5x considerando o tempo de 1 dia e 80x o tempo de 100 anos.	Alta Diretamente proporcional a raiz quadrada da permeabilidade

As análises desenvolvidas permitiram a comparação dos raios de influência calculados pelo método empírico de Sichardt e obtidos através das análises numéricas de percolação transiente. Nessa comparação, para cada permeabilidade, definiram-se duas zonas, uma onde o $R_{Sichardt}$ é superior ao raio obtido no modelo transiente ($R_{transiente}$) e outra onde o $R_{Sichardt}$ é inferior ao $R_{transiente}$. Dessa maneira, dependendo do contexto de tempo, ΔH e permeabilidade, o gráfico apresentado por servir como orientação para obtenção de valores de raio de influência alternativos aos calculados por Sichardt para diferentes permeabilidades e ΔH .

Entende-se que os estudos possuem suas limitações e contextos hidrogeológicos complexos exigem análises específicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CJC Engenharia e Projetos pelo apoio, infraestrutura, recursos disponibilizados e pela permissão na divulgação dos dados desse estudo, que se trata de um desenvolvimento aplicado aos projetos da empresa, ao meio acadêmico. Agradecemos, também, ao suporte da Rocscience na solução das dúvidas relacionadas ao software e ao Claudio Gomes Correia Neto pela ilustração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. R. (2018). *Rebaixamento temporário de aquíferos*. Oficina de Textos.
- Desens, A., Houben, G. J. (2021). *Beyond Sichardt—empirical equations for the determination of the radius of influence of a well*. Grundwasser, 1-11.
- Kyrieleis, W., Sichardt, W. (1930). *Grundwasserabsenkung bei Fundierungsarbeiten*. Berlin, 281 p.
- Rocscience. RS2 - 2D Geotechnical Finite Element Analysis. Toronto: Rocscience Inc. 2024.
- Rosa Filho, E. F. da. (1982). *Um método determinativo da capacidade de produção dos poços tubulares aplicado no aquífero Caiuá: região nordeste do estado do Paraná*. Águas Subterrâneas.
- Sichardt, I. W. (1928). *Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung*, insbesondere für größere Absenkungstiefen.
- Somerville, S. H., Large, D. S. (1986) *Control of groundwater for temporary works*. London: Construction Industry Research and Information Association. CIRIA.
- Velloso, P. P. C. (1988) *Teoria e prática de rebaixamento do lençol d'água*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.