

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO PARAMÉTRICO DA RESPOSTA TÉRMICA DE GRUPOS DE
ESTACAS TROCADORAS DE CALOR EM UM SOLO TROPICAL
TÍPICO DO DF**

ROBERTO PIMENTEL DE SOUSA JÚNIOR

ORIENTADOR: RENATO PINTO DA CUNHA, Ph.D.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO:
BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO/2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO PARAMÉTRICO DA RESPOSTA TÉRMICA DE GRUPOS DE
ESTACAS TROCADORAS DE CALOR EM UM SOLO TROPICAL
TÍPICO DO DF**

ROBERTO PIMENTEL DE SOUSA JÚNIOR

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

RENATO PINTO DA CUNHA, Ph.D. (UnB)

(ORIENTADOR)

JUAN FELIX RODRIGUEZ REBOLLEDO, Ph.D. (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS, D.Sc. (Universidad Militar Nueva Granada)

(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 29 DE NOVEMBRO DE 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUSA JÚNIOR, ROBERTO PIMENTEL DE

Estudo paramétrico da resposta térmica de grupos de estacas trocadoras de calor em um solo tropical típico do DF. [Distrito Federal] 2017

Xix, 145 p., --- mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2017)

Dissertação de Mestrado-Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Palavras chaves:

1. Energia

2. Energia Geotérmica

3. Fundações

4. Solos Tropicais

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUSA JÚNIOR, R.P. (2017). Estudo paramétrico da resposta térmica de grupos de estacas trocadoras de calor em um solo tropical típico do DF. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.

CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DO AUTOR: Roberto Pimentel de Sousa Júnior

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo paramétrico da resposta térmica de grupos de estacas trocadoras de calor em um solo tropical típico do DF.

GRAU/ANO: Mestre/2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Roberto Pimentel de Sousa Júnior

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia
Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Prédio SG-12,
Universidade de Brasília. CEP 70910-900 - Brasília, DF – Brasil

eng.robertopimentel@gmail.com

Dedico este trabalho às pessoas que mais me apoiaram
e me deram forças para concluí-lo:
meu pai Roberto Pimentel, minha mãe Cristina Teixeira,
minha irmã Luana Teixeira e à Mariá Leite.

AGRADECIMENTOS

Queria começar meus agradecimentos dando graças a Deus por ter permitido que esta oportunidade incrível de crescimento profissional e pessoal tenha passado pela minha vida e por eu a ter agarrado com todas as forças e ter feito todas as dificuldades pequenas.

Gostaria de agradecer a meus pais por terem a educação de seus filhos como prioridade em suas vidas e principalmente do conselho e apoio de meu pai que no momento da decisão entre continuar os estudos e iniciar a vida profissional percebeu o meu paradoxo pessoal entre a vontade de ir além e de iniciar minha carreira e se posicionou dando o melhor conselho que poderia e por me manter amparado de todas as formas.

Agradeço à Mariá Leite por sua amizade, companheirismo, força e sabedoria. Por me lembrar dos meus sonhos e ajudar a me manter forte e focado mesmo durante as diversas tribulações que passei até conseguir ser aprovado como aluno regular do programa de pós-graduação.

Agradeço a Leonardo Schimidt por seu companheirismo, amizade, partilha das dificuldades e glórias durante o curso e por fazer de sua casa e família a minha. Agradeço juntamente ao Biel e tia Jô pela acolhida e amizade sem igual.

Agradeço a minha irmã Luana Teixeira por toda torcida e amor. E por ter feito a correção de minha dissertação em tão pouco tempo e tão bem.

Agradeço a Hugo Caixeta e Vicente Caixeta por terem acreditado em mim, quando nem mesmo eu acreditava e terem me ajudado a viver uma experiência inesquecível, além da amizade e torcida.

Agradeço ao Professor Rideci de Farias por seu apoio desde o tempo de graduação, pelas inúmeras cartas de recomendação, pelas inúmeras oportunidades na qual se lembrou de mim e por ter sido um mentor e amigo de muita importância.

Agradeço ao Professor Renato Pinto da Cunha, por ter me aceitado como seu aluno, pela autonomia que sempre me confiou, por ter sido parceiro e por sua maneira horizontal de liderar. Agradeço também as portas que me abriu e o crescimento pessoal que me proporcionou. Agradeço também os colegas do GPFees pela solicitude e amizade.

Agradeço ao Professor Peter Webb que mesmo de outro país teve participação fundamental no desenvolvimento deste trabalho e não poupou esforços para nos ajudar.

Por fim gostaria de agradecer ao Programa de Pós Graduação pelas oportunidade de crescimento e pelas inúmeras amizades que fiz ao longo destes anos. Pessoas que ao dividir o desespero e alegrias de provas, trabalhos e resultados acabaram se tornando mais que colegas e certamente serão lembrados com carinho pro resto da vida. E sem esquecer os funcionários da limpeza que cuidam tão bem do ambiente e todas as pessoas que já passaram pela secretaria que são fundamentais na vida dos alunos, em especial a Jackeline, Lincoln, João e Romário.

RESUMO

Desde a década de 1980 os sistemas de estacas trocadoras de calor são utilizados para fins de aquecimento e/ou resfriamento de edificações, sendo utilizados primeiramente em países europeus e hoje difundidos também em países da Ásia e América do Norte. A proposta de um sistema de condicionamento de ambientes econômico e sustentável chamou atenção para o caso do Brasil, um país que passa por dificuldades energéticas e com alta demanda de condicionamento térmico em maioria de seu território.

Esta pesquisa dá seguimento ao segundo trabalho realizado no país neste segmento, uma dissertação de mestrado intitulada Validação do ensaio TRT para o estudo paramétrico da troca de calor de uma estaca de energia em um solo tropical realizada também pela Universidade de Brasília (UnB).

Por meio de simulações numéricas utilizando-se o software COMSOL Multyphysics v5.2, foram simuladas diferentes configurações de blocos de estacas, comuns na prática construtiva do Distrito Federal Brasileiro. Uma extensa pesquisa geológico-geotécnica do solo do Campo Experimental da Universidade de Brasília (UnB) possibilitou o cálculo dos parâmetros térmicos deste solo escolhido como representativo do Distrito Federal. Com os valores dos parâmetros térmicos, seguiu-se para as simulações numéricas, que variaram as fundações com relação ao número de estacas dos blocos, diâmetro das estacas e voltas na tubulação buscando a melhor configuração para região estudada.

Como resultado deste trabalho, concluiu-se que blocos com 4 ou mais estacas e diâmetro de 30 cm e 40 cm, o ideal é a utilização de apenas duas voltas nas tubulações, enquanto para estacas de 60 cm três voltas na tubulação geram máxima troca de calor, porém acredita-se que estas suportariam uma volta adicional. Dentro dos blocos, descobriu-se que as estacas se inter-relacionam termicamente, formando bulbos que quanto mais próximos, menor a troca de calor entre as estacas. Além disso, descobriu-se que o diâmetro das estacas é outro fator importante na troca de calor, pois um bulbo interno se forma interferindo no resultado final. Além destas conclusões referentes aos blocos de fundação, conclui-se também que o solo do Distrito Federal tem alto potencial de troca de calor, sendo um indicativo de viabilidade técnica da tecnologia e incentivo a novas pesquisas no assunto.

ABSTRACT

Since the 80s in the previous century energy piles systems have been used for heating and / or cooling purposes, being primarily used in European countries. Nowadays the technology has spread to other regions as in Asia and North America. The proposal of a conditioning system for closed environments that is economical and sustainable has drawn attention in Brazil, a country that is experiencing energy difficulties and could have a high demand for thermal conditioning in most of its territory.

This is a follow-up to the second geotechnical MSc work carried out in the University of Brasília in this segment, i.e. the one titled “Validação do Ensaio TRT para o Estudo Paramétrico da Troca de Calor de uma Estaca de Energia em um Solo Tropical also performed by the University of Brasília (UnB)”.

Numerical simulations using the software COMSOL Multyphysics v5.2, permitted that different configurations of foundation blocks were simulated, common in the constructive practice of the Brazilian Federal District. An extensive geological-geotechnical survey of the soil of the Experimental Research Site of the University of Brasilia (UnB), allowed the calculation of the thermal parameters of this soil chosen as representative of the Federal District. With these parameters the next step were the numerical simulations, which varied the foundations with respect to the number of piles of the blocks, diameter of the piles and turns in the pipe, seeking the best configuration for the region studied.

As a result of this work, it was concluded that for cap blocks with pile diameters of 30 and 40 cm, the ideal is the use of only two turns in the pipes for blocks with 4 or more piles, while for piles of 60 cm three turns in the pipe generates a maximum exchange of heat. Inside the blocks, it was discovered that the piles are thermally inter-related, forming bulbs that decrease the heat exchange between the piles. In addition, it was found that the diameter of the piles is another important factor in the heat exchange, because an internal bulb is formed interfering in the final result. In addition to these conclusions regarding the foundation blocks, it is also concluded that the soil of the Federal District has a high potential for heat exchange, being technically feasible to be employed in this technology, thus encouraging further research on the subject.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO.....	1
1.2. MOTIVAÇÃO.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.3.1. Objetivo geral.....	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. ASPECTOS GERAIS DO SISTEMA DE BOMBAS DE CALOR (GSHP).....	5
2.2. COMO FUNCIONA O SISTEMA DE ESTACAS DE ENERGIA.....	9
2.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS	13
2.4. GENERALIDADES TÉRMICAS DOS SOLOS TROPICAIS	14
2.5. COMPORTAMENTO TÉRMICO E PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS DO SISTEMA.....	17
2.6. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	17
2.7. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO.....	19
2.7.1. Empíricos e semi empíricos	19
2.7.2. Métodos experimentais	23
2.8. MEDIDAS DE EFICIÊNCIA DO SISTEMA E ESTACAS	25
2.8.1. Eficiência das estacas	25
2.8.2. Eficiência do sistema.....	26
2.9. CASOS HISTÓRICOS DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA GSHP	26
2.9.1. Terminal E do aeroporto de Zurich	26
2.9.2. Edifício residencial e comercial na cidade de Sapporo, Japão.....	30
2.9.3. One New Change London, UK	35
2.10. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS	38
2.11. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO MODELO	39
2.11.1. Parâmetros sensíveis do modelo	39
2.11.2. Geometria do modelo	41
2.11.3. Avaliação do limite do domínio.....	42
2.11.4. Avaliação do tipo de elemento	42
2.11.5. Avaliação da densidade da malha	43
2.11.6. Resumo do estudo da sensibilidade dos elementos finitos.....	44

3.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1.	ESTUDO EXPERIMENTAL DA RESPOSTA TÉRMICA DE FUNDAÇÕES POR ESTACAS TROCADORAS DE CALOR EM SOLO NÃO SATURADO	45
3.2.	VALIDAÇÃO DO ENSAIO TRT PARA O ESTUDO PARAMÉTRICO DA TROCA DE CALOR DE UMA ESTACA DE ENERGIA EM UM SOLO TROPICAL	46
3.3.	INFORMAÇÕES GERAIS DA LOCAÇÃO DO SOLO ESTUDADO	48
3.4.	GEOLOGIA E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO DE BRASÍLIA	51
3.4.1.	Perfil do solo do campo experimental.....	52
3.4.2.	Perfil geotécnico do solo do campo experimental	53
3.4.3.	Perfil mineralógico do solo do campo experimental.....	54
3.4.4.	Perfil de umidade do solo do campo experimental	55
3.4.5.	Perfil de temperatura do solo do campo experimental.....	57
3.5.	DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS TÉRMICOS DO SOLO.....	59
4.	ANÁLISE NUMÉRICA DE TROCA DE CALOR EM GRUPOS DE ESTACA .	71
4.1.	PROCEDIMENTO DE MODELAGEM NUMÉRICA DO SISTEMA TROCADOR DE CALOR EM GRUPOS DE ESTACAS	71
4.2.	BASES TEÓRICAS DO MODELO NUMÉRICO	72
4.3.	PROCESSO DE MODELAGEM NO SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS.....	76
4.4.	CARACTERÍSTICAS DO ESTUDO DO COMPORTAMENTO TERMO-HIDRÁULICO, CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO DO MODELO	77
4.5.	MODELAGEM PARAMÉTRICA.....	78
4.6.	PROCESSAMENTO DOS RESULTADOS.....	81
5.	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS	84
5.1.	RESULTADO DAS ESTACAS E BLOCOS	84
5.1.1.	Resultados para tubulação U	85
5.1.2.	Resultados das estacas para tubulação 2U	97
5.1.3.	Resultados das estacas para tubulação 3U	109
5.2.	COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS PARA MESMO NÚMERO DE ESTACAS E DIFERENTES DIÂMETROS	119
5.2.1.	Comparativo entre resultados para tubulação U	120
5.3.	COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS PARA BLOCOS COM MESMO NÚMERO DE ESTACAS E TUBULAÇÃO 2U	122
5.4.	COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS PARA BLOCOS COM MESMO NÚMERO DE ESTACAS E TUBULAÇÃO 3U	124
5.5.	COMPARATIVO ENTRE DIÂMETROS.....	126

5.6.	VARIAÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO E TROCA DE CALOR	129
5.7.	SUMÁRIO GERAL DO CAPÍTULO	131
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DA DISSERTAÇÃO	133
6.1.	OBSERVAÇÕES GERAIS	133
6.2.	CONCLUSÕES	135
6.3.	CRÍTICAS E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	135
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
8.	ANEXOS.....	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Energia para aquecimento de casas na Áustria desde anos 1970 (Brandl, 2006)....	5
Figura 2.2. Esquema de uma planta de energia geotérmica com estacas de energia. (Brandl et al 2006).....	6
Figura 2.3. Categorias de sistemas geotérmicos trocadores de calor (Hemmingway, 2011).....	7
Figura 2.4.(a) Geossintético energético (geocomposto instalado em um túnel de energia) (Brandl, 2006). (b) Pavimento Geotérmico no Oregon, Estados Unidos (Lund, 1999).....	8
Figura 2.5. Seção transversal de um edifício com sistema geotérmico (Brandl, 2013).	10
Figura 2.6. Esquema de Sistema de energia geotérmica utilizando estacas de energia no modo de resfriamento (Ghassan, 2014).....	11
Figura 2.7. Mineralogia de um perfil de alteração típico do Distrito Federal (IBRACON, 2017).....	15
Figura 2.8. Variação geral da condutividade térmica com a saturação em solos arenosos, argilosos e orgânicos. (Hillel, 1998)	16
Figura 2.9. Água sob processo de convecção sendo aquecida em uma panela. (Teixeira, 2013)	18
Figura 2.10. Barra de aço sendo aquecida sob processo de condução (Motta, 2015).....	18
Figura 2.11. Comparativo entre valores medidos e calculados de condutividade térmica. (Cotê & Konrad, 2005)	20
Figura 2.12. Sonda-agulha sem equipamento aquisitor de dados.	23
Figura 2.13. Esquema do ensaio TRT. (Orozco, 2016).....	24
Figura 2.14. Visão geral da Doca midfield no aeroporto de Zurich. (Palud & Hubbuch, 2007)	27
Figura 2.15. Performance térmica mensal da bomba de calor. (Palud & Hubbuch, 2007).....	28
Figura 2.16. Energia extraída e injetada nas estacas. Níveis de temperatura mensais do fluido circulante no circuito das estacas nos modos de injeção e extração. (Palud & Hubbuch, 2007)	28
Figura 2.17. Temperatura do solo em várias profundidades. Temperatura diária no fluido circundante no circuito das estacas nos modos de injeção e extração. (Palud & Hubbuch, 2007).....	29
Figura 2.18. Vista da edificação (Yasuhiro et al., 2007).....	30
Figura 2.19. Diagrama conceitual em modo de aquecimento (esquerda) e diagrama esquemático (direita). (Yasuhiro et al., 2007)	32
Figura 2.20. Flutuação da temperatura do interior do edifício, fluido e superfície das estacas no período de aquecimento. (Yasuhiro et al., 2007)	33
Figura 2.21. Fornecimento de energia para diversas soluções e consume de energia. (Yasuhiro et al., 2007).....	34
Figura 2.22. Vista Geral do Empreendimento One New Change, Londres. (Spiers, 2010)	35
Figura 2.23. Esquema do sistema geotérmico do One New Change. (Spiers, 2010).....	37

Figura 2.24. Tubulação imersa na armação da estaca (esquerda) e Topo da armação com a tubulação sendo preparada para teste de pressão (direita). (Spiers, 2010).....	37
Figura 2.25. Esquema de modelagem de uma estaca de energia. (Orozco, 2016).....	40
Figura 2.26. Domínio de solo em forma de paralelepípedo (esquerda) e cilíndrico (direita). (Orozco, 2016)	41
Figura 2.27. Tipos de elementos do domínio: hexaédrico, prismático e tetraédrico. (Orozco, 2016).....	43
Figura 3.1. Simulação numérica do ensaio TRT em uma estaca. (Orozco, 2016).....	46
Figura 3.2. Comparação entre as respostas experimentais e numéricas. (Orozco, 2016)	47
Figura 3.3. Localização do solo estudado.	49
Figura 3.4. Locação do poço para análise térmica do perfil de solo.	50
Figura 3.5. Mapa geológico do Distrito Federal (Freitas-Silva & Campos, 1998).	51
Figura 3.6. Mapa pedológico do Distrito Federal (EMBRAPA, 1978).	52
Figura 3.7. Perfil de solo característico do campus experimental da UnB. Modificado (Mota, 2003).....	53
Figura 3.8. Perfil geotécnico solo característico do campus experimental da UnB. Modificado (Mota, 2003).....	54
Figura 3.9. Perfil mineralógico do solo característico do campus experimental da UnB. Modificado (Carvalho, 1995).....	55
Figura 3.10. Perfil de umidade do solo durante o período chuvoso.	56
Figura 3.11. Perfil de umidade do solo durante o período seco.	56
Figura 3.12. Valores máximos e mínimos de umidade por profundidade para o campus experimental da UnB.....	57
Figura 3.13. (a) Escavação mecanizada do poço; (b) Preparação da amostra indeformada. ...	58
Figura 3.14. Perfil de temperatura ao longo de diversos horários.....	58
Figura 3.15. Perfil de temperatura média do solo.	59
Figura 3.16. Fluxograma de atividades para cálculo da capacidade de calor específica.	61
Figura 3.17. Fluxograma para cálculo da condutividade térmica do solo.....	62
Figura 3.18. Intervalo de valores para condutividade térmica adotados.	67
Figura 3.19. Intervalo de valores extremos calculados para condutividade térmica.....	68
Figura 3.20. Intervalo de valores extremos calculados de capacidade térmica.....	68
Figura 3.21. Resumo das propriedades que interferem na condutividade térmica do solo do campo experimental.	69
Figura 3.22. Resumo das propriedades que interferem na capacidade térmica específica do solo do Campo experimental.....	70
Figura 4.1. Modelagem numérica do sistema (Orozco, 2016).	72
Figura 4.2. Gráfico da temperatura superior do solo. (INPE)	78
Figura 4.3. Esquema com combinação de simulações possíveis.	79

Figura 4.4. Tipos de blocos simulados.....	80
Figura 4.5. Tipos de tubulações simuladas.....	80
Figura 4.6. Exemplo de como os dados são exportados pelo software.....	83
Figura 5.1. Nomenclatura e posicionamento das estacas nos blocos.....	85
Figura 5.2. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D03-U.....	86
Figura 5.3. Taxa de troca de calor média dos blocos e tendências polinomiais de segundo grau para configuração D03-U.....	87
Figura 5.4. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D03-U.....	87
Figura 5.5. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D03-U.....	88
Figura 5.6. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D03-U.....	88
Figura 5.7. Influência dos bulbos de temperatura nas estacas menos eficientes dos blocos....	90
Figura 5.8. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D04-U.....	90
Figura 5.9. Taxa de troca de calor média dos blocos e tendências lineares para configuração D04-U.....	91
Figura 5.10. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D04-U... ..	91
Figura 5.11. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D04-U.....	92
Figura 5.12. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D04-U.....	92
Figura 5.13. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D06-U.....	94
Figura 5.14. Taxa de troca de calor média dos blocos e tendências polinomiais de segundo grau para configuração D06-U.....	94
Figura 5.15. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D06-U... ..	95
Figura 5.16. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D06-U.....	95
Figura 5.17. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D06-U.....	96
Figura 5.18. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D03-2U.....	98
Figura 5.19. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de segundo grau do comparativo para configuração D03-2U.....	98
Figura 5.20. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de segundo grau do comparativo para configuração D03-2U excluindo o bloco com 2 estacas.....	99
Figura 5.21. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D03-2U.....	99
Figura 5.22. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D03-2U excluindo o valor médio do bloco com 2 estacas.....	100
Figura 5.23. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D03-2U.....	100

Figura 5.24. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D03-2U.	101
Figura 5.25. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D04-2U.	102
Figura 5.26. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de segundo grau do comparativo para configuração D04-2U.	103
Figura 5.27. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D04-2U.	103
Figura 5.28. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D04-2U.	104
Figura 5.29. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D04-2U.	104
Figura 5.30. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D06-2U.	106
Figura 5.31. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de segundo grau do comparativo para configuração D06-2U.	106
Figura 5.32. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D06-2U.	107
Figura 5.33. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D06-2U.	107
Figura 5.34. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D06-2U.	108
Figura 5.35. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D03-3U.	109
Figura 5.36. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de segundo grau do comparativo para configuração D03-3U.	110
Figura 5.37. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D03-3U.	110
Figura 5.38. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D03-3U.	111
Figura 5.39. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D03-3U.	111
Figura 5.40. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D04-3U.	113
Figura 5.41. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de segundo grau do comparativo para configuração D04-3U.	113
Figura 5.42. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D04-3U.	114
Figura 5.43. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6m com 50 horas de ensaio para configuração D04-3U.	114
Figura 5.44. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D04-3U.	115
Figura 5.45. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D06-3U.	116
Figura 5.46. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de terceiro grau do comparativo para configuração D06-3U.	117

Figura 5.47. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D06-3U.	117
Figura 5.48. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6m com 50 horas de ensaio para configuração D06-3U.....	118
Figura 5.49. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D06-3U.	118
Figura 5.50. Taxa de troca de calor entre estacas com uma volta.....	120
Figura 5.51. Variação da taxa de troca de calor com relação às estacas de 30 cm de diâmetro e tubulação com uma volta.....	120
Figura 5.52. Taxa de troca de calor entre estacas com duas voltas.....	122
Figura 5.53. Variação da taxa de troca de calor com relação às estacas de 30 cm de diâmetro e tubulação com duas voltas.....	123
Figura 5.54. Taxa de troca de calor entre estacas com três voltas.	124
Figura 5.55. Variação da taxa de troca de calor com relação às estacas de 30 cm de diâmetro e tubulação com três voltas.	125
Figura 5.56. Taxa de troca de calor para estacas de 30 cm de diâmetro e as 3 configurações de tubulação.	126
Figura 5.57. Taxa de troca de calor para estacas de 40 cm de diâmetro e as 3 configurações de tubulação.	127
Figura 5.58. Taxa de troca de calor para estacas de 60 cm de diâmetro e as 3 configurações de tubulação.	127
Figura 5.59. Resultado da troca de calor, com variação da saturação, para bloco B9-D04-2U.	130
Figura 5.60. Resumo geral da troca de calor normalizada de todos grupos de estaca.	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Valores típicos das propriedades térmicas dos solos. Modificado (Lhendup et al., 2014).....	16
Tabela 2.2. Valores dos parâmetros χ e n . (Cotê & Konrad, 2005)	21
Tabela 2.3. Valores dos parâmetros β . (Cotê & Konrad, 2005).....	21
Tabela 2.4 Principais características das estacas de energia. (Palud & Hubbuch, 2007).....	27
Tabela 2.5. Resumo do estudo econômico do sistema. (Palud & Hubbuch, 2007)	29
Tabela 2.6. Especificações do Edifício. (Yasuhiro et al., 2007)	31
Tabela 2.7. Demonstrativo de cálculo da demanda energética do edifício em Saporro. (Yasuhiro et al., 2007).....	33
Tabela 2.8. Resumo dos resultados dos 131 dias de medição referentes ao período de aquecimento. (Yasuhiro et al., 2007)	34
Tabela 2.9. Dados básicos do empreendimento One New Change (Spiers, 2010).....	36
Tabela 2.10. Propriedades térmicas dos materiais. (Orozco, 2016).....	41
Tabela 2.11. Resultado do estudo de modelagem da geometria do modelo. (Orozco, 2016)..	42
Tabela 3.1. Caracterização geotécnica do solo da UnB modificado (Mota, 2003).....	53
Tabela 3.2. Propriedades mineralógicas do solo do campus experimental da UnB. (Carvalho, 1995).....	54
Tabela 3.3. Resumo das propriedades do solo.	60
Tabela 3.4. Resultado da Capacidade de calor específico do solo.	61
Tabela 3.5. Condutividade térmica dos minerais	63
Tabela 3.6. Condutividade térmica equivalente dos minerais para cada faixa de profundidade.	63
Tabela 3.7. Condutividades térmica segundo Côté and Konrad (2005) para valores máximos de umidade.	64
Tabela 3.8. Condutividades térmica segundo Côté and Konrad (2005) para valores mínimos de umidade.	64
Tabela 3.9. Condutividade térmica segundo Lu et al (2007) para valores máximos de umidade.	65
Tabela 3.10. Condutividade térmica segundo Lu et al (2007) para valores mínimos de umidade.	65
Tabela 3.11. Resumo com intervalo de valores da condutividade térmica segundo os modelos calculados e a variação de umidade.	66
Tabela 3.12. Resumo dos modelos utilizados para cada propriedade e sua variação.	67
Tabela 4.1. Combinações possíveis e executadas.	81
Tabela 5.1. Média da troca de calor dos blocos para estacas com uma volta na tubulação. ..	121

Tabela 5.2. Variação da troca de calor média com relação às estacas com 30 cm de diâmetro e tubulação com uma volta.....	121
Tabela 5.3. Média da troca de calor dos blocos para estacas com duas voltas na tubulação.	123
Tabela 5.4. Variação da troca de calor média com relação às estacas com 30 cm de diâmetro e tubulação com duas volta.	123
Tabela 5.5. Média da troca de calor dos blocos para estacas com três voltas na tubulação...	125
Tabela 5.6. Variação da troca de calor média com relação às estacas com 30 cm de diâmetro e tubulação com três voltas.	125
Tabela 5.7. Resultado da troca de calor do bloco B9-D04-2U com variação da saturação. ..	129

NOMENCLATURA, SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABREVIATURAS

B	Bloco
COP	Coeficiente de performance
DF	Distrito Federal
GSHP	Ground source heat pump / Bomba de calor geotérmica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
SP	São Paulo
U	Voltas que a tubulação faz dentro da estaca
ONU	Organização das Nações Unidas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
BRIC's	Brasil, Rússia, Índia e China
HDPE	High-Density Polyethylene
e_t	Vetor tangencial unitário ao longo da borda da tubulação

NOMENCLATURA

A	Área da secção transversal da tubulação	[m ²]
ΔL	Acréscimo na profundidade da estaca, para estudo de simulação numérica	[m]
\dot{q}_G	Calor gerado por unidade de volume	[W/m ³]
u	Campo de velocidade do fluido dentro da tubulação	
C	Capacidade térmica	[J/kg.K]
C_w	Capacidade térmica da água	[J/kg.K]
C_p	Capacidade térmica do solo	[J/kg.K]
C_{pf}	Capacidade térmica específica do fluido	[J/kg.K],
c_{vw}	Capacidade volumétrica média da água	[J/kg.K]
R^2	Coefficiente de determinação	[adm]
h_{eff}	Coefficiente de transferência efetiva	[W/m ² .K]
h_{ext}	Coefficiente de transferência térmica parede externa	[W/m ² .K]
h_{int}	Coefficiente de transferência térmica parede interna	[W/m ² .K]
L_e	Comprimento da estaca	[m]
K	Condutividade térmica	[W/m.K]
k_{HDPE}	Condutividade térmica do HDPE	[W/m.K]
K_r	Condutividade térmica normalizada	[W/m.K]
K_{dry}	Condutividade térmica do solo seco	[W/m.K]
K_s	Condutividade térmica dos minerais formadores do solo	[W/m.K]
K_{sat}	Condutividade térmica do solo saturado	[W/m.K]
K_m	Condutividade térmica dos minerais do solo	[W/m.K]
L_e	Comprimento da estaca	[m]
γ	Densidade	[kg/m ³]

ρ	Densidade aparente do solo	[kg/m ³]
ρ	Densidade seca do solo	[kg/m ³]
D	Diâmetro das estacas	[m]
d_h	Diâmetro hidráulico da tubulação	[m]
α	Difusividade térmica	[m ² /s]
f_D	Fator de atrito de Darcy	[adm]
e	Índice de vazios	[adm]
qz	Fração volumétrica de quartzo	[adm]
r_e	Limite exterior da tubulação	[m]
r_i	Limites interior da tubulação	[m]
m	Massa	[kg]
Ke	Número de Kersten	[adm]
NU	Número de Nusselt	[adm]
Pr	Número de Prandtl	[adm]
RE	Número de Reynolds	[adm]
γ_{sat}	Peso específico aparentemente saturado	[kg/m ³]
γ_d	Peso específico aparente seco	[kg/m ³]
γ_s	Peso específico das partículas sólidas	[kg/m ³]
ρ_w	Peso específico da água	[kg/m ³]
γ	Peso específico natural	[kg/m ³]
η	Porosidade	[adm]
Rdom	Raio do domínio de estaca	[m]
Sr	Saturação do solo	[adm]
Q	Taxa de troca de calor	[W]
Q _L	Taxa de troca de calor normaliza	[W/m]
T _g	Temperatura da calda de cimento do domínio	[K]

T_f	Temperatura do fluido circulante respectivamente	[K]
T_{entrada}	Temperatura de entrada da água na tubulação	[°C ou K]
$T_{\text{saída}}$	Temperatura de saída da água na tubulação	[°C ou K]
T_{ref}	Temperatura do refrigerante	[°C ou K]
q_{wall}	Troca de calor na tubulação	[W/m]
QLB	Troca de calor normalizada média do grupo de estacas	[W/m]
QL B1	Troca de calor normalizada para bloco com 1 estaca	[W/m.e]
W	Umidade do solo	[adm]
ΔT	Varição de temperatura	[°C/K]
V	Velocidade média na seção da tubulação	[m/s]
u	Velocidade unidimensional	[m/s]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[m ² /s]

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO

Em 1987, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, publicou um relatório inovador que trouxe o conceito de desenvolvimento sustentável para o discurso público (ONU, 2016). A partir disso, iniciou-se uma discussão sobre esse tema vislumbrando a qualidade de vida das gerações futuras. Tal fato, aliado à segunda crise do petróleo, que elevou os preços, entre os anos 1970's e 1980's, estimulou a realização de pesquisas em diversos países do mundo (especialmente na Europa) sobre novas fontes energéticas, potenciais de recursos renováveis e tecnologias ambientais. Na década de 2000 outras ocasiões elevaram os preços do petróleo, como os atentados de 11 de Setembro de 2001 e a segunda Guerra do Golfo em 2003, impulsionando mais a busca por energias renováveis (Mártil, 2016).

A adoção de sistemas com energias renováveis levou a Europa a se tornar menos dependente da oscilação dos valores do petróleo. De acordo com a Comissão Europeia (2011), um dos objetivos é possuir 20% de sua matriz energética advinda de fontes renováveis. Outras vantagens desse sistema são a redução da emissão de gases, baixo risco de contaminação e viabilidade econômica a longo prazo. Portanto, unem consciência ambiental e estabilização de preços, sendo assim uma excelente opção de energia sustentável.

A Europa tem diversas fontes de energias renováveis, como fotovoltaica, solar, pequenas hidrelétricas, energia oceânica e as energias geotérmicas (Eurobserv'ER, 2014). Ainda em 1980's a Áustria se tornou o país pioneiro a utilizar as fundações como estrutura trocadora de calor com solo, destacando-se até os dias atuais em relação a outros sistemas de bombas de calor geotérmicas (GSHP). Em 2004 atingiu a marca de mais de 5000 estacas de energia por ano, acumulando mais de 22000 estacas instaladas. Por ser um sistema que funciona tanto para aquecimento como resfriamento, o sucesso já é consagrado neste país, levando-o a reduzir 300.000 toneladas de combustível por ano (Brandl, 2006).

1.2. MOTIVAÇÃO

O Brasil é um país que apresenta diferentes climas: equatorial; semi-árido; temperado e tropical, sendo que 53,8% do seu território pode ser considerado úmido e quente, e 25,2% seco e quente, totalizando 79% do território como área de clima quente (Alves & Schmid, 2015), demonstrando um grande potencial de mercado para novas modalidades de condicionamento de ambientes, como é o caso das estacas trocadoras de calor.

Em 2015 o Brasil atingiu a marca de 41,2% de sua matriz energética centrada em fontes renováveis. Devido às condições geológicas e hidrográficas favoráveis, 11,3% da matriz advém das hidrelétricas e 16,2% de biomassa. (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2016) Porém estas duas fontes energéticas estão sujeitas a variáveis ambientais e climáticas que podem desestabilizar economicamente a produção e preço das mesmas, como é o caso da interferência do período de secas que prejudicam as lavouras de cana e abaixa os níveis dos reservatórios prejudicando a produção de energia, podendo chegar a situações extremas como os apagões do início dos anos 2000's. Apesar do elevado percentual de energias renováveis na matriz energética brasileira, não foi encontrado registros a respeito de utilização de energia geotérmica na matriz energética nacional.

Analisando-se o contexto econômico-industrial, o Brasil perde competitividade devido ao alto valor de sua energia, que é em média, 134% maior que a média dos outros países do BRIC's. Segundo Barbosa (2016), a saída para tornar o Brasil mais competitivo está na diversificação da matriz energética. Portanto, é necessário desenvolver novas tecnologias e fontes de energias renováveis, como o caso da energia geotérmica superficial com aproveitamento das estruturas de fundação. O primeiro passo foi dado por Orozco (2016) com sua pesquisa que concluiu que o solo tropical é um excelente trocador de calor.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a eficiência térmica de diferentes configurações de grupos de estacas de energia em um solo tropical não saturado da cidade de Brasília-DF, através de simulação numérica. Como base utiliza-se as conclusões e resultados do estudo realizado por Orozco (2016) que indica as condições térmicas ótimas de funcionamento de uma estaca trocadora de calor.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Entender qual parâmetro tem maior influência nas propriedades térmicas do solo.
- Analisar a influência na troca de calor das estacas com relação ao diâmetro, número de voltas da tubulação e número de estacas nos blocos.
- Identificar a melhor configuração do sistema geotérmico no contexto de cada grupo de estacas.

1.4. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Para cumprir os objetivos traçados na dissertação, dividiu-se a dissertação em 6 diferentes capítulos: Introdução, Revisão bibliográfica, Materiais e Métodos, Análise numérica de troca de calor em grupos de estacas, Resultados das simulações paramétricas e por fim conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Na introdução trata-se de um contexto geral da questão energética no Brasil e no mundo, após lista-se os objetivos principais e específicos, e por fim qual escopo da dissertação, dissertando-se a respeito da estrutura de cada capítulo.

Na revisão bibliográfica, segundo capítulo da dissertação, destrincha o assunto das estacas trocadoras de calor iniciando por assuntos mais gerais como propriedades térmicas do solo e elementos do sistema, mecanismos de transferência de calor até assunto mais específicos, como métodos empíricos de cálculo de propriedades térmicas do solo, funcionamento de um sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP) e por fim 3 casos de utilização do sistema na qual houve monitoramento do sistema ou maior detalhamento do projeto e resultados.

Em materiais e métodos, terceiro capítulo, discutiu-se sobre o local de escolha, como o solo modelo para a dissertação, a geologia do local, além de todo perfil mineralógico, geotécnico e térmico utilizado como modelo. Discutiu-se também a forma de cálculo das propriedades térmicas do solo e por fim faz-se um apanhado geral sobre o assunto.

O quarto capítulo, análise numérica de troca de calor em grupos de estacas, inicia discutindo sobre elementos importantes para o estudo com uso do software COMSOL e as considerações feitas para modelagem numérica, além de um passo a passo para modelagem. Logo após discorre sobre os tipos de modelos parametrizados e como se processou os dados.

Resultado das simulações paramétricas, quinto capítulo da dissertação expõe os resultados ao mesmo tempo que faz pequenas conclusões a respeito do porquê dos resultados.

O sexto capítulo, finaliza a dissertação com as conclusões a respeito do estudo, focando principalmente na otimização da troca de calor nos grupos de estaca e também faz considerações a respeito de melhorias para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS GERAIS DO SISTEMA DE BOMBAS DE CALOR (GSHP)

Os sistemas GSHP (“Ground Source Heat Pump”) ou bombas de calor geotérmicas, são termoativos e basicamente capturam o calor ou frio do ambiente e fazem a troca deste calor com o solo. Eles tiveram seu início na Áustria e surgiram como uma alternativa de aquecimento para o inverno europeu. Ao mesmo tempo, a demanda por resfriamento começou a crescer, devido às mudanças nos projetos das casas que passaram a incorporar alternativas como grandes fachadas de vidro, e janelas permanentemente fechadas de arquitetura moderna. Na figura 2.1 tem o histórico de energia requeridas para aquecimento em casas na Áustria (Brandl, 2006).

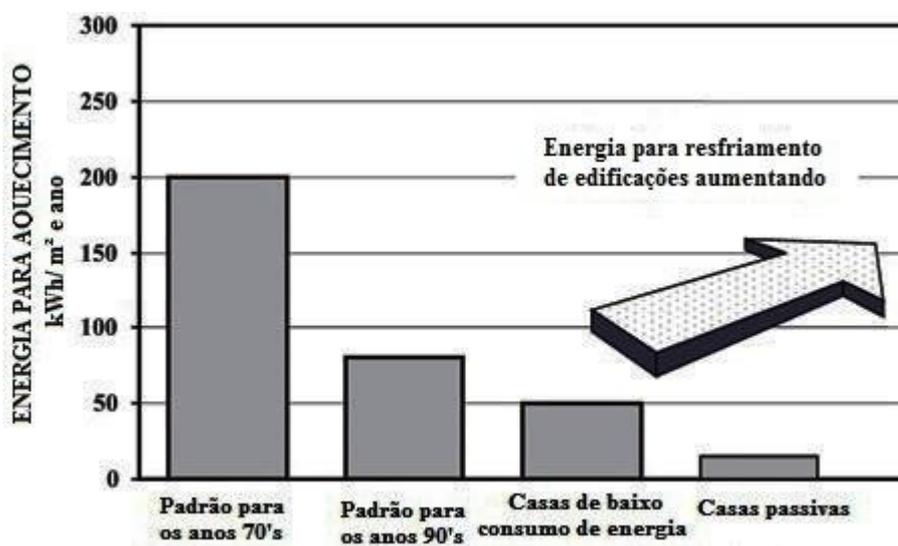


Figura 2.1. Energia para aquecimento de casas na Áustria desde anos 1970 (Brandl, 2006).

Atualmente os projetos no país pioneiro na tecnologia são denominados de “Casas Passivas”, um conceito no qual elas precisam do mínimo ou não precisam de energia convencional para aquecimento ou resfriamento, com isto a tecnologia aqui estudada é uma alternativa barata e limpa para complementar esta pouca demanda de energia necessária.

Um sistema GSHP é composto basicamente por três componentes como se vê na figura 2.2, sendo eles:

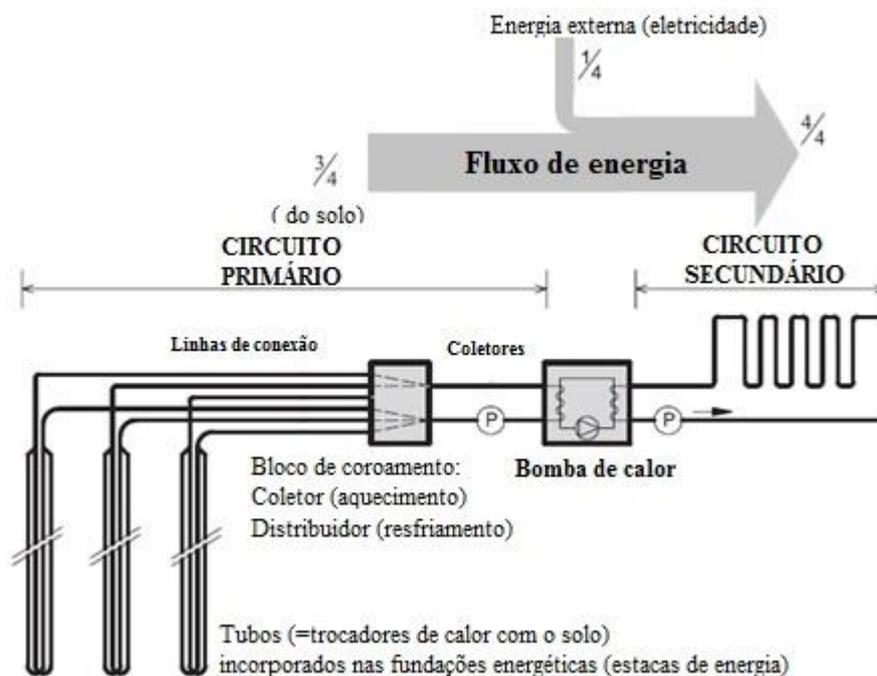


Figura 2.2.Esquema de uma planta de energia geotérmica com estacas de energia. (Brandl et al 2006)

- Circuito primário: transfere calor para o solo ou corpo d’água através de bobinas ou tubulações contendo água, misturas anticongelantes ou outros fluidos trocadores de calor.
- Bomba de Calor: elas maximizam o acondicionamento e operam de acordo com o princípio convencional das bombas de calor. Todos os componentes são concentrados num mesmo equipamento que inclui um trocador de calor com o circuito primário, compressor, controles, ventiladores, filtro de ar, um manipulador de ar e um trocador de calor com o circuito secundário.
- Circuito secundário: distribui ou retira calor do interior da edificação. O sistema geralmente utiliza dutos ou serpentinas passando pela estrutura do edifício para transferência de calor (Brandl et al. 2006).

Os sistemas trocadores de calor também conhecidos como GHE’s (“Ground Heat Exchangers) se dividem em cinco diferentes categorias segundo Wu (2009), como é possível observar na figura 2.3:

- Circuitos abertos (extração/recarga): estes sistemas são fornecidos por água de corpos hídricos como rios, lagos, lagoas ou poços. Consiste-se em ter uma fonte de extração de água e outra de re-injeção formando um circuito aberto.

- Circuitos de lagoa: este sistema é fechado e não utiliza água do corpo hídrico, porém as tubulações trocam calor com o corpo hídrico.
- Estacas de energia ou estacas trocadoras de calor (*Energy Piles / Pile Heat Exchanger System*): este utiliza as estacas das fundações para abrigar as tubulações que conduzem a circulação dos líquidos refrigerantes circulares e as mesmas ficam ligadas a uma bomba de calor.
- Circuito horizontal: é um sistema fechado, porém posicionado de forma horizontal. Este se assemelha bastante com uma serpentina e geralmente é utilizado em áreas rurais, pois necessita de muito espaço.
- Sistema fechado de poços: Sistema fechado instalado dentro de um poço previamente escavado (preenchido com concreto ou água). Geralmente esta solução é utilizada em locais com problemas de espaço (Wu, 2009).

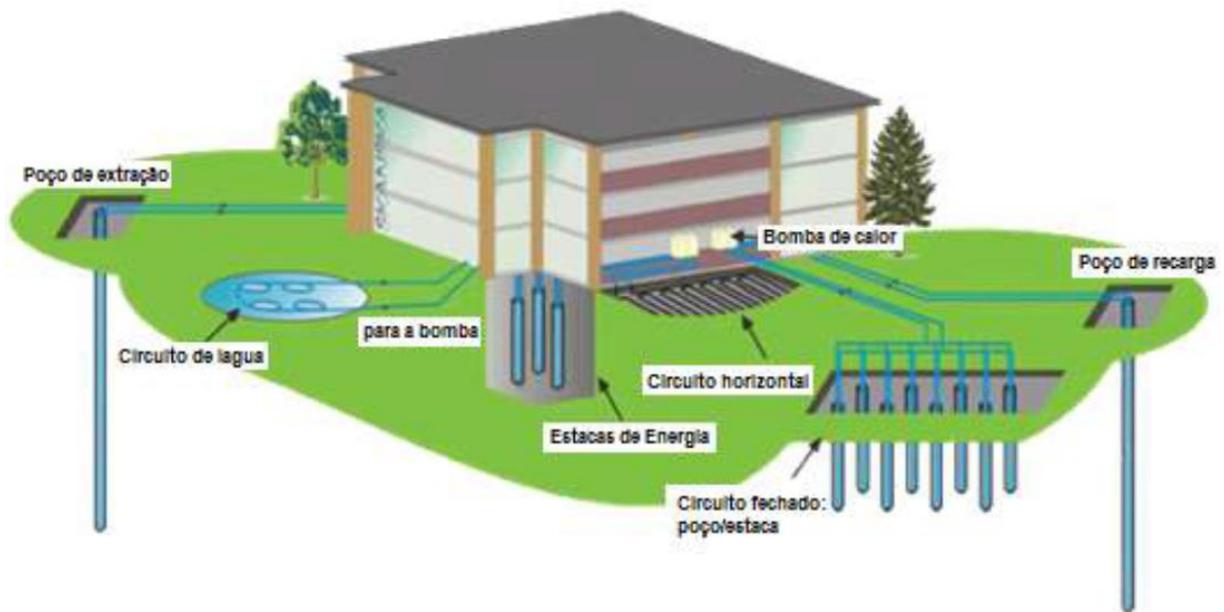


Figura 2.3. Categorias de sistemas geotérmicos trocadores de calor (Hemmingway, 2011).

Além das aplicações para edifícios, os GSHP's podem ser desenvolvidos em revestimento de túneis, pavimentos, estacionamentos, pistas de aeroportos, sistemas de ancoragem em túneis dentre outras, para aquecer ou resfriar ambientes das mais variadas propostas (Brandl, 2016). Ver figura 2.4.



Figura 2.4.(a) Geossintético energético (geocomposto instalado em um túnel de energia) (Brandl, 2006). (b) Pavimento Geotérmico no Oregon, Estados Unidos (Lund, 1999).

Esse sistema se torna interessante uma vez que a temperatura do solo a cerca de 5 a 10 metros deixa de sofrer as influências da amplitude térmica do ambiente e se mantém estável por quase todo ano (Bidarmaghz et al., 2013). Com isto, em climas quentes o solo irá resfriar o ambiente e em climas frios o solo aquecerá. Logo a tecnologia se torna interessante para países frios, quentes ou temperados.

Algumas vantagens dos sistemas trocadores de calor são:

- Mais de 50% de redução nas emissões de CO₂ para novas edificações (Laloui et al., 2006).
- Menor quantidade de emissões contaminantes do que outros sistemas.
- Utilização de bombas renováveis e de eficiência energética.
- Redução no uso de energia primária e crescimento do uso de energias renováveis (Laloui et al., 2006).
- Simplicidade, uma bomba localizada em qualquer lugar gera aquecimento ou esfriamento independente para cada ambiente (Geothermal Communities, 2010).
- Baixa manutenção.
- Equipamento não fica exposto ao tempo (Geothermal Communities, 2010).
- Baixo impacto ambiental, pois não usa combustíveis fósseis e a energia utilizada pode ser renovável (Geothermal Communities, 2010).
- Longa expectativa de vida. Pesquisas concluíram que a tecnologia dura 20 anos ou mais (GeothermalCommunities, 2010).
- Baixo custo para integrar aquecimento de água (Geothermal Communities, 2010).
- Diminuta probabilidade de risco de contaminação do solo devido às relativas baixas temperaturas e pressões do sistema.

2.2. COMO FUNCIONA O SISTEMA DE ESTACAS DE ENERGIA

A temperatura experimentada pelas pessoas em um ambiente é composta pela temperatura do ar e da temperatura da estrutura, emitida por radiação (temperatura das paredes e lajes), na qual a razão entre elas é essencial (Brandl, 2006). Desta maneira o sistema geotérmico age tanto para resfriar ou aquecer a temperatura do ar e a estrutura do edifício por meio das paredes ou lajes.

Como explicitado no item 2.1, o sistema é formado por 3 partes, o circuito primário, circuito secundário e a bomba de calor, as três partes são fechadas, ou seja, os fluidos que circulam no interior de cada não se misturam com os fluidos dos outros circuitos. A transferência de calor entre os circuitos são feitas apenas por processos físicos, como a condução, convecção ou radiação. A figura 2.5 mostra o esquema do sistema como um todo em um edifício. O sistema primário (tubulação imersa nas contenções e estacas que trocam calor com o solo), a bomba de calor central ao sistema e o sistema secundário (neste caso imerso nas paredes e lajes por

serpentinas de tubos de PEAD), lembrando que o mesmo também pode conduzir calor através do sistema de ar.

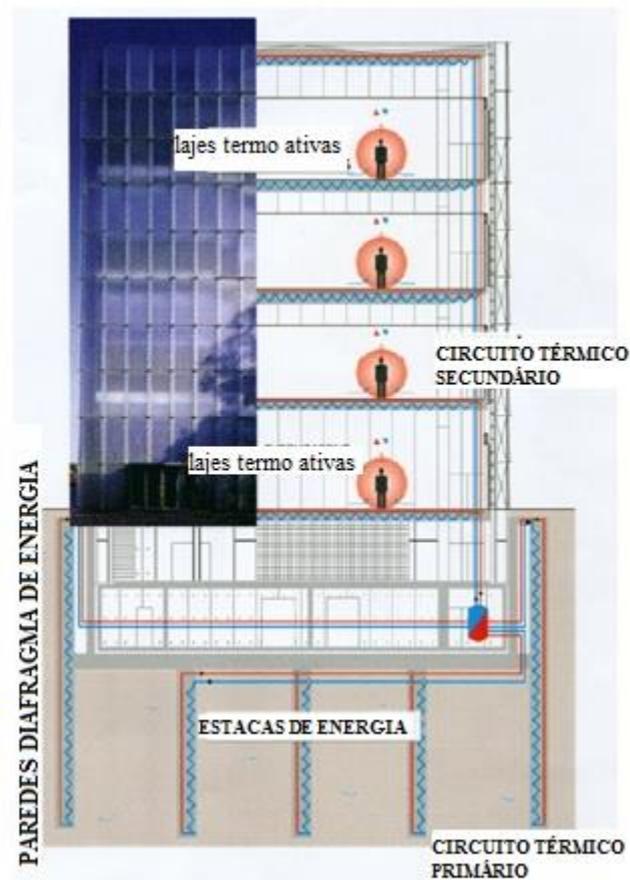


Figura 2.5. Seção transversal de um edifício com sistema geotérmico (Brandl, 2013).

As bombas de calor funcionam de maneira parecida com um sistema de ar condicionado. As mesmas possuem opções de funcionamento para aquecimento ou resfriamento, habilitando o sistema para ser utilizado em tempo frio ou quente, sendo utilizável durante todo período do ano. Durante o inverno o sistema retira calor do solo para injetar no ambiente, durante o verão o calor do ambiente é injetado no solo. Isso é possível pois a temperatura do solo mantém certa constância e sua variação é mais amena que a variação das temperaturas diárias.

O sistema para resfriamento de ambiente através de sistemas geotérmicos de troca de calor funciona como no esquema mostrado na figura 2.6 que utiliza temperaturas usuais como exemplo. Neste exemplo o circuito secundário utiliza ar como fluido, mas líquido também poderia ser utilizado para trocar calor com a estrutura do edifício através de serpentinas espalhadas pelas lajes e paredes.

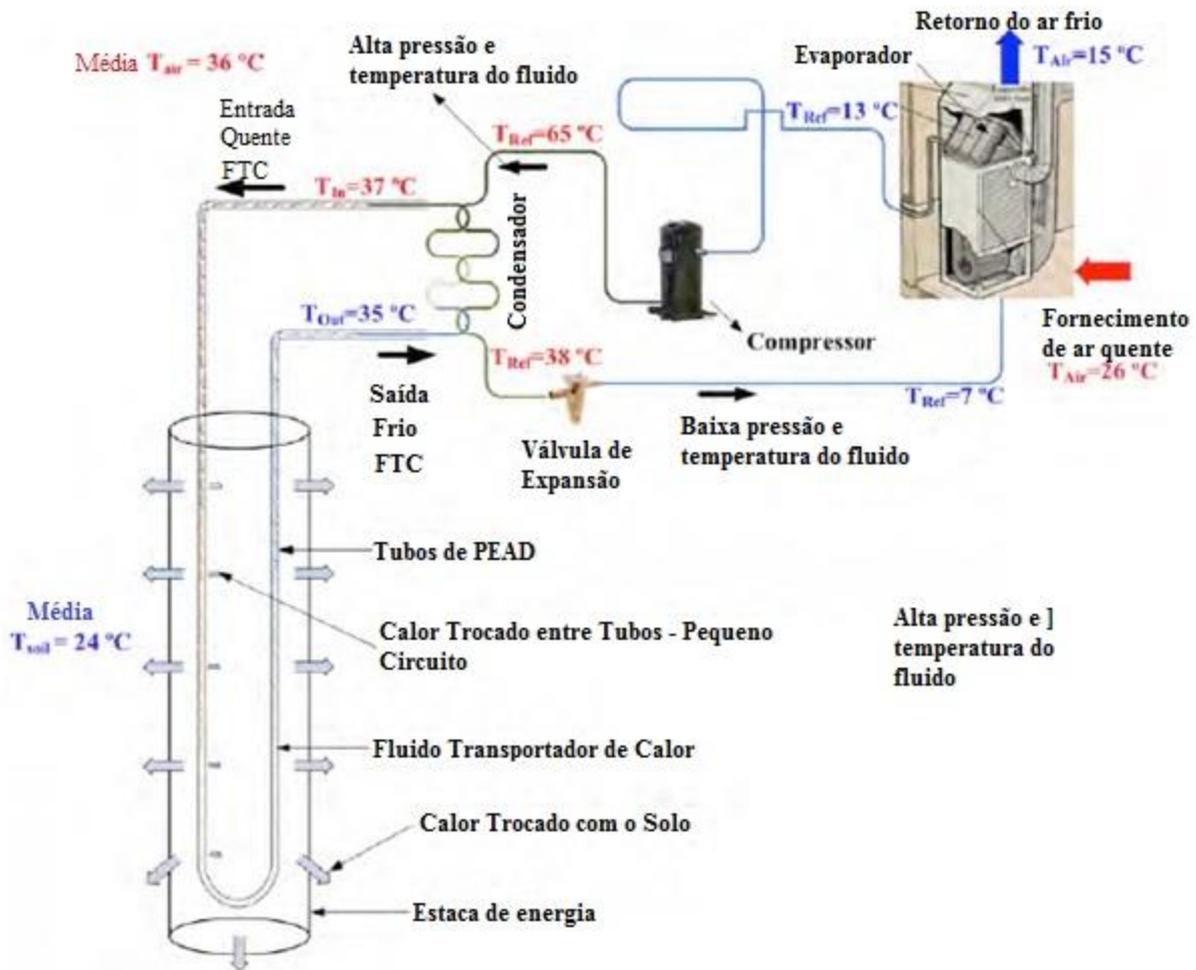


Figura 2.6. Esquema de Sistema de energia geotérmica utilizando estacas de energia no modo de resfriamento (Ghassan, 2014).

O sistema funciona em três partes: troca de calor entre o ambiente (circuito secundário) e bomba de calor; processamento da temperatura dentro da bomba de calor e troca de calor entre bomba de calor e estrutura geotérmica (circuito primário). Importante salientar que o fluido de cada um das três partes do sistema não se misturam, eles trocam calor entre si, apenas por processos físicos como convecção ou condução térmica.

O funcionamento do sistema inicia-se pela troca de calor entre o ambiente e o circuito de bomba de calor de acordo com os seguintes passos:

- O processo de resfriamento do ar do ambiente se dá pela seguinte operação: o ar quente do ambiente é sugado da edificação pelos dutos de ar e conduzido ao interior do evaporador (parte da bomba de calor) que circula o seu fluido (líquido) a baixa temperatura.

- Por causa do gradiente de temperatura entre o ar do ambiente e o líquido do evaporador um mecanismo de convecção forçada transfere calor do ar do ambiente para o líquido do evaporador e isto faz com que o ar a temperatura mais baixa seja devolvido ao ambiente.

Circuito da bomba de calor:

- Após a saída do evaporador o líquido que circula na bomba de calor ganha alguns graus, pois recebeu calor do ar quente do ambiente.
- No compressor, o líquido é comprimido e tem sua pressão e temperatura elevados.
- O próximo instrumento da bomba de calor é o condensador, nele há troca de calor entre o líquido da bomba de calor e o líquido do circuito primário (estacas) lembrando que esses líquidos não se misturam.
- Dentro do condensador a temperatura do líquido da bomba de calor diminui pois ele troca calor com o líquido que circula pelas estacas que possui menor temperatura. Com isto há troca de calor entre os dois sistemas, e o circuito primário (estacas) atua como um *input* extra de energia de refrigeração para o sistema, demandando menor quantidade de energia elétrica para este processo de resfriamento do líquido da bomba de calor.
- Na válvula de expansão a pressão do fluido cai bastante e conseqüentemente sua temperatura, até que o fluido chega a baixa temperatura no evaporador e o ciclo se repete (Ghassan, 2014).

Circuito primário (Estruturas geotérmicas):

- No condensador, o líquido que circula pelas estacas ganha alguns graus, pois recebe calor. Uma bomba faz a água circular pelas estacas e devido ao comportamento da temperatura do solo, o fluido irá perder calor no modo de resfriamento.
- Após o caminho dentro da estaca, o líquido perde calor para o solo e tem sua temperatura diminuída, com isto o mesmo segue para o condensador atuando como uma adição extra de energia para decaimento da temperatura, porém neste caso ela é constante e grátis.

Salienta-se que este exemplo mostra um sistema funcionando na função de resfriamento do ambiente. Para casos que se faz necessário aquecer o ambiente, basta inverter o sentido de circulação dos fluidos.

2.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS

Para problemas de troca de calor, alguns parâmetros são necessários para previsão do comportamento térmico. Para este estudo em especial, dois parâmetros foram utilizados diretamente, sendo eles a condutividade térmica e a capacidade térmica específica, que foram utilizados para indicar como se comportaria a troca de calor nas estacas.

- Condutividade térmica:

A condutividade térmica pode ser definida como a propriedade que mede a transferência de energia ou calor entre moléculas que compõe as partículas do solo, esta definida pela eq. (2.1) (Ennigkeit & Katzenbach, 2001).

$$K = \frac{Q}{\Delta T} \text{ [W.m}^{-1}\text{K}^{-1}] \quad (2.1)$$

Sendo Q a densidade de fluxo de calor em uma área determinada e ΔT o gradiente de temperatura para cada direção analisada.

Esta propriedade varia no solo de acordo com a temperatura, porosidade e composições química e mineralógica. No caso de solos saturados, a condução térmica é muito mais rápida que em solos não saturados. Solos orgânicos ricos em xisto ou carvão geralmente tem baixa condutividade térmica em contraste com solos na qual a geologia tem altas taxas de quartzo (Moel et al. 2010).

- Capacidade térmica:

A capacidade térmica (C) descreve a quantidade de calor fornecida a um corpo relacionada à variação de temperatura que o mesmo experimenta. Já a capacidade térmica específica (Cp) está ligada a capacidade térmica relacionada pela unidade de massa do material em questão. Descrita pela Eq. 2.2 abaixo:

$$Cp = \frac{q}{m.\Delta T} \text{ [J/kg.K]} \quad (2.2)$$

Sendo q o calor medido, m a massa do material e ΔT variação de temperatura experimentada.

No caso de estruturas trocadoras de calor, essa propriedade é muito importante, pois determina o potencial de troca de calor dos materiais. Ela é dependente das fases do solo, dos minerais que o constituem, da densidade volumétrica aparente (bulk density), do teor de sólidos, e dos fluidos que complementam a estrutura do solo: gases e líquidos.

- Difusividade térmica:

A difusividade térmica (α) descreve a capacidade de um material conduzir energia em relação à capacidade de armazenar energia térmica. Desta maneira, difusividade térmica alta significa que o calor se move rapidamente através de uma seção transversal devido ao meio conduzir energia térmica rapidamente em relação à sua capacidade térmica e densidade aparente. A equação 2.3 descreve como calcular a mesma:

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot Cp} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad (2.3)$$

Na qual α é a difusividade térmica, K a condutividade térmica, ρ densidade aparente, Cp é capacidade térmica específica do material.

2.4. GENERALIDADES TÉRMICAS DOS SOLOS TROPICAIS

Devido a sua magnitude territorial, o Brasil ocupa duas zonas do globo: a tropical e a temperada. Os principais agentes formadores dos solos dos países localizados nestas regiões são o intemperismo e a erosão. O intemperismo é provocado por agentes como ciclo térmico e pluviométrico e atividade microbiológica. No caso da erosão há transporte de material e este pode ser pela gravidade, vento e águas superficiais que transportam e depositam materiais em outros lugares, criando depósitos compostos por diferentes camadas de solo ao longo do tempo. Estes processos naturais permitem a formação dos solos classificados como lateríticos e saprolíticos, que têm características volumétricas e gravimétricas bem particulares dependendo dessa conformação (Maragon, 2005). Os principais compostos químicos destes solos são oxigênio, silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio (IBRACON, 2017). Se tratando da mineralogia, a figura 2.7 mostra um perfil típico do solo de Brasília que é um bom representante dos solos tropicais. Estes solos por estarem em uma região plana, contém um perfil típico de porosidade, que inicia com valores altos e decaem conforme a profundidade aumenta, ver figura 3.8 que contém o perfil do solo do campo experimental da UnB um bom representante dos solos tropicais típicos do Centro-oeste. Isto acontece devido a topografia, geralmente plana, que faz com que a água de infiltração vá lavando as camadas mais superficiais do solo e depositando partículas menores nas camadas mais profundas.

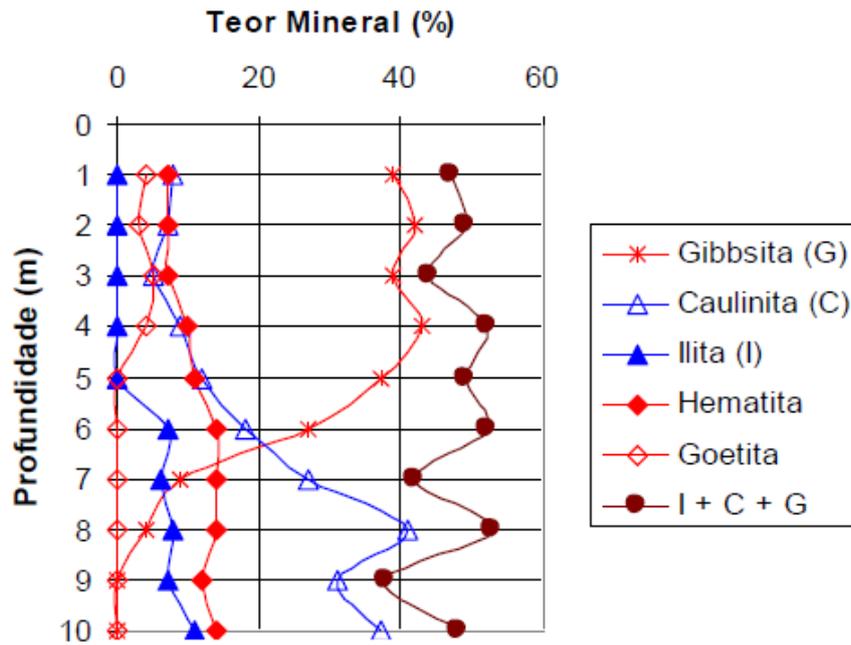


Figura 2.7. Mineralogia de um perfil de alteração típico do Distrito Federal (IBRACON, 2017).

A condutividade térmica dos solos varia muito de acordo com sua composição química, mineralógica, estrutural e grau de saturação. De forma geral, a condutividade térmica tem relação inversamente proporcional à porosidade, logo materiais mais porosos tem menor condutividade térmica, enquanto os menos porosos possuem maior condutividade. Farouki (1981) explica que devido ao fato do principal meio de transferência de calor no solo ser a condução térmica, a porosidade dá indicativo da quantidade de partículas sólidas que há no mesmo. Como a condução térmica é feita através do contato grão a grão, porosidade menor gera maior superfície de condução para o calor e conseqüentemente maior é a condutividade do solo de maneira geral. Mineralogicamente, quando o solo tem maior concentração de minerais como quartzo, olivinas, piroxênios e anfíbolitos, a condutividade térmica é maior. Dentre os minerais, o quartzo é o que mais entrega condutividade térmica ao solo, no entanto com aumento elevado da temperatura este pode reduzir sua condutividade térmica, porém não para os níveis de trabalho das estacas trocadoras de calor que são temperaturas geralmente abaixo de 50°C, podendo considerar níveis máximos de condutividade térmica. Minerais como sílica e diábase aumentam sua condutividade com aumento de temperatura. Enquanto solos com alta porcentagem de feldspatos têm um comportamento similar ao quartzo, se tratando da temperatura (Robertson, 1988).

Finalmente, a saturação do solo é outra variável muito importante na condutividade térmica, esta pode variar na medida em que o grau de saturação aumenta ou diminui. Este fato ocorre, pois com a entrada de água nos poros, um bom condutor térmico dá lugar a um isolante térmico natural. Outro fato muito importante é que a presença de água adsorve os grãos do solo e geram pontes entre os grãos com um bom condutor térmica, isto também facilita a condução térmica e conseqüentemente a condutividade térmica do solo. Na figura 2.8 é mostrada de maneira geral a variabilidade da condutividade térmica com a saturação em areias, argilas e solos orgânicos (Hillel, 1998).

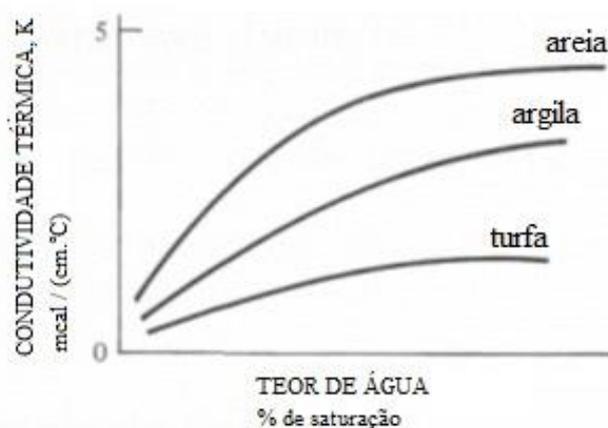


Figura 2.8.Variação geral da condutividade térmica com a saturação em solos arenosos, argilosos e orgânicos. (Hillel, 1998)

A tabela 2.1 mostra valores típicos de propriedades térmicas de diferentes tipos de solos segundo a literatura. Se tratando da idealização de um tipo de solo em especial para instalação de um sistema de bombas de calor geotérmica (GSHP), o mais indicado no caso é o solo com maiores propriedades térmicas. Não indica-se um tipo em especial, pois as propriedades dependem de diversos fatores que não apenas o tipo do solo.

Tabela 2.1.Valores típicos das propriedades térmicas do solos. Modificado (Lhendup et al., 2014)

Material	Condutividade Térmica (W/m.K)	Capacidade calorífica volumétrica (kJ/m ³ .K)	Peso específico (kg/m ³)	Capacidade térmica específica (J/kg.K)
Pedregulho	2.0 - 3.3	2200 - 2700	2600	846,2 - 1038,5
Areia	1.5 - 2.5	2500 - 3000	1900	1315,8 - 1578,9
Silte	1.4 - 2.0	2500 - 3100	1800	1389,9 - 1722,2
Argila	0.9 - 1.8	2200 - 3200	1700	1294,1 - 1882,4
Argilito	2.6 - 3.1	2340 - 2350	2210	1058,8 - 1063,3
Arenito	3.1 - 4.3	2190 - 2200	2200	995,5 - 1000,0

2.5. COMPORTAMENTO TÉRMICO E PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS DO SISTEMA

Três elementos além do solo são importantes para o fenômeno da troca de calor que rege todos os sistemas de bombas de calor geotérmicas (GSHP). São eles: o fluido refrigerante, o material do tubo que é imerso nas fundações e o concreto da estaca. Dependendo de suas propriedades ou características alcança-se maior ou menor eficiência na troca de calor.

- Fluido refrigerante: este é muito importante para a eficiência do sistema. Ele circula pelos tubos trocando calor com o solo e com o ambiente ou conduzindo e processando a temperatura dentro da bomba de calor. Três principais características são necessárias para a escolha do fluido, sendo elas: capacidade de transferência de calor, proteção contra congelamento e proteção do sistema contra corrosão ou ferrugem (Philip, 2013). A condutividade de calor deste é muito dependente do tipo de escoamento que se experimenta, sendo em fluxo turbulento sua maior eficiência. Geralmente utiliza-se água e dependendo dos casos alguns aditivos ou até mesmo solução salina.
- Concreto: o concreto nas estacas é uma ponte entre o fluido trocador de calor e a principal fonte de calor (solo). O concreto tem boa condutividade térmica e capacidade de armazenar calor, o que o faz um meio ideal de absorção de energia (Brandl, 2006).
- Tubulação: Geralmente utiliza-se tubulação em HDPE (polietileno de alta densidade) de 20 mm ou 25 mm de diâmetro com 2 ou 2,3 mm de espessura de parede. A especificação de espessura da parede está relacionado ao fato da pressão que a tubulação precisa estar durante processo de concretagem e funcionamento, cerca de 8 bar em valores usuais. Paredes muito finas poderiam não suportar a pressão e muito grossas diminuir a eficiência da troca de calor. O material empregado garante boa resistência e boa taxa de troca de calor.

2.6. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O fenômeno da transferência de calor se manifesta de três maneiras distintas: condução, convecção e radiação. No fenômeno da troca de calor entre estacas de energia dois dos mecanismos acima são utilizados, o da condução e o da convecção. Abaixo temos a definição de cada um:

- Convecção: este ocorre em fluidos. Quando aquecidos diminuem sua densidade e com isto tendem a se deslocar para cima, enquanto a parte do fluido com menor temperatura e

maior densidade tende a descer, quando se aquece, esta parte sobe e um ciclo acontece. Exemplo desse fenômeno ocorre em uma panela com água sendo aquecida. No fluido dentro da tubulação este fenômeno ocorre e aquece ou resfria água, ver figura 2.9 a seguir:



Figura 2.9. Água sob processo de convecção sendo aquecida em uma panela. (Teixeira, 2013)

- **Condução:** nos sólidos este é o fenômeno que modifica a temperatura. O contato do sólido com temperaturas mais altas geram agitação das moléculas. Esta agitação vai se propagando assim como o calor ao longo do sólido. Nas estacas de energia este tipo de fenômeno ocorre no interior da estaca e no solo. Exemplo deste fenômeno é o aquecimento de uma barra de aço em uma fonte de calor, como pode se observar na figura 2.10. Só será sentido o calor na outra ponta da barra após certo período, haja visto que a agitação molecular vai se transferindo entre as moléculas e percorrendo a barra do sentido do local onde está recebendo calor para a outra extremidade que não está recebendo.



Figura 2.10. Barra de aço sendo aquecida sob processo de condução (Motta, 2015)

- Radiação: este ocorre através de ondas eletromagnéticas e como as ondas se propagam até no vácuo não há necessidade de contato para que haja transferência de calor. Exemplo deste fenômeno ocorre com uma fogueira, que aquece mesmo de longe.

2.7. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO

2.7.1. EMPÍRICOS E SEMI EMPÍRICOS

- Kersten (1949):

Por volta de 1949 um dos primeiros métodos de estimação da condutividade térmica dos solos surgiu. As equações de Kersten surgiram a partir de extensivos testes em 19 solos naturais e rochas “fraturadas”. Suas equações foram desenvolvidas com base em 4 ou 5 tipos de solos diferentes e as mesmas determinam a condutividade térmica com base na umidade do solo (%) e sua densidade seca (γ_d).

As equação para argilas e siltes obtiveram desvios nos resultados medidos em cerca de até 25%. Uma das críticas a este método é a não consideração dos níveis de quartzo do solo, além de subestimar a propriedade para areias quartzosas e superestimar a propriedade para argilas puras (Farouki, 1981).

- Johansen (1975):

As últimas considerações acima, vieram das conclusões publicadas por Johansen em sua tese de doutorado em 1975.

Com base em dados de Smith & Byers (1938) e Smith (1942) e em dados próprios, Johansen notou que o principal fator na determinação da condutividade térmica num estado seco era a densidade seca e porosidade (microestrutura). Para ele, a condutividade da partícula fazia pouco efeito. Johansen dá muita importância ao mineral quartzo, enquanto que para os outros minerais constituintes do solo ele estipula uma condutividade térmica média.

O método é uma alternativa para interpolação entre condutividade térmica seca e saturada, agregando melhorias ao método de Kersten (Farouki, 1981).

- Cotê & Konrad (2005):

Integrando os efeitos de porosidade, grau de saturação, mineralogia e distribuição granulométrica Cotê and Konrad desenvolveram um modelo para determinação da condutividade térmica dos solos.

Cerca de 220 resultados experimentais foram analisados para desenvolver esta metodologia empírica para ajuste da condutividade térmica seca, outros 650 resultados foram analisados de diversos tipos de solos para se chegar à relação geral entre condutividade térmica normalizada dos solos e grau de saturação.

A figura 2.11 mostra o comparativo entre alguns destes resultados e os comparam com os valores medidos através nova formulação proposta pelos autores.

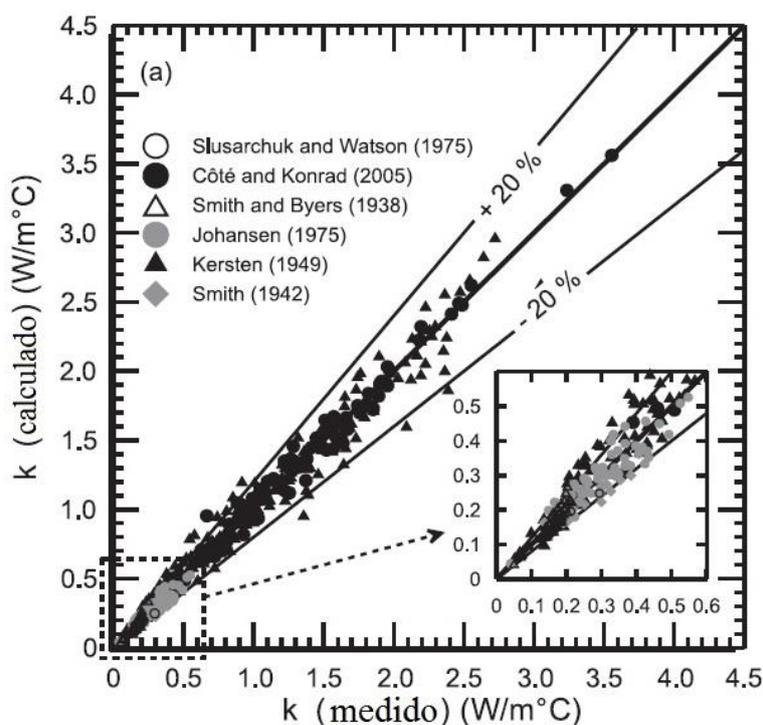


Figura 2.11. Comparativo entre valores medidos e calculados de condutividade térmica. (Cotê & Konrad, 2005)

Este estudo aprimorou o método de Johansen, e a principal mudança é que a condutividade térmica de todos minerais são levadas em consideração. Utilizando média e ponderação a composição mineral é levada em consideração para cálculo da condutividade térmica dos minerais formadores do solo (K_s).

Abaixo o passo a passo para utilização deste método. Para cálculo precisa-se de três variáveis de entrada, sendo elas:

K_m - Condutividade térmica dos minerais do solo analisado (W/m.K)

Sr - grau de saturação do solo (adimensional)

η - porosidade (adimensional)

Com estes dados em mãos, classifica-se o solo conforme as tabelas 2.2 e 2.3, então segue-se a ordem das equações abaixo, sendo elas:

Ks – Condutividade térmica dos minerais formadores do solo (W/m.K)

Ksat - Condutividade térmica do solo saturado (W/m.K)

Kr - Condutividade térmica normalizada

Kdry - Condutividade térmica do solo seco

O resultado final de condutividade térmica K é dado em (W/m.K).

Sendo:

Tabela 2.2. Valores dos parâmetros χ e n. (Cotê & Konrad, 2005)

Tipo de solo	χ	n
Pedregulhos e areias	1.70	1.80
Solos finos e areias naturais	0.75	1.20
Orgânico	0.30	0.87

Tabela 2.3. Valores dos parâmetros β . (Cotê & Konrad, 2005)

Tipo de solo	β
Pedregulhos e areias grossas	4.60
Areias médias e finas	3.55
Silte e solos argilosos	1.90
Solos orgânicos fibrosos	0.60

$$Ks = \prod_j k_{mj}^{x_j}, \text{ onde } \sum_j x_j = 1 \quad (2.4)$$

$$K_{sat} = k_s^{1-\eta} 0.6^\eta \quad (2.5)$$

$$K_r = \frac{\beta S_r}{1+(\beta-1)S_r} \quad (2.6)$$

$$K_{dry} = \chi 10^{-\eta n} \quad (2.7)$$

$$K = (K_{sat} - K_{dry})K_r + K_{dry} \quad (2.8)$$

- Lu et. Al (2007):

Em temperatura ambiente a relação entre Condutividade térmica e umidade pode ser explicada com base nas interações entre partículas sólidas e água. Para baixos valores de umidade, moléculas de água são fortemente adsorvidas nas superfícies das partículas, neste domínio a espessura dos filmes de água crescem com aumento de umidade, e a condutividade também aumenta mas não substancialmente. Este aumento de umidade inicia a formação de pontes de água entre as partículas sólidas de solo e a condutividade térmica começa a crescer rapidamente por causa do contato entre as partículas (Sepaskhah & Boersma, 1979; Tarnawski & Gori, 2002). O processo continua até a maioria das partículas estarem conectadas juntas. A distância entre água e ar também influenciam no aumento de K com aumento de W.

Estas discussões levaram a proposição de um novo método de cálculo de condutividade térmica normalizada (K_r) que o relacionava com grau de saturação (S_r) para toda gama de umidade. Tendo maior acertividade principalmente para solos finos e com baixa saturação. Utilizou-se dois parâmetros na nova formulação μ (parâmetro dependente da textura do solo) e o número 1.33 que é um parâmetro da forma. Com isto o novo K_r fica como na equação 2.9:

$$K_r = \exp\{\mu[1 - S_r^{\mu-1.33} S_r]\} \quad (2.9)$$

(W/m.K) – unidade de medida de condutividade térmica

Outra mudança foi no fator K_{dry} , que se tornou uma função linear simples que descreve a relação entre K_{dry} e η para solos minerais, porque a magnitude da transferência de calor em solos secos está relacionada com sua porosidade, sendo assim K_{dry} torna a equação 2.10:

$$K_{dry} = -a\eta + b \quad (2.10)$$

Esta tem dois parâmetros empíricos a e b, onde são 0,56 e 0,51 respectivamente para porosidades entre 0,2 e 0,6. O processo de cálculo segue os mesmos passos para cálculo pelo modelo de Cotê and Konrad, apenas as equações de K_r e K_{dry} que devem ser substituídas por 2.9 e 2.10.

- Johansen (1975):

Algumas formulações empíricas determinam a capacidade térmica específica do solo. A mais famosa dentre as várias é a de Johansen demonstrada em 1975, juntamente com sua formulação para condutividade térmica explicada no item anterior. As variáveis envolvidas

são expostas abaixo e logo após a equação que calcula o valor da capacidade térmica específica do solo explicitada na equação 2.11.

- c_p – capacidade térmica do solo [J/kg.K]
- ρ_d - densidade seca do solo [kg/m³]
- ρ_w - densidade da água [kg/m³]
- ρ – densidade aparente do solo [kg/m³]
- w – umidade do solo (adimensional)
- c_{vw} – capacidade volumétrica média da água 4.18×10^6 [J/m³.K]

$$c_p = \left(\frac{\rho_d}{\rho_w \rho} \right) (0.17 + w) c_{vw} \quad (2.11)$$

2.7.2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

- Teste da sonda-agulha:

Este teste é feito em amostras de solo em laboratório. Utiliza-se um equipamento chamado sonda-agulha, o mesmo emite uma quantidade constante de calor ao solo e a mudança de temperatura é observada em um dado período de tempo. Baseado na mudança de temperatura, a condutividade térmica é medida por uma estimativa paramétrica (Lhendup et al. 2014).

Na figura 2.12 há um exemplo de sonda agulha. Este equipamento também há uma versão para ser utilizado em campo, porém suas aplicações são mais ligadas à agricultura haja visto que no mercado os equipamentos disponíveis chegam a profundidade máxima de apenas 1,5 m.



Figura 2.12. Sonda-agulha sem equipamento aquisitor de dados.

- Ensaio TRT (Thermal Response Test):

Este ensaio é uma imitação de um sistema de um poço trocador de calor, que veio como uma solução mais barata haja visto que o conhecimento das propriedades do solo é necessária para qualquer projeto de GSHP e pode ser feito em uma das estacas que serão utilizadas posteriormente.

A figura 2.13 mostra o esquema de um ensaio TRT, que consiste em fazer circular água pelo sistema através de uma bomba hidráulica. Um aquecedor que irá fornecer energia térmica ao circuito, e sensores de temperatura na entrada e saída da estacas irão ser ligados a um sistema de aquisição de dados que irá obter estes valores ao longo de cerca de 50 horas ou mais, além de um medidor de vazão. O furo da estaca deve ser preenchido com material que garanta o transporte térmico entre o solo e o tubo, sendo durável e física e quimicamente estável.

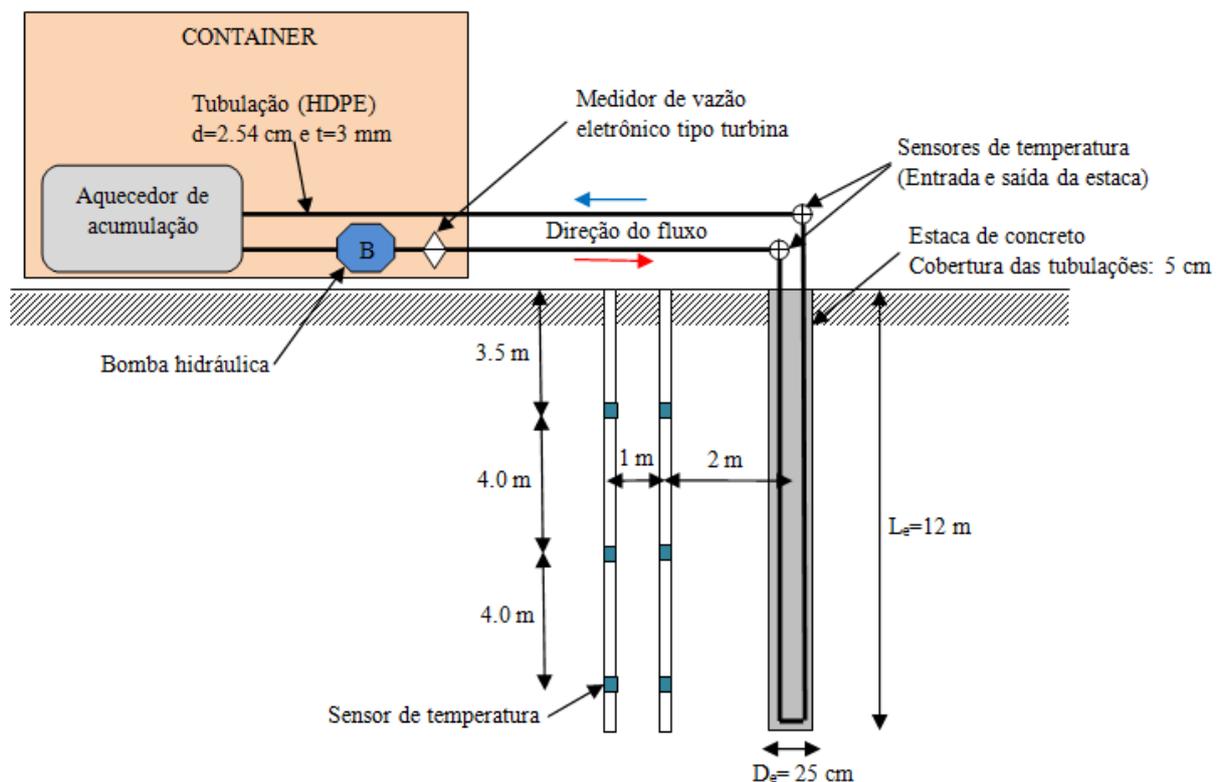


Figura 2.13. Esquema do ensaio TRT. (Orozco, 2016)

O ensaio é normatizado pelo EuroCode sobre a norma CENT/TC 341 N525 (2011), ela dentre várias coisas, trata sobre duração mínima do ensaio, tempo de ensaio, tipo de fluxo e procedimento de execução. Segundo ele, deve-se saber a temperatura inicial média do solo,

que pode ser medida por termômetros, quando houverem instalados ou pela circulação de água sem aquecimento pelo sistema e medição da mesma. Após ter estes dados em mãos, deve-se iniciar o ensaio com a circulação de água com energia de aquecimento. Esta mesma norma estipula um período mínimo de ensaio de 48 horas, porém este valor pode ser diferente de acordo com diâmetro do furo e parâmetros térmicos estimados. Ao fim do ensaio, os valores de condutividade térmica e resistência térmica do solo são calculados através de equações descritas em dois métodos diferentes: teorema da fonte linear ou teorema da fonte cilíndrica (Neto, 2015).

2.8. MEDIDAS DE EFICIÊNCIA DO SISTEMA E ESTACAS

Nos sistemas geotérmicos duas medidas de eficiência podem dar indicativos de viabilidade técnico-econômica. Uma das medidas é a eficiência da troca de calor nas estacas, enquanto a outra é a eficiência energética do sistema, estando este ligado diretamente à viabilidade econômica da solução.

2.8.1. EFICIÊNCIA DAS ESTACAS

A troca de calor que ocorre nas tubulações das estacas pode ser medida através da diferença de temperatura do fluido na entrada e saída da estaca. Esta mudança de temperatura por um período de tempo significa perda de energia térmica para o meio. Através desta diferença na temperatura do fluido calcula-se a efetividade térmica do sistema.

Essa efetividade térmica pode ser analisada de duas maneiras: total ou normalizada. No caso da total é a troca de calor na estaca como um todo, enquanto a segunda significa a taxa de troca de calor por metro de estaca, muito utilizada como parâmetro de comparação da troca de calor entre estacas. A equação 2.12 determina o cálculo da troca de calor total, enquanto a equação 2.13 a troca normalizada.

$$Q = C_w \rho_w q_{entrada} (T_{entrada} - T_{saída}) \text{ [W]} \quad (2.12)$$

$$Q_L = C_w \rho_w q_{entrada} \left(\frac{T_{entrada} - T_{saída}}{L_e} \right) \text{ [W/m]} \quad (2.13)$$

Sendo C_w é a capacidade térmica específica da água ($4182 \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]}$), ρ a densidade da água (10^6 Kg/m^3), q_{entrada} a vazão de entrada em massa [Kg/s], e T_{entrada} e $T_{\text{saída}}$ [K] as temperaturas de entrada e saída do fluido na tubulação respectivamente e L_c o comprimento da estaca.

2.8.2. EFICIÊNCIA DO SISTEMA

O sistema como um todo necessita de dois tipos de energia: energia geotérmica e energia elétrica que permite o funcionamento da bomba de calor e das outras bombas que fazem o fluido circular. A energia geotérmica atua como um acréscimo de energia ao sistema porém de maneira sem custos de produção, desta maneira a diferença entre energia elétrica utilizada pelo sistema e a energia produzida dá indicativo de eficiência do sistema. Este parâmetro é conhecido como COP (*Coefficient of Performance*).

A equação 2.14 define como se deve fazer o cálculo do mesmo (Brandl, 2006):

$$COP = \frac{\text{energia de saída depois da bomba de calor (KW)}}{\text{energia necessária para operação (KW)}} \text{ [adm]} \quad (2.14)$$

A figura 2.2 mostra um sistema exemplo onde o $COP = 4$, este número significa que de 4 partes de energia gerada, uma parte vem da energia elétrica, enquanto as outras 3 vem da energia geotérmica.

A eficiência da bomba é altamente influenciada pela diferença entre temperatura extraída e utilizada. Temperatura alta de uso (temperatura de aquecimento do sistema secundário) e temperatura baixa de extração (no sistema primário) reduz a eficiência. Por razões econômicas valores de $COP \geq 4$ devem ser alcançados (Brandl, 2006).

2.9. CASOS HISTÓRICOS DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA GSHP

2.9.1. TERMINAL E DO AEROPORTO DE ZURICH

No ano 2000 iniciou-se a expansão do aeroporto de Zurich, Suíça com a construção do terminal E, chamado de Dock Midfield, com capacidade para 26 aviões, possuindo 500 m de comprimento e 30 m de largura, totalizando 85200 m^2 de área, em 2003 a obra foi finalizada. Com objetivo de ser sustentável, a energia renovável foi largamente utilizada no projeto. As metas ambiciosas previam utilização de cerca de 65% a 70% dos sistemas de aquecimento e

resfriamento fossem advindos de fontes renováveis, sendo uma delas a geotérmica com a solução das estacas de energia.

Na etapa de projeto, constatou-se que geologicamente o local da obra possuía uma camada superficial de depósito muito mole para suportar as cargas da estrutura, com isto a solução adotada foi de 440 estacas na fundação, em sua maioria estacas com diâmetro de 0.9 m a 1.5 m e comprimento de 30 m na média que são assentadas em um solo de formação glacial chamado de morenas, que é mais competente. Destas, mais de 300 foram convertidas em estacas de energia (Palud, 2013).

As principais características do sistema primário estão resumidas na tabela 2.4:

Tabela 2.4 Principais características das estacas de energia. (Palud & Hubbuch, 2007)

Tipo de estaca da fundação	escavada in loco, em concreto
Número de estacas de energia	306
Diâmetro das estacas	90 - 150 cm
Média de comprimento das estacas	26.8 m
Número de voltas por estaca	5 (10 tubos em uma seção transversal)
Volume de solo ativado termicamente pelas estacas	660.000 m ³
Taxa de fluxo por estaca	max. 860 litros/h



Figura 2.14. Visão geral da Doca midfield no aeroporto de Zurich. (Palud & Hubbuch, 2007)

Em 2004 iniciou-se o período de aferição do sistema, alguns resultados são apresentados nas figuras 2.15 e 2.16. Na figura 2.15 são apresentados os resultados dos valores de energia elétrica utilizada e energia entregue pelo sistema ao longo da segunda medição durante o período de 10/2005 a 09/2006. Ao longo do ano a energia total liberado para o sistema é de 2210 MWh, enquanto a bomba de calor absorveu 490 MWh de energia elétrica. Isto significa que o sistema tem COP 4.51 (Coeficiente de performance). Na figura 2.16 tem-se os valores de entrada e saída da temperatura na estaca enquanto na figura 2.17 tem-se a

variação da temperatura do solo em várias profundidades e as temperaturas de entrada e saída do fluido das estacas.

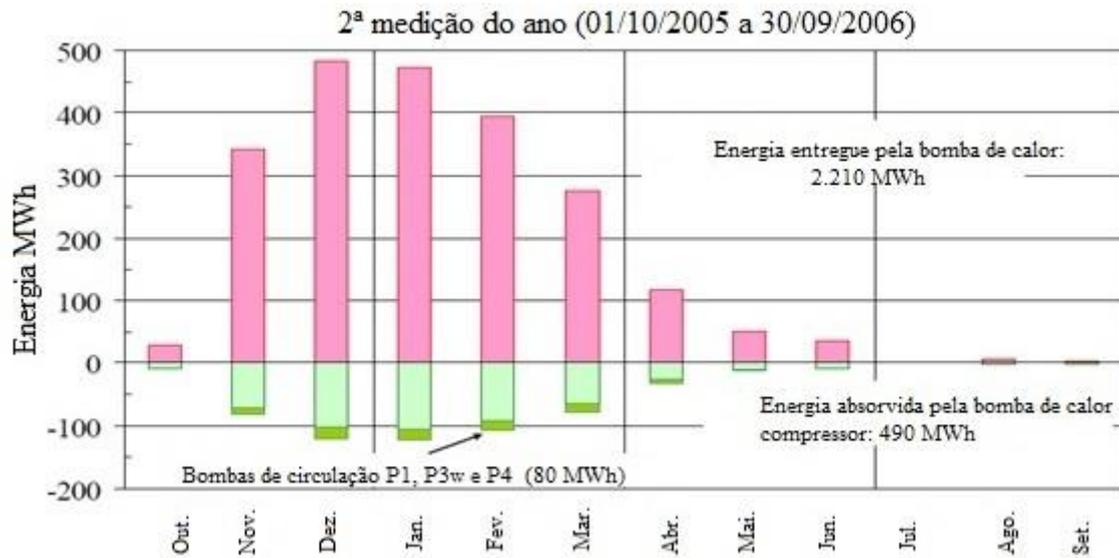


Figura 2.15. Performance térmica mensal da bomba de calor. (Palud & Hubbuch, 2007)

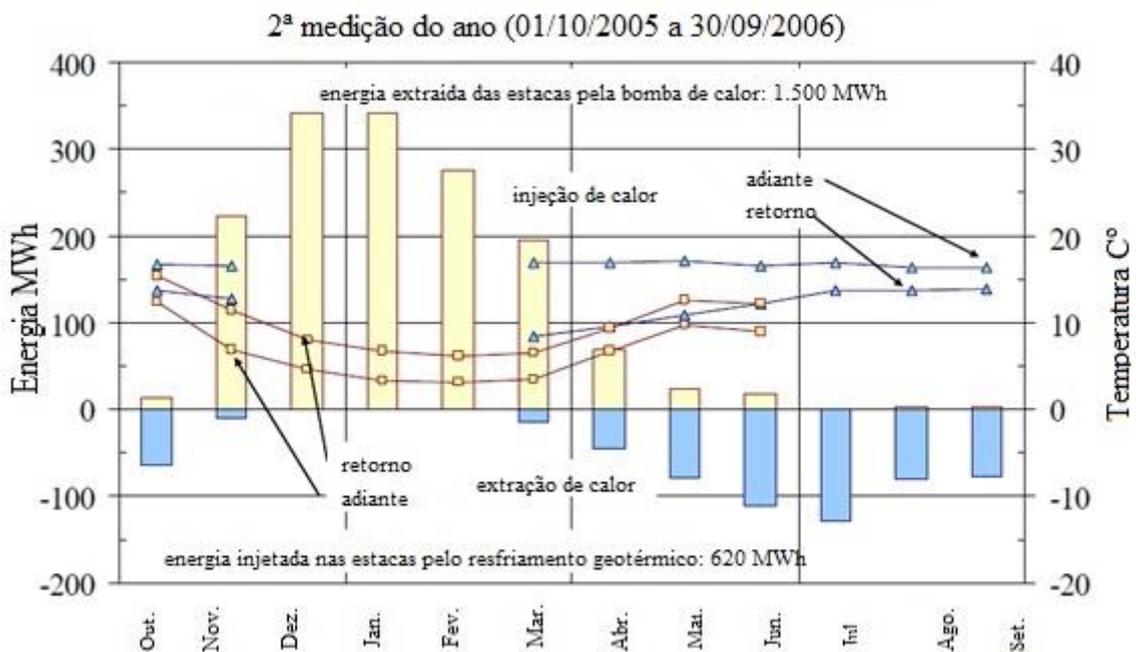


Figura 2.16. Energia extraída e injetada nas estacas. Níveis de temperatura mensais do fluido circulante no circuito das estacas nos modos de injeção e extração. (Palud & Hubbuch, 2007)

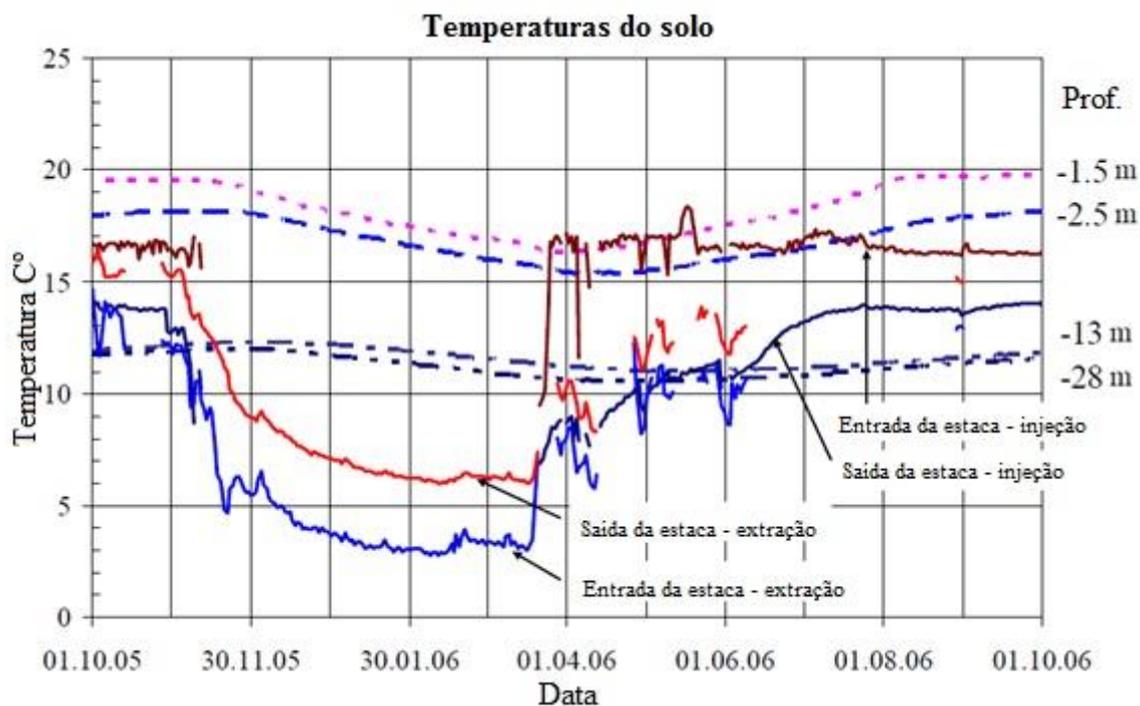


Figura 2.17. Temperatura do solo em várias profundidades. Temperatura diária no fluido circundante no circuito das estacas nos modos de injeção e extração. (Palud & Hubbuch, 2007)

Além do estudo técnico, analisou-se também a parte econômica da solução adotada. Na tabela 2.5 tem-se resumo dos valores empregadas e precificação final do KWh para solução de estacas de energia e energia elétrica convencional.

Tabela 2.5. Resumo do estudo econômico do sistema. (Palud & Hubbuch, 2007)

Sistema	Estacas de Energia	Convencional	Diferença
Investimento	€ 670.000,00	€ 80.000,00	590.000
Custo Anual			
Capital	€ 46.170,00	€ 5.450,00	€40.720,00
Manutenção	€ 10.070,00	€ 3.170,00	€6.900,00
Energia	€ 71.660,00	€156.180,00	-€84.520,00
Total Custo Anual	€ 127.900,00	€164.800,00	-€36.900,00
Preço da energia térmica total	0.04 €/KWh	0.05 €/KWh	

Analisando os custos, o sistema de estacas de energia é € 590.000 mais caro que o sistema convencional, porém seu custo energético anual para este projeto em particular é € 84.520 mais barato que o sistema convencional e a manutenção do sistema geotérmico é € 6.900 mais cara que para o sistema convencional, a diferença anual é de € 77.620 a favor do sistema geotérmico. Quando se desconsidera o custo anual de capital, que é o valor que se receberia

por ter o capital investido, o investimento de capital para instalação do sistema de estacas de energia se paga em 8,63 anos. Quando se analisa todas questões, inclusive o custo de capital, obtém-se o preço total energético, que é 20% mais barato para as estacas de energia que para o sistema convencional.

2.9.2. EDIFÍCIO RESIDENCIAL E COMERCIAL NA CIDADE DE SAPPORO, JAPÃO

A geotermia utilizando estacas de energia começou a se popularizar no Japão devido a questões governamentais. O governo japonês tem objetivos audaciosos de redução de emissão de Dióxido de Carbono. Pretende-se reduzir em 6% as emissões, meta estipulada na Terceira Sessão da Conferencia de Parceiros das Nações Unidas na convenção de Mudança Climática (COP3), que aconteceu em 1997. Como grande parte das emissões vem do Setor Civil 33% aproximadamente, diversas soluções ecologicamente corretas estão sendo tomadas desde então nas cidades e construções.

Na cidade de Sapporo, Japão um edifício comercial e residencial, utilizou estacas de energia com finalidade de reduzir custos e emissões de CO₂ com acondicionamento do ambiente, ver figura 2.18. Na tabela 2.6 tem-se as especificações do edifício a ser estudado (Yasuhiro et al., 2007).



Figura 2.18. Vista da edificação (Yasuhiro et al., 2007)

Tabela 2.6. Especificações do Edifício. (Yasuhiro et al., 2007)

Especificações da Edificação	
Localização	Hokkaido, Japão
Estrutura	Concreto Armado
Número de Pavimentos	Semi Térreo, dois pavimentos
Área	Área total 247.53 m ² Área em planta 92.70 m ²
Métodos introduzidos	
Estratégias Passivas	Isolamento térmico externo Utilização da capacidade térmica da estrutura Utilização passiva solar Sombreamento solar e resfriamento do ar exterior durante o verão
Estratégias Ativas	Sistema de estacas de energia para ar condicionado Bomba de calor utilizando fluidos refrigerantes não CFC Aquecimento radiante de baixa temperatura e resfriamento direto por sistema subterrâneo térmico. Resfriamento por sistema térmico subterrâneo

Na figura 2.19 tem-se o diagrama conceitual do sistema GSHP e diagrama esquemático da operação em modo de aquecimento. No sistema tem-se 26 estacas de concreto utilizadas para trocar calor, com diâmetro de 30 cm e profundidade de 9 metros. Esta em especial tem solução anti congelamento com solução de propileno glicol com 40% e o complemento em água.

Para troca de calor com o edifício, tubulações foram distribuídas nas lajes como numa serpentina. Além das várias outras soluções adotadas que atuam de maneira passiva, como visto na figura 2.19.

O consumo do sistema é de 3.8KW e o seu COP (coeficiente de performance) é de 3.9 na média para as temperatura adotadas. Na tabela 2.7 tem um demonstrativo do cálculo de demanda energética do sistema para o período de aquecimento que foi de 21/12 a 30/04, fez-se os cálculos pelo parâmetro de Lumped e pelo software SMASH, que calcula a carga térmica de ambientes.

Na figura 2.20 Figura 2.20. temos a medição das temperaturas durante o período de aquecimento para o ano de 2000/2001. Mede-se cinco diferentes temperaturas, a do fluido que

vai para a edificação, a temperatura do fluido que retorna para o subsolo, temperatura do interior do ambiente externo e temperatura de superfície das estacas. Dois “gaps” nos resultados ocorreram devido a pausa para reparos no mês de janeiro devido a entrada de ar na tubulação que diminuiu a temperatura do fluido a cerca de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ na saída das estacas. Na tabela 2.8 tem um resumo dos resultados dos 131 dias de medição que referiam ao período de aquecimento.

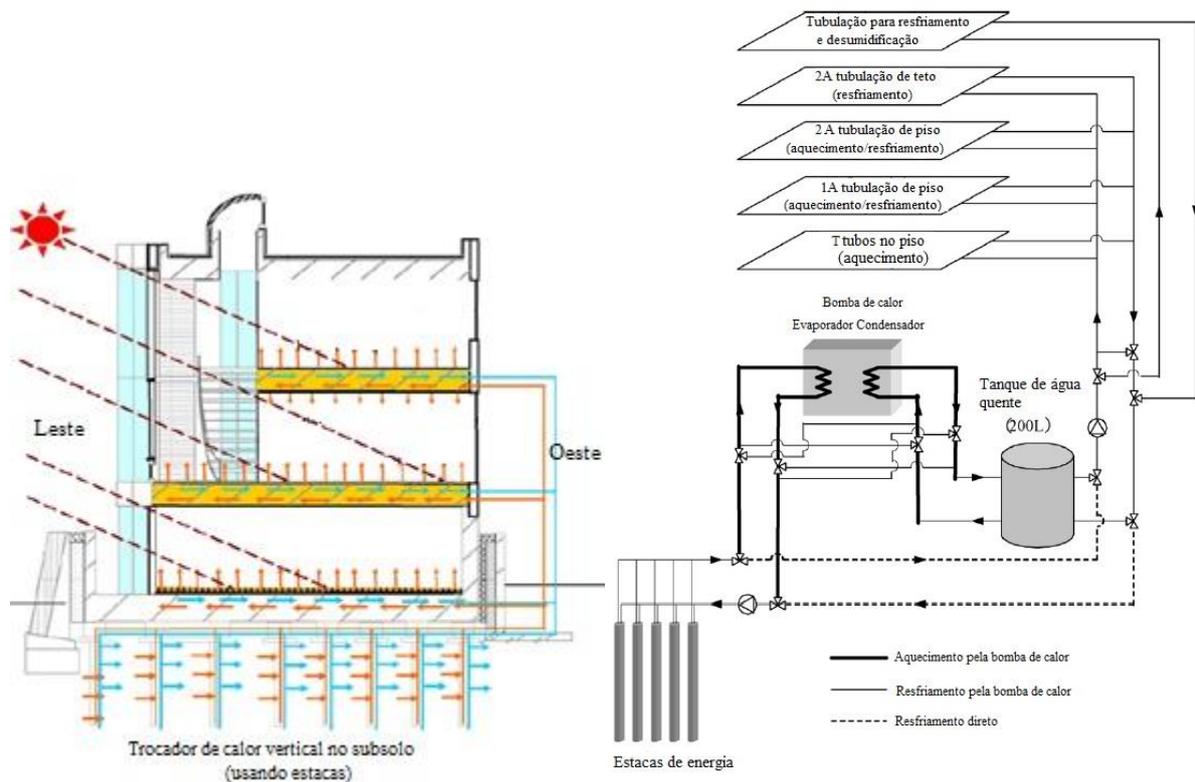


Figura 2.19. Diagrama conceitual em modo de aquecimento (esquerda) e diagrama esquemático (direita). (Yasuhiro et al., 2007)

Tabela 2.7. Demonstrativo de cálculo da demanda energética do edifício em Saporro. (Yasuhiro et al., 2007)

Método teórico	parâmetro de	Máxima carga de Aquecimento	45.6 kW
Lumped		(11 h de operação intermitente)	
Cálculo de carga térmica por software SMASH			
24 h de operação contínua	Carga de aquecimento anual	101.41 GJ	
	Carga de resfriamento anual	33.02 GJ	
	Máxima carga de aquecimento	17.3 kW	
	Máxima carga de resfriamento	17.4 kW	
11 h de operação intermitente	Carga de aquecimento anual	80.65 GJ	
	Carga de resfriamento anual	30.64 GJ	
	Máxima carga de aquecimento	49.7 kW	
	Máxima carga de resfriamento	23.5 kW	
Coeficiente de perda de calor			2.41 W/m ² K

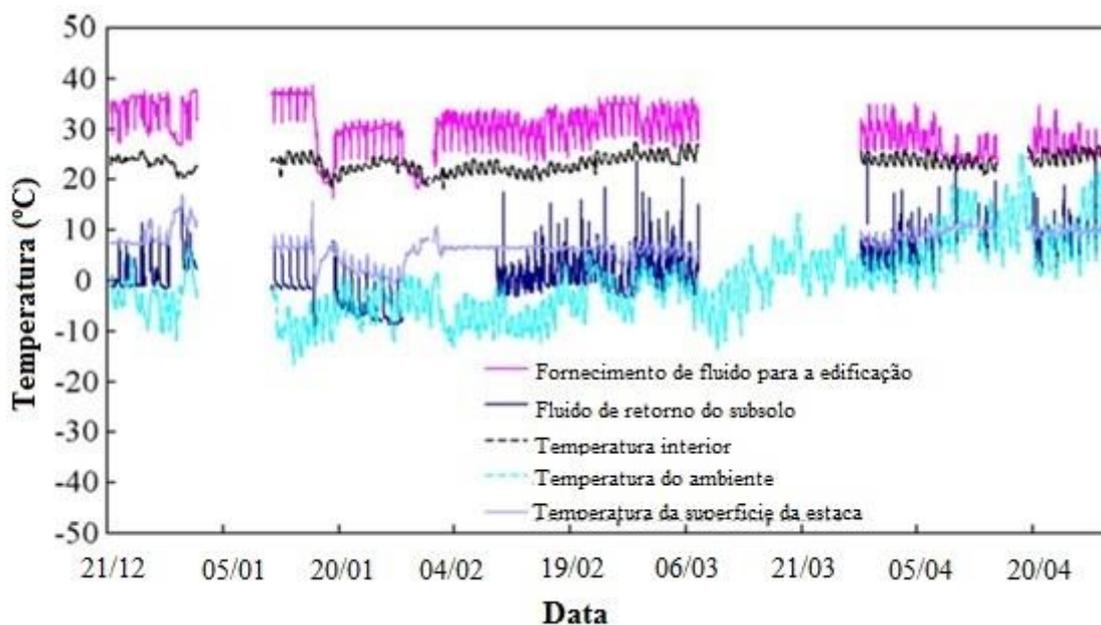


Figura 2.20. Flutuação da temperatura do interior do edifício, fluido e superfície das estacas no período de aquecimento. (Yasuhiro et al., 2007)

Tabela 2.8. Resumo dos resultados dos 131 dias de medição referentes ao período de aquecimento. (Yasuhiro et al., 2007)

Temperatura da sala (°C)	23,3
Umidade relativa (%)	38,9
Temperatura do fluido de abastecimento para o solo (°C)	-0,6
Temperatura do fluido de retorno do solo (°C)	2,4
Temperatura da superfície dos pilares (°C)	6,7
Temperatura do fluido de abastecimento da edificação (°C)	30,4
Temperatura do fluido de retorno da edificação (°C)	28,4
Quantidade de Aquecimento do espacial Qh (MJ/d)	503,8
Energia consumida pela bomba de calor e transformador Eh+Et (MJ/d)	173,3
Horas de operação da bomba de calor (h)	14,3
Energia consumida pelo sistema de transporte e controle Ep (MJ/d)	27,5
COP=Qh/Eh (ND)	3,9
SCOP1=Qh/(Eh+Ep) (ND)	3,2
SCOP2=Qh/(Eh+Ep+Et) (ND)	2,8

Estudou-se também questões técnicas, comparando as estacas de energia a outros sistemas de aquecimento. Na figura 2.21 tem-se os resultados para aquecimento do edifício com base em vários tipos de sistemas, o escolhido devido ao baixo consumo de energia de aquecimento foi o sistema de estacas de energia. Ele chega a utilizar três vezes menos energia que outros sistemas de aquecimento, como o aquecimento a querosene e bomba de calor utilizando somente o ar.

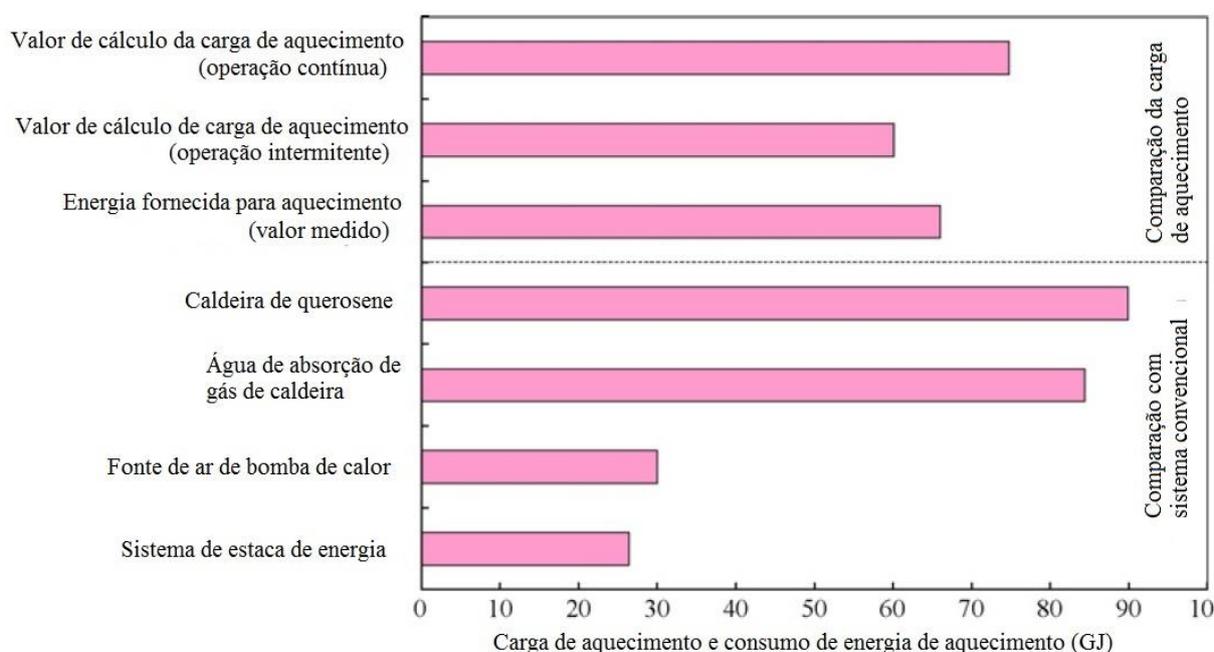


Figura 2.21. Fornecimento de energia para diversas soluções e consume de energia. (Yasuhiro et al., 2007)

2.9.3. ONE NEW CHANGE LONDON, UK

One new change é um projeto finalizado em 2010, situado no Centro de Londres, a leste da catedral de São Paulo. Sua utilização é essencialmente comercial, voltada para lojas de varejo e escritórios corporativos, na figura 2.22 tem-se vista geral do empreendimento. Até a atual data, ele é o maior projeto geotérmico utilizando estacas de energia do Reino Unido. (Spiers, 2010)

A utilização do sistema de refrigeração utilizando geotermia foi requerido para ir de encontro às políticas de planejamento da (GLA) *Greater London Authorities*, que obriga que 10% da energia requerida pelos novos estabelecimentos devem ser providas por fontes renováveis. Na tabela 2.9 alguns dados básicos do empreendimento.

O conjunto das fundações do edifício é composto por 250 estacas de diâmetros de 0,9 m a 2,4 m, com profundidades maiores que 40 metros, além de mais de 400 metros lineares de estacas secantes utilizadas como muro de contenção. Das 250 estacas, 194 foram utilizadas como estacas de energia, porém para atingir os objetivos energéticos dois poços adicionais precisaram ser inseridos no projeto com 140 m de profundidade e ligação direta com o aquífero.



Figura 2.22. Vista Geral do Empreendimento One New Change, Londres. (Spiers, 2010)

Tabela 2.9. Dados básicos do empreendimento One New Change (Spiers, 2010).

Características	Quantidades
Valor total do contrato (10 ⁶ €)	13.5
Área total do empreendimento (m ²)	52.025
Destinação	Comercial e Corporativa
Energia de aquecimento produzida (Kw)	2400 Kw
Energia de resfriamento produzida (Kw)	2300 Kw
Estacas de energia (unid.)	192
Profundidade média (m)	45
Diâmetro das estacas (m)	0,90 e 2,40
Poços abertos (unid.)	2
Ano de conclusão	2010
Redução nas emissões de CO ₂ (kg/ano)	900.000

O sistema de refrigeração geotérmica do edifício utiliza 13 bombas de calor de 130 kW, o sistema funcionando tem estimativa de entregar 1690 Kw de aquecimento e 1820 kW de refrigeração da combinação das estacas de energia e poços, deixando de emitir cerca de 900 toneladas de CO₂ anuais. Na figura 2.23 tem o esquema de funcionamento do sistema de refrigeração. Pode-se ver dois circuitos, um fechado o que compreende o quadro trocador de calor, bombas de calor e estacas e um circuito aberto adicional com poços abertos, estes foram adicionados pois somente as estacas não conseguiriam atender a demanda de energética requerida pelo edifício.

O sistema fechado (estacas de energia) tem sua tubulação passando pela armação das estacas em tubos de polietileno de alta densidade, figura 2.24. Neste caso em específico, cerca de 38 km de tubulação foram utilizados, para prover a troca de calor entre as estacas e o solo. No verão a temperatura da água fica em torno de 30°C a 44°C e a água resfria cerca de 3 a 5 °C. No inverno a temperatura da água fica em torno de -4°C a 5°C e se aquece da ordem de 3 a 5°C. Durante todo o ano a temperatura média do solo mantém cerca de 12°C.

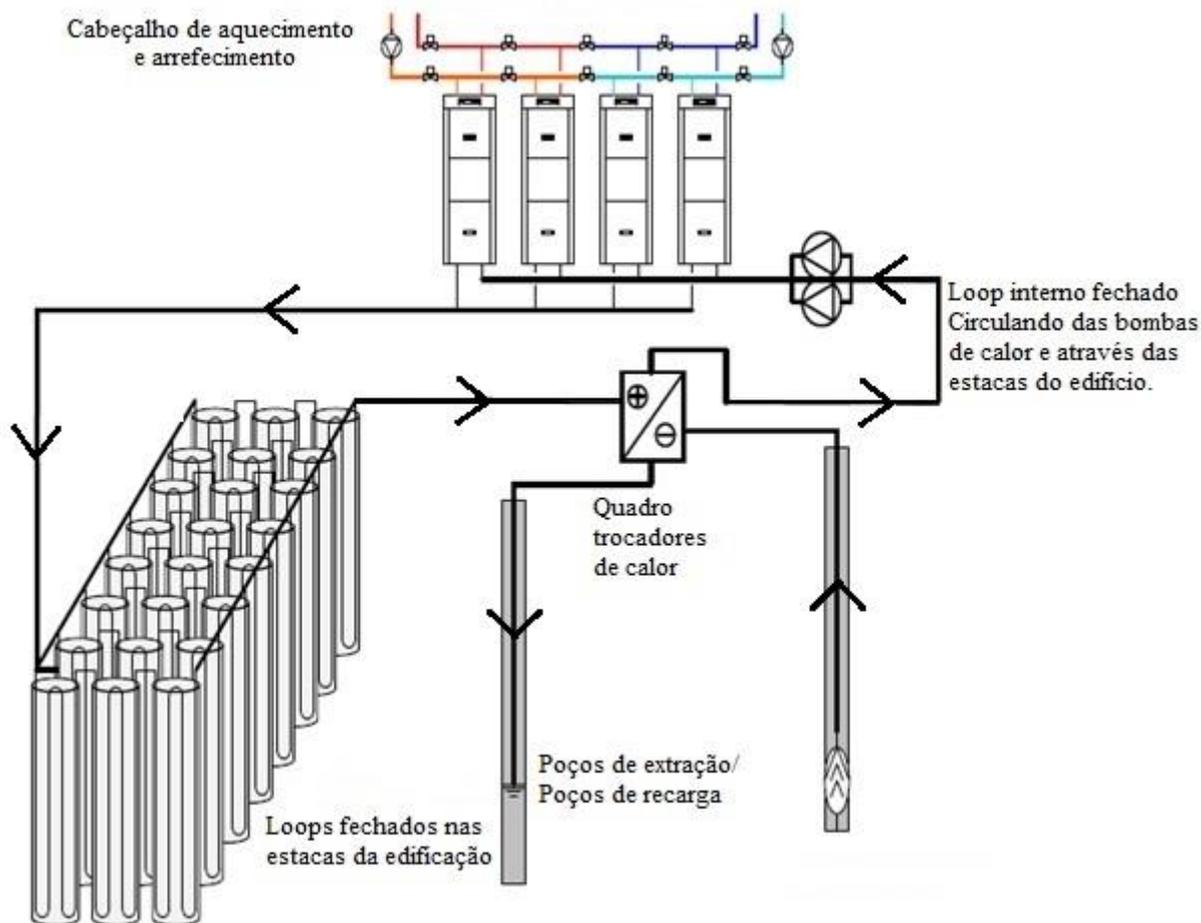


Figura 2.23. Esquema do sistema geotérmico do One New Change. (Spiers, 2010)

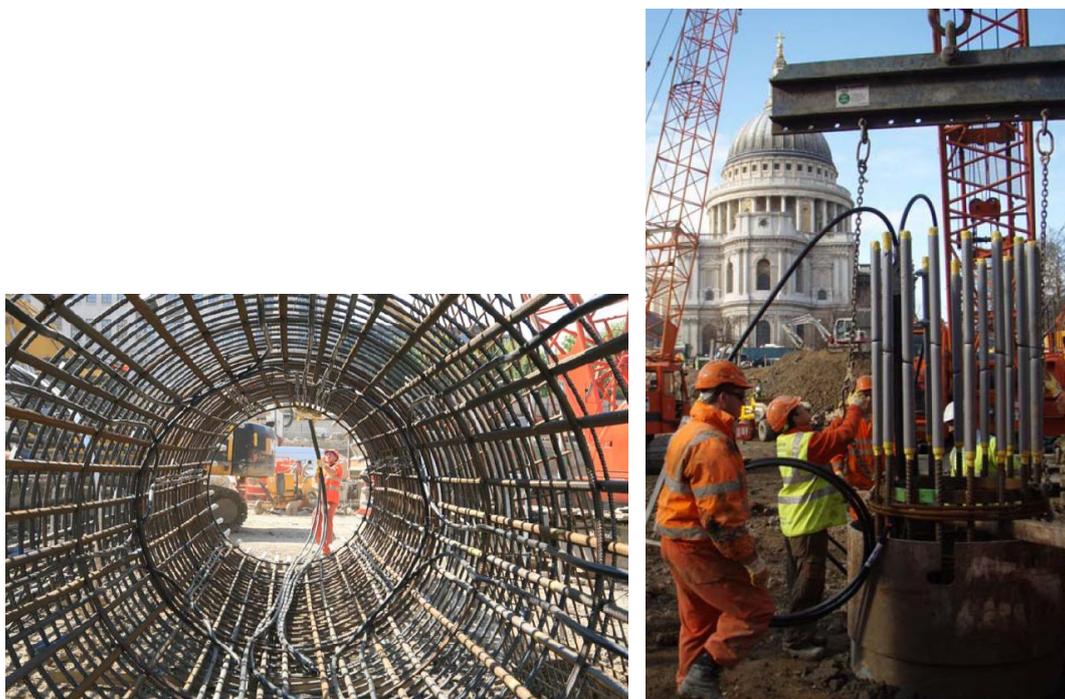


Figura 2.24. Tubulação imersa na armação da estaca (esquerda) e Topo da armação com a tubulação sendo preparada para teste de pressão (direita). (Spiers, 2010)

2.10. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS

Nas figuras 3.21 e 3.22 tem comparativo entre os parâmetros que interferem nas propriedades térmicas do solo e as mesmas. Os parâmetros influenciadores em grande maioria se inter-relacionam e Kersten (1949) cita alguns dentre os seguintes:

- Temperatura
- Densidade
- Porosidade
- Saturação
- Tipo de Solo
- Minerais constituintes do solo.

Seus estudos foram desenvolvidos em regiões que havia congelamento do solo, por isto ele cita a temperatura, que pode aumentar cerca de 4% na condutividade térmica do solo se aumenta de 4,4 °C para 21,11 °C, por exemplo.

Para mesmo tipo de solo, o aumento na densidade implica em aumento da condutividade térmica, e isto se conter mais material sólido e conseqüentemente maior contato entre eles Kersten (1949). Comparando por exemplo, dois tipos de areia, com mesma densidade e porosidade diz que pode haver diferença em suas propriedades térmicas. Assumindo que uma areia seja de britagem e a outra natural, a primeira terá propriedades térmicas melhores por haver mais contato entre os grãos (Cotê and Konrad, 2005).

Ainda sobre as conclusões de Cotê and Konrad (2005) a respeito do tipo de solo, pode-se dizer que para materiais finos graduados, a influência do formato dos grãos da partícula no contato entre partículas diminui com o aumento da porosidade. Já para cascalhos bem graduados o formato das partículas não influencia na condutividade térmica, haja visto que a distribuição dos grãos contribuem para diminuir a porosidade e conseqüentemente aumentar o contato entre partículas, se tornando menos importante o formato destas.

O grau de saturação é outro fator extremamente importante para a troca de calor, pois o aumento do teor de água aumenta o valor das propriedades térmicas. Porém esta relação não é de maneira proporcional, pois há interdependência com o tipo de solo em questão. Com intuito de entender melhor a interação entre troca de calor e saturação, fez-se um experimento a parte que será discutido na sessão 5.6 na qual varia-se a saturação, refaz os cálculos de propriedades térmicas do solo e observa-se a mudança na troca de calor.

E por fim, a importância da mineralogia do solo, que se dá porque alguns minerais são condutores melhores que outros, aumentando muito as taxas de condutividade térmica geral do solo.

Na figura 3.21 se podem analisar de maneira geral as propriedades do solo e seu correspondente valor de condutividade.

Tratando-se da capacidade térmica específica, a figura 3.22 mostra as propriedades responsáveis pelo resultado final da mesma.

2.11. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO MODELO

Este estudo foi realizado por Orozco (2016) para desenvolvimento de seu trabalho. Ele tratou de aspectos referentes à modelagem numérica. Utilizou-se as mesmas conclusões para modelagem numérica deste trabalho e abaixo tem um resumo dos pontos principais.

2.11.1. PARÂMETROS SENSÍVEIS DO MODELO

A avaliação inicial dos parâmetros de modelagem que poderiam influenciar no resultado foram desenvolvidos no estudo de sensibilidade de Orozco (2016).

Orozco realizou este estudo para compreender os elementos e parâmetros que fazem parte do modelo numérico como um todo, a fim de não sofrer nenhum prejuízo nos resultados devido a erros de modelagem. Para tal, ele realizou modelos hipotéticos simples, a fim de obter configurações adequadas e com isto ao fim obteve-se um modelo referência com as condições ótimas determinadas, que serviu de padrão para as simulações dos grupos de estacas, que buscava-se entendimento do seu comportamento de uma maneira mais geral. Os parâmetros analisados foram geométricos e numéricos sendo eles: geometria do modelo, domínio e limite do solo, tipo de elemento utilizado no software e densidade da malha.

Orozco (2016) fez seu modelo com base no ensaio experimental de sua dissertação do solo em SP, que conta com um domínio de 6 camadas diferentes de solo, uma estaca de 25 cm de diâmetro e 12 metros de comprimento de estaca e tubulação tipo U incorporada na estaca. este esquema é ilustrado na figura 2.25.



Figura 2.25. Esquema de modelagem de uma estaca de energia. (Orozco, 2016)

As condições iniciais e de contorno foram a temperatura superficial variável no tempo, com temperatura inicial (24°C), esta mesma temperatura constante na parte mais profunda do domínio e ensaio fictício com duração de 48 horas.

Os parâmetros hidráulicos e térmicos foram de 0.000157 m³/s (Re=8000) e temperatura de entrada na estaca de 50°C constante durante todo ensaio. As outras propriedades utilizadas como dados de entrada do software são resumidas na tabela 2.10.

Tabela 2.10. Propriedades térmicas dos materiais. (Orozco, 2016)

Material	Capacidade Térmica Cp (J/Kg.K)	Condutividade térmica K W/(m.K)	Densidade ρ kg/m ³
Concreto	1000	2.00	2400
Sedimentos	1208	1.23	1573
Seixos	1267	1.74	1810
Areia siltosa fina	1250	1.94	1960
Areia siltosa fina (sat)	1369	2.14	2043
Areia siltosa (sat)	1468	1.26	1984
HDPE	-	0.48	-

2.11.2. GEOMETRIA DO MODELO

Como domínio modelou-se um cilindro e um paralelepípedo. O paralelepípedo tem lado b e o cilindro diâmetro d , onde $b = d = 5\text{m}$.

As análises tem como objetivo encontrar o modelo com menor tempo de processamento na figura 2.26 tem-se o modelo de domínio de solo.

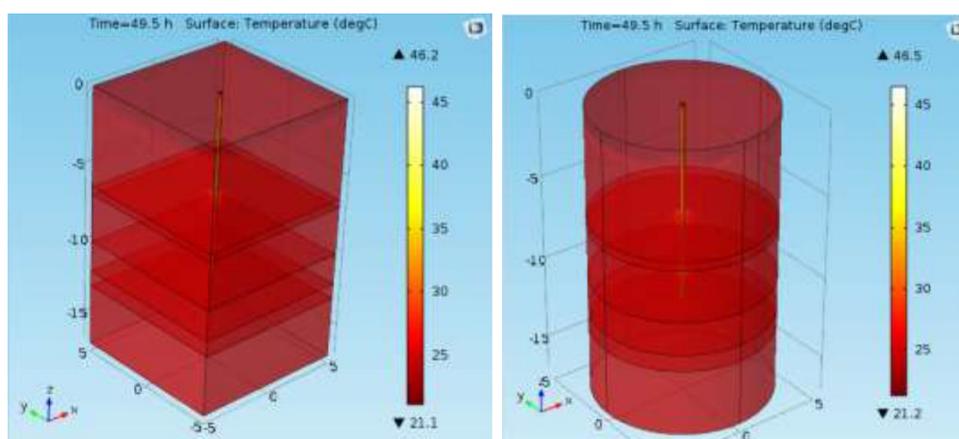


Figura 2.26. Domínio de solo em forma de paralelepípedo (esquerda) e cilíndrico (direita). (Orozco, 2016)

Como resultado encontra-se uma diferença de 15 segundos no tempo de modelagem, sendo o modelo cilíndrico mais rápido, com de 7% a diferença entre eles. Para casos mais complexos

e de domínio maior esta diferença pode aumentar muito o tempo de processamento, aconselhou-se assim utilizar o modelo cilíndrico. Na tabela 2.11 tem-se os resultados encontrados por Orozco.

Tabela 2.11. Resultado do estudo de modelagem da geometria do modelo. (Orozco, 2016)

Tipo de domínio	Núm. Elementos	Tempo Processo [s]	T média saída [°C]	%Δtempo [s]
Paralelepípedo	337.493	2341	47.72	7.0
Cilíndrico	335.467	2188	47.72	0

2.11.3. AVALIAÇÃO DO LIMITE DO DOMÍNIO.

Diversos trabalhos tratam do assunto. O que se busca é o diâmetro e a profundidade da extrapolação do domínio de solo abaixo da profundidade máxima da estaca. Para o raio de domínio de solo, geralmente utilizam-se relações diâmetro da estaca/profundidade, enquanto para extrapolação da profundidade utilizam-se apenas acréscimos ao comprimento da estaca. São os casos de Laloui et al. (2006) e Suryatriyasturi et al. (2012), entre outros, sendo que nestes recomenda-se acréscimo de 30% de $(Le+0.3Le)$ ou 10 metros abaixo da estaca.

Orozco variou as dimensões R_{dom}/Le e ΔL para valores de 0.2, 0.4, 0.8, 1.2 e 1.6, com relação aos valores finais da diferença entre temperatura média de saída. Elas são tão pequenas, que influenciariam pouco na variável de interesse (taxa de calor trocado – Q_L). A variação desta variável chegaria a ser menor que 2%, mostrando que valores muito grandes de raio ou profundidade de domínio não trariam grandes benefícios com relação a resultados e aumentariam muito o tempo das simulações.

Com base na discussão citada acima, o mesmo chegou a conclusão de o acréscimo de raio deveria ser igual a de +3 m e altura igual ao comprimento da estaca +5m.

2.11.4. AVALIAÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO

O software COMSOL possui 3 tipos de elementos finitos exclusivos para elementos 3D: elementos em tetraedro (C3D4), prismáticos (C3D6) e hexaedros (C3D8), já para modelos em

1D, 2D ou 3D temos os elementos tipo EDGE. Na figura 2.27 há os diferentes tipos de elementos no domínio:

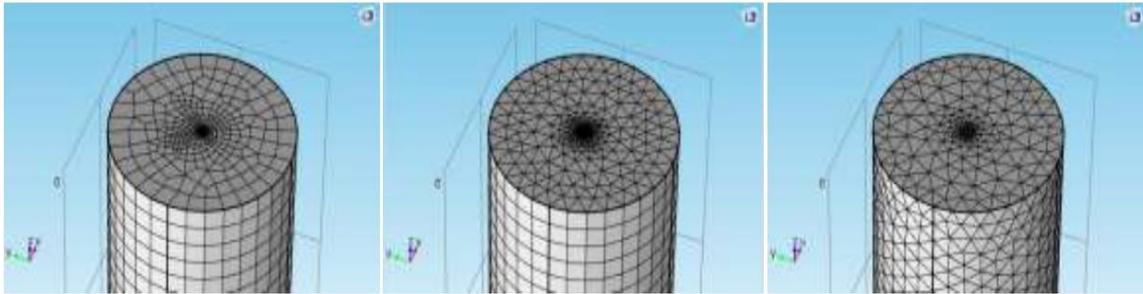


Figura 2.27. Tipos de elementos do domínio: hexaédrico, prismático e tetraédrico. (Orozco, 2016)

Orozco testou diferentes tipos de elementos tanto para resposta térmica quanto para taxa de troca de calor para os casos. O mesmo descobriu que há uma tendência de comportamento para os diferentes elementos, porém para pouco tempo de simulação o comportamento seria distinto entre os mesmos.

Os elementos hexaédricos e prismáticos são muito similares, porém a eficiência entre elementos processados e o tempo para elementos tetraédricos são muito maiores, gerando melhores resultados para mesmos períodos de simulação.

Os resultados térmicos são praticamente nulos, sendo muito próximos para os três tipos de elementos. Já os elementos hexaédricos demandam menor tempo de processamento, porém faz-se necessário um refinamento da malha para se aproximar aos resultados dos outros elementos. Por se mostrar mais eficiente, além de ser sugestão do próprio software este foi o elemento escolhido para as modelagens.

2.11.5. AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DA MALHA

A última parte do estudo de sensibilidade realizada por Orozco (2016) foi o estudo da densidade da malha. No software utilizado há seis opções de malha:

- Grossa
- Normal
- Fina
- Muito fina
- Extrafina
- Extremamente fina

Este tipo de estudo é importante, pois uma escolha muito conservadora aumentaria o tempo de simulação, já uma escolha muito arrojada diminuiria o tempo, porém afetaria de maneira negativa o resultado final da simulação.

O mais sensato a se fazer seria aumentar a densidade da malha conforme a proximidade com a estaca aumenta. O software permite esta variação na densidade da malha e leva em consideração quesitos como a proximidade com a estaca para refino dos elementos.

Com os resultados, Orozco (2016) definiu que o ideal seria utilizar malhas variáveis com densidade normal para o domínio de solo, já para estaca e tubulação densidades extrafinas.

2.11.6. RESUMO DO ESTUDO DA SENSIBILIDADE DOS ELEMENTOS FINITOS

Resumindo-se o estudo de sensibilidade dos elementos finitos, Orozco (2016) concluiu que para se obter configurações ótimas para análise do problema basta seguir algumas considerações simples, sendo elas:

- Raio do domínio de solo: de + 3m;
- Profundidade do domínio de solo: Le + 5m;
- Elementos finitos: tetraédricos;
- Densidade da malha do domínio de solo: variável com densidade normal;
- Densidade da malha dos domínios da estaca e tubulação: extremamente finos.

Este estudo precisou fazer pequenos ajustes para utilizar as conclusões de Orozco (2016), porque este tem modelagem mais complexa devido ao grande número de estacas e dimensão do domínio de solo. Por este motivo os seguintes ajustes foram realizados:

- Considerou-se a aresta dos blocos para acrescentar 3 metros no domínio do solo;
- Diminuiu-se para 3 metros a extrapolação da profundidade do domínio de solo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo paramétrico da resposta térmica de grupos de estacas trocadoras de calor em solo tropical típico do DF do Brasil faz parte de um projeto de pesquisa inicialmente desenvolvido em parceria com a Universidade de São Paulo. O objetivo era estudar o comportamento termo-mecânico de estacas trocadoras de calor submetidas a um clima subtropical. Como resultados obteve-se um trabalho intitulado *Estudo da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado* (Neto, 2015) por parte da USP e outro intitulado *Validação do ensaio trt para o estudo paramétrico da troca de calor de uma estaca de energia em um solo tropical* (Orozco, 2016). O primeiro deles fez um abordagem experimental, executando ensaios TRT (*Thermal response test*) enquanto o segundo desenvolve modelagem numérica do ensaio TRT para obter condições ótimas de trabalho. Abaixo explanação sobre os principais, resultados e conclusões destas duas dissertações.

3.1. ESTUDO EXPERIMENTAL DA RESPOSTA TÉRMICA DE FUNDAÇÕES POR ESTACAS TROCADORAS DE CALOR EM SOLO NÃO SATURADO

Neto desenvolveu sua dissertação na área geotérmica a fim de obter parâmetros térmicos do solo do estado de São Paulo, tomando como representante o solo do campo experimental da USP – São Carlos, Universidade responsável pelo estudo.

Para alcançar o objetivo principal, a estratégia traçada foi o desenvolvimento do equipamento e execução de um ensaio TRT (Thermal Response Test) e a partir dos resultados inferir as propriedades térmicas do solo.

O ensaio TRT executado para a pesquisa segue o modelo da figura 2.13. Este ensaio consistiu basicamente em injetar fluido a certa temperatura numa estaca ou poço através da tubulação imersa nas estruturas e medir a temperatura experimentada pelo fluido em sua saída. Esta perda ou ganho de calor seria o indicativo do comportamento térmico do solo no qual estavam inseridas as estruturas. Lembrando que questões hidráulicas como fluido ou regime de fluxo também influenciam na troca de calor geral do sistema.

Parâmetros como diâmetro da estaca, número de tubulações dentro da estaca, grau de saturação do solo e vazão de circulação da água foram variados, a fim de obter maior entendimento sobre a influência destes parâmetros no comportamento térmico de uma estaca. Questões ambientais também estavam inseridas no estudo, como o comportamento do solo submetido a operação do sistema de estacas de energia. Fez-se isto medindo a temperatura ao redor da estaca de energia, bem como o raio de influencia do calor, além do tempo de

resfriamento da estaca e do solo circundante após encerrar a operação. Por fim, analisou-se todos os dados e fez-se comparação com dados de parâmetros térmicos de outros países.

Após análise dos dados, resultados interessantes puderam ser extraídos da pesquisa como:

- Aumento de 50% na condutividade térmica e 40% na taxa de troca de calor para aumento do diâmetro da estaca e número de tubulações dentro da mesma;
- O raio de aquecimento do solo ao redor da estaca é de 2 m do eixo da estaca;
- Variação do nível freático não influenciou nos resultados;

3.2. VALIDAÇÃO DO ENSAIO TRT PARA O ESTUDO PARAMÉTRICO DA TROCA DE CALOR DE UMA ESTACA DE ENERGIA EM UM SOLO TROPICAL

A dissertação desenvolvida por Orozco (2016), teve como objetivo principal analisar o comportamento de uma estaca trocadora de calor por meio da validação numérica da resposta térmica em um solo tropical e posterior avaliação de parâmetros que influenciam em sua efetividade.

Esta dissertação, feita por parte da UnB utilizou equações semi-empíricas para cálculo das propriedades térmicas do solo e através do software COMSOL Multiphysics v5.2 simulou numericamente o ensaio TRT, feito experimentalmente em São Carlos por Neto (2015). Ver figura 3.1.

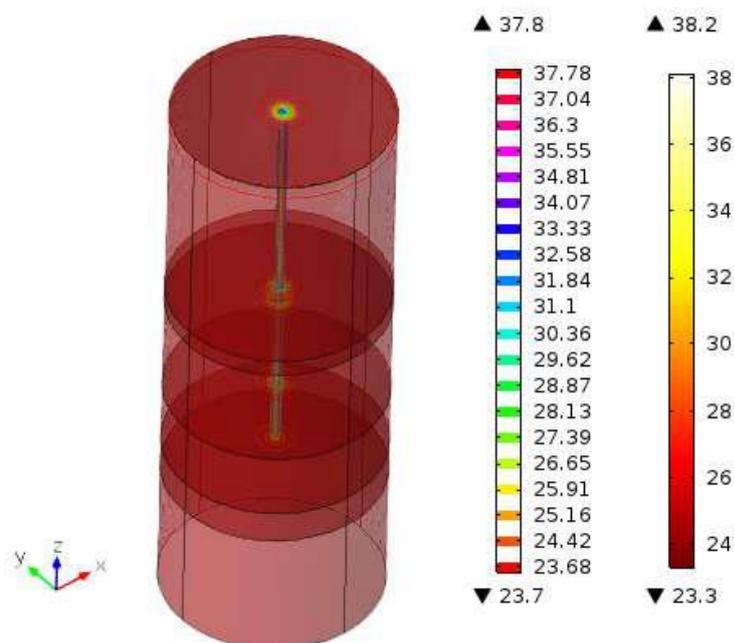


Figura 3.1. Simulação numérica do ensaio TRT em uma estaca. (Orozco, 2016)

Após comparar respostas experimental e numérica, Orozco percebeu o quanto os valores eram próximos, como demonstrado na figura 3.2. Após esta verificação seguiu-se o próximo passo que foi a parametrização da estaca.

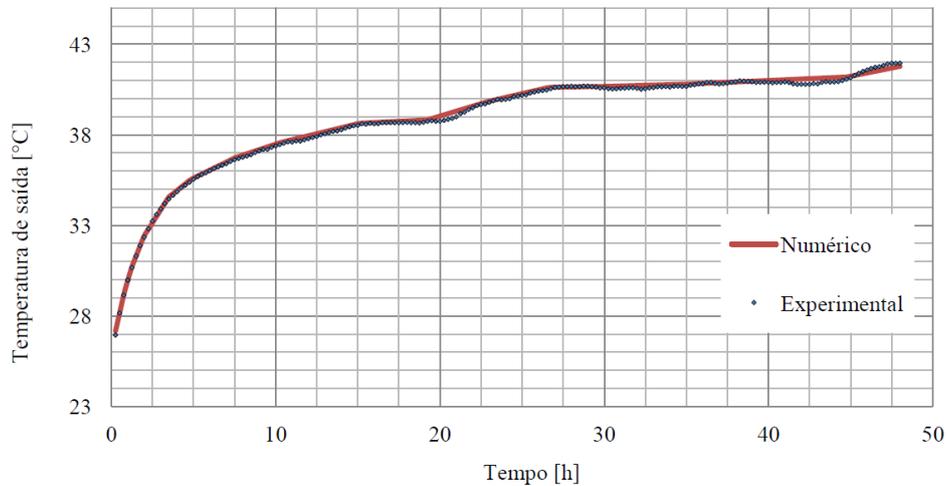


Figura 3.2. Comparação entre as respostas experimentais e numéricas. (Orozco, 2016)

A parametrização da estaca foi feita variando diversos parâmetros, sendo eles:

- Comprimento da estaca;
- Diâmetro da estaca;
- Vazão da estaca;
- Vazão em diferentes tipos de estacas;
- Tubulação;
- Posição do nível freático;
- Condutividade térmica para o concreto;
- Condutividade térmica do solo;
- Temperatura de entrada da estaca;
- Espessura da tubulação;
- Espaçamento entre estacas.

Como resultado, concluiu-se que:

- A troca de calor total da estaca é proporcional ao comprimento da estaca, porém na média a taxa mostra pequena queda com o aumento do comprimento da estaca.
- O diâmetro da estaca e a vazão do fluido aumentam a taxa de troca de calor conforme os mesmos aumentam, porém para tubulações com apenas uma volta há limitação na

troca de calor com o aumento da vazão. O mesmo ocorre para o número de voltas da tubulação que tende a atingir uma constância depois de certo número de voltas.

- A posição do nível freático gera variação, pouco significativa na troca de calor.
- A condutividade térmica do concreto aumenta o resultado final da troca de calor de maneira significativa, enquanto a variação da condutividade térmica do solo tem um comportamento similar quando aumentada, porém quando diminui a taxa de troca de calor diminui de maneira menos acentuada.
- A temperatura de entrada do fluido na estaca é outro fator que influencia no resultado da troca de calor. Quanto maior a temperatura de entrada, maior será a variação de temperatura entre o líquido circundante e a temperatura do solo, logo maior será a troca de calor.
- A espessura da tubulação tem relação inversamente proporcional com a troca de calor, porém descobriu-se que há um mínimo possível de utilização, haja visto que as tubulações precisam suportar pressão do fluido.

Por fim, a última análise refere-se ao espaçamento entre estacas, introduzindo sobre o assunto tema desta dissertação.

Com os resultados, Orozco conseguiu entender melhor a respeito dos fatores inerentes a uma estaca e o que mais influenciava em sua troca de calor. Abrindo espaço para o estudo da interação entre grupos de estacas.

3.3. INFORMAÇÕES GERAIS DA LOCAÇÃO DO SOLO ESTUDADO

Como solo base para o estudo, escolheu-se o solo do campo experimental da Universidade de Brasília, mais precisamente no campo experimental da Pós Graduação em Geotecnia. O critério que levou a escolha do local foi devido ao grande número de trabalhos já desenvolvidos nele, que facilitam a busca de informações a respeito do mesmo. A Universidade encontra-se em Brasília, mais precisamente na Asa Norte (15° 45,955 S, 47° 52,384' O). Ver figura 3.3.

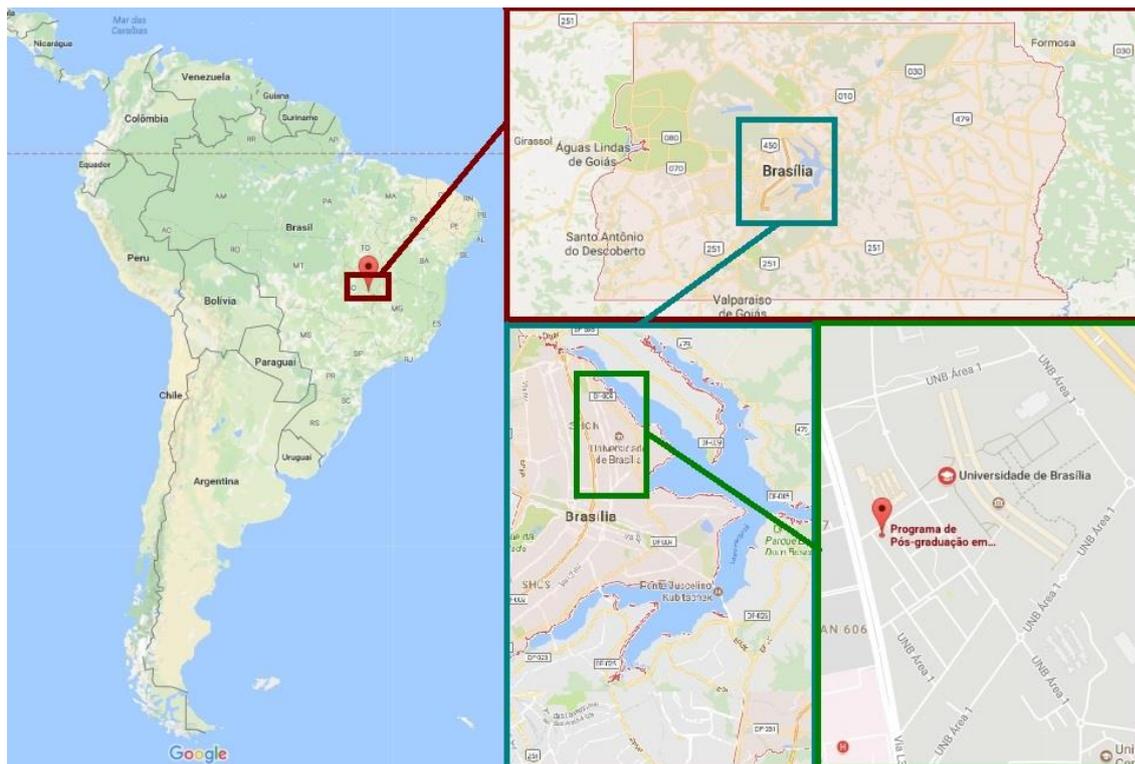


Figura 3.3. Localização do solo estudado.

A fim de obter dados geotécnicos do local, 4 furos de sondagem foram executados no mesmo campus para outros estudos. Na figura 3.4, ilustra-se o mapa de locação dos mesmos. Adicionalmente, fez-se um poço com escavação mecanizada a fim de se medir o perfil de temperatura do solo.

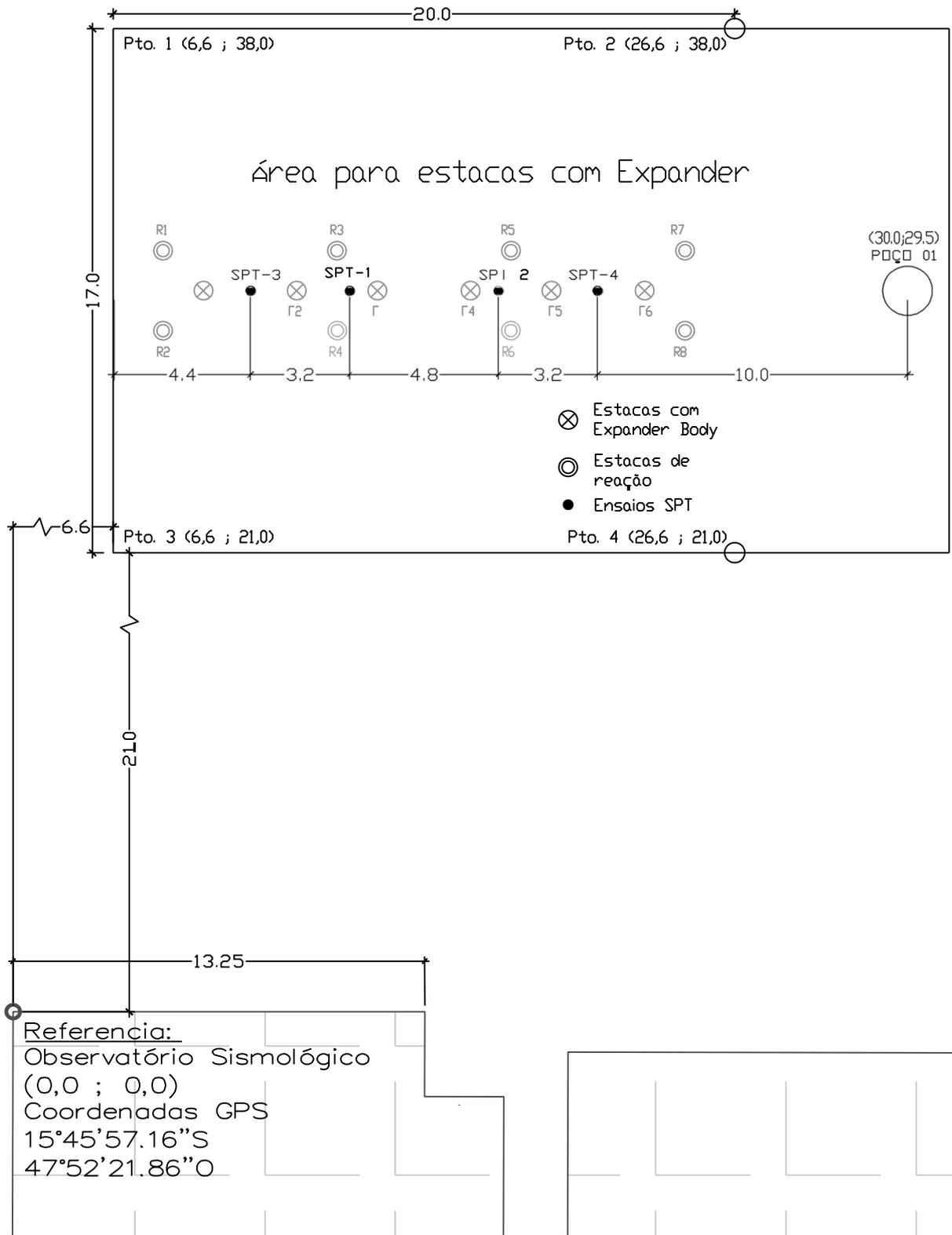


Figura 3.4. Localização do poço para análise térmica do perfil de solo.

3.4. GEOLOGIA E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO DE BRASÍLIA

A geomorfologia do Distrito Federal encontra-se em chapadas, onde predominam relevo residual e aplainamento, com topografia plana e levemente ondulada (Blanco, 1995).

Freitas-Silva & Campos em 1998 citado por Cardoso (2002), redefina a geologia do Distrito Federal, que passa a ser composta por rochas atribuídas aos grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí, respectivamente contribuindo com cerca de 65%; 15%; 5% e 15% de sua área total, como mostra o mapa geológico da região, mostrado na figura 3.5. Os principais tipos de rochas são as ardózias, metarritimitos e quartzitos.

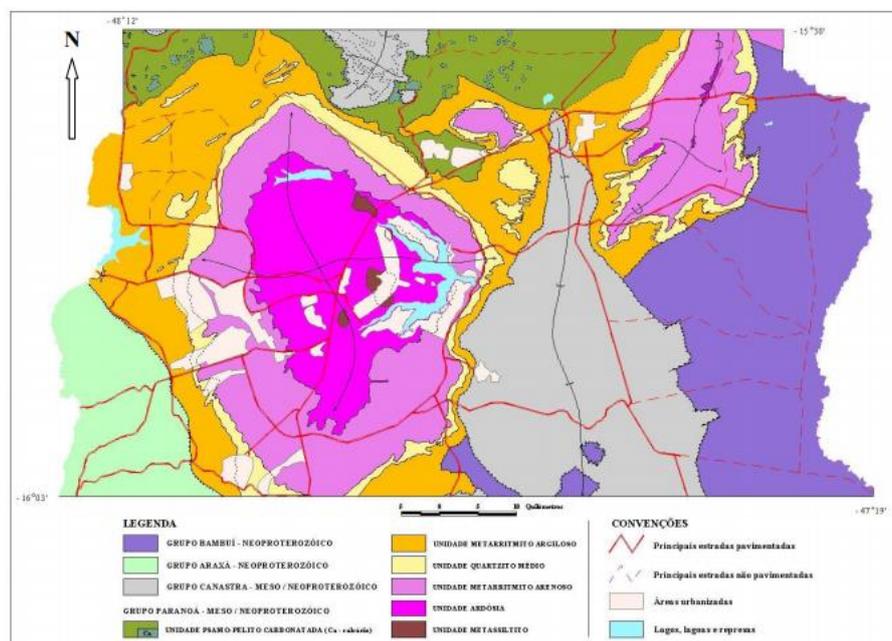


Figura 3.5. Mapa geológico do Distrito Federal (Freitas-Silva & Campos, 1998).

No plano piloto, principalmente próximo ao local das amostras o grupo geológico é o Paranoá e encontra-se na região principalmente a unidade metarrimito arenoso. Os solos são principalmente dos tipos latossolo vermelho, cambissolo e latossolo vermelho-amarelo, ver figura 3.6.

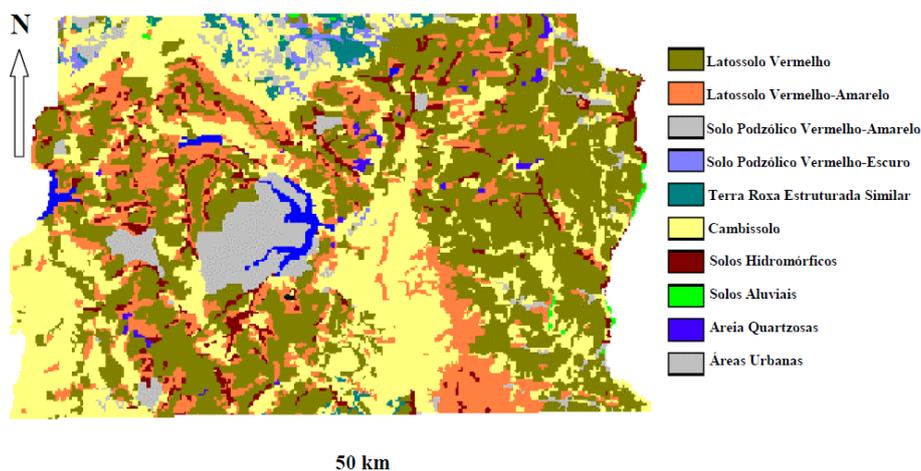


Figura 3.6. Mapa pedológico do Distrito Federal (EMBRAPA, 1978).

3.4.1. PERFIL DO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL

O perfil de solo do campus experimental da UnB foi estudado por diversos autores, como Pastore (1996), Mota (2003) e Guimarães (2002). O último descreve o perfil do subsolo do campus experimental, nas seguinte subcamadas:

- 0 a 3,5 m - areia argilosa, com predominância de gibbsita, macroporos e muitos agregados. Destaca-se que as profundidades de 3 e 4 m correspondem a zona de transição. Esta zona corresponde ao trecho de maior bioturbação, e na qual ocorrem as maiores variáveis de umidade ao longo do ano;
- 3,5 a 8,5 m - zona na qual as propriedades físicas, mineralógicas e microestruturais vão gradualmente se alterando até encontrar o residual mais jovem a 8,5 m. Neste trecho, o teor de gibbsita, a porosidade e a macroporosidade vão diminuindo aos poucos. A profundidade de 8 m corresponde à zona de transição;
- 8,5 m - profundidade a partir da qual o solo assume textura mais siltosa, com aumento do IP e uma estrutura com distribuição de poros mais homogênea. Nesta profundidade já não aparece a gibbsita. Ver figura 3.7.

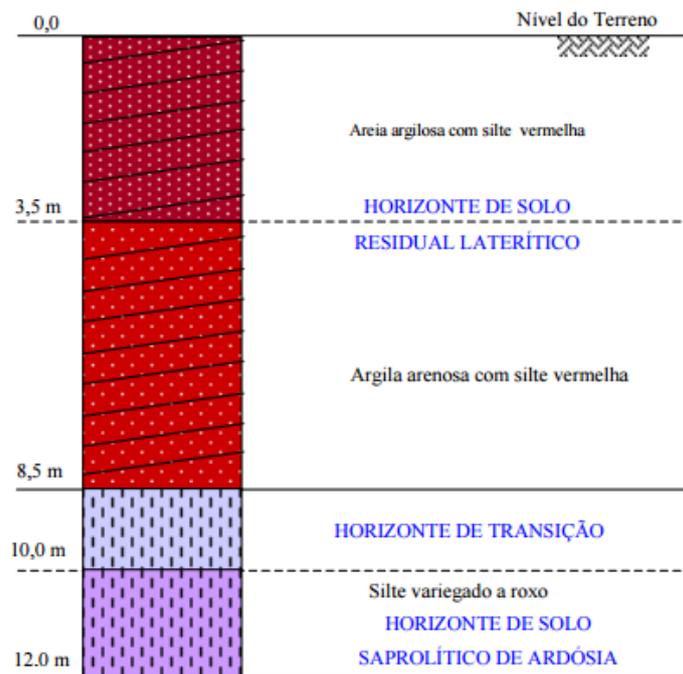


Figura 3.7. Perfil de solo característico do campus experimental da UnB. Modificado (Mota, 2003).

3.4.2. PERFIL GEOTÉCNICO DO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL

Guimarães (2002) faz uma caracterização geotécnica do campus experimental. Esta é tomada como base para cálculo dos parâmetros térmicos do perfil de solo. A tabela 3.1 apresenta os resultados do perfil de solo da UnB e figura 3.8 apresenta os dados em forma de gráfico.

Tabela 3.1. Caracterização geotécnica do solo da UnB modificado (Mota, 2003).

Parâmetro	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	e	η (%)	
Profundidade (m)	1	26,86	10,2	16,48	1,6	0,616
	2	26,78	10,41	16,53	1,57	0,611
	3	26,11	11,49	17,09	1,27	0,56
	4	25,97	11,46	17,03	1,27	0,559
	5	26,94	11,96	17,53	1,25	0,556
	6	25,75	11,98	17,33	1,15	0,535
	7	26,52	12,82	17,98	1,07	0,517
	8	26,25	13,86	18,6	0,89	0,472
	9	27,15	13,84	18,75	0,96	0,49
	10	27,62	13,29	18,47	1,08	0,519

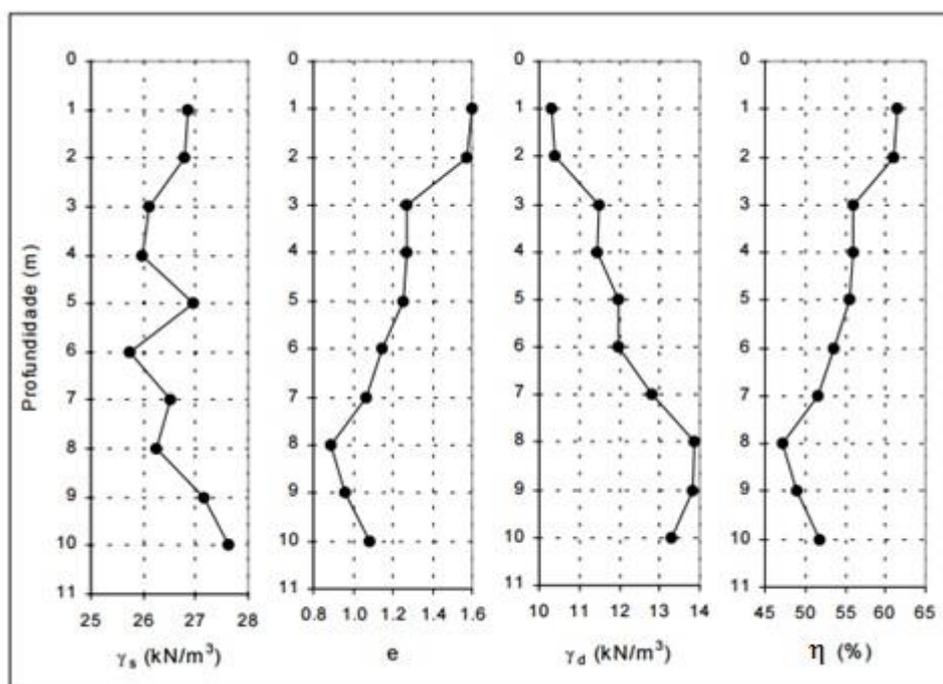


Figura 3.8. Perfil geotécnico solo característico do campus experimental da UnB. Modificado (Mota, 2003).

3.4.3. PERFIL MINERALÓGICO DO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL

Carvalho (1995) por meio de ensaios de difratometria de raios-X descreveu mineralogicamente o perfil do solo do campus experimental. A figura 3.9 apresenta os perfis e a tabela 3.2 as características mineralógicas do solo.

Tabela 3.2. Propriedades mineralógicas do solo do campus experimental da UnB. (Carvalho, 1995).

Mineral (%)	Profundidade (m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
gibbsita	39,2	41,7	38,7	43,3	36,6	27,1	9,1	3,7	0	0
caolinita	8,3	6,9	5,4	8,7	11,7	17,5	27,1	41,1	30,9	37,1
quartzo	32,5	29,4	37,6	22,1	29,4	15,7	28,9	9,4	27,6	22,5
hematita	6,8	6,9	6,7	10,1	10,8	14,1	14,4	13,7	11,9	14,1
goethita	3,5	3,4	4,7	4,4	0	0	0	0	0	0
anastásio	5,9	6,9	4,1	5,9	7,4	7,9	7,3	5,1	7,2	0
rutilo	3,8	4,9	3,1	5,5	4,1	6,5	3,8	6,6	0	0
ilita	0	0	0	0	0	6,9	5,7	7,9	7,1	11,2

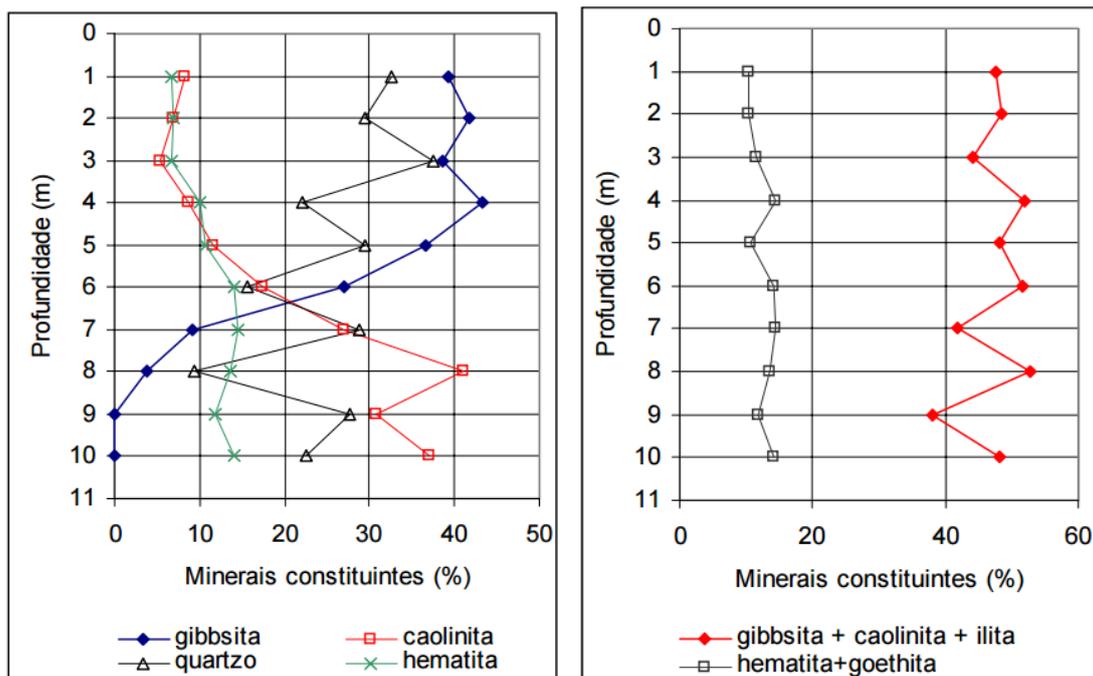


Figura 3.9. Perfil mineralógico do solo característico do campus experimental da UnB. Modificado (Carvalho, 1995).

Nesta, observa-se que o teor de gibbsita inicia-se alto e decai até chegar a 0% aos 9 metros de profundidade. Já a caolinita faz o processo inverso, variando entre 30% e 40% para profundidades maiores. A soma dos materiais gibbsita, caolinita e illita permanecem entre 40% e 60% em toda profundidade, enquanto a soma de hematita e goethita permanecem entre 10% e 15% ao longo de todo perfil.

3.4.4. PERFIL DE UMIDADE DO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL

Como explicitado no item 3.3 como intuito de se determinar certos parâmetros, foi executado um poço com escavação mecanizada e 4 furos de sondagens SPT. As sondagens foram executadas em diferentes épocas do ano para observar a variação de umidade presente no solo. As figuras 3.10 e 3.11 mostram respectivamente o perfil de umidade para o período chuvoso e seco para cada sondagem e a data de execução da mesma.

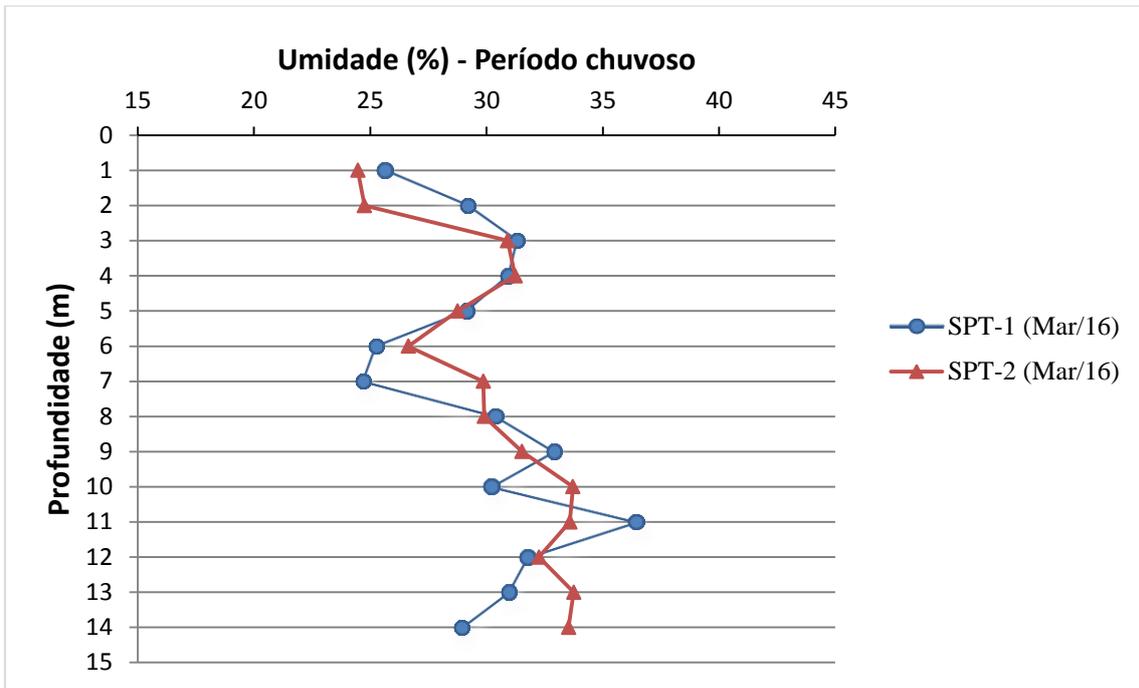


Figura 3.10. Perfil de umidade do solo durante o período chuvoso.

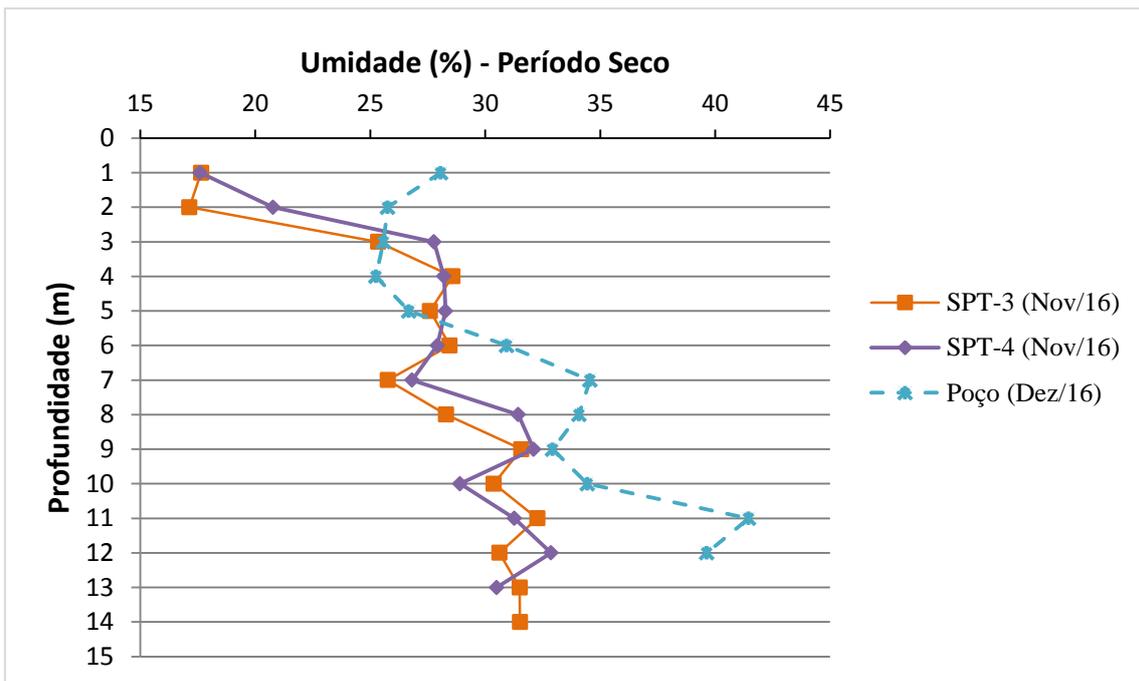


Figura 3.11. Perfil de umidade do solo durante o período seco.

Para se obter um intervalo de variação da umidade, separou-se as umidades mínimas e máximas para as épocas do ano medidas e organizou os dados em um novo perfil com os valores extremos de umidade medidos, apresentados na figura 3.12.

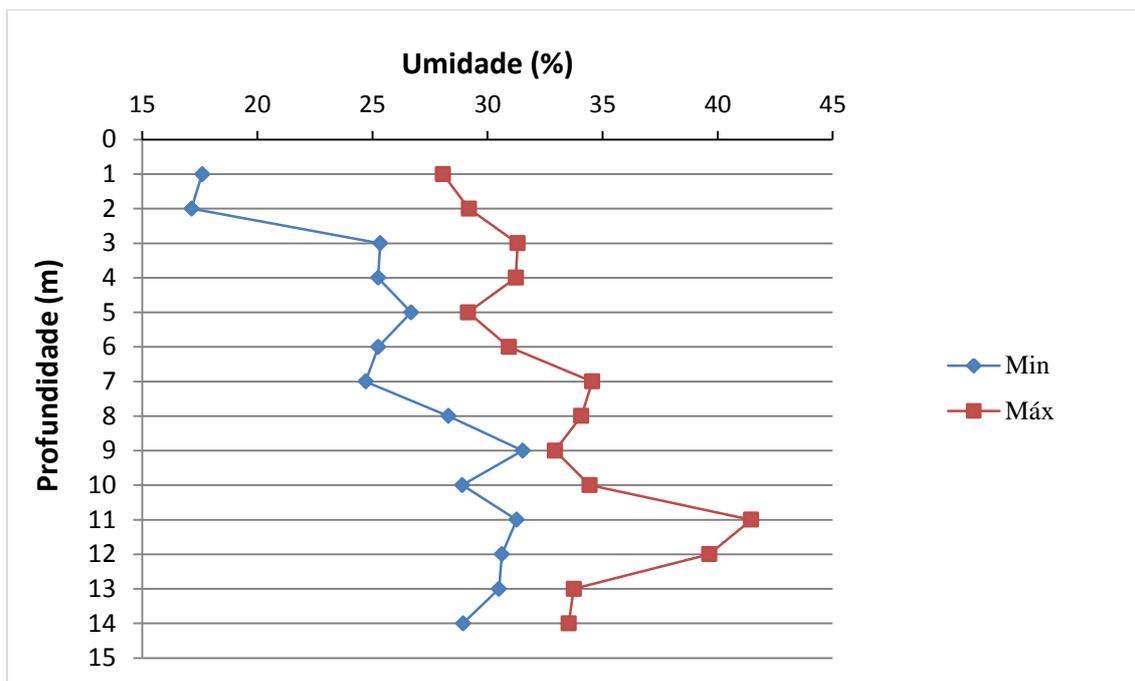


Figura 3.12. Valores máximos e mínimos de umidade por profundidade para o campus experimental da UnB.

3.4.5. PERFIL DE TEMPERATURA DO SOLO DO CAMPO EXPERIMENTAL

Para medir a tendência de valor da temperatura do solo ao longo da profundidade, executou-se uma escavação mecanizada do solo, com os seguintes objetivos:

- Medir a temperatura do solo ao longo da profundidade em diferentes horários do dia;
- Retirar amostras indeformadas a cada metro para futuras pesquisas.

Os materiais utilizados foram:

- Caminhão com trado mecanizado de 80 cm;
- Sarilho;
- Balde;
- Termômetro culinário de agulha (Termômetro Digital Minipa, MV-363).

Necessitou-se também da ajuda de dois poceiros, que executavam a moldagem dos corpos de prova indeformados e as medições da temperatura.

O trabalho ocorreu durante os dias 03 de Dezembro de 2016 e 05 de Dezembro de 2016. A figura 3.13 mostra a execução dos serviços de escavação para medição do perfil de temperatura e moldagem das amostras indeformadas que foram extraídas para pesquisas futuras.



Figura 3.13. (a) Escavação mecanizada do poço; (b) Preparação da amostra indeformada.

Na figura 3.14 constam-se as medições de temperatura realizadas no período. Encontra-se ampla variação principalmente na superfície, porém, com o aumento da profundidade a variação tende a diminuir. Entende-se que o método de medição apenas estima a temperatura e há várias intervenções no processo, como a abertura do poço que tende a levar a temperatura do solo ao equilíbrio térmico com o tempo. Porém como o objetivo é obter uma estimativa de temperatura considera-se razoável a média dos valores medidos e com isto obtém-se o perfil ao longo da profundidade na figura 3.15, bem como valores máximos e mínimos medidos. Estes valores médios foram os tomados como dado de entrada para as simulações numéricas haja visto que não tem-se um perfil anual de temperatura do solo.

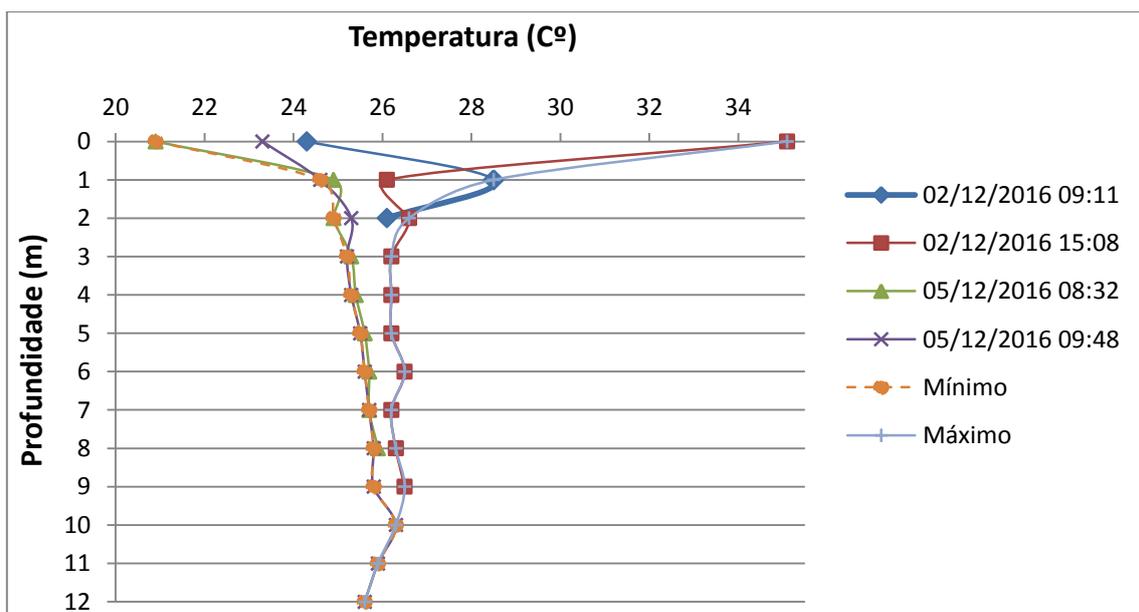


Figura 3.14. Perfil de temperatura ao longo de diversos horários.

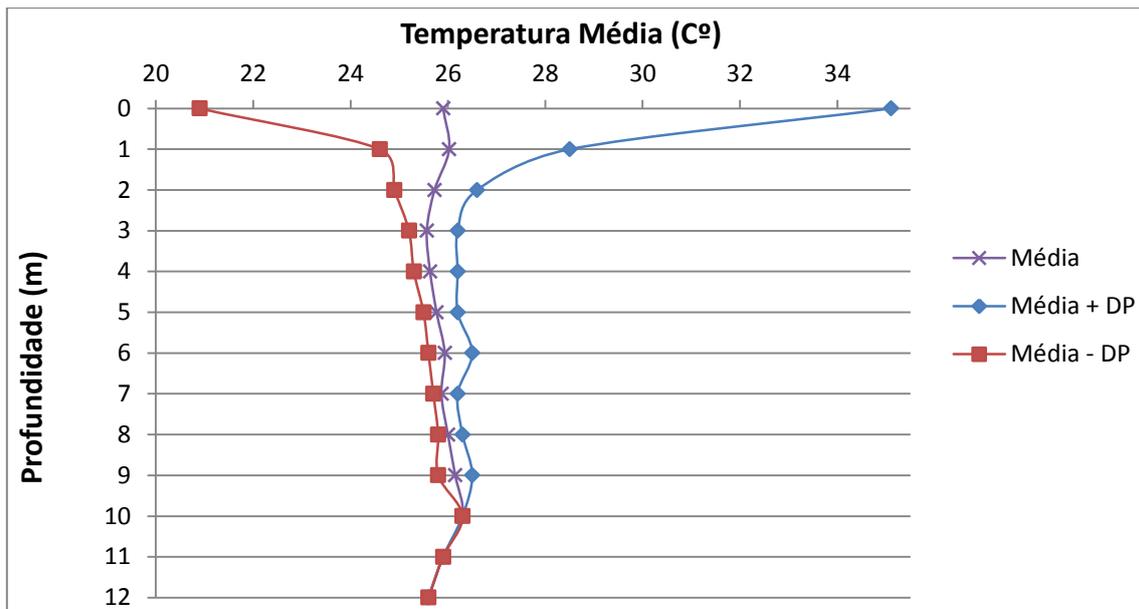


Figura 3.15. Perfil de temperatura média do solo.

A medição da temperatura do subsolo poderia ser melhorada, executando-se um perfil de termômetros ao longo da profundidade, termômetros fixos e instalados em um poço, com monitoramento em intervalos de tempo pré-definidos por no mínimo um ano. Aquisição de dados mais precisos se faz necessário para estudos mais assertivos e com maior duração de análise. A medição ao longo de pelo menos um ano seria muito importante, pois a maioria do que se tem a respeito do comportamento da temperatura do solo se aplica a regiões de clima temperado, que possui clima muito diferente do aplicado às regiões tropicais.

3.5. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS TÉRMICOS DO SOLO

De acordo com perfil geológico, geotécnico e mineralógico do solo escolhido como representante do solo do Distrito Federal utilizou-se correlações citadas na seção 2.7 para determinar a condutividade térmica (K) e a capacidade de calor específica (C_p) do solo para cada metro de profundidade. Com os dados descritos acima, resumiu-se na tabela 3.3 as propriedades do solo até a profundidade de 10 metros e as extrapolou até os 15 metros.

Tabela 3.3. Resumo das propriedades do solo.

Parâmetro	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	e	η (%)	qz	
Profundidade (m)	1	26,86	10,20	13,33	16,48	1,60	0,616	0,33
	2	26,78	10,41	13,67	16,53	1,57	0,611	0,29
	3	26,11	11,49	14,65	17,09	1,27	0,560	0,38
	4	25,97	11,46	14,45	17,03	1,27	0,559	0,22
	5	26,94	11,96	14,95	17,53	1,25	0,556	0,29
	6	25,75	11,98	14,39	17,33	1,15	0,535	0,16
	7	26,52	12,82	15,44	17,98	1,07	0,517	0,29
	8	26,25	13,86	18,00	18,60	0,89	0,472	0,09
	9	27,15	13,84	17,78	18,75	0,96	0,490	0,28
	10	27,62	13,29	17,53	18,47	1,08	0,519	0,23

Sendo γ_s é o peso específico das partículas sólidas, γ_d é o peso específico aparentemente seco, γ peso específico natural, γ_{sat} peso específico aparentemente saturado, e índice de vazios, η porosidade, qz fração volumétrica de quartzo.

Com as informações contidas na tabela 3.3, procede-se o cálculo das propriedades térmicas do solo, a condutividade térmica (K) por meio das correlações de Cotê and Konrad (2005) e Lu et. Al (2007) e a capacidade de calor específica (C_p) pelo modelo de Johansen (1975). Inteiramente que todas as propriedades foram calculadas para os valores extremos de umidade, tendo assim uma gama de valores possíveis de capacidade térmica.

Na figura 3.16, apresenta-se um fluxograma de cálculo para C_p pelo método citado acima. Para tal os parâmetros de entrada são demonstrados na segunda linha e posteriormente após sua aplicação na equação 2.11. chega-se ao resultado em (J/Kg.K).

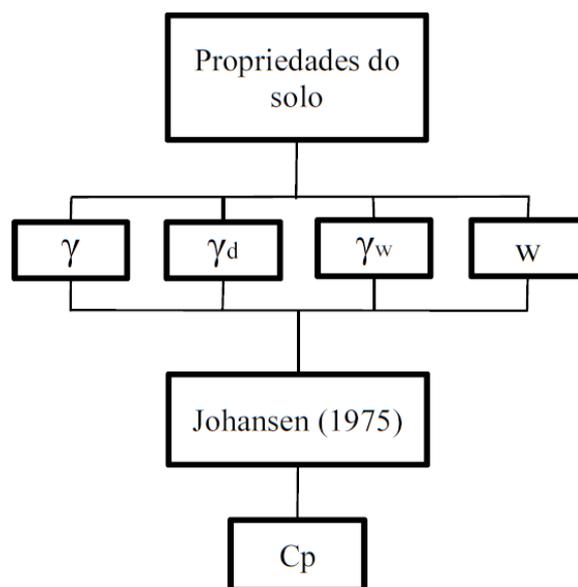


Figura 3.16. Fluxograma de atividades para cálculo da capacidade de calor específica.

Sendo γ – Peso específico aparente, γ_d - Peso específico seco, γ_w – Peso específico da água e W – umidade.

Seguindo os passos descritos na figura 3.16, chega-se aos valores máximos e mínimos dos resultados metro a metro da capacidade de calor específico (C_p), apresentados na tabela 3.4.

Tabela 3.4. Resultado da Capacidade de calor específico do solo.

Johansen (1975)		
Solo	Profundidade	C_p [J/(kg.K)]
Areia	1	1106,648 - 1441,430
Areia	2	1086,698 - 1470,208
Areia	3	1388,066 - 1583,649
Areia	4	1400,448 - 1598,904
Argila	5	1460,717 - 1543,380
Argila	6	1470,497 - 1667,674
Argila	7	1447,362 - 1789,238
Argila	8	1458,161 - 1643,844
Silte	9	1578,894 - 1624,651
Silte	10	1454,692 - 1629,946
Silte	11	--
Silte	12	--

Para cálculo da condutividade térmica do solo segue-se o fluxograma apresentado na figura 3.17. Observa-se que a escolha do modelo depende do tipo de solo e por isto o primeiro passo é a definição de algumas propriedades para que o cálculo possa ter continuidade.

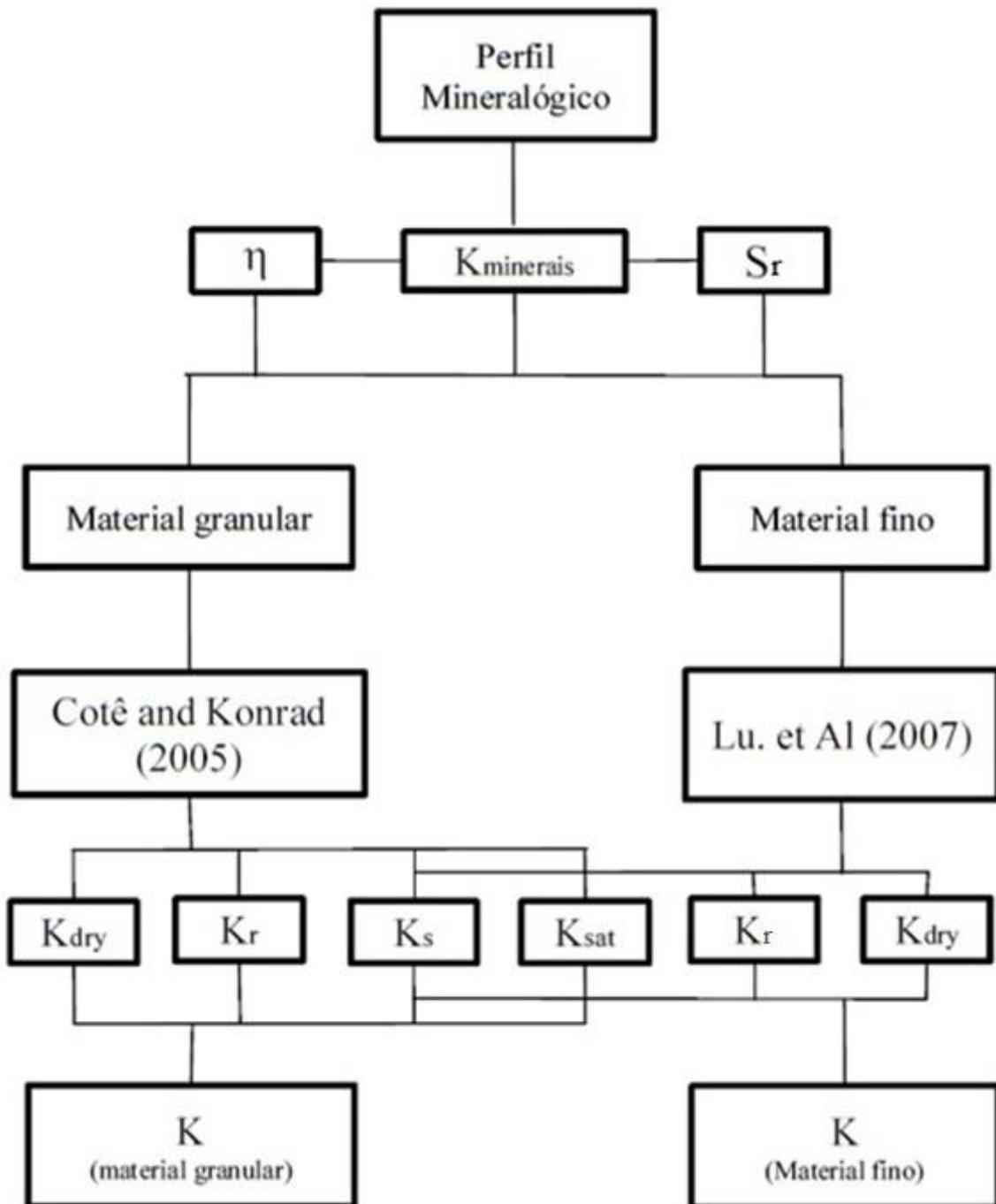


Figura 3.17. Fluxograma para cálculo da condutividade térmica do solo.

Sendo η – porosidade, K_{minerais} – Condutividade térmica individual dos minerais constituintes do solo e S_r – Grau de saturação, K_{dry} – Condutividade térmica do solo seco, K_r – Condutividade térmica normalizada, K_s – Condutividade térmica dos minerais formadores do solo, K_{sat} – Condutividade térmica do solo saturado.

Para cálculo da condutividade térmica pelo modelo Cotê and Korad (2005) ou Lu et al. (2007) o parâmetro K_s corresponde a uma média ponderada da condutividade térmica dos minerais que compõe o solo. Com base nisto, a tabela 3.2 contém as porcentagens de cada um dos minerais para cada faixa de metro. Em adição, a tabela 3.5 mostra a condutividade dos minerais constituintes do solo. Aplicando-se a equação 3.4 calcula-se o K_s apresentado na tabela 3.6.

Tabela 3.5. Condutividade térmica dos minerais

Mineral	K [W/m.K]	Bibliografia
gibbsita	2,60	Hokai, K.I.(1971)
caolinita	2,80	Midttomme, K., et.al (1997)
quartzo	7,70	Hokai, K.I.(1971)
hematita	11,29	Hokai, K.I.(1971)
goethita	2,91	Hokai, K.I.(1971)
anastásio	6,53	Wikipedia (2017)
rutilo	5,12	Hokai, K.I.(1971)
ilita	1,80	Midttomme, K., et.al (1997)

Tabela 3.6. Condutividade térmica equivalente dos minerais para cada faixa de profundidade.

Profundidade (m)	K_s [W/m.K]
1	9,883
2	9,826
3	10,019
4	9,713
5	9,886
6	9,591
7	9,879
8	9,430
9	9,653
10	9,524

Nas tabelas 3.7 e 3.8 estão apresentados os cálculos detalhados da condutividade térmica para valores máximos e mínimos pelo método de Cotê and Konrad (2005), enquanto nas tabelas 3.9 e 3.10 pelo método de Lu et. Al (2007). A tabela 3.11 resume os valores calculados para a condutividade térmica conforme os dois modelos citados.

Tabela 3.7. Condutividades térmica segundo Côté and Konrad (2005) para valores máximos de umidade.

Côté e Konrad (2005) - W+						
Profundidade		Ke + Kr [W/m.K]	Kdry [W/m.K]	Ks [W/m.K]	Ksat [W/m.K]	k [W/m.K]
Areia	1	0,760	0,137	9,883	1,723	1,342
Areia	2	0,779	0,135	9,826	1,744	1,388
Areia	3	0,865	0,167	10,019	2,032	1,780
Areia	4	0,863	0,168	9,713	2,010	1,757
Argila	5	0,763	0,161	9,886	2,043	1,596
Argila	6	0,810	0,171	9,591	2,138	1,765
Argila	7	0,919	0,180	9,879	2,281	2,111
Argila	8	1,003	0,204	9,430	2,529	2,535
Silte	9	0,963	0,194	9,653	2,434	2,350
Silte	10	0,933	0,179	9,524	2,229	2,092
Silte	11	x	x	x	x	x
Silte	12	x	x	x	x	x

Sendo Kdry é condutividade do solo seco, Ks condutividade térmica dos minerais formadores do solo, Ksat condutividade do solo saturado, Ke número de Kersten, Kr condutividade térmica normalizada, Kw=0.6 W/m.K e K a condutividade térmica do solo.

Tabela 3.8. Condutividades térmica segundo Côté and Konrad (2005) para valores mínimos de umidade.

Côté e Konrad (2005) - W-						
Profundidade		Ke + Kr [W/m.K]	Kdry [W/m.K]	Ks [W/m.K]	Ksat [W/m.K]	K [W/m.K]
Areia	1	0,598	0,137	9,883	1,723	1,086
Areia	2	0,595	0,135	9,826	1,744	1,092
Areia	3	0,794	0,167	10,019	2,032	1,648
Areia	4	0,791	0,168	9,713	2,010	1,625
Argila	5	0,720	0,161	9,886	2,043	1,516
Argila	6	0,712	0,171	9,591	2,138	1,572
Argila	7	0,750	0,180	9,879	2,281	1,756
Argila	8	0,906	0,204	9,430	2,529	2,309
Silte	9	0,940	0,194	9,653	2,434	2,299
Silte	10	0,843	0,179	9,524	2,229	1,908
Silte	11	x	x	x	x	x
Silte	12	x	x	x	x	x

Sendo Kdry é condutividade do solo seco, Ks condutividade térmica dos minerais formadores do solo, Ksat condutividade do solo saturado, Ke número de Kersten, Kr condutividade térmica normalizada, Kw=0.6 W/m.K e K a condutividade térmica do solo.

Tabela 3.9. Condutividade térmica segundo Lu et al (2007) para valores máximos de umidade.

Lu et. Al. (2007) - W+						
Profundidade (m)		ke	Kdry	ks	ksat	k
Areia	1	0,735	0,165	9,883	1,723	1,310
Areia	2	0,754	0,168	9,826	1,744	1,356
Areia	3	0,844	0,196	10,019	2,032	1,745
Areia	4	0,841	0,197	9,713	2,010	1,722
Argila	5	0,842	0,199	9,886	2,043	1,752
Argila	6	0,879	0,210	9,591	2,138	1,905
Argila	7	0,953	0,220	9,879	2,281	2,184
Argila	8	1,001	0,246	9,430	2,529	2,532
Silte	9	0,979	0,236	9,653	2,434	2,388
Silte	10	0,962	0,219	9,524	2,229	2,152
Silte	11	x	x	x	x	x
Silte	12	x	x	x	x	x

Sendo kdry é condutividade do solo seco, ks condutividade dos sólidos, ksat condutividade do solo saturado, Ke número de Kersten, kw=0.6 W/m.K e K a condutividade térmica do solo.

Tabela 3.10. Condutividade térmica segundo Lu et al (2007) para valores mínimos de umidade.

Lu et. Al. (2007) - W-						
Profundidade (m)		ke	kdry	ks	ksat	k
Areia	1	0,579	0,165	9,883	1,723	1,066
Areia	2	0,575	0,168	9,826	1,744	1,074
Areia	3	0,770	0,196	10,019	2,032	1,609
Areia	4	0,766	0,197	9,713	2,010	1,586
Argila	5	0,806	0,199	9,886	2,043	1,686
Argila	6	0,799	0,210	9,591	2,138	1,751
Argila	7	0,832	0,220	9,879	2,281	1,934
Argila	8	0,945	0,246	9,430	2,529	2,402
Silte	9	0,966	0,236	9,653	2,434	2,358
Silte	10	0,903	0,219	9,524	2,229	2,034
Silte	11	x	x	x	x	x
Silte	12	x	x	x	x	x

Sendo kdry é condutividade do solo seco, ks condutividade dos sólidos, ksat condutividade do solo saturado, Ke número de Kersten, kw=0.6 W/m.K e K a condutividade térmica do solo.

Tabela 3.11. Resumo com intervalo de valores da condutividade térmica segundo os modelos calculados e a variação de umidade.

Profundidade (m)	Cotê and Konrad (2005)			Lu et.al (2007)		
1	1,086	-	1,342	1,066	-	1,310
2	1,092	-	1,388	1,074	-	1,356
3	1,648	-	1,780	1,609	-	1,745
4	1,625	-	1,757	1,586	-	1,722
5	1,516	-	1,596	1,686	-	1,752
6	1,572	-	1,765	1,751	-	1,905
7	1,756	-	2,111	1,934	-	2,184
8	2,309	-	2,535	2,402	-	2,532
9	2,299	-	2,350	2,358	-	2,388
10	1,908	-	2,092	2,034	-	2,152
11	x	-	x	x	-	x
12	x	-	x	x	-	x

Na tabela 3.12 tem-se o resumo dos modelos utilizados para determinar K e Cp, além da gama de possíveis valores para cada qual. Na figura 3.18 tem um comparativo entre os métodos de condutividade térmica, nele encontram-se os resultados de condutividade térmica para os dois modelos calculados Cotê and Konrad (2005) e Lu et. Al (2007). Na figura 3.19 tem o perfil de condutividade térmica levando-se em consideração o tipo de solo. Para profundidade entre 0 m e 4 m utiliza-se o modelo de Cotê and Konrad (2005), pois o solo é arenoso para esta profundidade e tal modelo é mais apropriado. Para profundidade de 5 m ou mais utiliza-se Lu et. al (2007), isso porque o segundo modelo é mais apropriado para materiais finos como siltes e argilas. Com isto esta figura explicita os valores de condutividade térmica do solo estudado que serão utilizados como dado de entrada para cálculo de troca de calor. A figura 3.20 mostra o perfil de Capacidade térmica específica do solo de Brasília e também é dado de entrada para as simulações numéricas.

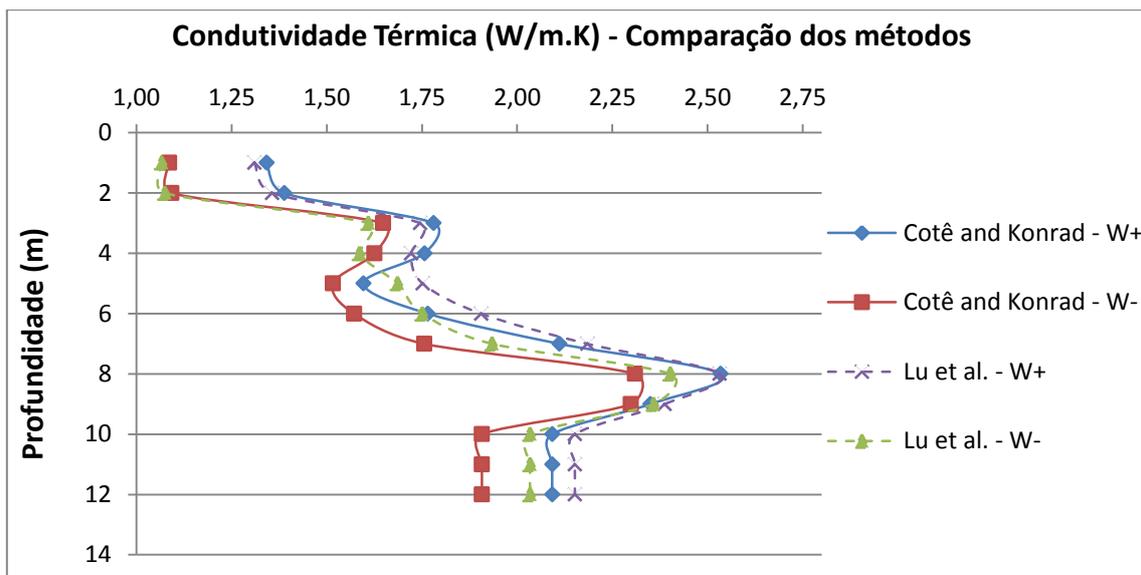


Figura 3.18. Intervalo de valores para condutividade térmica adotados.

Tabela 3.12. Resumo dos modelos utilizados para cada propriedade e sua variação.

Profundidade	Modelo	K [W/m.K]	Modelo Cp	Cp [J/kg.K]	
Areia	1	Cotêandkonrad (2005)	1,086 - 1,342	Johansen (1975)	1106,65 - 1441,43
Areia	2	Cotêandkonrad (2005)	1,092 - 1,388	Johansen (1975)	1086,70 - 1470,21
Areia	3	Cotêandkonrad (2005)	1,648 - 1,780	Johansen (1975)	1388,07 - 1583,65
Areia	4	Cotêandkonrad (2005)	1,625 - 1,757	Johansen (1975)	1400,45 - 1598,90
Argila	5	Lu et. Al (2007)	1,686 - 1,752	Johansen (1975)	1460,72 - 1543,38
Argila	6	Lu et. Al (2007)	1,751 - 1,905	Johansen (1975)	1470,50 - 1667,67
Argila	7	Lu et. Al (2007)	1,934 - 2,184	Johansen (1975)	1447,36 - 1789,24
Argila	8	Lu et. Al (2007)	2,402 - 2,532	Johansen (1975)	1458,16 - 1643,84
Silte	9	Lu et. Al (2007)	2,358 - 2,388	Johansen (1975)	1578,89 - 1624,65
Silte	10	Lu et. Al (2007)	2,034 - 2,152	Johansen (1975)	1454,69 - 1629,95
Silte	11	x	x - x	x	- x
Silte	12	x	x - x	x	- x

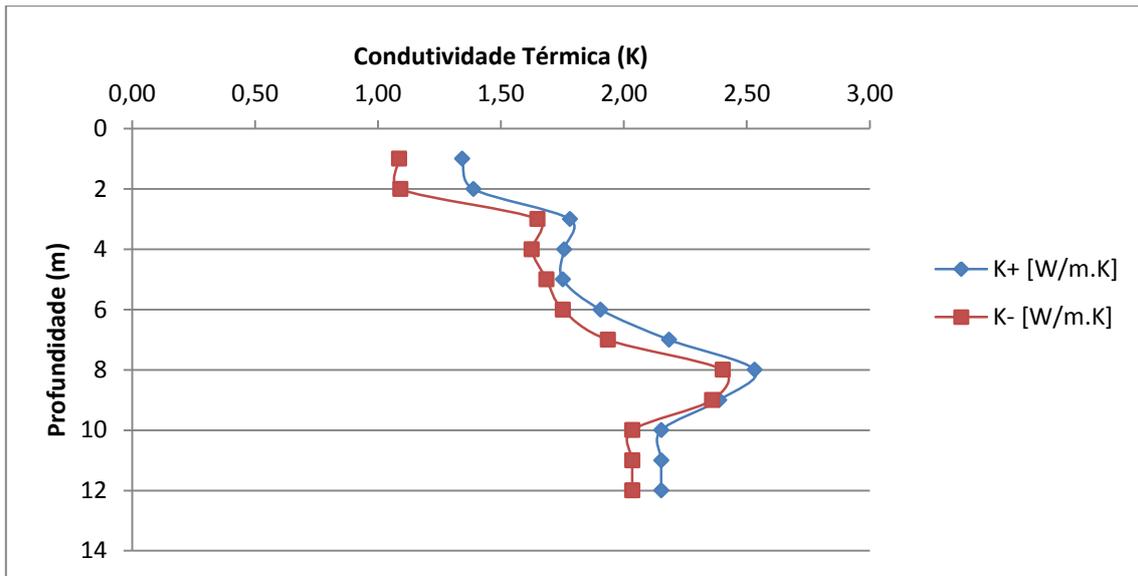


Figura 3.19. Intervalo de valores extremos calculados para condutividade térmica.

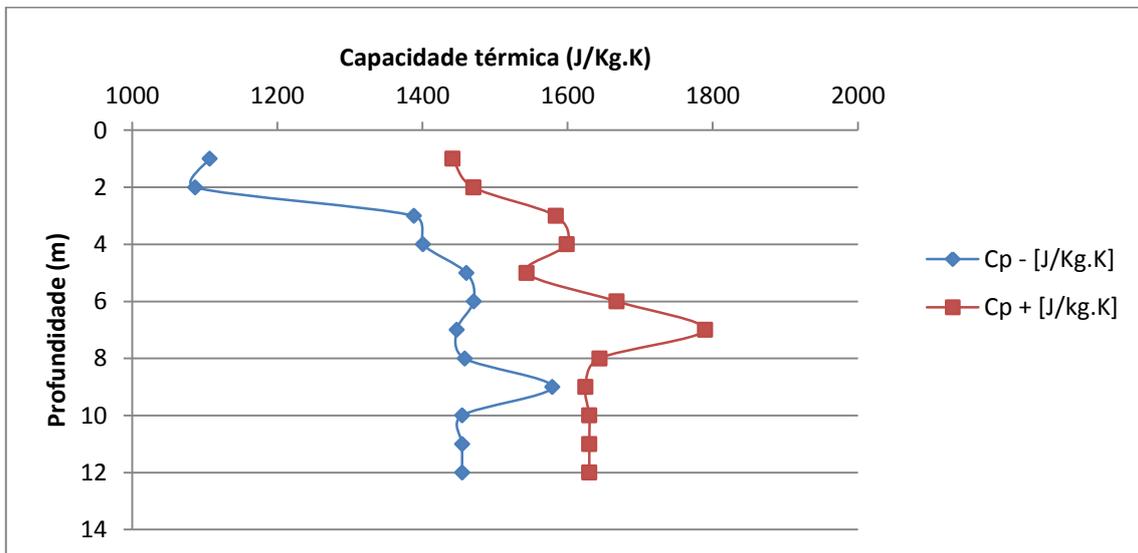


Figura 3.20. Intervalo de valores extremos calculados de capacidade térmica.

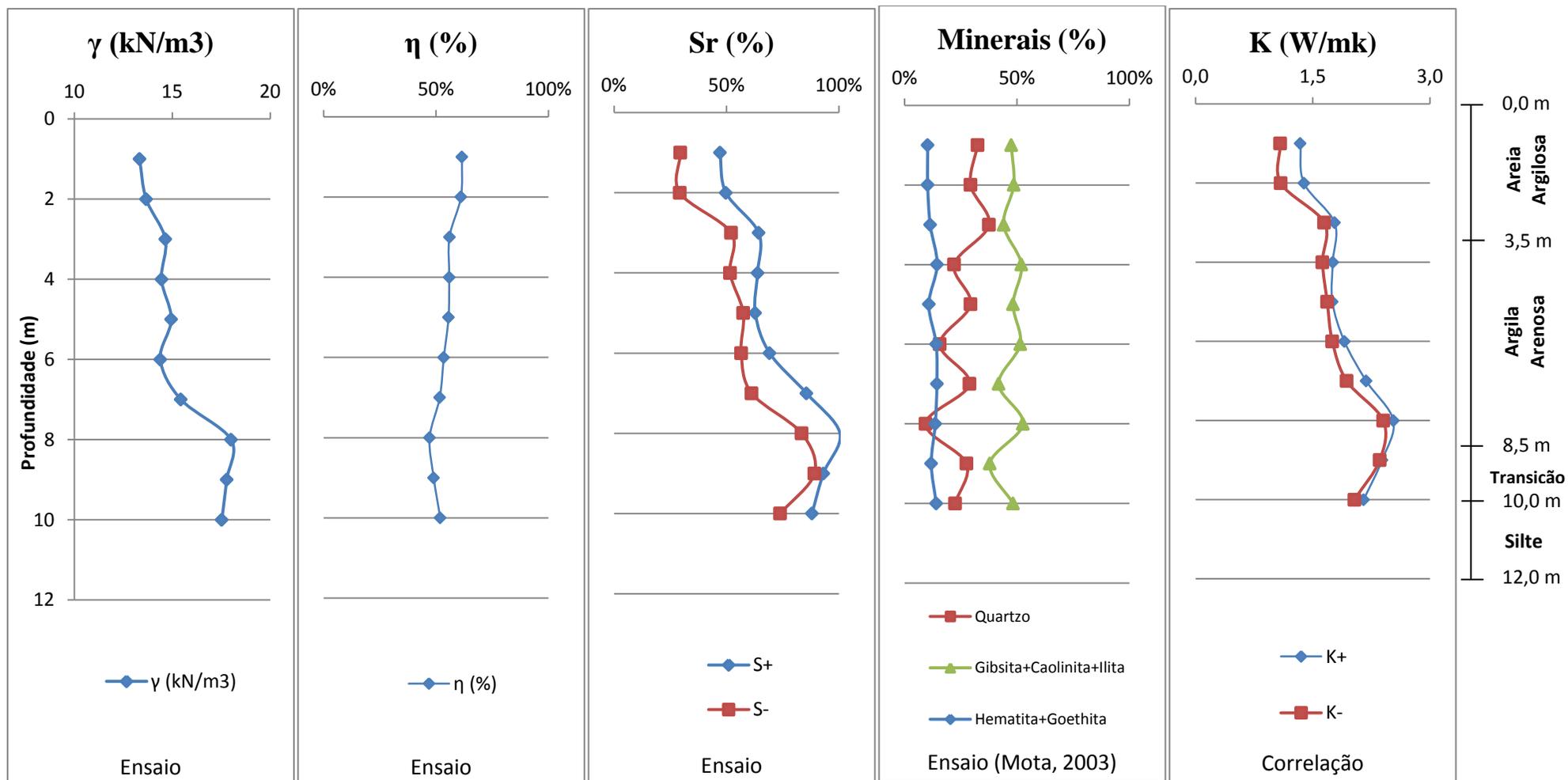


Figura 3.21. Resumo das propriedades que interferem na condutividade térmica do solo do campo experimental.

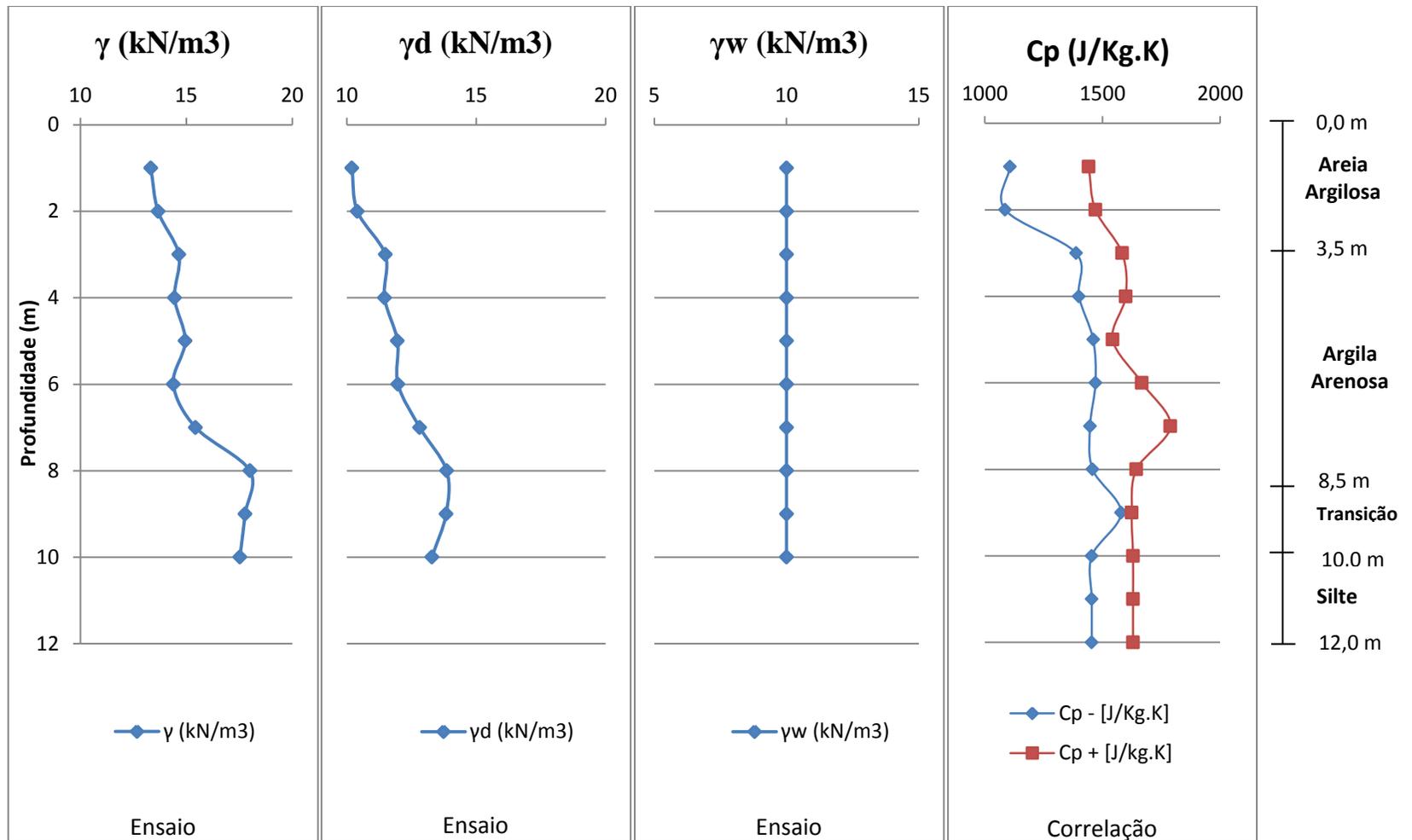


Figura 3.22. Resumo das propriedades que interferem na capacidade térmica específica do solo do Campo experimental.

4. ANÁLISE NUMÉRICA DE TROCA DE CALOR EM GRUPOS DE ESTACA

Com a finalidade de entender a interação entre fluxo de calor nas estacas de diferentes grupos e medir esta influência na troca de calor final, para o solo típico de Brasília (Brasília, Distrito Federal), fez-se a modelagem numérica dos grupos e mediu-se a troca de calor dos mesmos bem como de todas estacas modificando-se certos parâmetros para entender a influência dos mesmos no resultado geral. O estudo dos parâmetros referentes ao modelo numérico como parâmetros hidráulicos, geometria do modelo, limite do domínio, avaliação de malha e tipo de elementos foi desenvolvido por Orozco (2016) e foi explicitado no item XX. Partiu-se do estudo citado para proceder as simulações. A seguir trata-se de outros aspectos como bases teóricas do modelo, processo de modelagem, condições iniciais, de contorno e processamento dos resultados.

4.1. PROCEDIMENTO DE MODELAGEM NUMÉRICA DO SISTEMA TROCADOR DE CALOR EM GRUPOS DE ESTACAS

Com a definição das configurações ótimas para simulação do modelo trocador de calor em grupos de estacas, simulou-se por meio do software COMSOL *Multiphysics* os diversos casos de grupos de estacas a fim de entender a influência dos parâmetros variados no resultado final da troca de calor das estacas dos diferentes blocos.

Esta parte da dissertação mostra as considerações e condições de contorno utilizadas nas modelagens. A figura 4.1 mostra como ficou o modelo antes da simulação, evidenciando os 3 domínios: solo dividido por metro, estaca de concreto e tubulação.

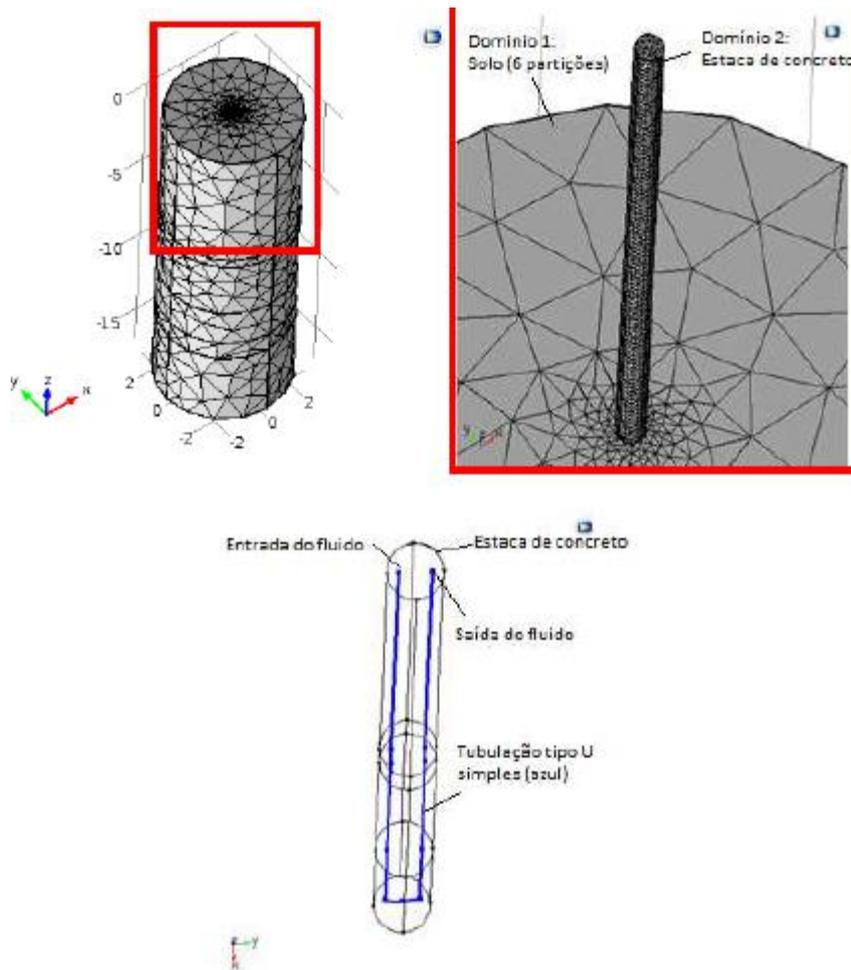


Figura 4.1. Modelagem numérica do sistema (Orozco, 2016).

O resultado da simulação que mede a eficiência da troca de calor da estaca é definida por meio das duas equações 2.12 e 2.13, a primeira retorna o resultado da taxa de calor trocado total (Q), enquanto a segunda a taxa normalizada pelo comprimento da estaca (Q_L).

4.2. BASES TEÓRICAS DO MODELO NUMÉRICO

A transferência de calor no caso das estacas de energia está ligado às leis da termodinâmica que serão apenas apresentadas em formulações derivadas destas leis. A transferência de calor leva em consideração vários fenômenos físicos devido à participação de vários materiais. Para as estacas de energia na qual há fluxo de fluido e troca de calor, se faz necessário o acoplamento destes dois fenômenos a fim de compreender como o sistema por inteiro se comporta. Desta maneira, um modelo de elementos finitos se torna uma solução rápida e barata para estudo de questões relacionadas à tecnologia de estacas trocadoras de calor.

O primeiro processo térmico é a transferência de calor governada pelo fenômeno de condução que é dado nos materiais em estado sólido, como o concreto da estaca e o solo, e é representada pela Lei de Fourier e que têm a seguinte formulação:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}_G}{\rho C_p} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

Sendo \dot{q}_G , é o calor gerado por unidade de volume e α é a difusividade térmica, T é temperatura e C_p capacidade térmica.

As malhas numéricas possuem um único grau de liberdade por nós (temperatura), por este motivo este tipo de simulação é menos complexa e exigem menor esforço computacional. Pelo comportamento linear da condução térmica, malhas mais grosseiras podem ser utilizadas nestes materiais e mesmo assim obter resultados de qualidade (Silva, 2017). Lembrando que quanto mais próximo da fronteira entre materiais mais refinada deve ser a malha.

O balanço de energia dado pela transferência de calor entre o fluxo e estaca de concreto é representado impondo as condições de contorno de calor convectivas nodais dentro da calda de cimento (Park, 2012).

Para isto, uma análise do que acontece na tubulação se realiza em 1D considerando a temperatura no interior e exterior da tubulação e a condutividade efetiva do material da tubulação. Portanto, a equação de balanço de calor que resolve o problema da transferência de calor na tubulação é dada na Eq. (4.2):

$$\rho A C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho A C_p u e_t \cdot \nabla_t T = \nabla_t \cdot (A k \nabla_t T) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho A}{d_h} |u| u^2 + q_G + q_{wall} \quad (4.2)$$

Na qual e_t é o vetor tangencial unitário ao longo da borda da tubulação, u velocidade unidimensional [m/s], T temperatura [K], C_{pf} a capacidade térmica específica do fluido [J/kg.K], K condutividade térmica [W/m.K], f_D é o fator de atrito de Darcy e A área da secção transversal da tubulação [m²].

Sendo,

$$q_{wall} = h_{eff} (T_g - T_f) \quad (4.3)$$

E para uma tubulação de seção circular,

$$h_{eff} = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_i h_{int}} + \frac{1}{r_e h_{ext}} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{K_{HDPE}}} \quad (4.4)$$

Onde d_h é o diâmetro hidráulico da tubulação [m], u a velocidade do fluxo dentro da tubulação, r_e e r_i são os limites exterior e interior da tubulação respectivamente [m], T_g e T_f a temperatura da calda cimento no domínio e do fluido circulante respectivamente, h_{eff} [$W/m^2.K$], e k_{HDPE} [$W/m.K$], correspondem ao coeficiente de transferência de calor efetivo e condutividade térmica do material da tubulação (HDPE). Os termos h_{ext} e h_{int} são coeficientes de transferência de calor que dependem do tipo de regime do fluxo (laminar/turbulento) [W/m^2K], determinados pelos números de Nusselt, Reynolds e Prandtl.

Sendo,

$$h_{int} = Nu \frac{k}{d_h} \quad (4.4)$$

E os números adimensionais:

$$Nu_{lam} = 3.66 \text{ (para secção circular)} \quad (4.5)$$

$$Nu_{turb} = \frac{\left(\frac{f_D}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{f_D}{8}} (Pr^{1/3} - 1)} \quad (4.6)$$

$$Nu = \max(Nu_{lam}, Nu_{turb}) \quad (4.7)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (4.8)$$

$$Re = \frac{\rho V d_h}{\mu} \quad (4.9)$$

O fator de atrito de Darcy segundo Colebrook para tubulação lisa (HDPE),

$$f_D = \max(f_{TURB}, f_{D0}) \quad (4.10)$$

$$f_{D0} = \frac{64}{Re} \quad (4.11)$$

$$\sqrt{\frac{1}{f_{TURB}}} = -1.8 \log_{10} \left(\frac{6.9}{Re} \right) \quad (4.12)$$

Sendo V , ρ e μ a velocidade média na seção, a densidade e a viscosidade dinâmica do fluido correspondentemente.

O movimento e transporte de fluidos em tubulações está descrito pelas conhecidas equações de Navier-Stokes para um fluido newtoniano-incompressível. Estas formulações descrevem a

lei de continuidade de um fluido pela conservação de massa e momento determinados nas Eqs (4.13) e (4.14) (Bidarmaghz A., 2013).

Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial A\rho}{\partial T} + \nabla \cdot (A\rho u) = 0 \quad (4.13)$$

Equação de conservação de momento:

$$\rho \frac{\partial}{\partial T_{ref}} u + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla P I + \mu \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} u + F \quad (4.14)$$

Na qual u representa o campo de velocidade [m/s] ρ é densidade do fluido, μ é viscosidade dinâmica, P é pressão, I é a matriz identidade, T_{ref} temperatura do refrigerante e F as forças externas.

O problema das estacas de energia utiliza fluxo transitório, haja visto que com o passar do tempo o grau de saturação térmica do solo vai aumentando ou diminuindo dependendo do calor inserido no mesmo por parte do fluido das estacas, que trocam mais calor quando está em regime de fluido turbulento.

Quando em regime turbulento, e dependente do tempo, essas mesmas equações devem ser calculadas pelas formulações “*Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS)*” descritas nas Eqs. (4.15) e (4.16).

Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (A\rho u) = 0 \quad (4.15)$$

Equação de conservação de momento:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} u + \rho u \cdot \nabla (\bar{u}u) = -\nabla \bar{P} + \mu \cdot \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} - \rho \cdot \frac{\partial}{\partial x} (u'u') + F \quad (4.16)$$

Sendo no regime turbulento,

$u(x, y, z, t) = \bar{u}(x, y, z) + u'(x, y, z, t)$ é o campo de velocidade.

$P(x, y, z, t) = \bar{P}(x, y, z) + P'(x, y, z, t)$ é o campo de pressão.

4.3. PROCESSO DE MODELAGEM NO SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS

O Software COMSOL *Multiphysics* v5.2 não é um software específico para engenharia de fundações ou estacas trocadoras de calor, mas possui uma gama imensa de fenômenos que podem ser simulados, porém se faz necessária a incorporação de outros módulos. Para o caso de estacas trocadoras de calor, dois módulos adicionais são necessários, um responsável pela parte hidráulica e outro pela parte térmica. O primeiro chama-se *PipeFlow*, enquanto o segundo *HeatTransfer*. Com a instalação dos dois módulos segue-se o procedimento descrito abaixo:

- 1) Modelagem da geometria: nesta etapa modela-se o domínio de solo, as estacas e as tubulações.
 - a. Para este estudo discretizou-se o solo em camadas metro a metro e extrapolou a camada dos 12 metros até os 15 metros.
- 2) Inserção de equações:
 - a. Equação de variação de temperatura superficial;
 - b. Equação que define o perfil de temperatura ao longo da profundidade do solo.
- 3) Definição dos parâmetros dos materiais:
 - a. Incluem-se parâmetros térmicos como: γ , K e C_p .
- 4) Configuração do Módulo *Pipe Flow*:
 - a. Determina-se propriedades da tubulação, como diâmetro interno e rugosidade;
 - b. Pressão na tubulação;
 - c. Pontos de entrada e saída de fluido, bem como temperatura de entrada;
 - d. Valores iniciais de pressão, velocidade tangencial e vazão;
 - e. Propriedades do tubo como: K (condutividade térmica) e Rugosidade da parede.
- 5) Configuração do Módulo *Heat Transfer*:
 - a. Valores iniciais de temperatura da massa de solo e estaca;
 - b. Possíveis equações que controlam comportamento, como por exemplo da temperatura superficial ou temperatura constante para o fundo da massa de solo.
- 6) Definição do tipo de elemento finito e densidade de malha.
- 7) Definição do Estudo numérico:
 - a. Define-se o intervalo de resultados e o tempo total de simulação.

4.4. CARACTERÍSTICAS DO ESTUDO DO COMPORTAMENTO TERMO-HIDRÁULICO, CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO DO MODELO

A investigação do comportamento termo-hidráulico é feito em todas estacas de todos blocos. Para tal, simulou-se um sistema em início de operação em solo não saturado termicamente ou hidraulicamente e a partir daí mediu-se a troca de calor para um determinado tempo comum a todas simulações.

Simulações numéricas necessitam de condições iniciais e de contorno. A seguir são descritas as utilizadas para as simulações executadas:

a) Valores iniciais do modelo:

- Temperatura do solo: A temperatura inicial do solo foi descrita no item 3.4.5 e o perfil de temperatura na figura 3.15;
- Temperatura da estaca e água da tubulação: Para tal adotou-se a mesma temperatura do solo, simulando início de operação com equalização entre temperaturas do solo, estaca e água da tubulação;
- Vazão da água na tubulação: adotou-se o mesmo valor da vazão ao longo do período para o início;
- Pressão na saída da tubulação: adotou-se a pressão atmosférica, com valor igual a 102,100 Pa;
- Tempo do segmento de análise (Step Time): para tal definiu-se que as análises seriam feitas a cada 1 hora ou (3600 s);
- Tempo total de análise: o fim da análise se dá após 50 horas (180.000 s), ultrapassando o mínimo para ensaio TRT estabelecido pela norma Eurocode CEN/TC 341 N 525 2011, 48 horas (178.200 s);

b) Condições de contorno do modelo numérico:

- Temperatura superficial: para esta condição de contorno utilizou-se como base o dia 08/12/2016, dia na qual o perfil de temperatura do solo foi medido e extrapolou-se para o dia seguinte a fim de completar 50 horas de ensaio. Ver figura 4.2.

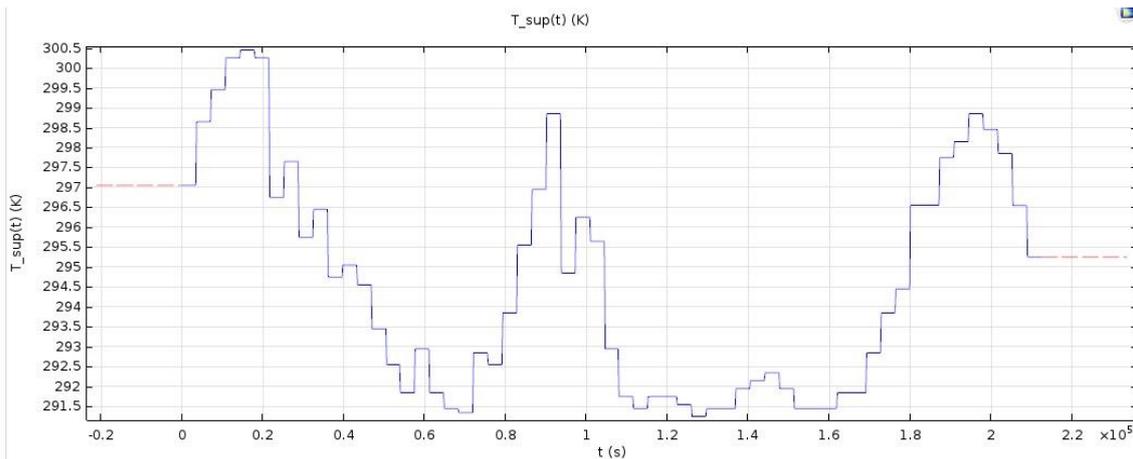


Figura 4.2. Gráfico da temperatura superior do solo. (INPE)

- Temperatura constante em profundidade: esta condição na fronteira inferior do domínio de solo representa a constância de temperatura a certa profundidade do solo; Considerou-se 25°C (298,75 K) e também a considerou para os 3 últimos metros de domínio de solo onde já não havia mais tubulação imersa.
- Temperatura da água na entrada da estaca: para esta condição considerou-se 35 °C (308,15 K);
- Vazão do fluido circundante nas tubulações: este fluxo foi considerado constante durante todo período, do início ao fim e teve como valor ($4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$).

4.5. MODELAGEM PARAMÉTRICA

Realiza-se simulações na qual são variados parâmetros geométricos, de configuração geotérmica e térmicos. Os parâmetros geométricos variados são o número de estacas no bloco, sendo eles 1 estaca, 2 estacas, 4 estacas, 6 estacas e 9 estacas. Os diâmetros das estacas são variados em 0.3 m, 0.4m e 0.6m. O distanciamento relativo entre as estacas permaneceu-se sempre o mesmo, 3D (três diâmetros), e se escolheu esta relação pois é a mais utilizada nos projetos de fundações desenvolvidos no DF. Com relação a tubulação utilizou-se também opções: U simples (1U), U duplo (2U) e U triplo (3U) sempre acopladas, ou seja, apenas uma entrada e uma saída de água para cada estaca. Avalia-se também a variação dos parâmetros térmicos do solo K e Cp, sendo valores máximos ou mínimos, calculados conforme máxima e mínima variação de umidade do solo. Para melhor entendimento e identificação dos resultados criou-se um modelo para identificação das configurações aplicadas em cada simulação a ser descrita e organizada na ordem a seguir:

- Número de estacas no bloco: B+X, sendo B – Bloco e X – algarismo que indica a quantidade de estacas no bloco. Exemplo: B2 - Bloco com duas estacas. Quando há apenas uma estaca suprime-se o algarismo 1;
- Diâmetro das estacas: D0X, sendo D – Diâmetro e 0X – indica o diâmetro em metros. Exemplo: D06 – Diâmetro de 0,60 m;
- Configuração da tubulação: XU, sendo X- indica o número de voltas da tubulação dentro da estaca e U significa as voltas. Exemplo: 2U – Tubulação com duas voltas dentro da estaca. Quando há apenas uma estaca suprime-se o algarismo 1;
- Parâmetros térmicos do solo: W(+/-) – sendo W significa a umidade e os sinais + ou – indicam se os parâmetros foram calculados para valores máximos ou mínimos de umidade.

Abaixo na figura 4.3 encontra-se esquema contendo todas as possibilidades abordadas nas simulações, nas figuras 4.4 e 4.5 tem exemplo dos blocos e do tipo de tubulação, na tabela 4.11 as combinações simuladas.

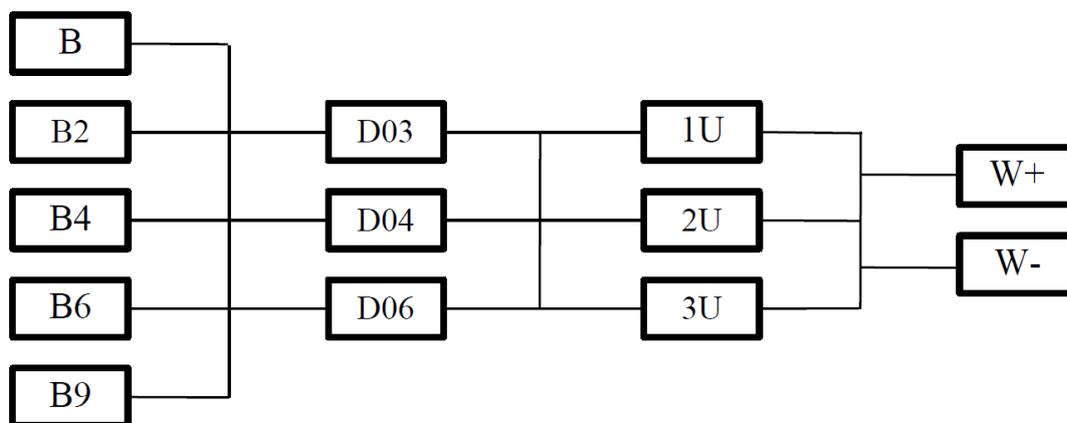


Figura 4.3. Esquema com combinação de simulações possíveis.

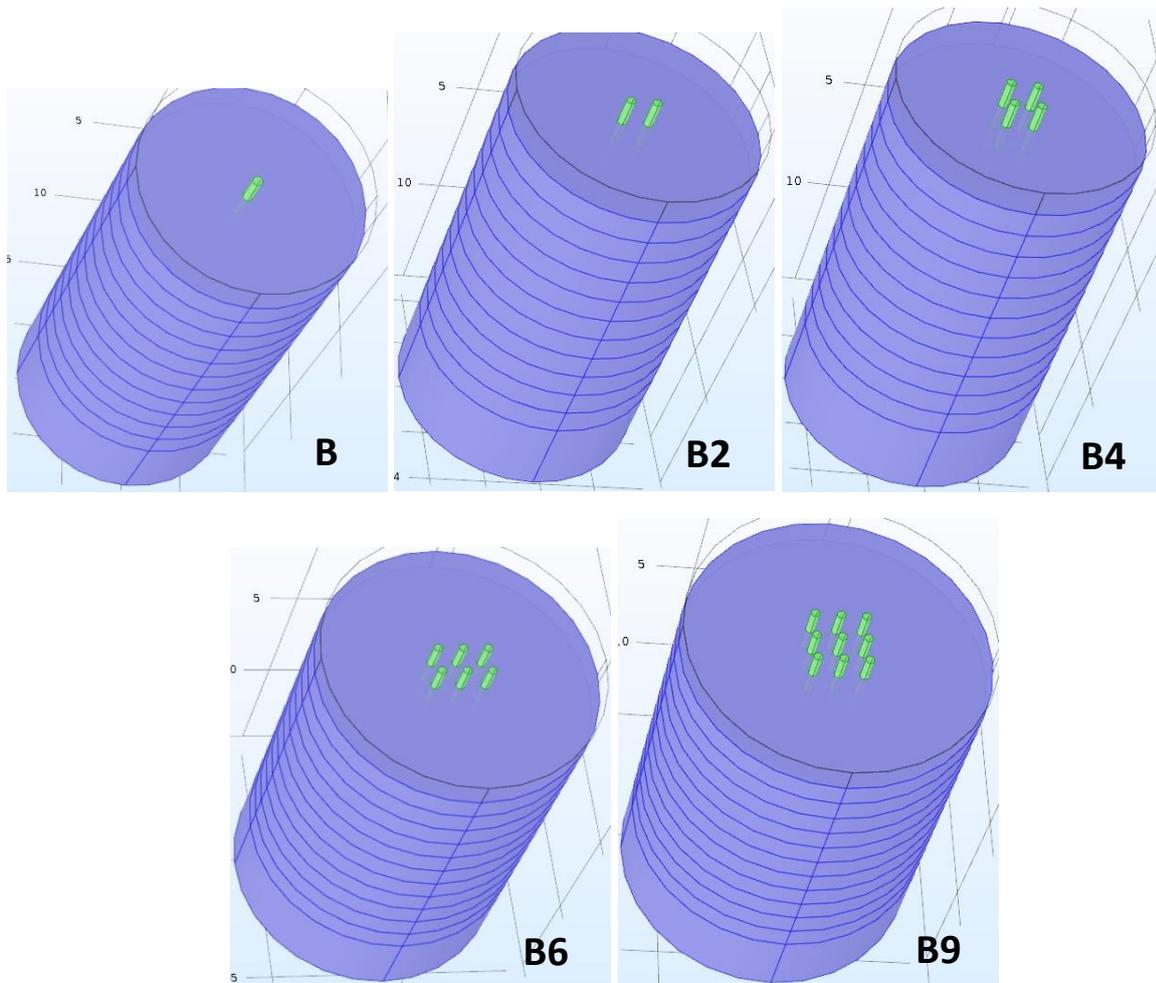


Figura 4.4. Tipos de blocos simulados.

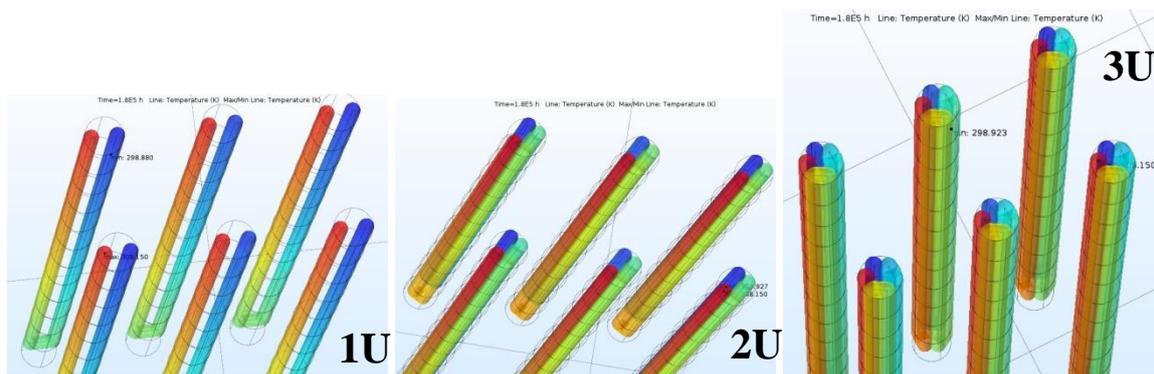


Figura 4.5. Tipos de tubulações simuladas.

Tabela 4.1. Combinações possíveis e executadas.

Diâmetro	Tubulação	Número de estacas					
		B1	B2	B4	B6	B9	
D03	1U	W+	B-D03-U-W+	B2-D03-U-W+	B4-D03-U-W+	B6-D03-U-W+	B9-D03-U-W+
		W-	B-D03-U-W-	B2-D03-U-W-	B4-D03-U-W-	B6-D03-U-W-	B9-D03-U-W-
	2U	W+	B-D03-2U-W+	B2-D03-2U-W+	B4-D03-2U-W+	B6-D03-2U-W+	B9-D03-2U-W+
		W-	B-D03-2U-W-	B2-D03-2U-W-	B4-D03-2U-W-	B6-D03-2U-W-	B9-D03-2U-W-
	3U	W+	B-D03-3U-W+	B2-D03-3U-W+	B4-D03-3U-W+	B6-D03-3U-W+	B9-D03-3U-W+
		W-	B-D03-3U-W-	B2-D03-3U-W-	B4-D03-3U-W-	B6-D03-3U-W-	B9-D03-3U-W-
D04	1U	W+	B-D04-U-W+	B2-D04-U-W+	B4-D04-U-W+	B6-D04-U-W+	B9-D04-U-W+
		W-	B-D04-U-W-	B2-D04-U-W-	B4-D04-U-W-	B6-D04-U-W-	B9-D04-U-W-
	2U	W+	B-D04-2U-W+	B2-D04-2U-W+	B4-D04-2U-W+	B6-D04-2U-W+	B9-D04-2U-W+
		W-	B-D04-2U-W-	B2-D04-2U-W-	B4-D04-2U-W-	B6-D04-2U-W-	B9-D04-2U-W-
	3U	W+	B-D04-3U-W+	B2-D04-3U-W+	B4-D04-3U-W+	B6-D04-3U-W+	B9-D04-3U-W+
		W-	B-D04-3U-W-	B2-D04-3U-W-	B4-D04-3U-W-	B6-D04-3U-W-	B9-D04-3U-W-
D06	1U	W+	B-D06-U-W+	B2-D06-U-W+	B4-D06-U-W+	B6-D06-U-W+	B9-D06-U-W+
		W-	B-D06-U-W-	B2-D06-U-W-	B4-D06-U-W-	B6-D06-U-W-	B9-D06-U-W-
	2U	W+	B-D06-2U-W+	B2-D06-2U-W+	B4-D06-2U-W+	B6-D06-2U-W+	B9-D06-2U-W+
		W-	B-D06-2U-W-	B2-D06-2U-W-	B4-D06-2U-W-	B6-D06-2U-W-	B9-D06-2U-W-
	3U	W+	B-D06-3U-W+	B2-D06-3U-W+	B4-D06-3U-W+	B6-D06-3U-W+	B9-D06-3U-W+
		W-	B-D06-3U-W-	B2-D06-3U-W-	B4-D06-3U-W-	B6-D06-3U-W-	B9-D06-3U-W-

4.6. PROCESSAMENTO DOS RESULTADOS

Ao fim das simulações o software COMSOL *Multiphysics* pode gerar vários tipos de resultados, visuais ou numéricos. O mais importante para as análises é o valor da temperatura de saída da água nos tubos, pois com este valor é possível calcular o valor da troca de calor na estaca Q e a troca de calor normalizada Q_L . Com isto, gera-se parâmetro para analisar estaca por estaca, bem como analisar a média de troca de calor para os blocos com diferentes números de estacas.

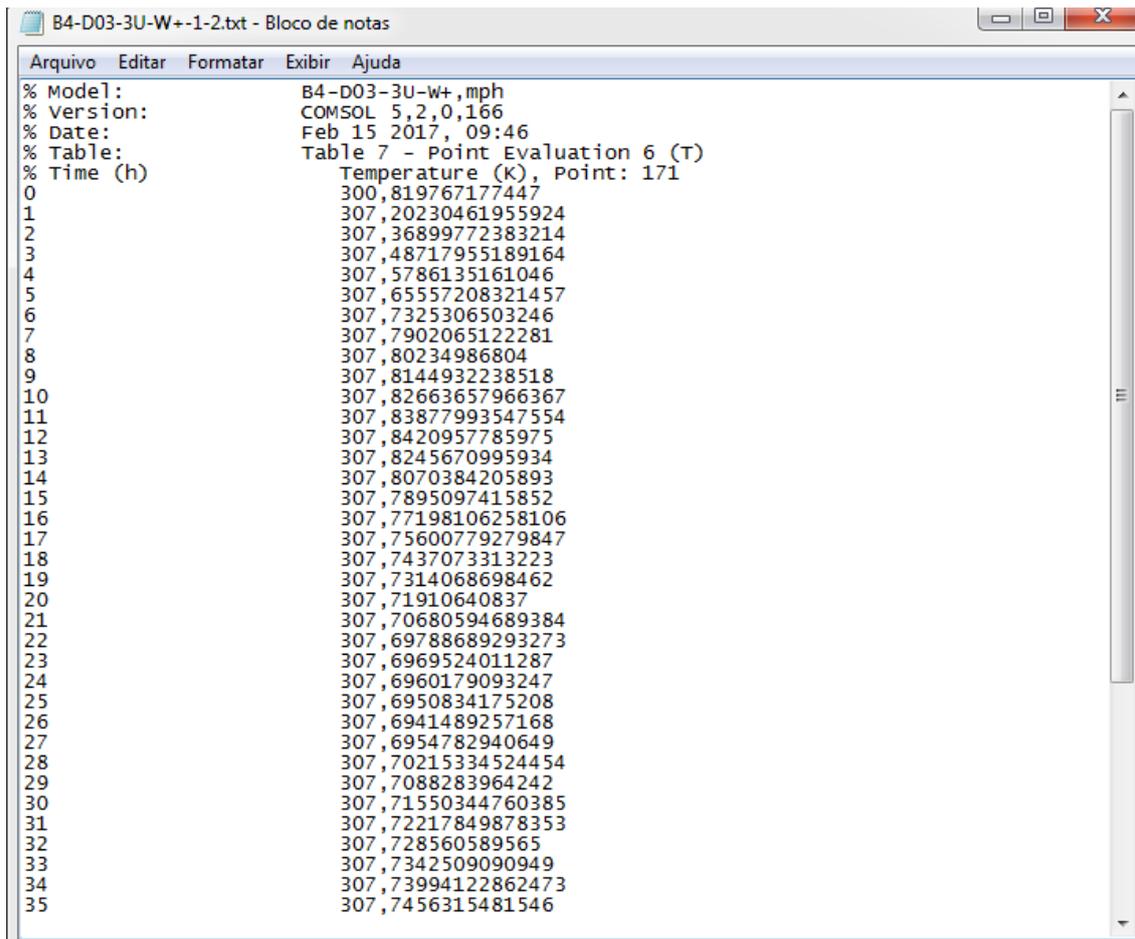
Tratando-se do processo de tratamento dos dados até o valor final de troca de calor normalizada, os seguintes passos são seguidos:

- *Point evaluation*: o primeiro passo é avaliar o ponto de saída da tubulação. Utiliza-se o recurso *Point Evaluation* para isto. Como resultado o software entrega uma tabela contendo duas colunas, vide figura 4.6, a primeira com o passo de tempo e a segunda com o valor da temperatura correspondente. Posteriormente exportou-se esta tabela em formato txt, e repetiu-se o processo para cada uma das estacas.

- Cálculo da eficiência térmica das estacas: este passo inicia-se com a passagem dos dados exportados do software COMSOL *Multiphysics* para uma tabela que calcula automaticamente Q_L e como resultado final tem-se também gráfico da troca de calor ao longo do tempo. O cálculo de Q_L faz-se utilizando a equação 4.2, isto pela diferença entre o valor da temperatura de entrada e a de saída. Com este valor é possível realizar o cálculo para cada passo de tempo. Por fim faz-se uma média aritmética para o período de ensaio considerado e obtém o valor médio da troca de calor.
- Análise da troca de calor normalizada por bloco: a última análise, faz-se dos blocos como um todo. Para tal realiza-se uma média das trocas de calor normalizadas por estaca e com esta média compara-se com o valor de troca normalizada padrão, que é sempre da estaca única. Abaixo a equação 4.3 mostra como o cálculo é feito, sendo: Q_{LB} é o valor da troca de calor normalizada média do bloco que se está analisando e Q_{LB1} é o valor da troca de calor normalizada média do bloco padrão com apenas uma estaca.

$$Variação (\%) = \frac{Q_{LB} - Q_{LB1}}{Q_{LB1}} \quad (4.3)$$

- Análise da influência do grupo de estacas na troca de calor de cada estaca: a fim de entender melhor o comportamento da troca de calor das estacas dentro de um grupo, analisa-se estaca por estaca para analisar o quanto sua posição influencia em sua troca de calor.



The image shows a text editor window titled "B4-D03-3U-W+-1-2.txt - Bloco de notas". The window contains the following text:

```
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
% Model:      B4-D03-3U-w+,mph
% Version:    COMSOL 5,2,0,166
% Date:       Feb 15 2017, 09:46
% Table:      Table 7 - Point Evaluation 6 (T)
% Time (h)    Temperature (K), Point: 171
0            300,819767177447
1            307,20230461955924
2            307,36899772383214
3            307,48717955189164
4            307,5786135161046
5            307,65557208321457
6            307,7325306503246
7            307,7902065122281
8            307,80234986804
9            307,8144932238518
10           307,82663657966367
11           307,83877993547554
12           307,8420957785975
13           307,8245670995934
14           307,8070384205893
15           307,7895097415852
16           307,77198106258106
17           307,75600779279847
18           307,7437073313223
19           307,7314068698462
20           307,71910640837
21           307,70680594689384
22           307,69788689293273
23           307,6969524011287
24           307,6960179093247
25           307,6950834175208
26           307,6941489257168
27           307,6954782940649
28           307,70215334524454
29           307,7088283964242
30           307,71550344760385
31           307,72217849878353
32           307,728560589565
33           307,7342509090949
34           307,73994122862473
35           307,7456315481546
```

Figura 4.6. Exemplo de como os dados são exportados pelo software.

5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARAMÉTRICAS

Nos resultados analisa-se a média de troca de calor normalizada das estacas, bem como os parâmetros envolvidos a fim de entender qual deles mais influenciam na eficiência das estacas ou blocos.

A primeira apresentação de resultados se dá entre diferentes tipos de blocos e diâmetros de estacas para mesmo tipo de tubulação. Analisa-se neste a quantidade de calor trocada, a perda de eficiência entre estacas dos blocos com relação ao resultado do bloco de apenas uma estaca. A segunda apresentação mantém o diâmetro das estacas e modifica-se a tubulação. Nesta, observa-se a tendência das curvas, o coeficiente de determinação (R^2) das mesmas e a perda de eficiência dos blocos em relação à estaca padrão.

Por fim, faz-se comparativo geral que mantém apenas o diâmetro das estacas e modifica todos outros parâmetros.

5.1. RESULTADO DAS ESTACAS E BLOCOS

Nesta, apresenta-se os resultados de troca de calor de duas maneiras distintas. A primeira delas é pela troca de calor normalizada por metro de estaca e a segunda, toma como padrão o bloco com uma estaca, para estudar a influência que a posição da estaca tem na sua eficiência utilizando porcentagem. Estes dois resultados são apresentados também para a média dos blocos. A posição da estaca é dada pela notação linha-coluna. Exemplo: estaca 12, primeira linha e segunda coluna, vide figura 5.1.

O objetivo deste item é analisar de forma quantitativa como a posição da estaca tem influência na sua troca de calor e por quais outras estacas cada uma é influenciada. Analisa-se também, a eficiência dos blocos como um todo, utilizando uma média de calor trocado por metro de estaca.

As imagens para análise do bulbo de calor foram feitas a profundidade de 6 metros e para tempo de 50 horas (fim da simulação) a fim de padronizar a análise. Executou-se um plano de corte na profundidade desejada e depois se plotou um gráfico na qual a temperatura corresponde a coordenada Z, deixando a união entre bulbos bem visível. Ainda para estudo da interação entre estacas, executou-se outro tipo de corte, este na vertical e passando pelo centro

das estacas. Optou-se por utilizar os blocos com 2 estacas de cada uma das configurações. Plotou-se a temperatura neste plano de corte. Para tal, utiliza-se apenas as simulações executadas com valores máximos de umidade, pois as tendências e a forma de decaimento de eficiência são bem parecidas para os diferentes tipos de umidade.

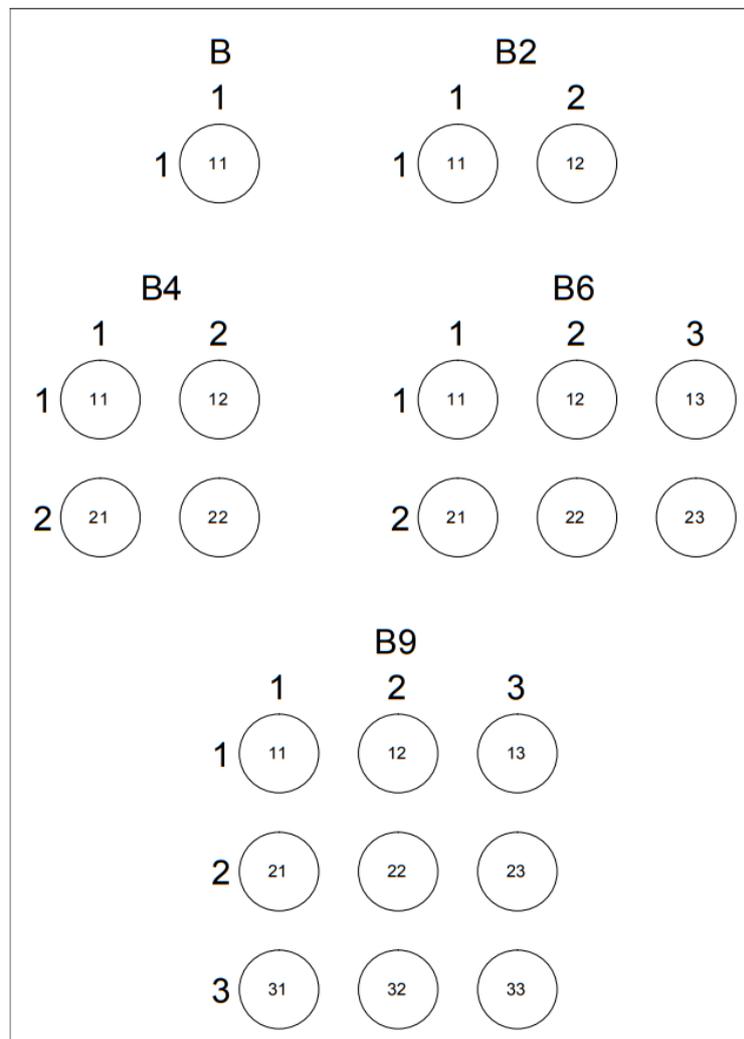


Figura 5.1. Nomenclatura e posicionamento das estacas nos blocos.

5.1.1. RESULTADOS PARA TUBULAÇÃO U

Neste item, apresenta-se os resultados para cada par de configuração (valores máximos e mínimos de umidade) de duas maneiras, uma com valor de troca de calor normalizado por metro de estaca, a média de calor trocado nos blocos, a perda de eficiência das estacas e dos blocos com relação ao bloco padrão (1 estaca). Analisa-se questões como a tendência do gráfico de perda de eficiência das estacas ou blocos com relação ao bloco padrão de 1 estaca, analisa-se também a influência da posição da estaca no seu resultado, e os valores que

desviam de forma significativa do esperado, e conclui-se do porquê dos resultados e das observações feitas.

- **D03-U:**

Abaixo nas figuras 5.2 a 5.6 tem-se os gráficos com resultados da configuração D03-U e figuras que mostram como os bulbos de calor se comportam dentro dos blocos.

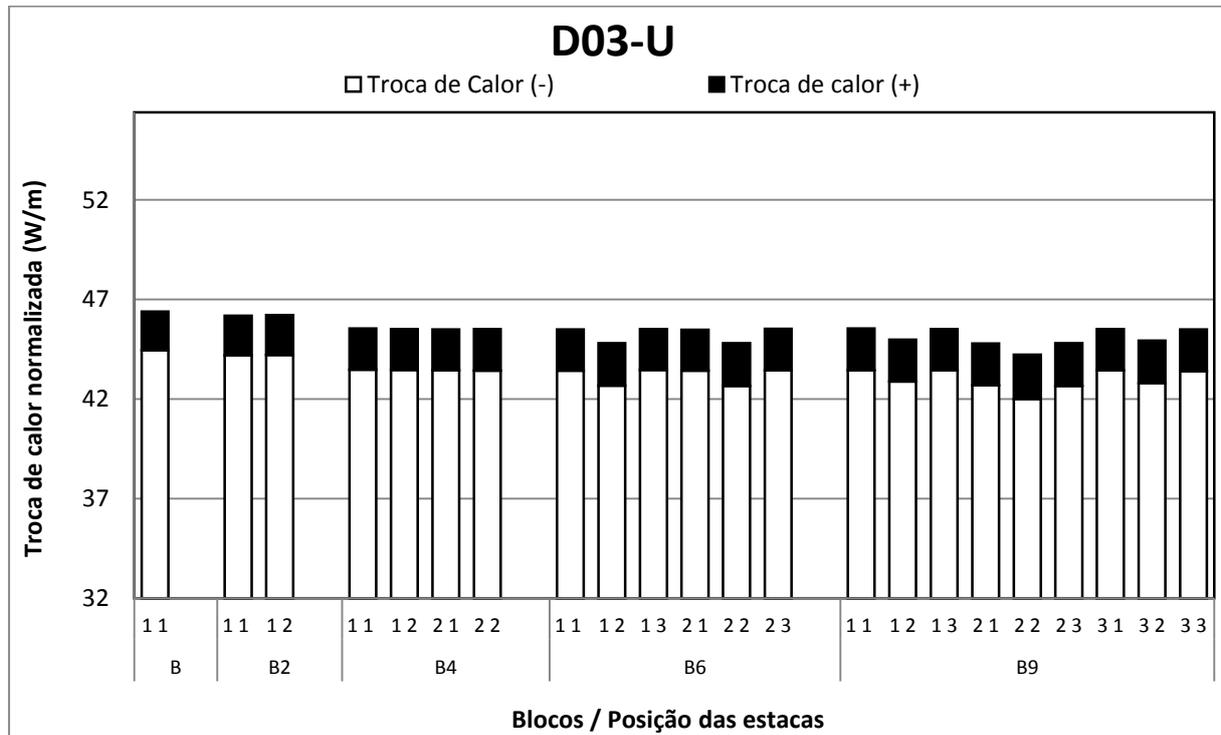


Figura 5.2. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D03-U.

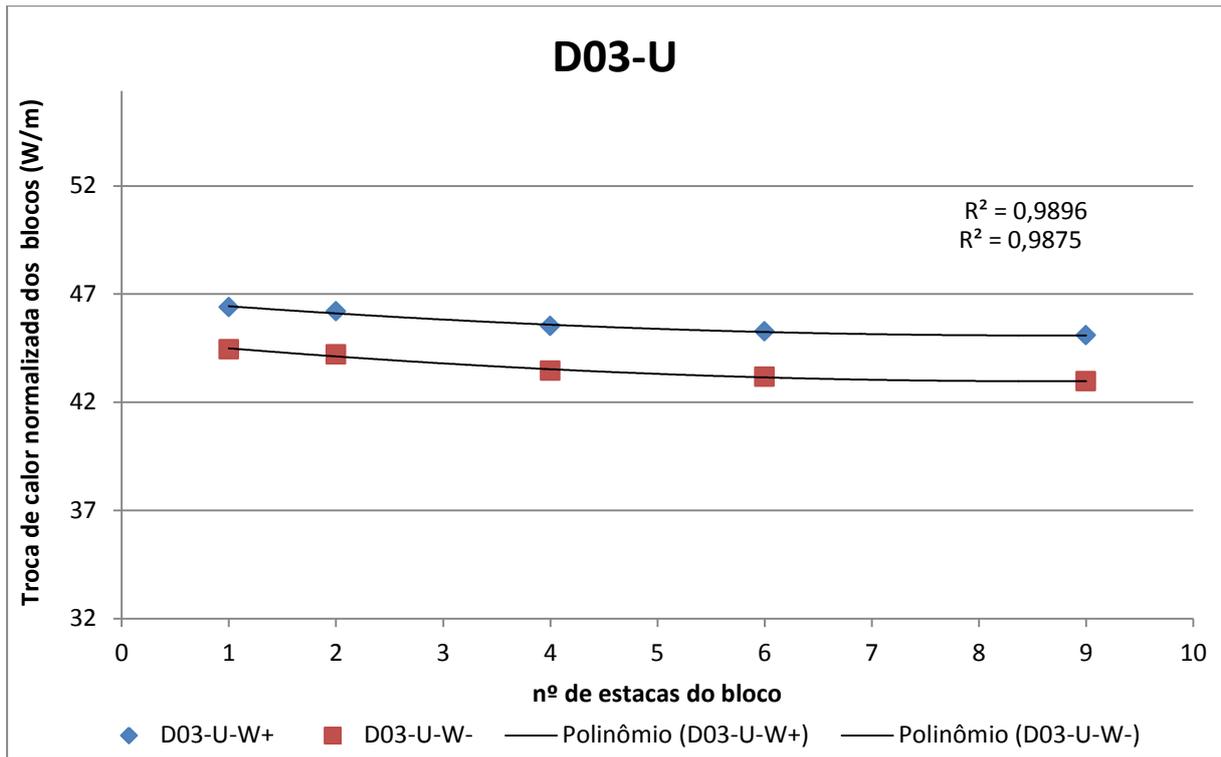


Figura 5.3. Taxa de troca de calor média dos blocos e tendências polinomiais de segundo grau para configuração D03-U.

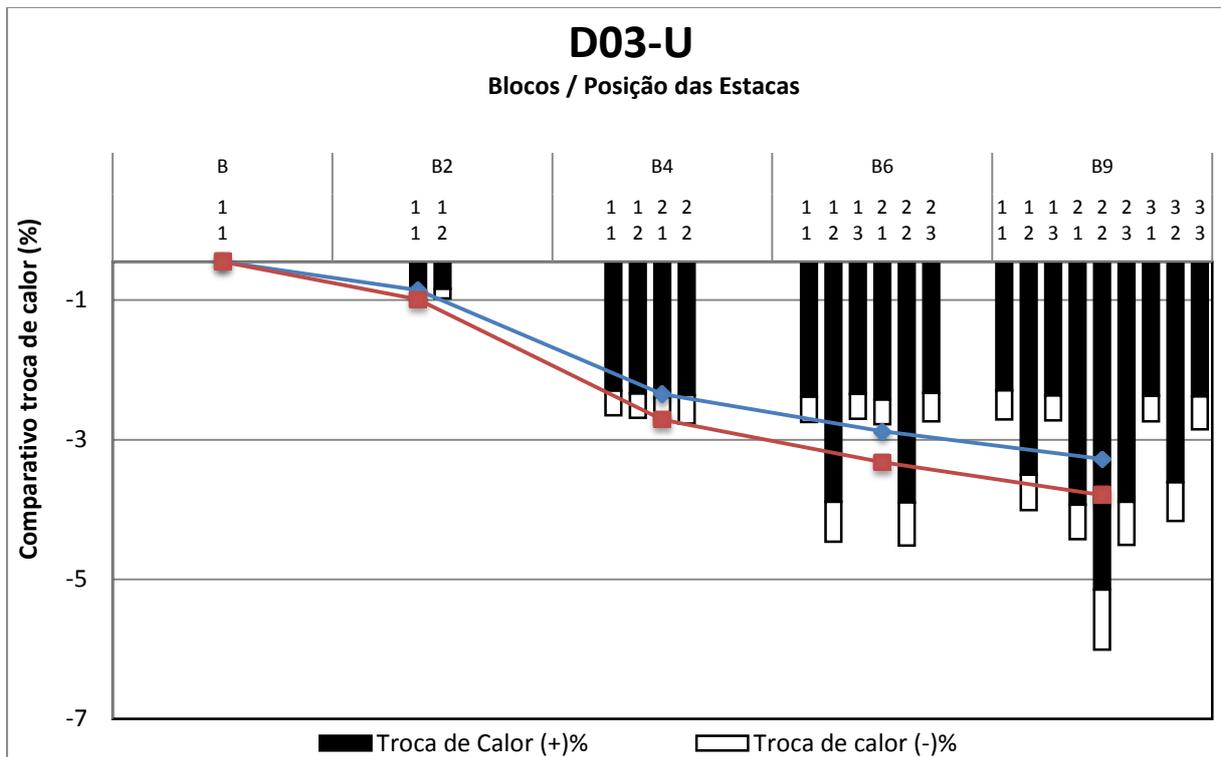


Figura 5.4. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D03-U.

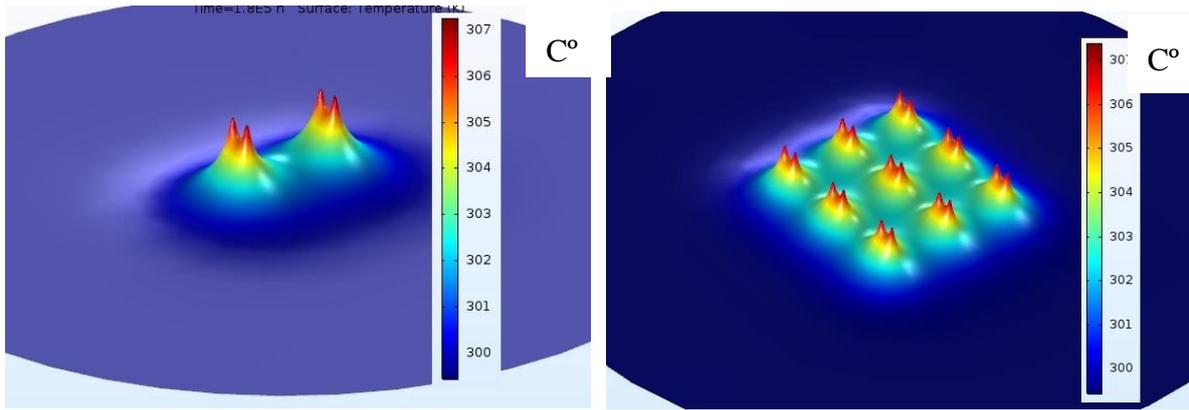


Figura 5.5. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D03-U.

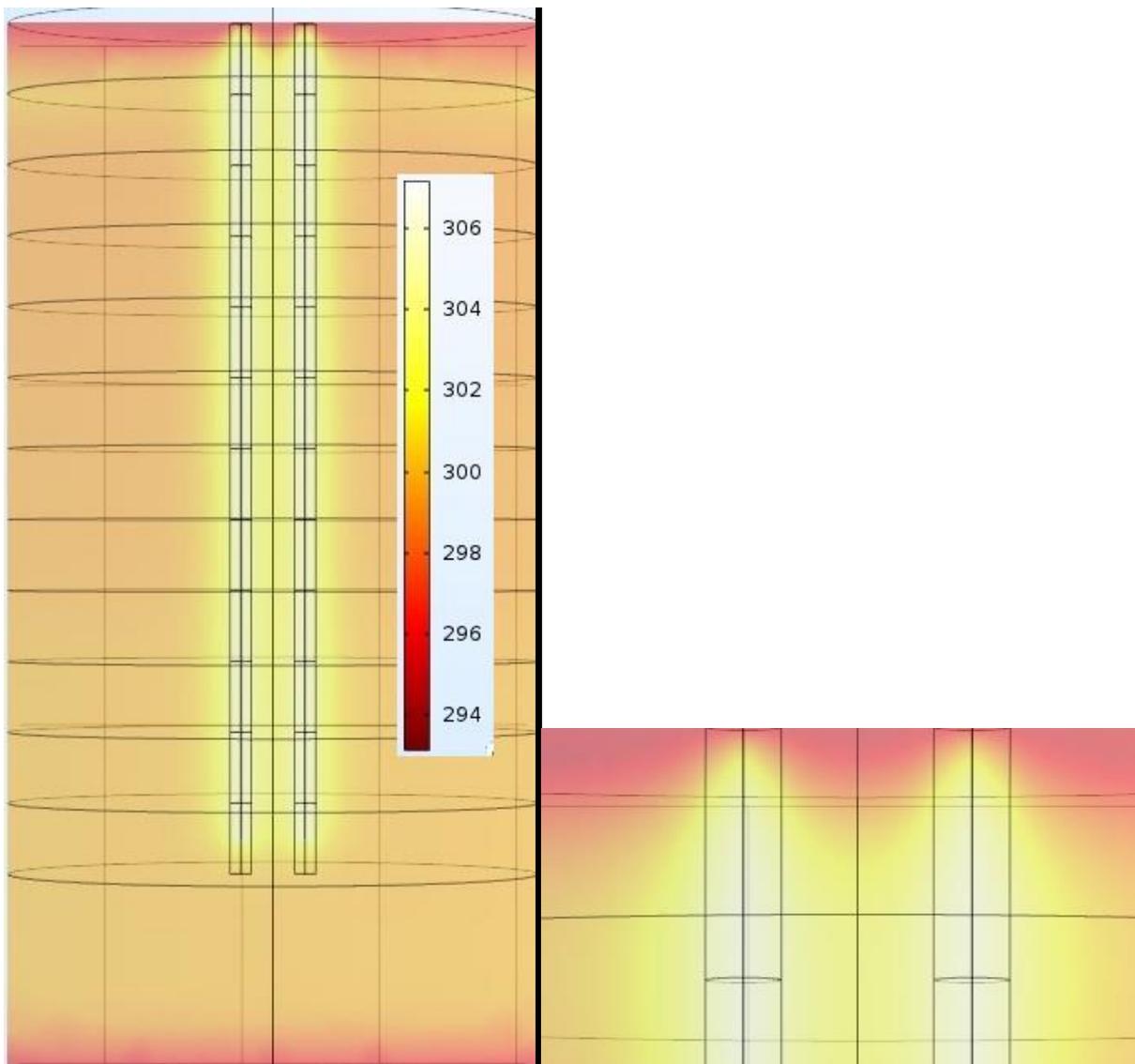


Figura 5.6. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D03-U.

Com base nas figuras acima observa-se que:

- O bloco com 2 estacas tem pequena perda de eficiência, e as taxas são praticamente iguais para as estaca;
- O bloco com 4 estacas tem valor praticamente igual de troca de calor para todas estacas, porém o decaimento é maior quando comparado ao bloco com 2 estacas;
- Nota-se que os bulbos térmicos se interceptam e as estacas são influenciadas pelas estacas em suas laterais e em sua diagonal, mas devido a maior distância a interferência entre estacas é menor;
- Nos blocos com 6 estacas, nota-se comportamento e valores diferentes para as estacas da coluna 2, já que elas tem perda de eficiência maior que as outras estacas;
- No bloco com 9 estacas, outra configuração de estaca aparece, que é a 2-2. Ela se encontra exatamente no meio do bloco, sofrendo influência de 4 estacas em suas laterais e outras 4 em diagonal, sendo evidenciado pela maior perda de eficiência dentre as estacas do bloco, na figura 5.4;
- Considerando o número de estacas “influenciadoras” e mesma posição mesmo em diferentes blocos a perda de eficiência e a troca de calor das estacas são bastante parecidas;
- A eficiência é maior para valores máximos de umidade, sendo cerca de -2,92% para o bloco de 9 estacas, enquanto para os valores mínimos de umidade ela chega a ser -3,34%;
- Os blocos com 2 e 4 estacas tem maior erro com relação a curva de tendência, apesar de terem valores bem consistentes;
- O valor de R^2 (coeficiente de determinação) para a tendência polinomial de segundo grau é cerca de 0,9875 e 0,9896 para valores máximos e mínimos de umidade, respectivamente.

Conclui-se que para o bloco com 2 estacas a perda de eficiência é pequena, pois elas tem apenas a influência uma da outra e como os bulbos se interceptam, quando muda-se para o bloco com 4 estacas mais estacas se influenciam, porém devido a simetria nas duas direções o decaimento se acentua, ainda de maneira uniforme para todas as estacas, vide figura 5.4. No bloco com 6 estacas, a perda de eficiência das estacas da coluna 2 (12 e 22) é explicada devido ao fato das estacas possuírem 3 estacas se influenciando diretamente, as duas laterais e a estaca da mesma coluna, sem contar o maior número de diagonais. No bloco com 9 estacas, a estaca exatamente do meio do bloco (22) sofre maior perda de eficiência, pois ela interage

com o bulbo de 4 estacas laterais e 4 estacas em diagonal, sendo a estaca que mais perde eficiência dentre todas, ver figura 5.7. Com relação a tendência de perda de troca de calor ela se mostra bem próxima a ideal, com valor R^2 próximo a 1.

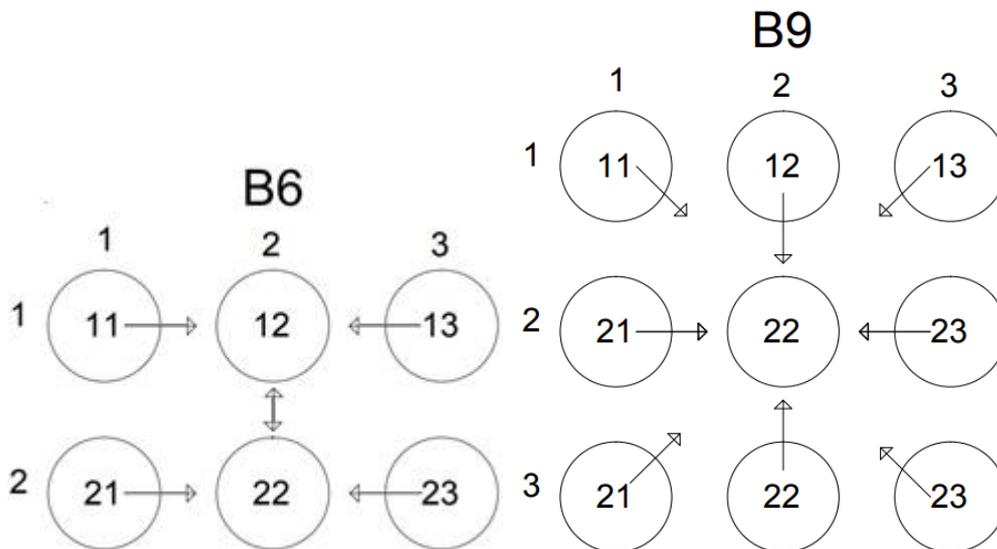


Figura 5.7. Influência dos bulbos de temperatura nas estacas menos eficientes dos blocos.

- **D04-U:**

Nas figuras 5.8 a 5.12 tem-se os gráficos com resultados da configuração D04-U e figuras que mostram como os bulbos de calor se comportam dentro dos blocos.

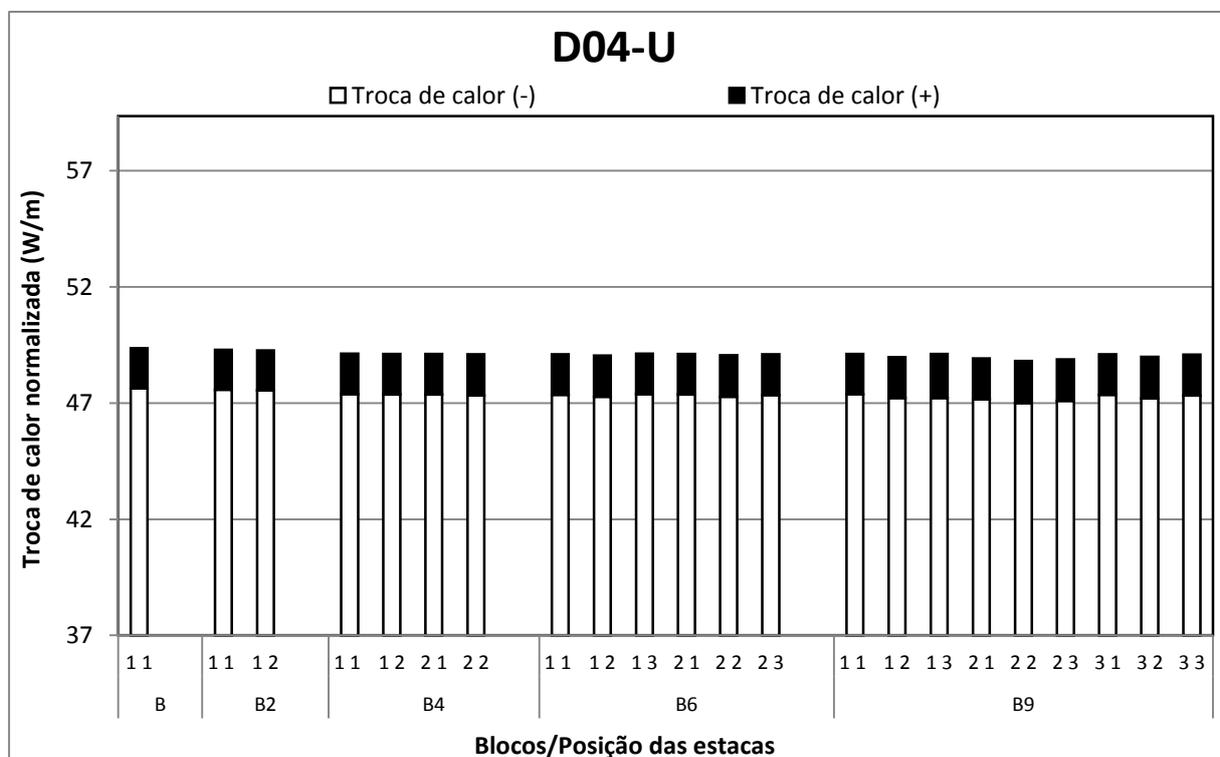


Figura 5.8. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D04-U.

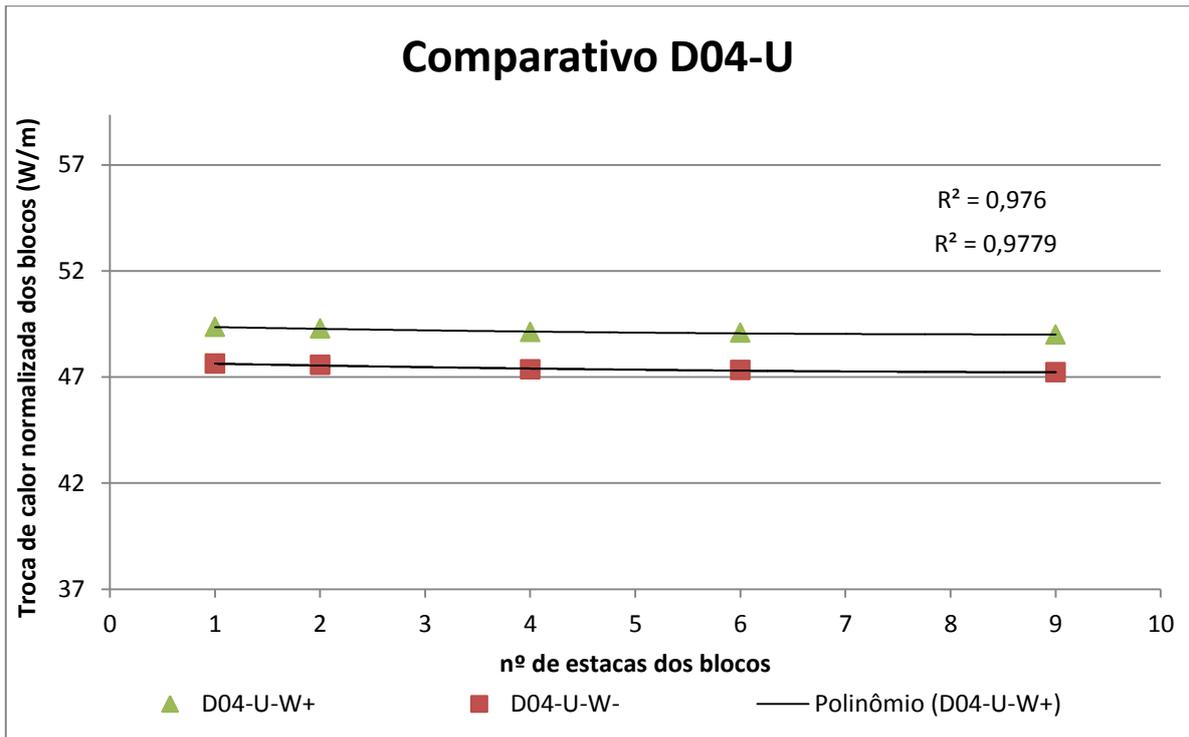


Figura 5.9. Taxa de troca de calor média dos blocos e tendências lineares para configuração D04-U.

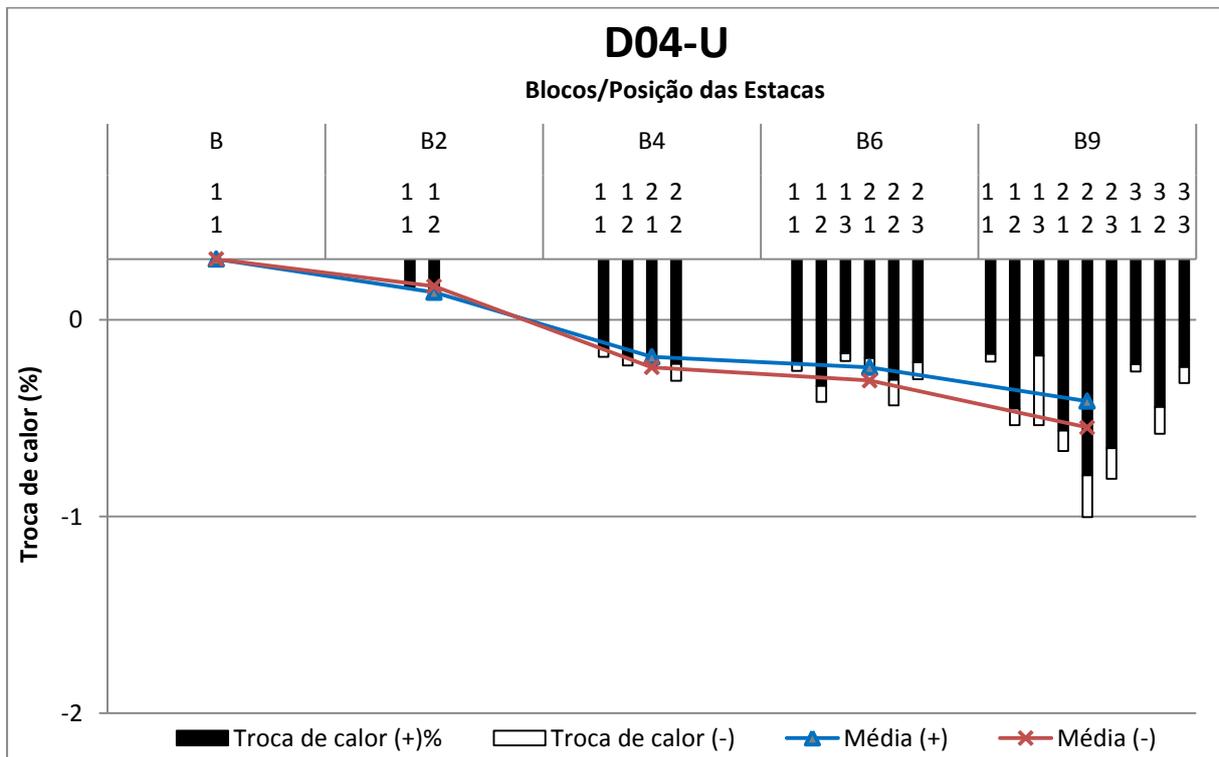


Figura 5.10. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D04-U.

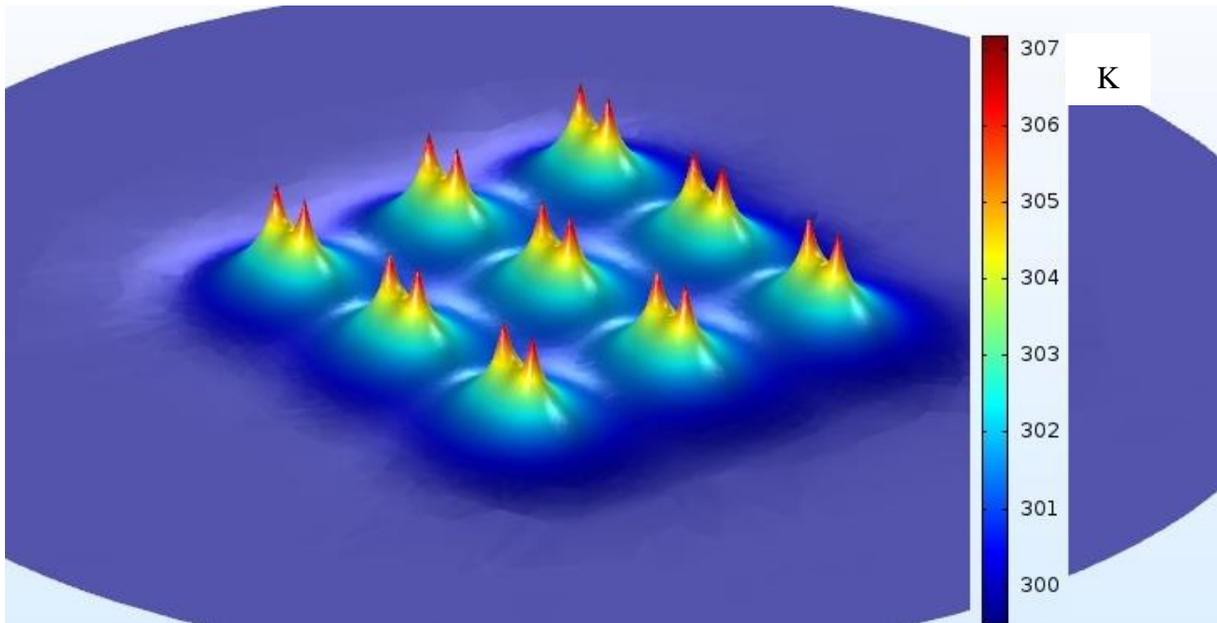


Figura 5.11. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D04-U.

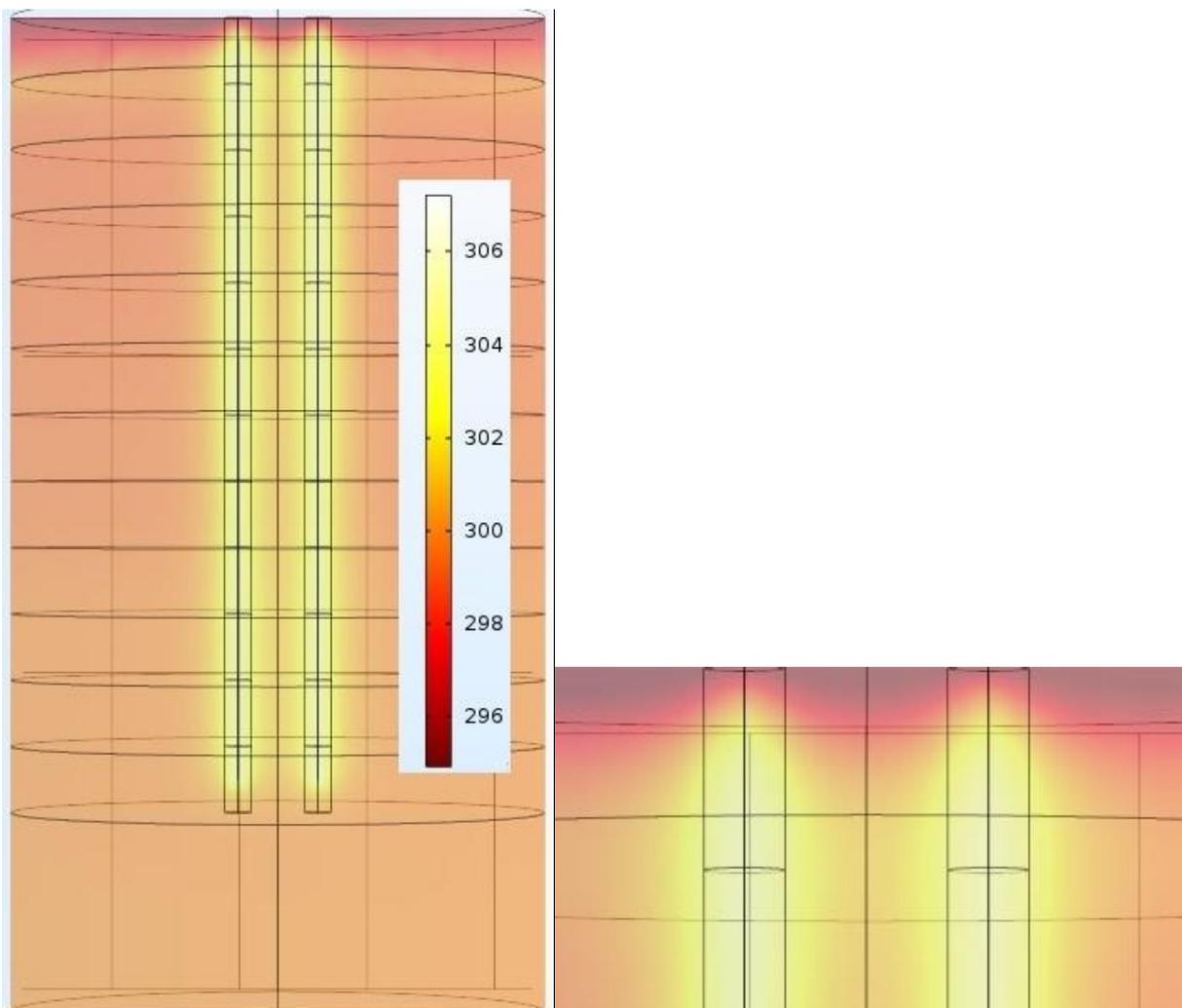


Figura 5.12. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D04-U.

Com base nas figuras acima observa-se que:

- O comportamento de perda de eficiência devido a posição da estaca mantém a mesma tendência;
- A perda de eficiência se dá de maneira menos acentuada, ficando em cerca de 1% na média das estacas de 40 cm, quando comparada com o diâmetro de 30 cm, que fica em cerca de 3%. Estes valores são comparados com o bloco de uma estaca;
- Varia-se pouco a eficiência média dos blocos conforme aumenta-se o número de estacas, não ultrapassando 1% com relação a estaca padrão, tanto para valores máximos como mínimos de umidade;
- A tendência para as duas curvas segue um polinômio de segundo grau com decaimento muito brando, com resultados de 0,9779 e 0,9760 para valores máximos e mínimos.

As observações acima levam à conclusão que o aumento do diâmetro diminui a interação entre os bulbos de calor e com isto a eficiência geral é maior. Juntamente com o aumento do diâmetro, há o fato do espaçamento também aumentar, haja visto que ele é dependente do diâmetro das estacas, sempre 3D (três diâmetros), sendo outra justificativa para o aumento de eficiência. As figuras 5.11 e 5.12 mostra a interação entre os bulbos.

- **D06-U:**

Nas figuras 5.13 a 5.17 tem-se os gráficos com resultados da configuração D06-U e figuras que mostram como os bulbos de calor se comportam dentro dos blocos.

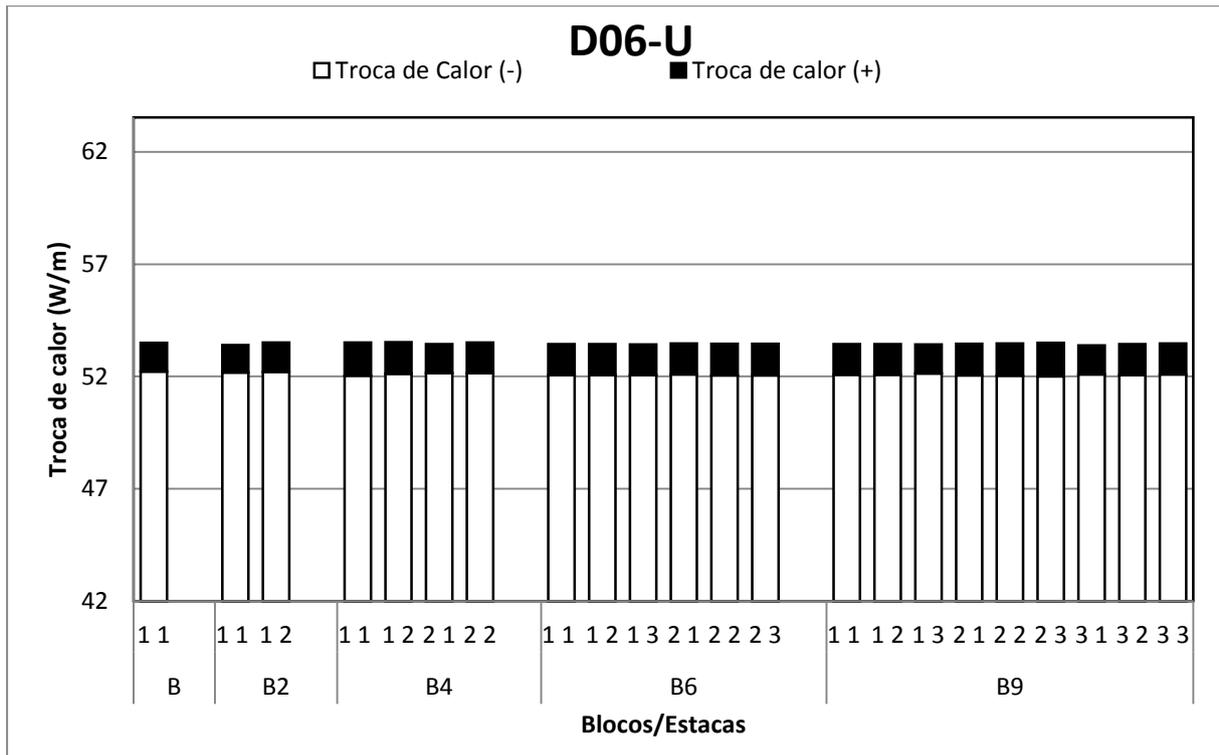


Figura 5.13. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D06-U.

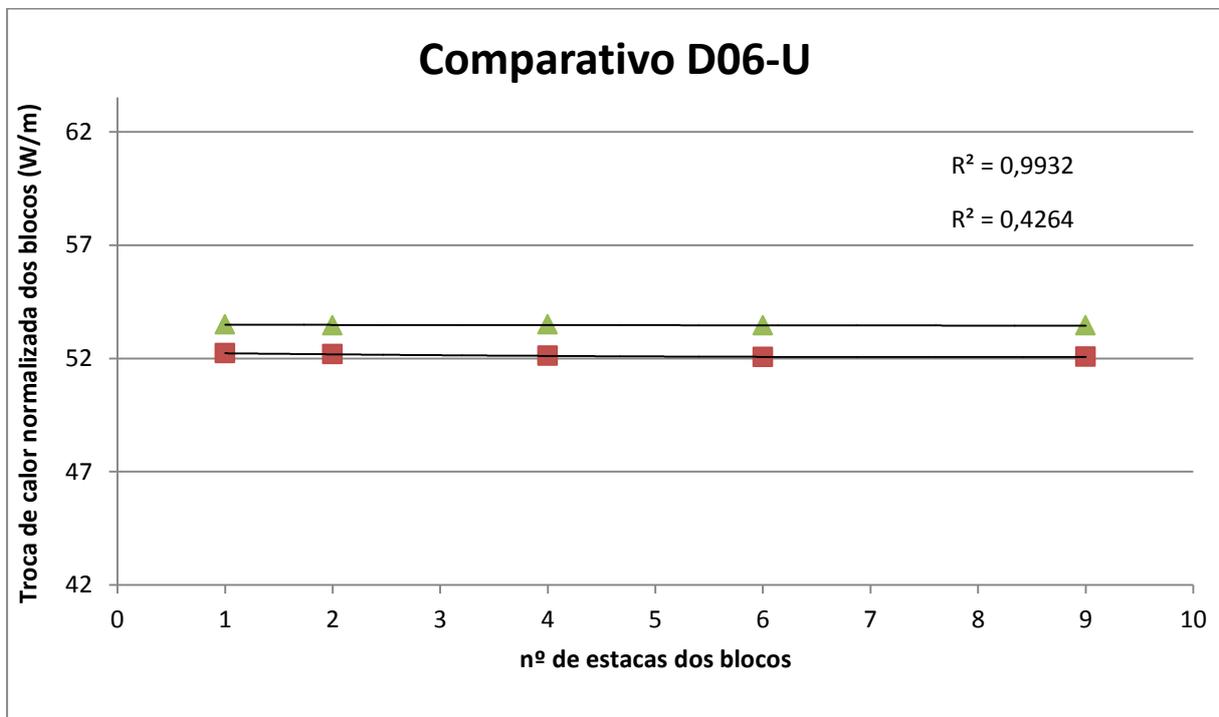


Figura 5.14. Taxa de troca de calor média dos blocos e tendências polinomiais de segundo grau para configuração D06-U.

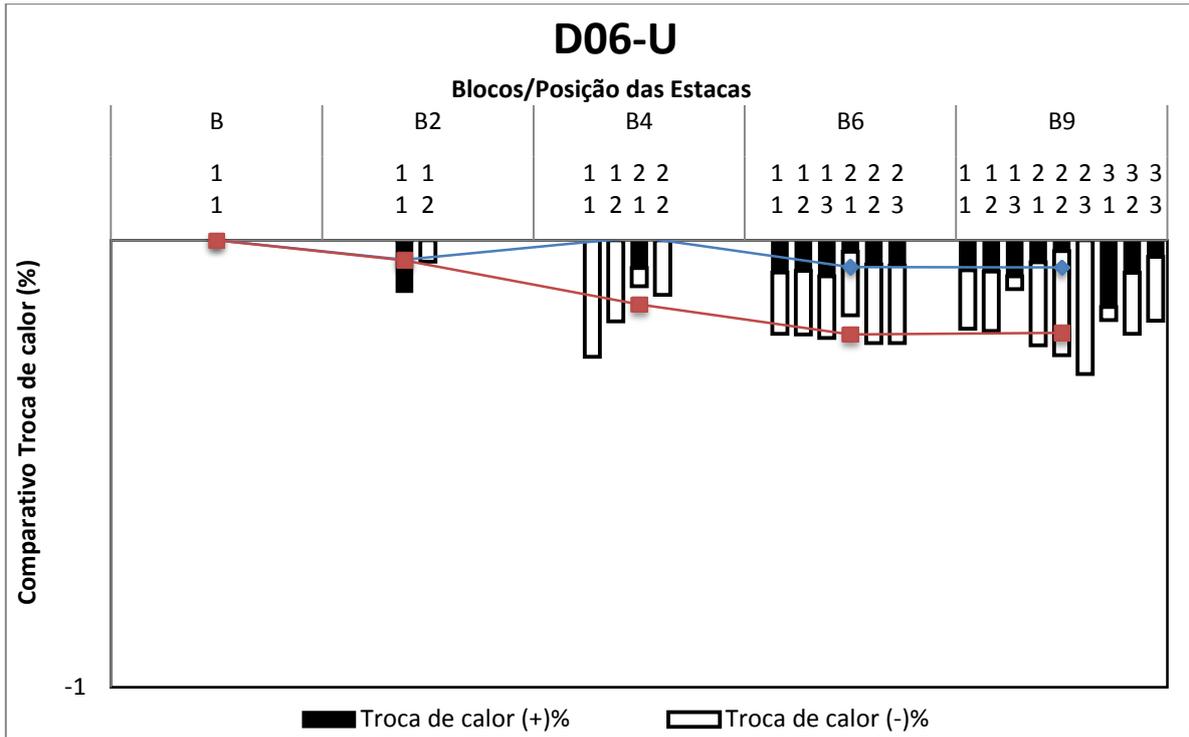


Figura 5.15. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D06-U.

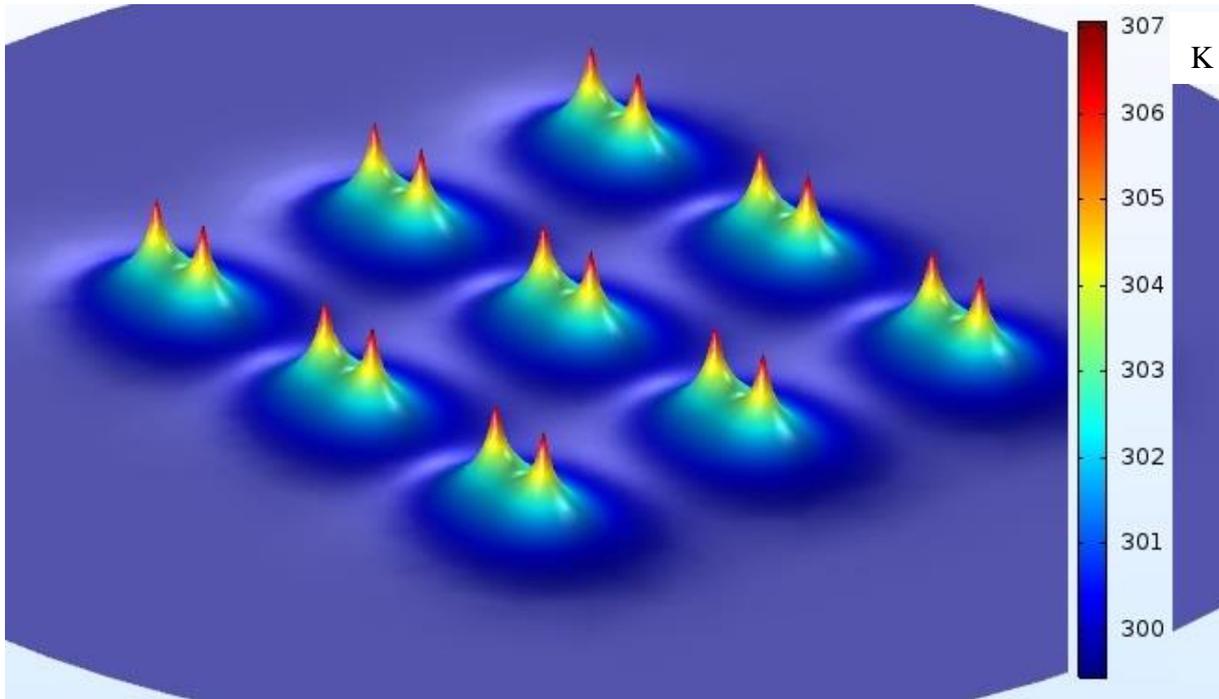


Figura 5.16. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D06-U.

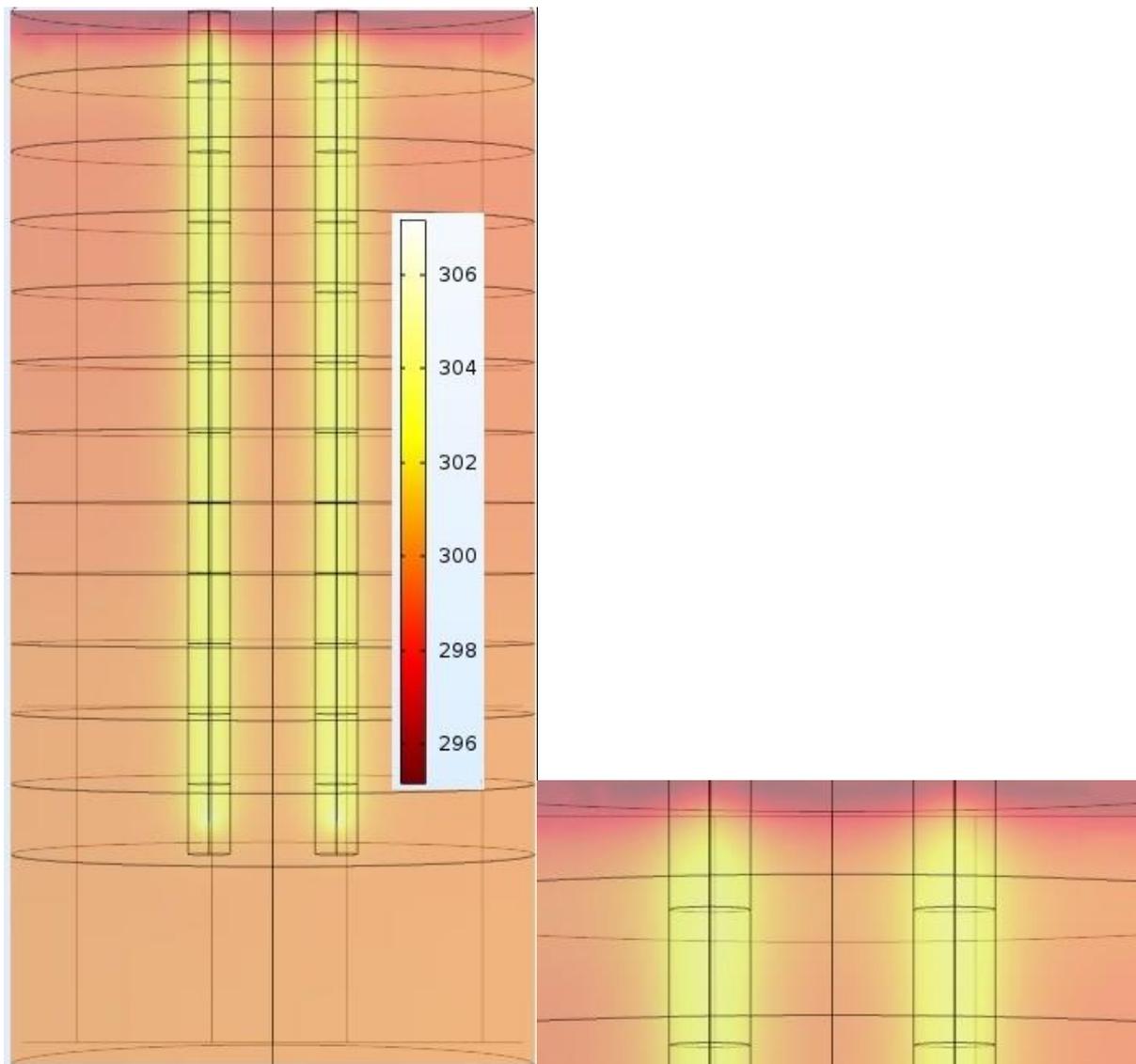


Figura 5.17. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D06-U.

Com base nas figuras acima observa-se que:

- O caimento de eficiência dos blocos são desprezíveis, assim como as variações de eficiência das estacas devido a sua posição;
- A troca de calor da estaca é maior que para estacas com diâmetros menores e mesma tubulação;
- Para os valores máximos de umidade, a perda de eficiência não chega a 0,1%, podendo desconsiderar a perda de eficiência;
- A diferença entre eficiência de uma estaca e outra é tão pequena que não há valores concisos com relação ao decaimento, por causa de arredondamento dos resultados do software;

- As variações por serem extremamente pequenas geram uma curva de tendência com valor baixo de R^2 (coeficiente de determinação) para valores mínimos de umidade, enquanto para valores máximos ele chega a 0,9932, podendo praticamente ser substituído por uma reta.

Das observações acima, conclui-se que para a configuração de diâmetro de 60 cm nas estacas e espaçamento entre elas de 3 diâmetros, a interação entre os bulbos de temperatura é praticamente inexistente, vide figuras 5.16 e 5.17. Tal fato gera uma curva de queda de eficiência dos blocos muito próxima a uma reta horizontal. O aumento da taxa de troca de calor em relação aos diâmetros menores se dá pelo fato de haver menor interação entre bulbos de calor dentro da estaca que a descida e subida da tubulação. A figura 5.16 evidencia que o bulbo de temperatura formado pela tubulação quase não se une comparando o tubo de descida e o tubo de subida, o que indica menor influência entre a tubulação dentro da estaca.

5.1.2. RESULTADOS DAS ESTACAS PARA TUBULÃO 2U

Neste item se apresenta os resultados com a mesma metodologia adotada para estacas com tubulação do tipo 2U.

- **D03-2U:**

Nas figuras 5.18 a 5.24 tem-se gráficos com resultados da configuração D03-2U e figuras que mostram como os bulbos de calor se comportam dentro do bloco.

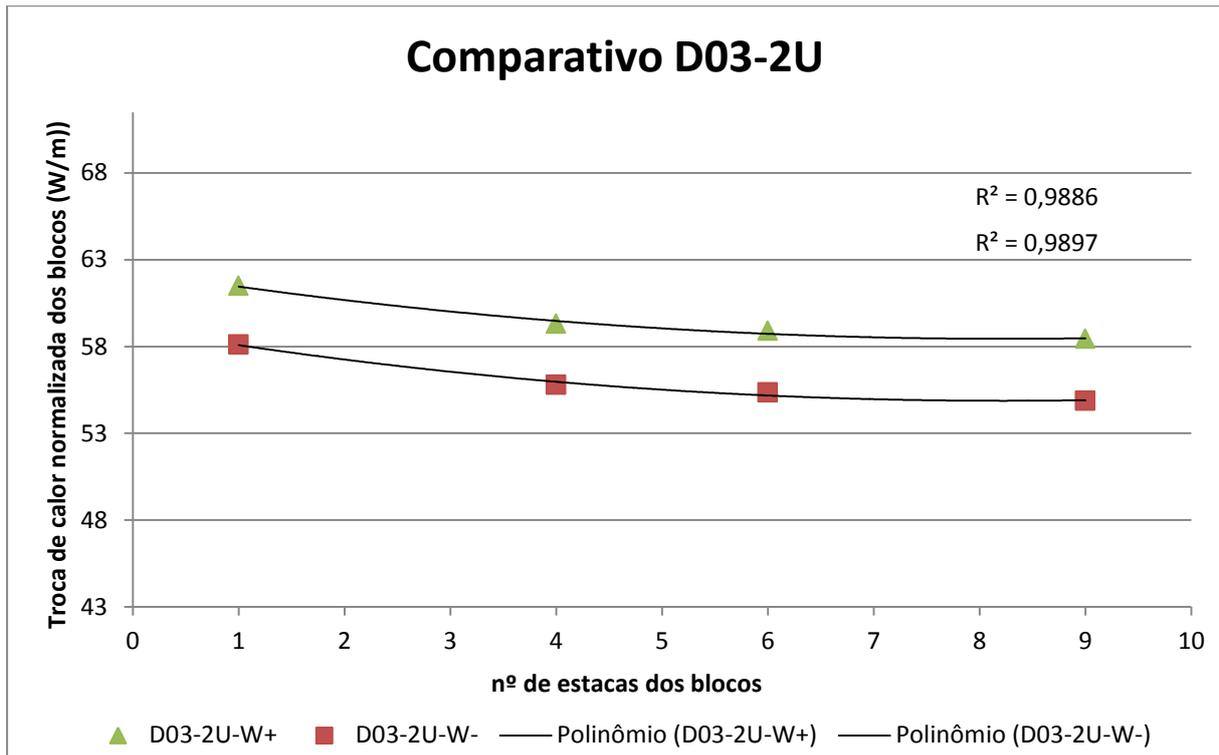


Figura 5.20. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de segundo grau do comparativo para configuração D03-2U excluindo o bloco com 2 estacas.

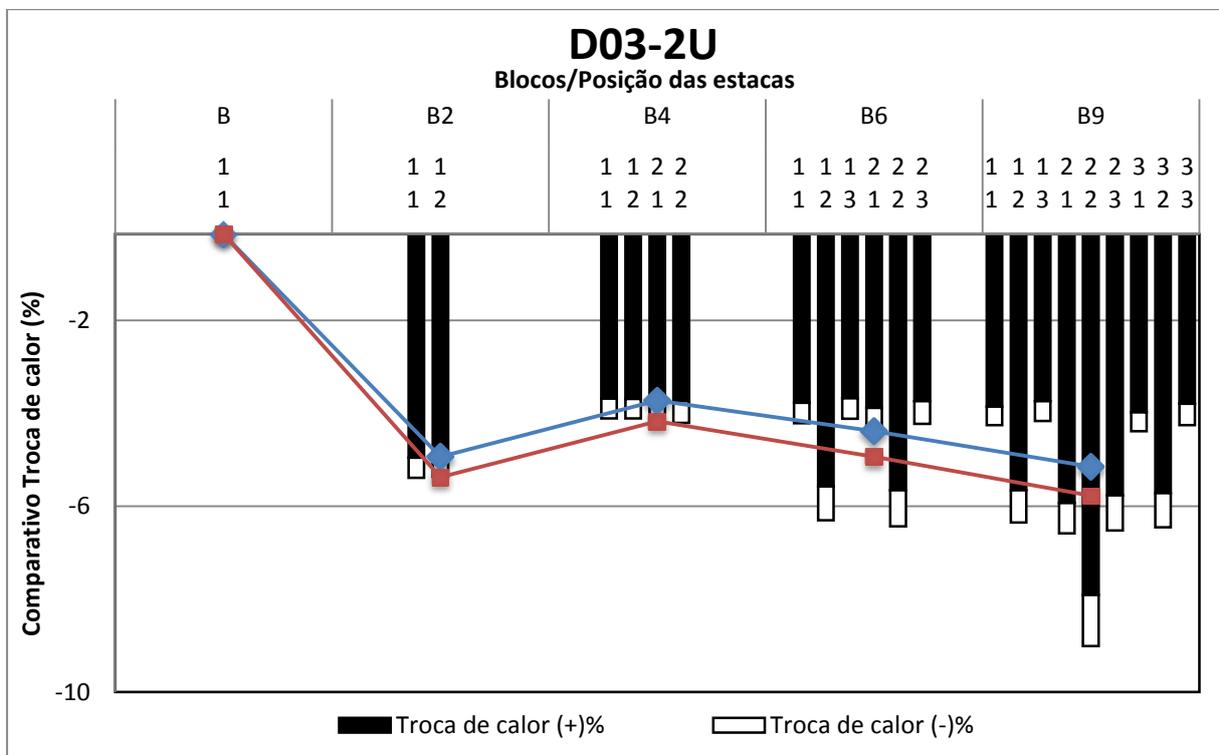


Figura 5.21. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D03-2U.

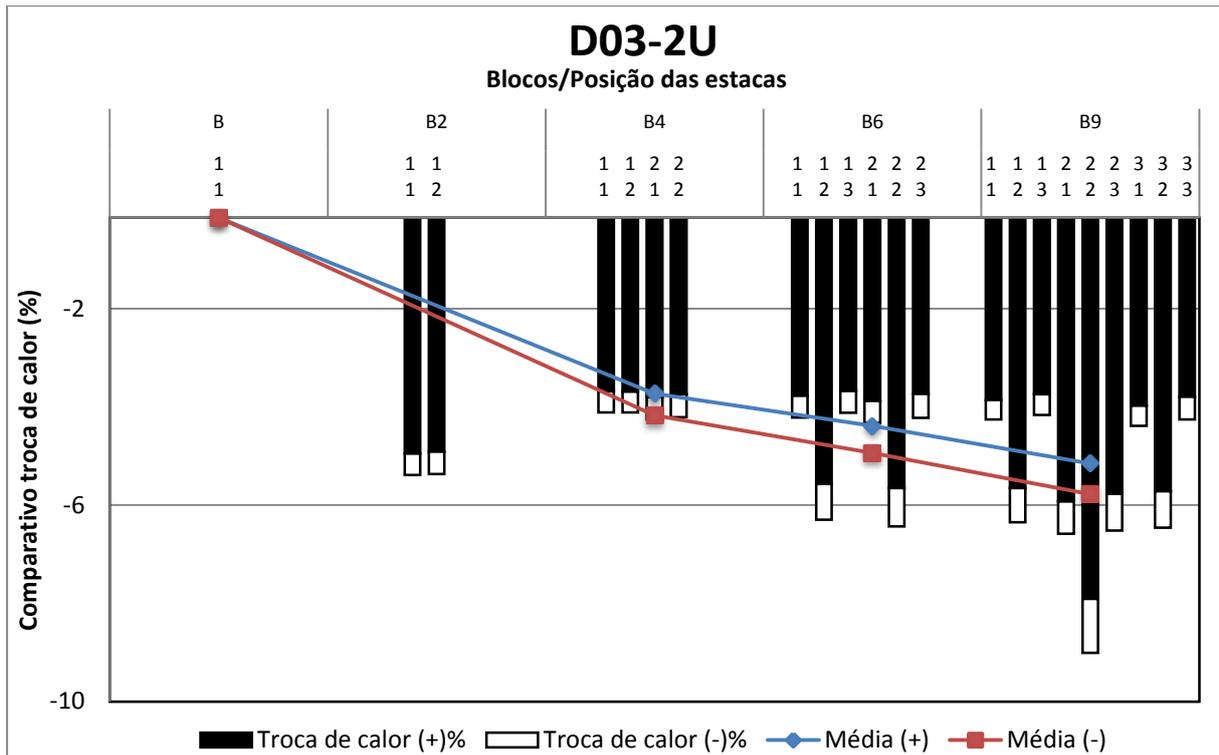


Figura 5.22. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D03-2U excluindo o valor médio do bloco com 2 estacas.

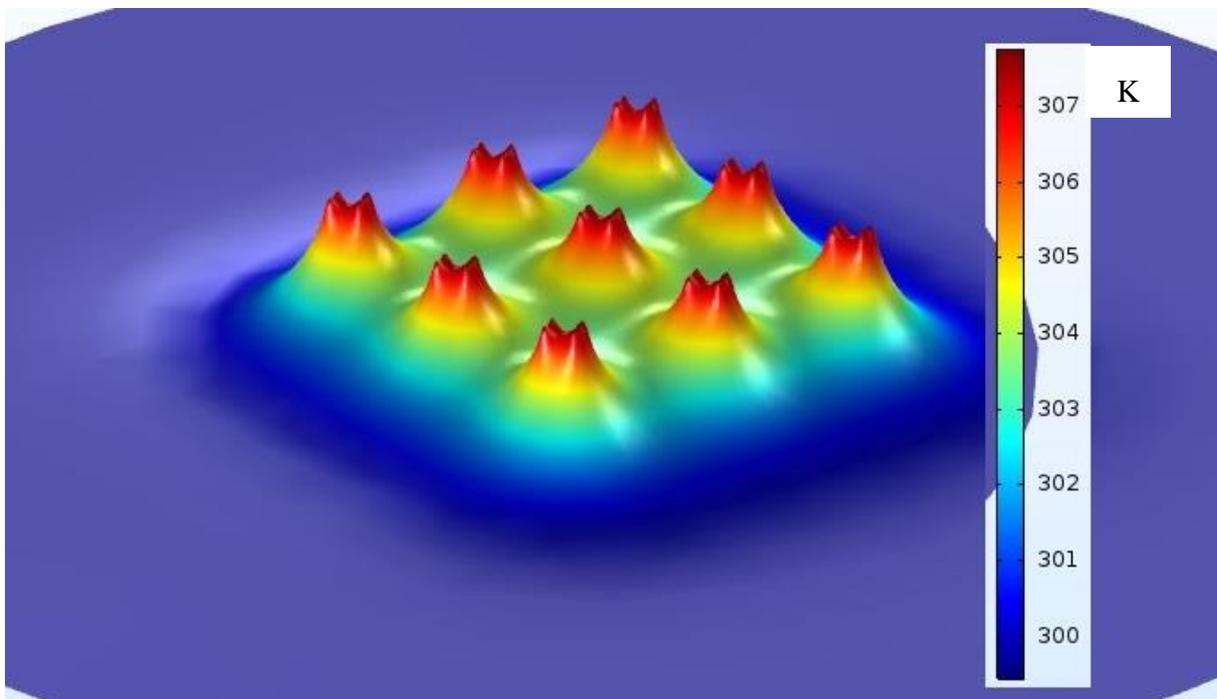


Figura 5.23. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D03-2U.

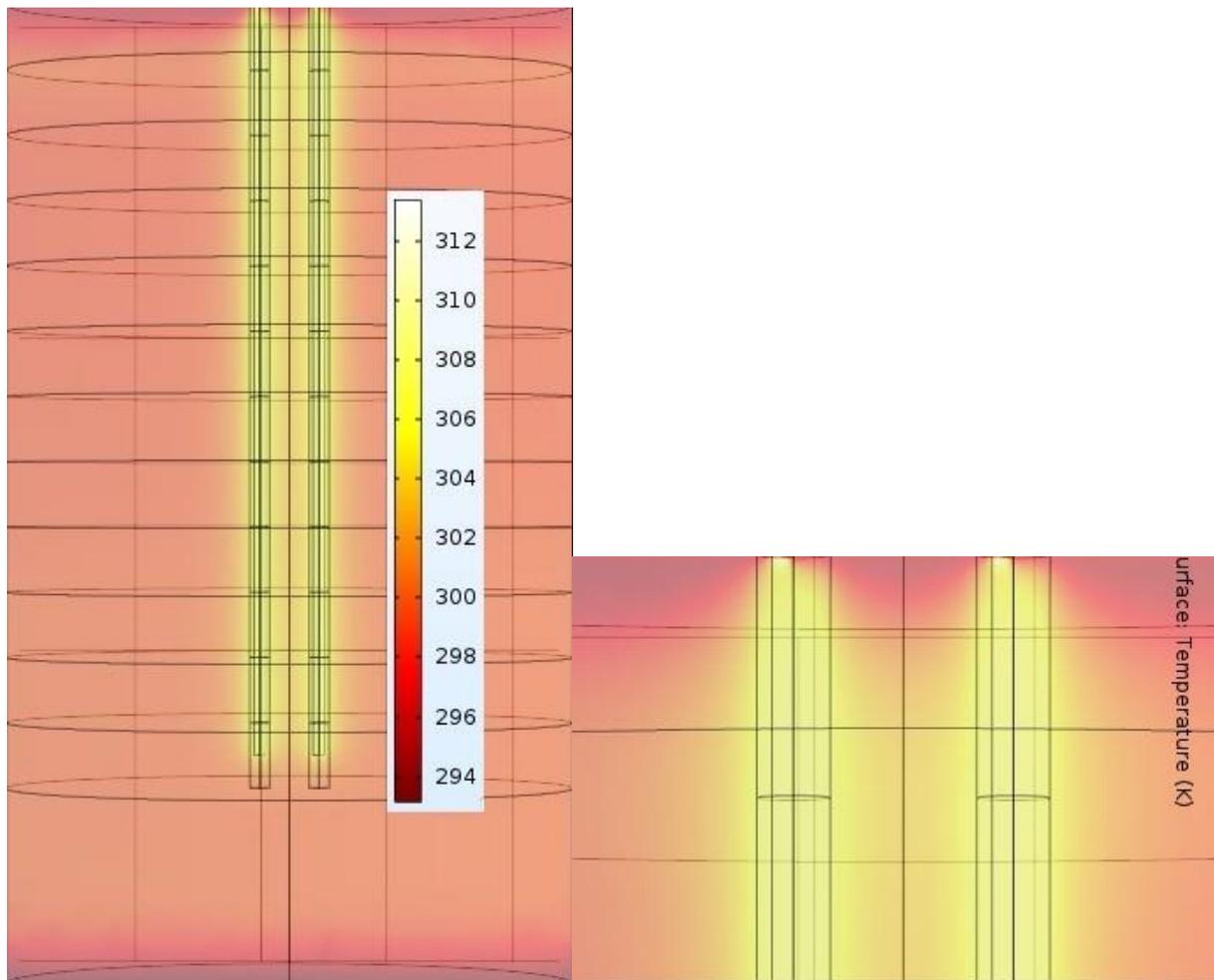


Figura 5.24. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D03-2U.

Com base nas figuras acima, observa-se que:

- Com relação a posição das estacas nos blocos segue-se o mesmo padrão de perda de eficiência na troca de calor;
- O bloco B2 possui valor de perda de eficiência acima do esperado;
- A taxa de troca de calor é maior que quando comparada com estacas com apenas uma volta de tubulação (U);
- A perda de eficiência é proporcional ao aumento do número de estacas nos blocos;
- A intersecção entre os bulbos de calor é maior;
- A diferença de eficiência entre análises com maior ou menor valor de umidade é -5,00% e -5,62%;

- O bloco com 2 estacas para os dois padrões de umidade teve perda de eficiência maior que o esperado, gerando tendência com baixo valor de R^2 , 0,5221 e 0,5513 para valores máximos e mínimos de umidade respectivamente;
- A exclusão do ponto B2 gerou uma tendência com valor de R^2 de 0,9886 e 0,9897 para valores máximos e mínimos de umidade respectivamente.

Com as observações acima, conclui-se que o aumento de uma volta gerou acréscimo de troca de calor na estaca, pois há maior superfície trocando calor, porém este mesmo fato aumentou o bulbo de calor, o que gera maior interação entre as estacas, fazendo com que as mesmas interajam mais entre si. A eficiência em blocos com maior número de estacas cai pois há mais estacas interagindo entre si. Nota-se nas figuras 5.23 e 5.24 maior interação entre as estacas.

- **D04-2U:**

Abaixo nas figuras 5.25 a 2.29 tem-se os gráficos com resultados da configuração D04-2U e figuras que mostram como os bulbos de calor se comportam dentro dos blocos.

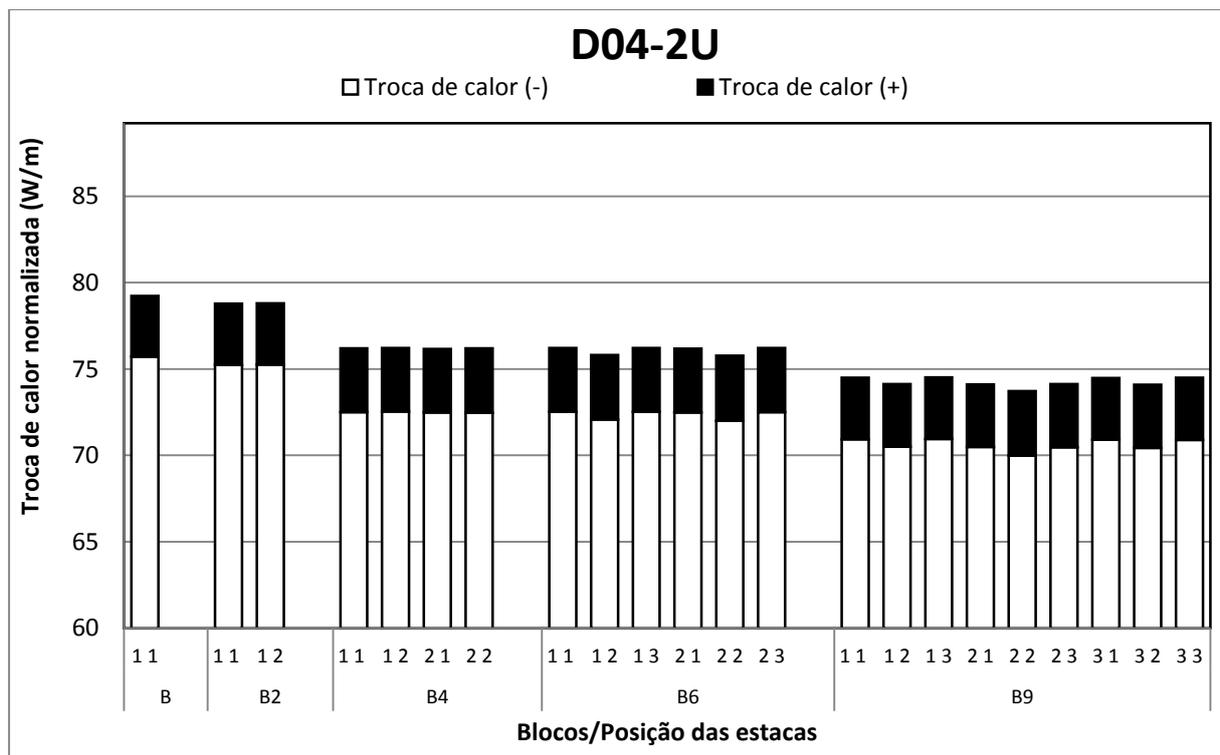


Figura 5.25. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D04-2U.

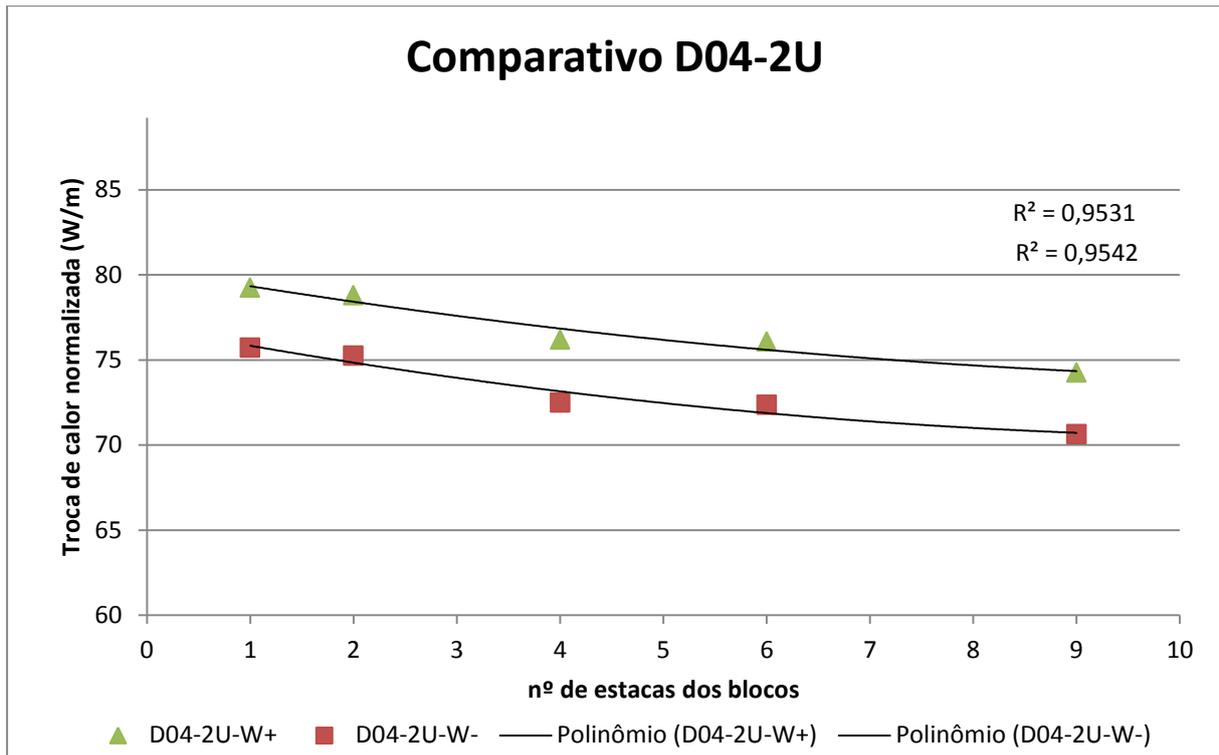


Figura 5.26. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de segundo grau do comparativo para configuração D04-2U.

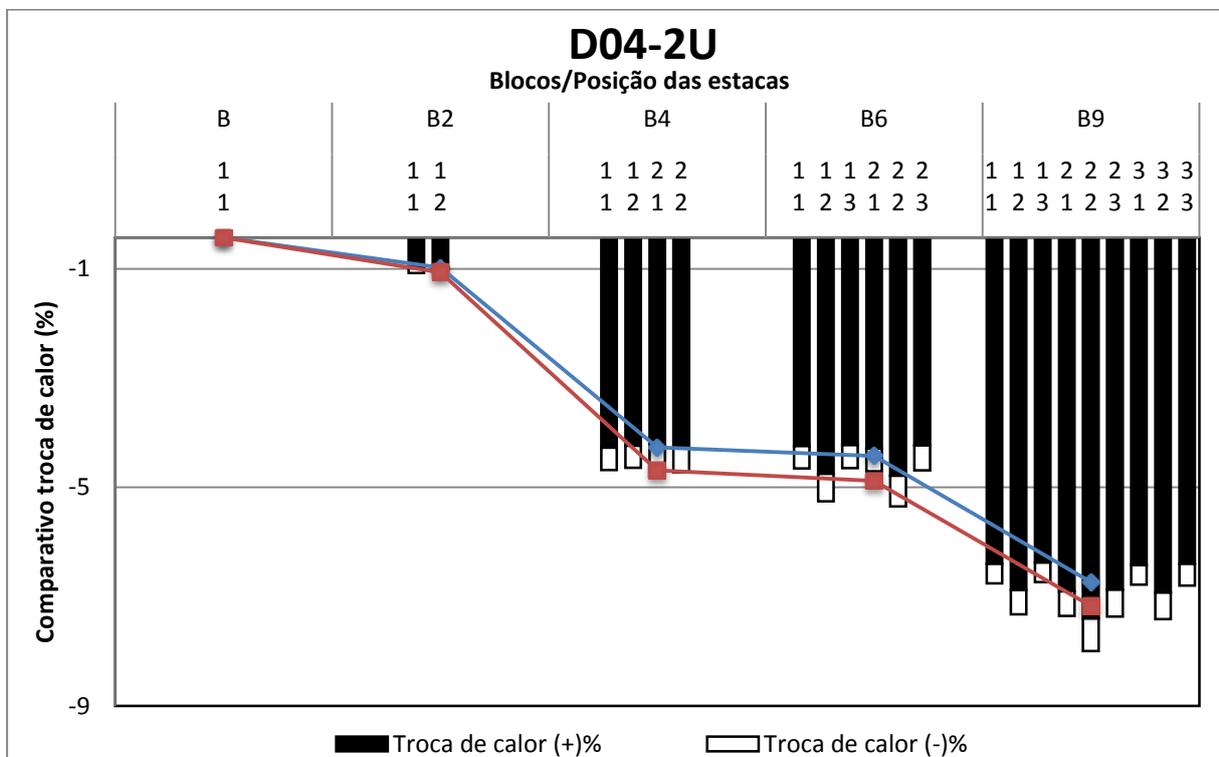


Figura 5.27. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D04-2U.

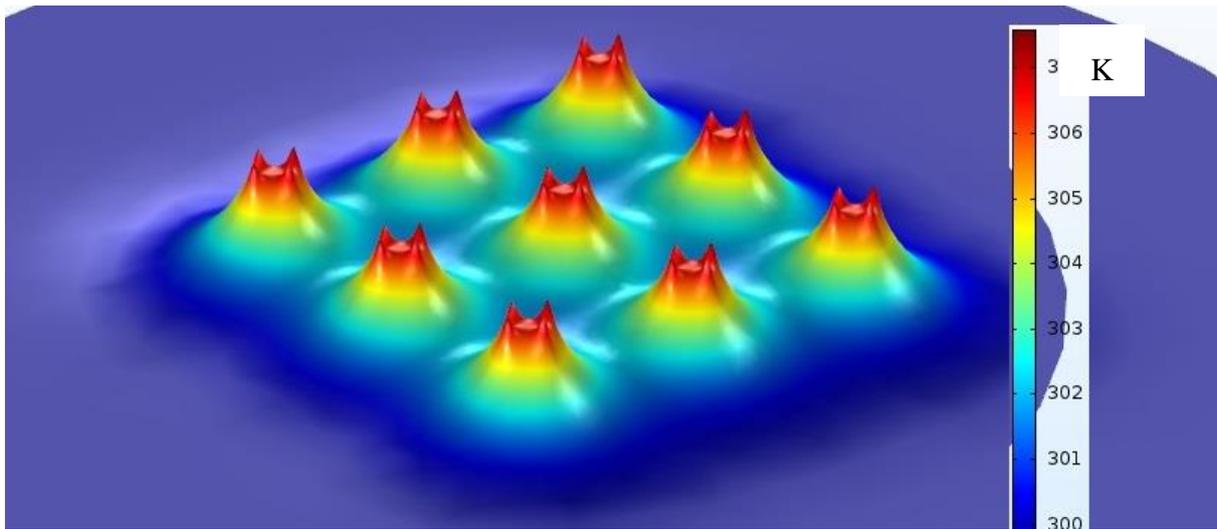


Figura 5.28. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D04-2U.

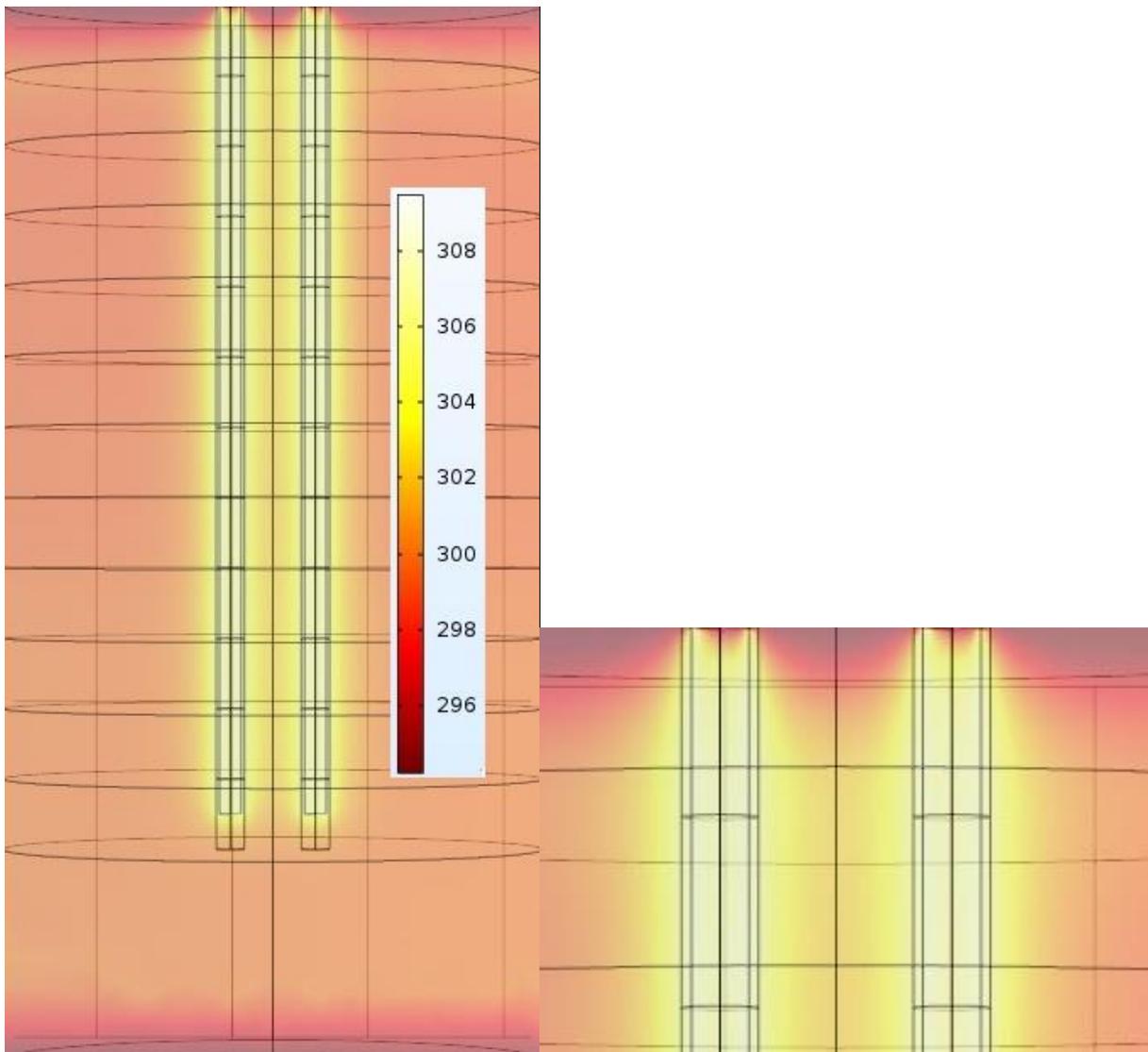


Figura 5.29. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D04-2U.

Com base nas figuras acima, observa-se que:

- A interação entre estacas é presente, porém com menor intensidade quando comparada com estacas de 30 cm de diâmetro;
- A taxa de troca de calor é maior que para estacas com diâmetro de 30 cm;
- A curva de troca de calor segue a mesma tendência para valores máximos e mínimos de umidade, porém com maior disparidade entre elas;
- O R^2 das curvas são de 0,9531 e 0,9532 para valores máximos e mínimos de umidade, respectivamente.

As figuras e gráficos levam a seguinte conclusão parcial: para estas configurações ainda há interação entre os bulbos de temperatura das estacas, porém em menor intensidade, fato que evidencia a diminuição da diferença de eficiência entre estacas e a suavização das curvas da média de eficiência dos blocos. A figura 5.28 também mostra que dentro da estaca o aumento da troca de calor é explicado pela menor interferência entre o calor irradiado dos tubos devido ao maior espaçamento entre as pernas da tubulação no interior da estaca.

O resultado da perda de eficiência nos grupos segue a mesma configuração de curva para umidades máximas e mínimas, tendo valores bem próximos para blocos com 2 e 9 estacas. Blocos com 4 e 6 estacas se distanciam um pouco mais quando se compara os valores máximos ou mínimos de umidade. Há certo patamar entre a diferença de eficiência entre blocos com 4 e 6 estacas, evidenciando perda de eficiência bem próxima entre as mesmas, tanto para valores máximos como mínimos.

- **D06-2U:**

Entre as figuras 5.30 e 5.34 os gráficos mostram resultados da configuração D06-2U e comportamento dos bulbos de calor dentro dos blocos.

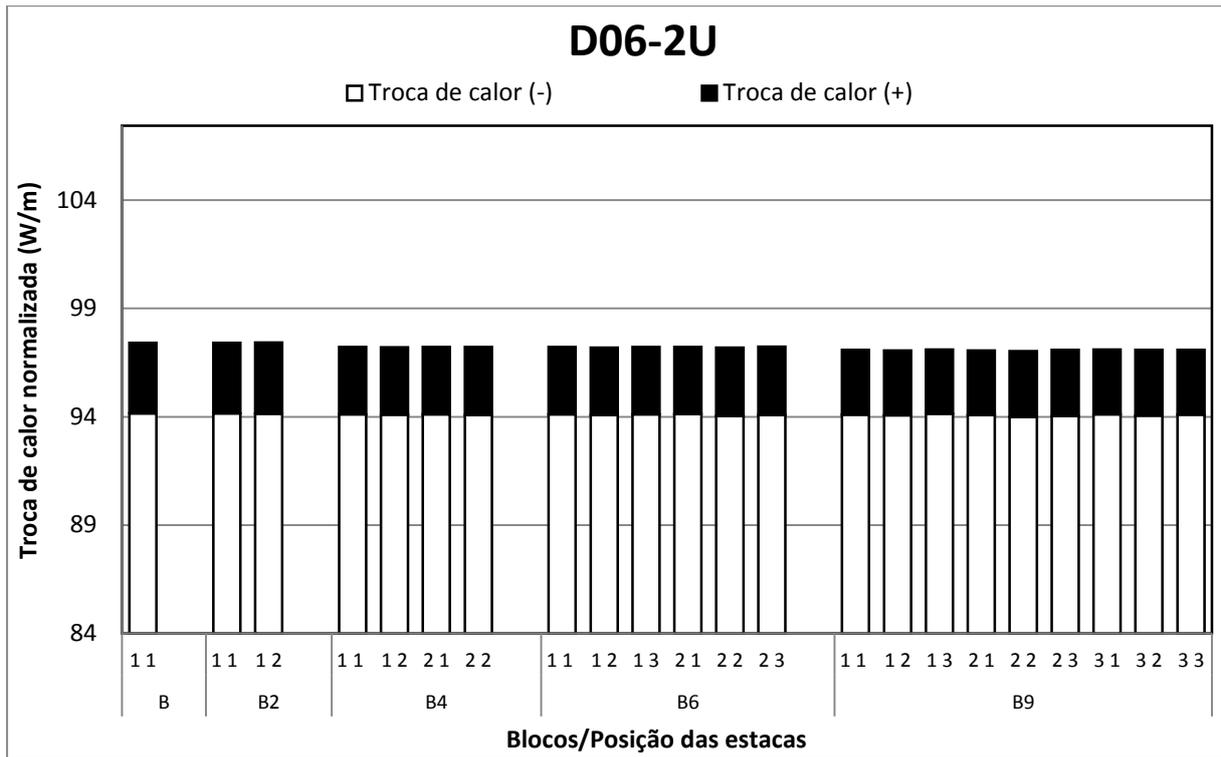


Figura 5.30. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D06-2U.

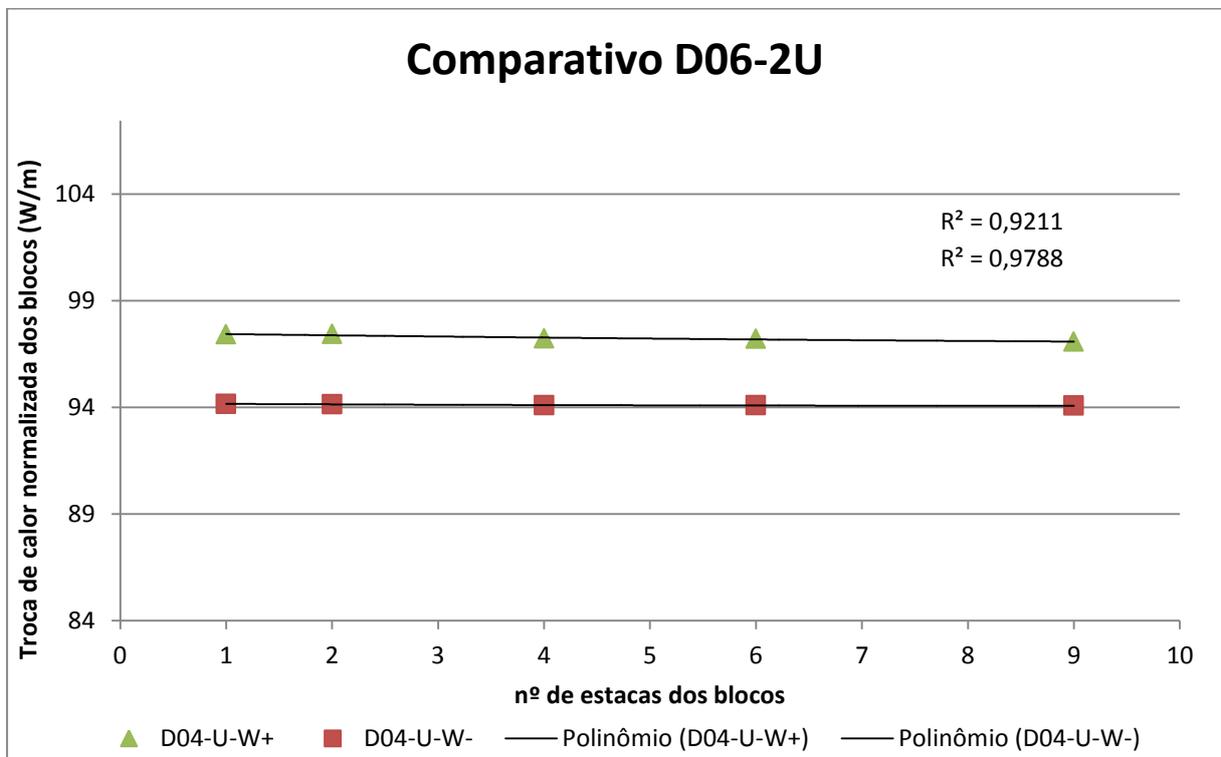


Figura 5.31. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de segundo grau do comparativo para configuração D06-2U.

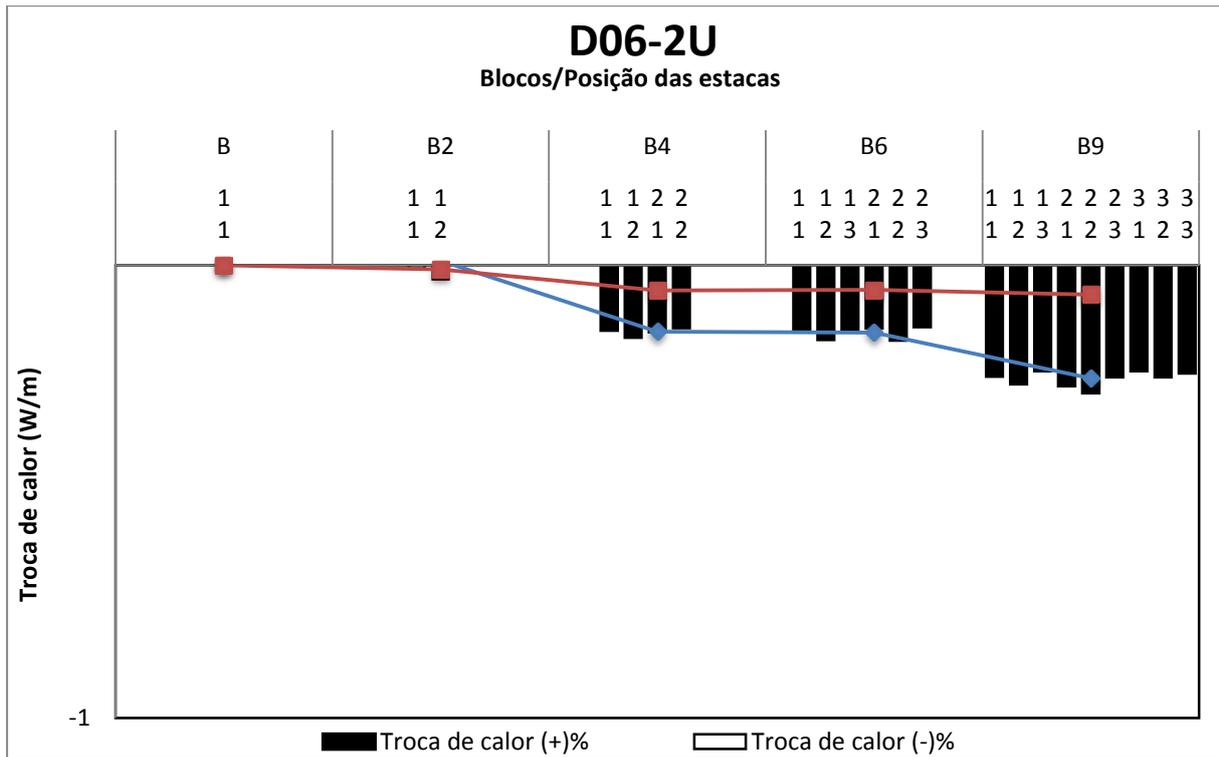


Figura 5.32. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D06-2U.

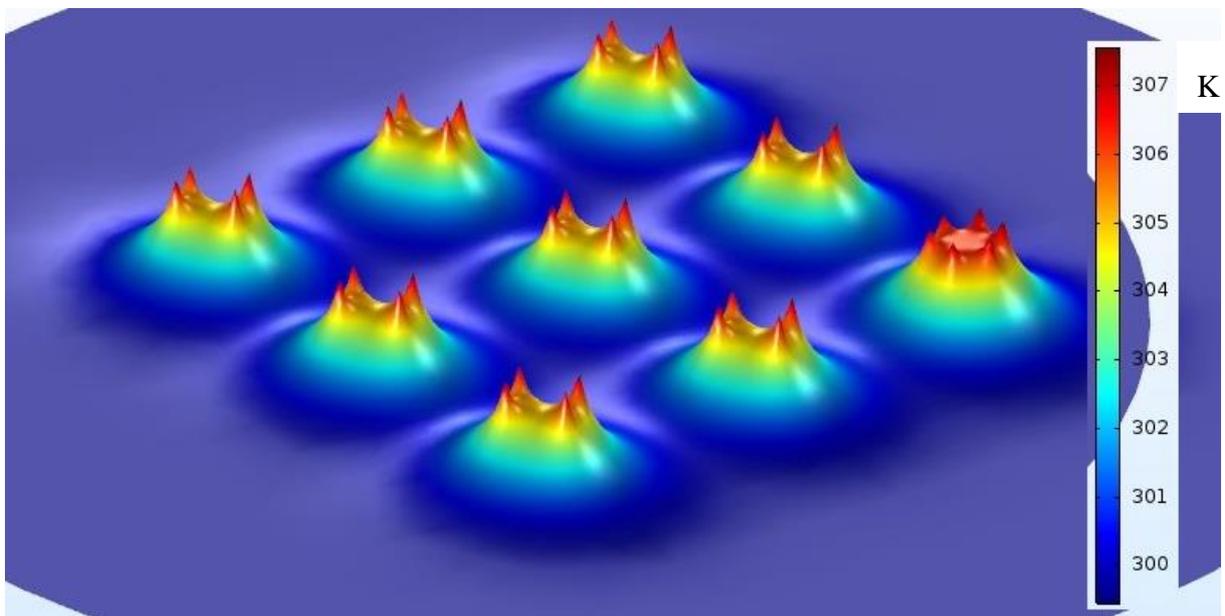


Figura 5.33. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D06-2U.

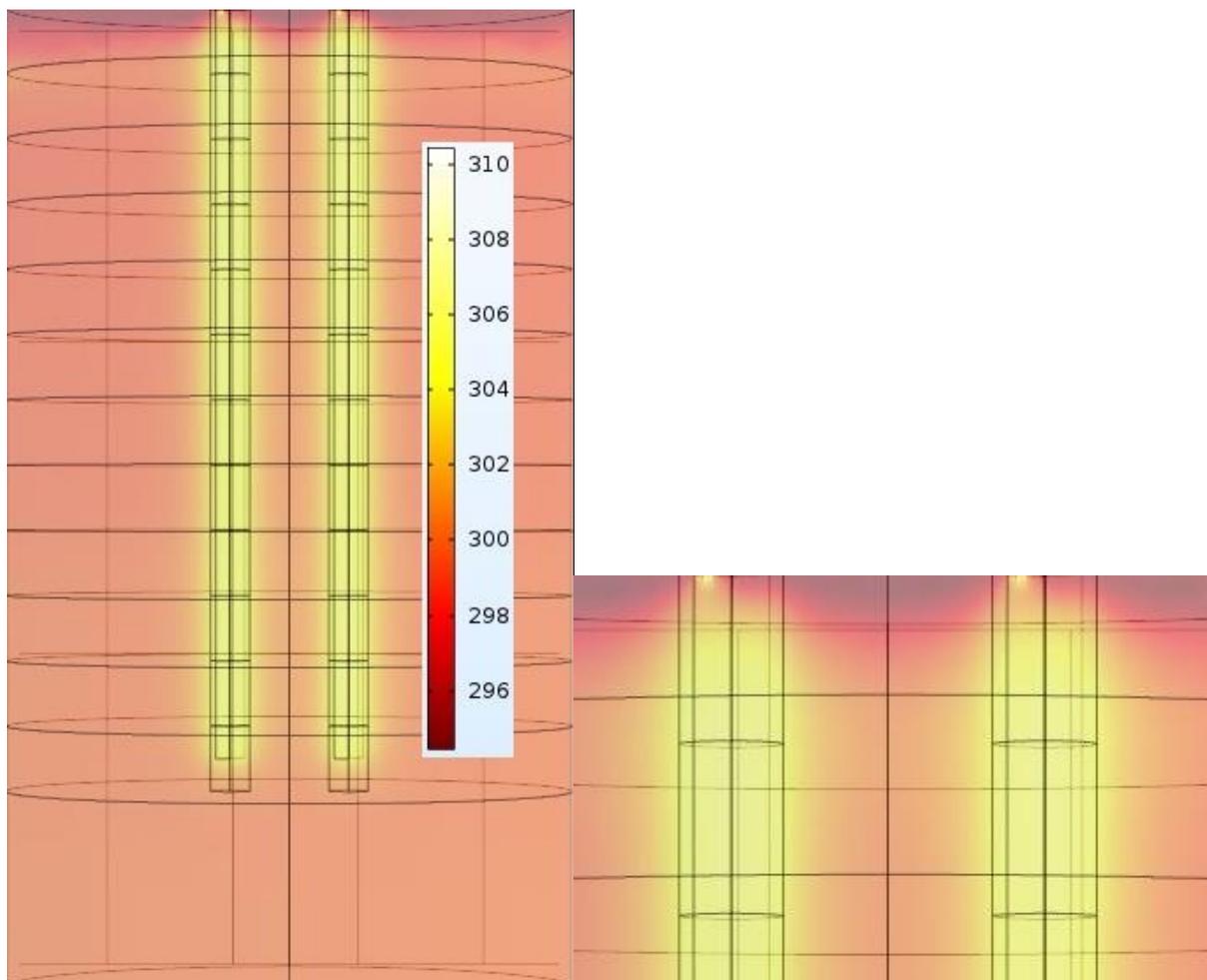


Figura 5.34. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D06-2U.

Com base nas figuras acima observa-se que:

- A interação entre as estacas é praticamente inexistente;
- A taxa de troca de calor é maior que para estacas com diâmetro de 30 cm;
- A máxima variação entre os blocos e a estaca padrão é em torno de 0,30%, sendo baixa e irrisória. A diferença entre eficiência de uma estaca e outra é tão pequena que os valores não são concisos, devido ao arredondamento dos resultados do software;
- As tendências tem valores de R^2 de 0,9211 e 0,9788 para valores máximos e mínimos de umidade sendo bem próximos ao valor máximo 1 e a curva é bem próxima a uma reta.

A partir das observações acima, conclui-se que para este tipo de configuração a interação entre estacas é praticamente inexistente, pois o bulbo de calor irradiado não chega a interferir de maneira considerável nas outras estacas, fato evidenciado pela constância dos valores de

troca de calor e de eficiência, gerando quase uma reta para os valores médios de eficiência dos blocos. Por ter maior diâmetro e consequentemente espaçamento, nota-se que dentro da estaca a interação entre as temperaturas irradiadas nas pernas da tubulação é menor, formando uma espécie de “coroa” de temperatura dentro da estaca, fato este que possibilita maior troca de calor. Quando se analisa o perfil das estacas também evidencia-se que os bulbos não se interceptam de maneira muito considerável.

5.1.3. RESULTADOS DAS ESTACAS PARA TUBULAÇÃO 3U

Neste item apresenta-se os resultados e faz-se análise da mesma maneira que para as duas configurações de tubulação anteriores.

- **D03-3U:**

Abaixo nas figuras 5.35 a 5.39, apresenta-se gráficos com resultados da configuração D03-3U e figuras que mostram o comportamento térmico desta configuração.

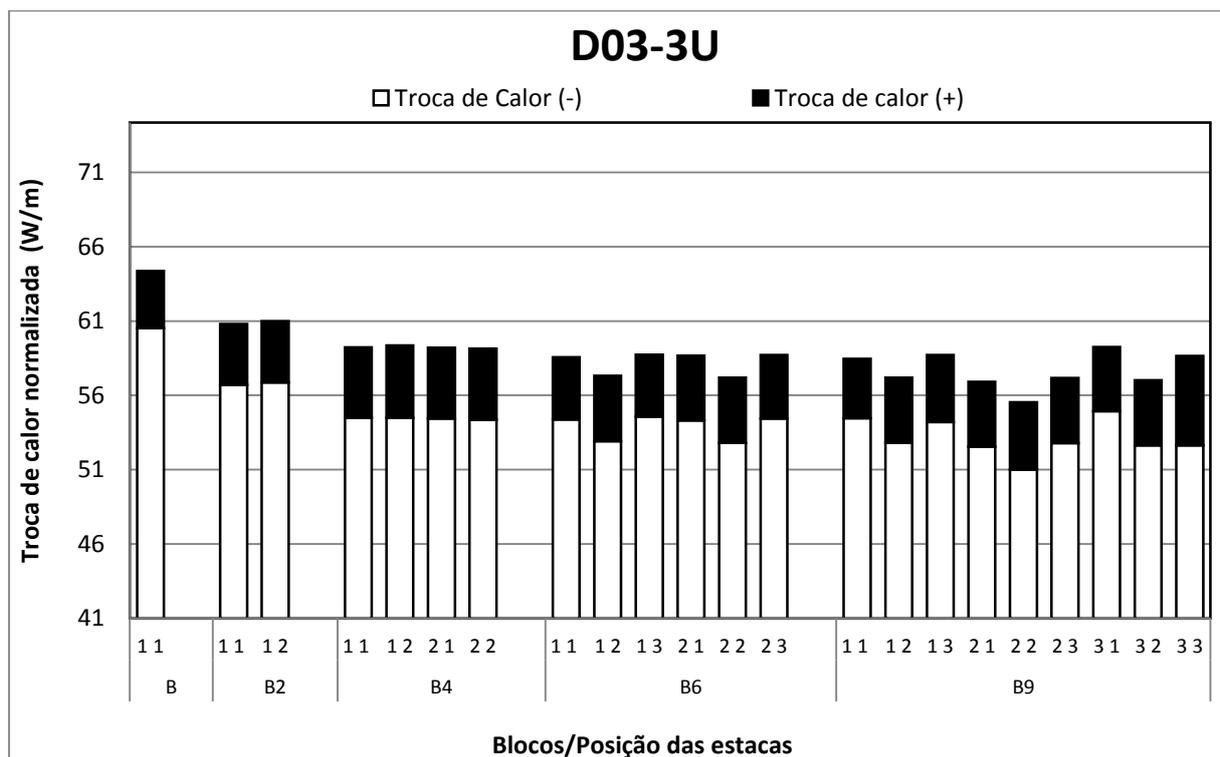


Figura 5.35. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D03-3U.

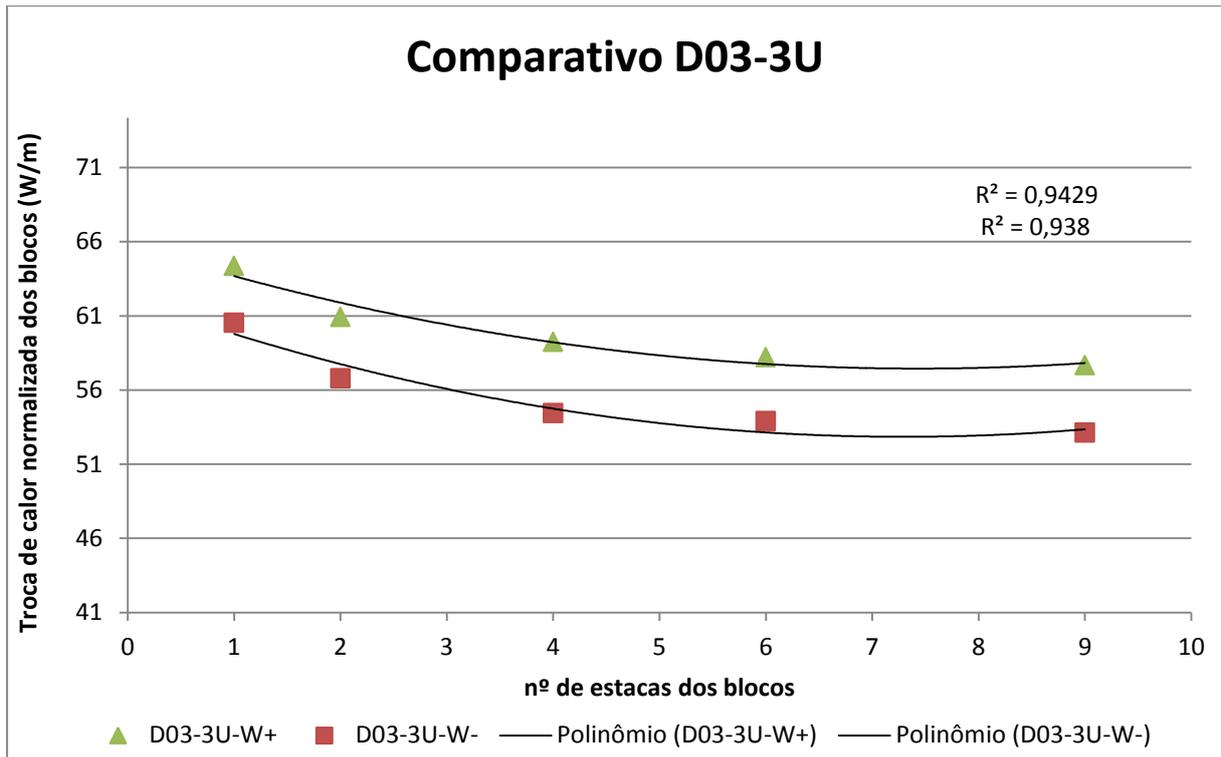


Figura 5.36. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de segundo grau do comparativo para configuração D03-3U.

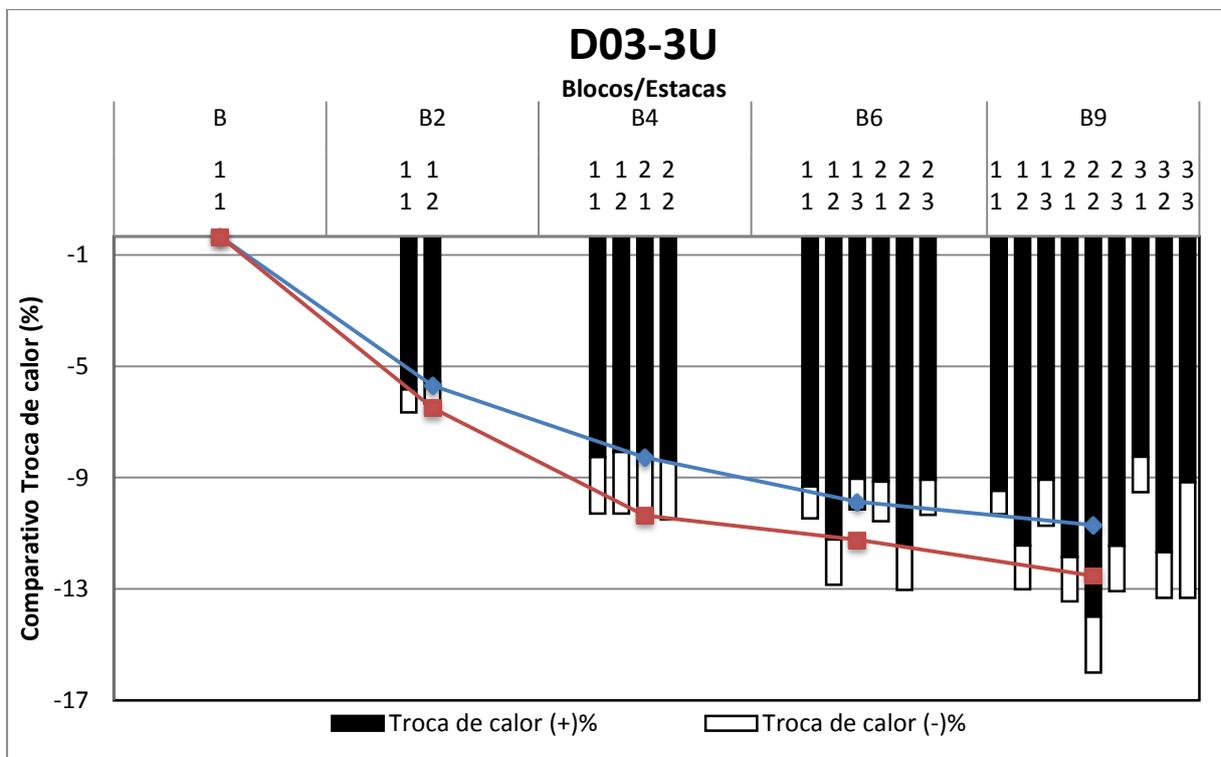


Figura 5.37. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D03-3U.

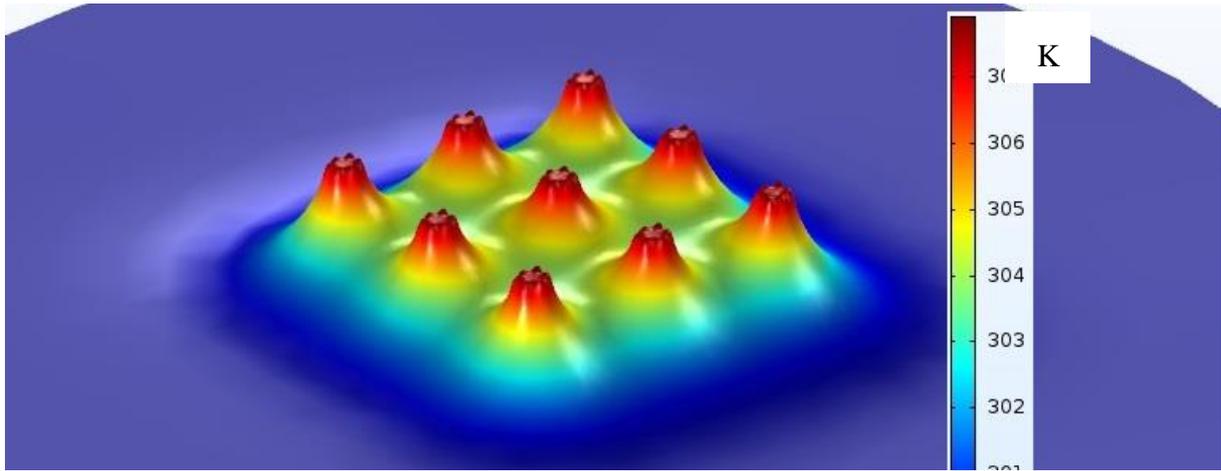


Figura 5.38. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6 m com 50 horas de ensaio para configuração D03-3U.

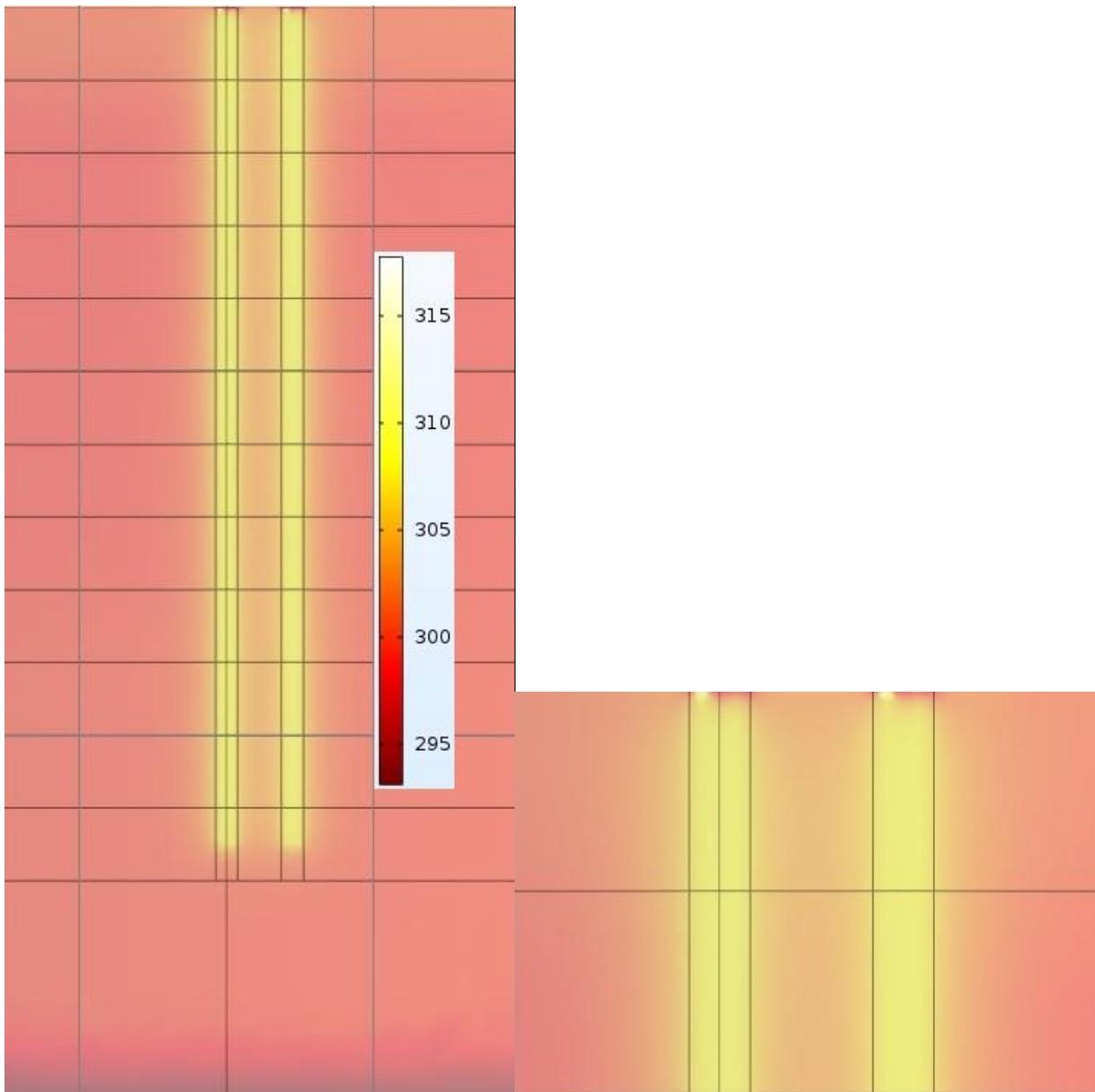


Figura 5.39. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D03-3U.

Dos gráficos e figura acima, observa-se que:

- Para esta configuração as três voltas na tubulação fazem aumentar a taxa de troca de calor, porém não de maneira proporcional ao número de voltas;
- A interação entre estacas nos blocos segue como esperado;
- Os bulbos de calor praticamente se unem por serem maiores;
- Nos dois casos metade da perda máxima de eficiência se dá logo no bloco com 2 estacas;
- A tendência é bem próxima para valores máximos e mínimos de umidade, sendo que elas tem R^2 de 0,9429 e 0,9380 respectivamente;
- A máxima perda de eficiência ultrapassou os 10% sendo elas de 12,1835% para bloco de 9 estacas e valor mínimo de umidade.

Conclui-se das observações acima que a acentuação da perda de eficiência das estacas dentro do bloco se dá devido à grande influência que um bulbo de temperatura tem sobre o outro, devido ao fato deles serem maiores por haver três voltas na tubulação. Este fato também influencia na eficiência média dos blocos que tem uma queda significativa como mostrado na figura 5.37. O aumento de voltas da tubulação não levou a um aumento proporcional, pois como mostrado nas figuras 5.38 e 5.39, o calor irradiado dentro da estaca pelas voltas da tubulação praticamente se unem por terem grande proximidade.

- **D04-3U:**

Nas figuras 5.40 a 5.44 tem-se os gráficos com resultados da configuração D04-3U e elas mostram como os bulbos de calor se comportam dentro dos blocos.

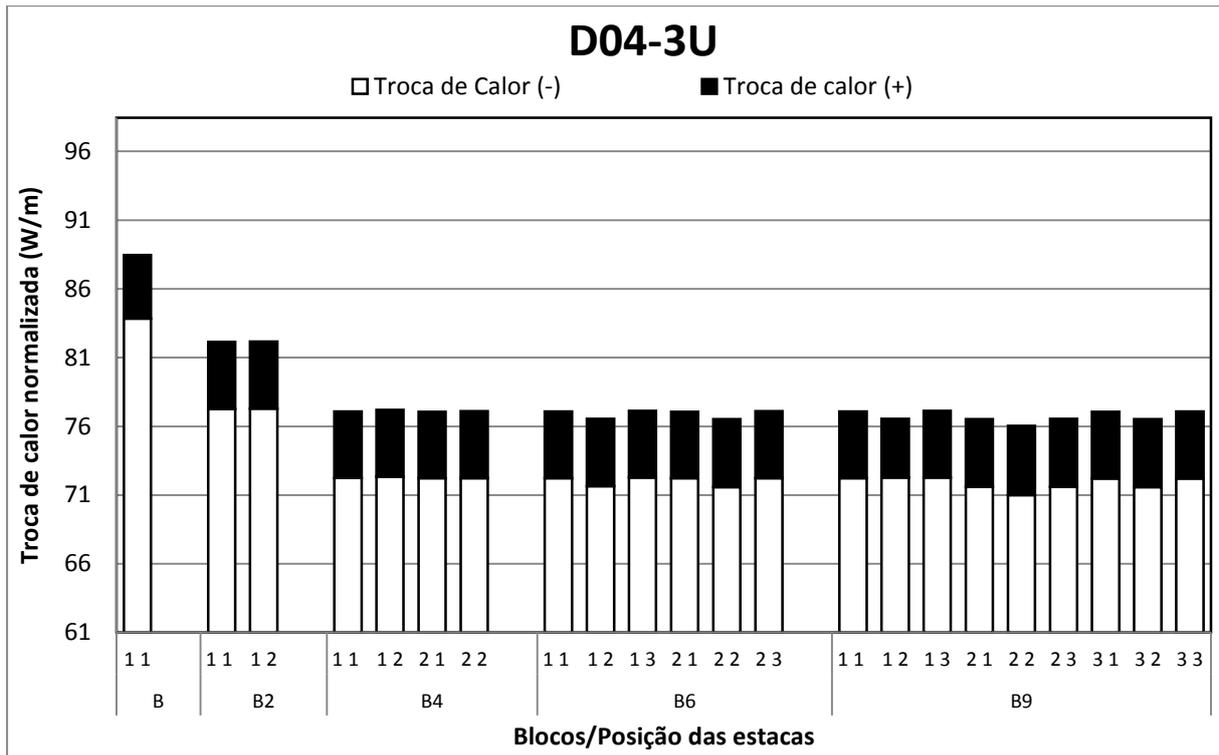


Figura 5.40. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D04-3U.

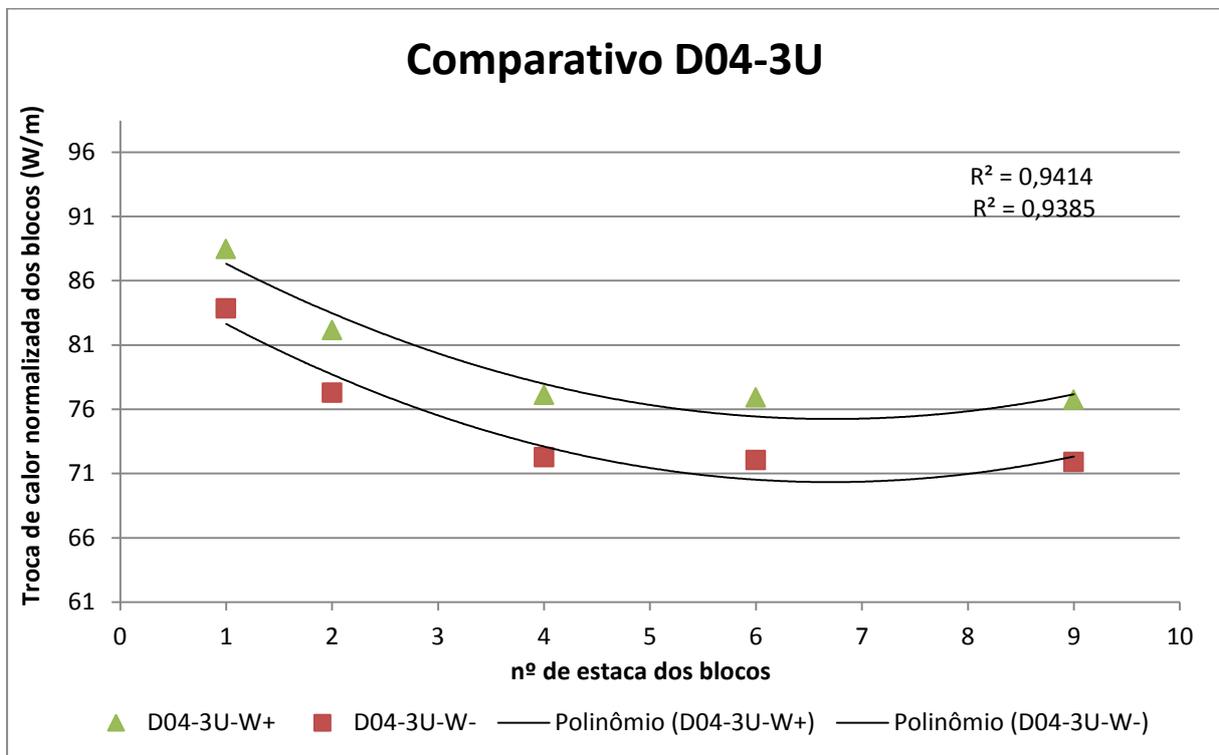


Figura 5.41. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de segundo grau do comparativo para configuração D04-3U.

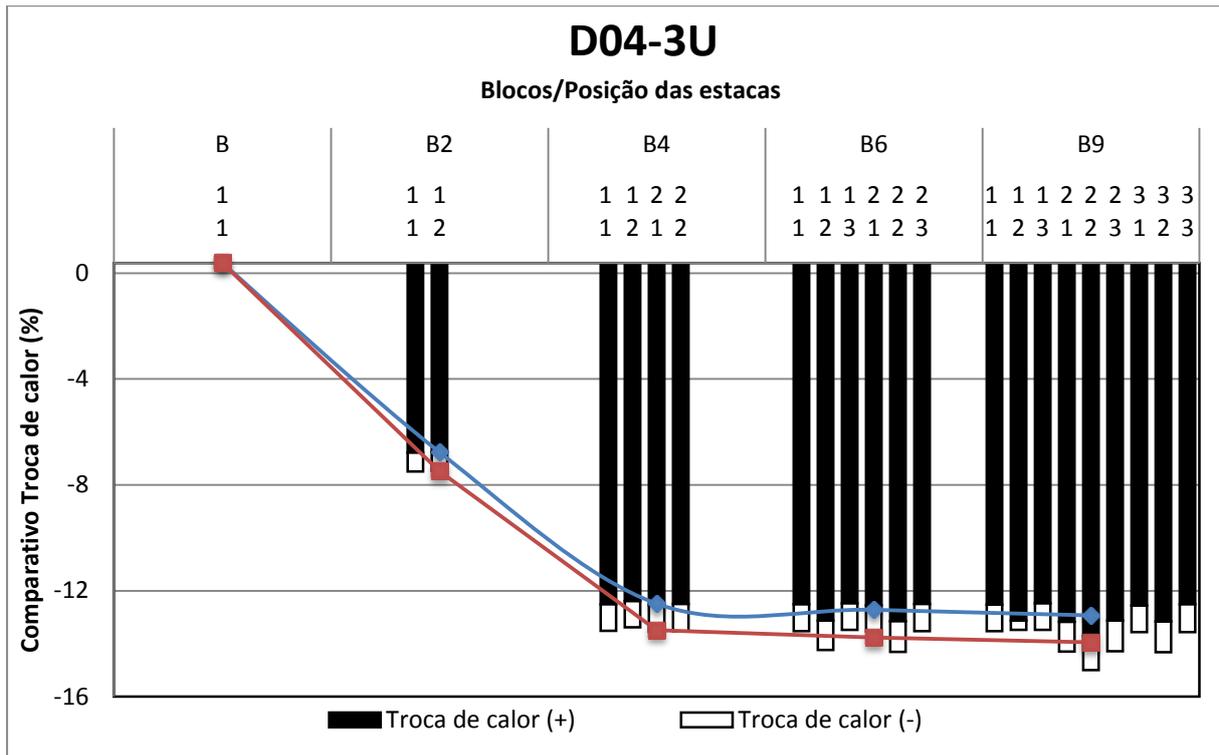


Figura 5.42. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D04-3U.

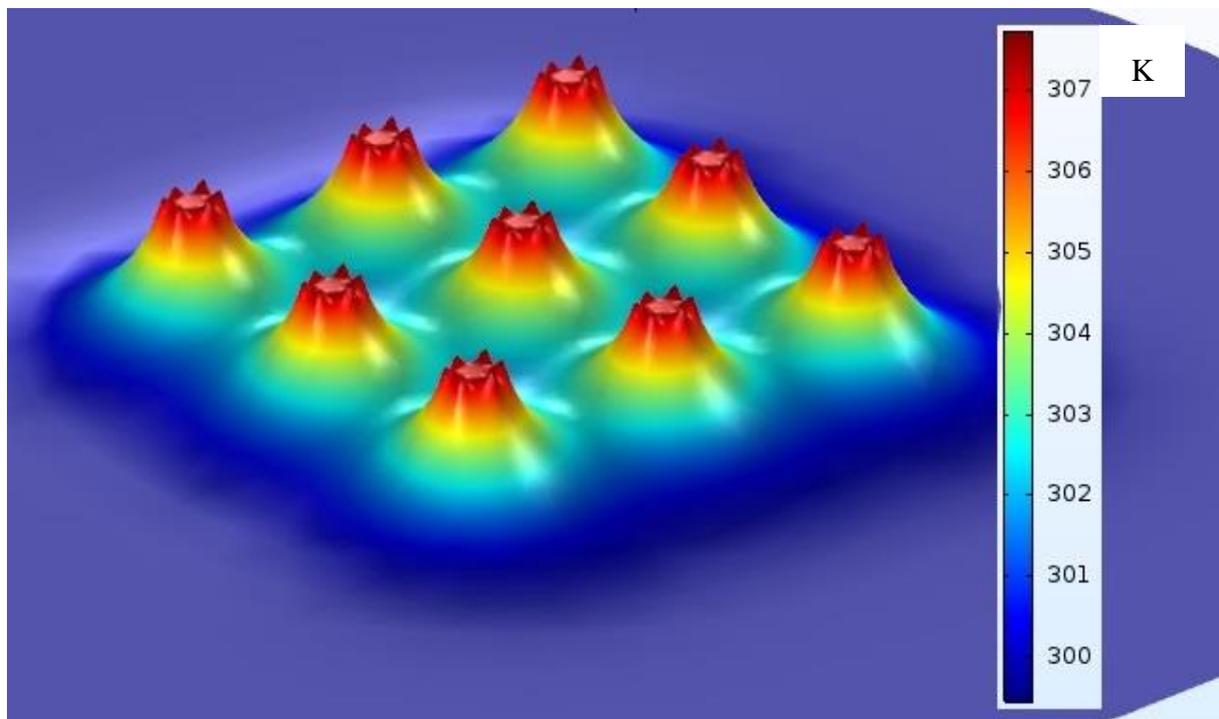


Figura 5.43. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6m com 50 horas de ensaio para configuração D04-3U.

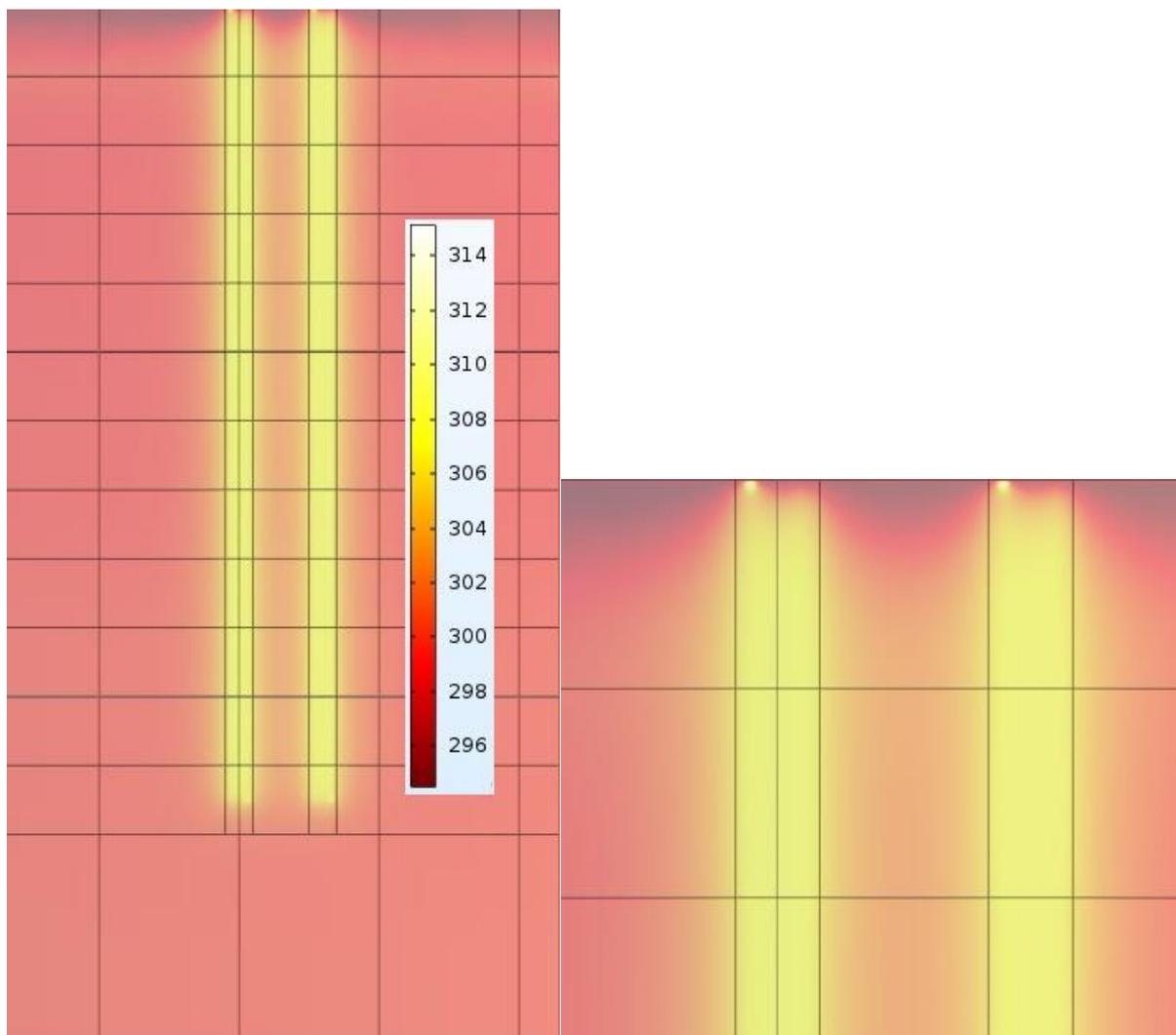


Figura 5.44. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D04-3U.

Das figuras e tabelas acima, observa-se que:

- A interação entre as estacas diminuiu;
- A quantidade de calor trocada pelas estacas aumentou com relação a configuração D03-3U;
- A eficiência média dos blocos tende a uma uniformização a partir do bloco com 4 estacas;
- Para esta configuração o bloco de duas estacas já possui perda de eficiência da ordem de 7% para as duas curvas, chegando a valores maiores que 13% também para estas;
- O R^2 das tendências são 0,9414 e 0,9385 respectivamente para valores máximos e mínimos.

As estacas por terem maior diâmetro e conseqüentemente maior distância, tendem a interferir menos entre si, aumentando sua troca de calor e eficiência individual por haver menor interação entre as pernas da tubulação no interior da estaca. Porém, quando se compara a eficiência média dos blocos da configuração D04-3U com D03-3U, nota-se que esta perde mais eficiência com o aumento das estacas nos blocos. Este fato pode ser explicado porque a estaca base com diâmetro de 40 cm troca mais calor por ter menos interação térmica dentro de si, e com isto quando se compara os blocos com a mesma, os números indicam maior perda de eficiência.

- **D06-3U:**

Nas figuras 5.45 a 5.49 tem-se os gráficos e figuras com resultados da configuração D06-3U e comportamento térmico dos bulbos de temperatura.

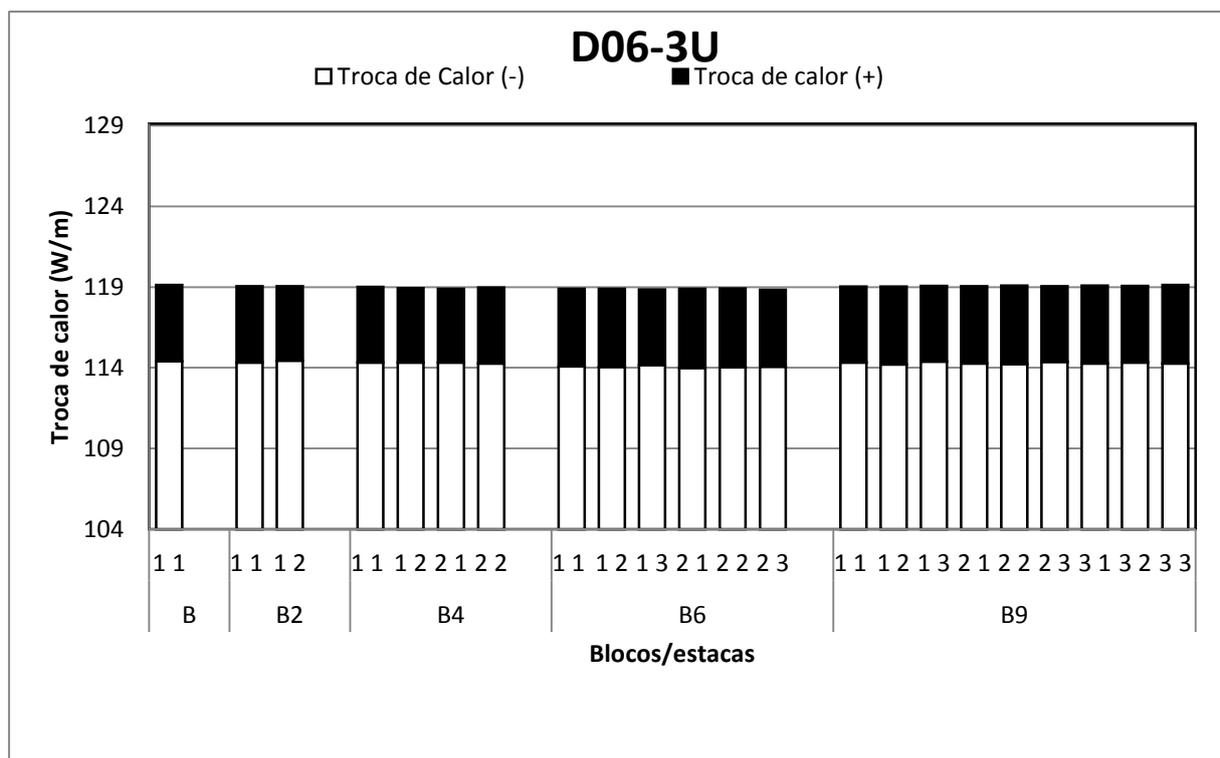


Figura 5.45. Taxa de troca de calor por estaca para configuração D06-3U.

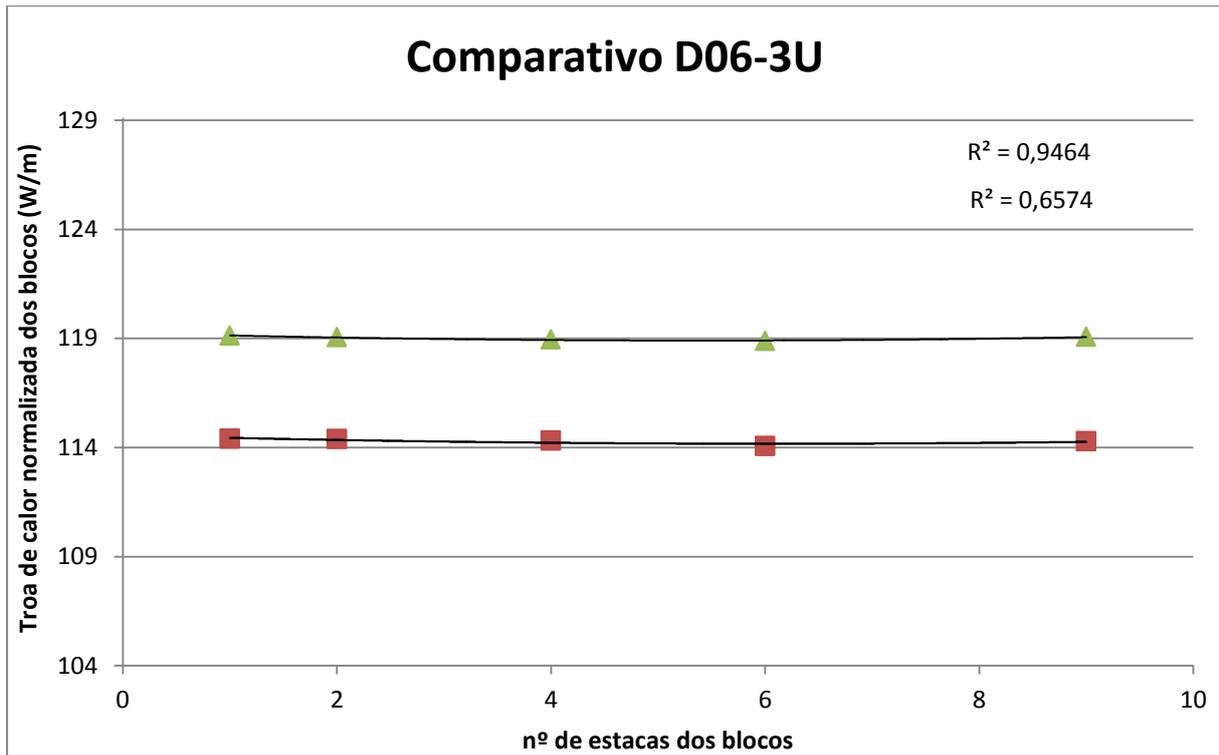


Figura 5.46. Gráfico com resultados e tendências polinomiais de terceiro grau do comparativo para configuração D06-3U.

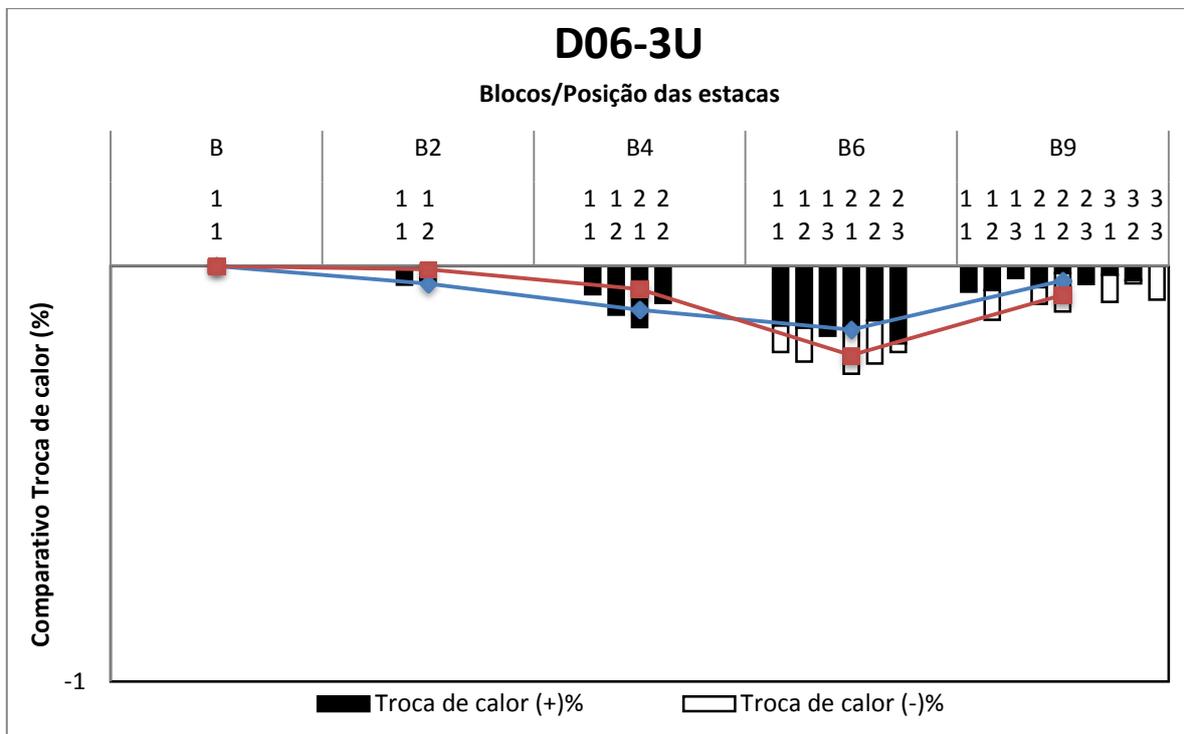


Figura 5.47. Queda de eficiência por estaca e média dos blocos para configuração D06-3U.

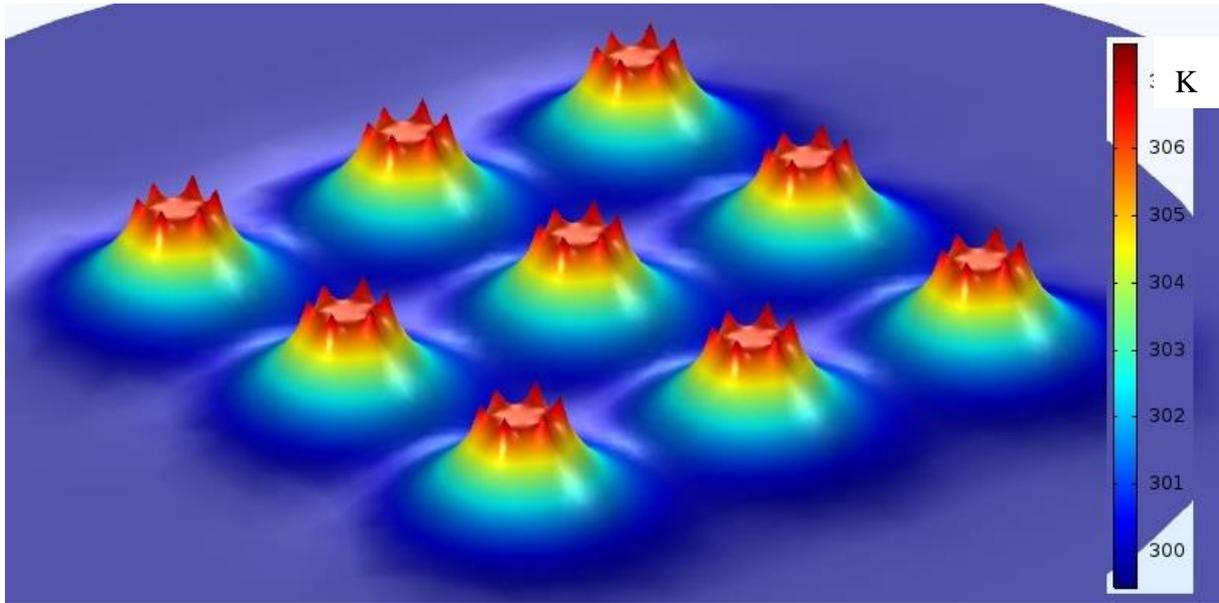


Figura 5.48. Plotagem 3D da temperatura do plano de corte a 6m com 50 horas de ensaio para configuração D06-3U.

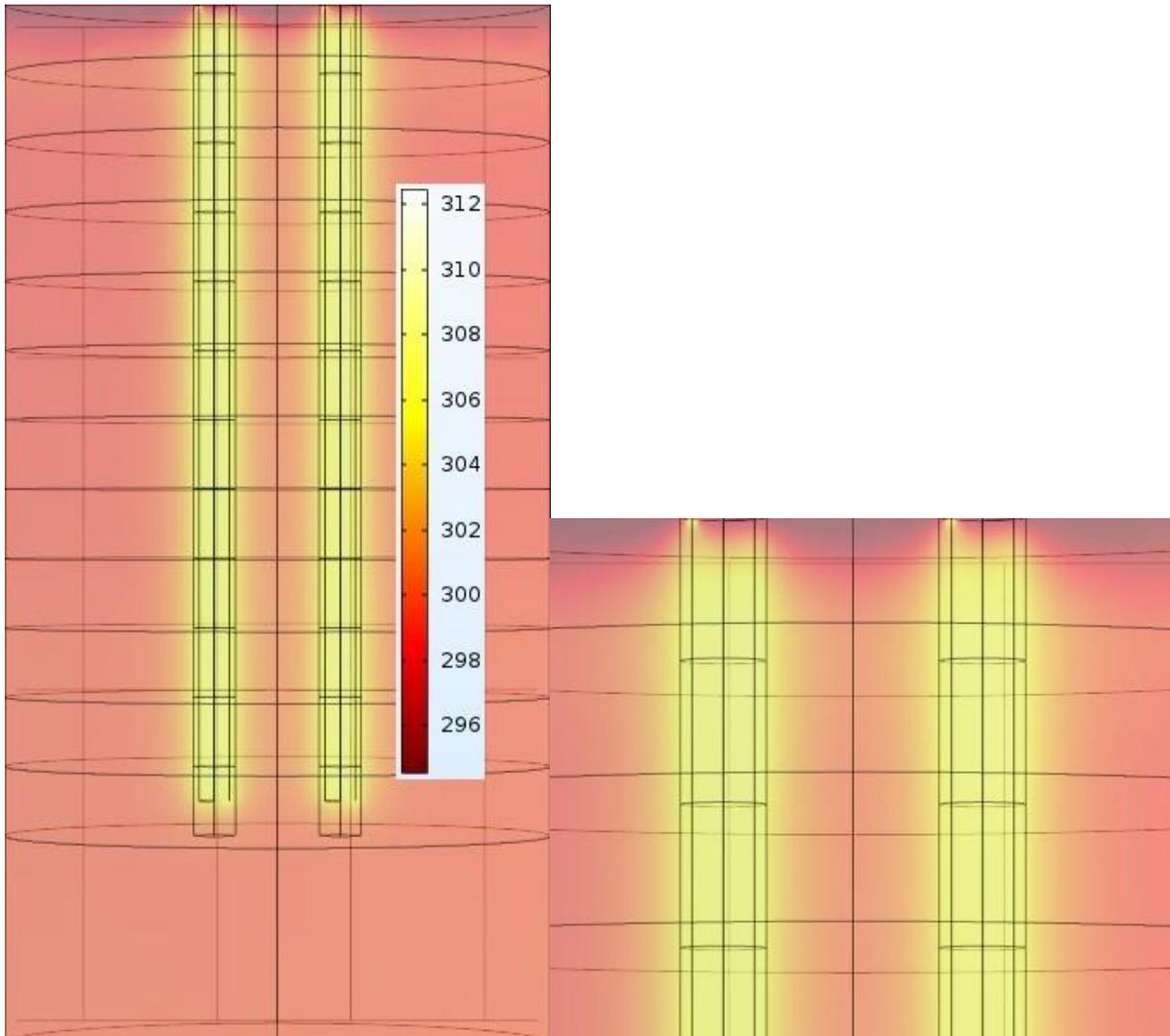


Figura 5.49. Plotagem do perfil de corte com 50 horas passando pelo centro das estacas ao longo de toda profundidade e ênfase nos primeiros metros, para configuração D06-3U.

Das figuras e tabelas acima, observa-se que:

- A interação entre as estacas é praticamente nula;
- A eficiência praticamente não muda de um bloco para outro;
- A quantidade de calor trocada pelas estacas aumentou com relação à configuração D03-3U;
- A eficiência média dos blocos tende a uma uniformização a partir do bloco com 4 estacas;
- O máximo valor de variação na troca de calor é de 0,20%;
- A diferença entre eficiência de uma estaca e outra é tão pequena que não há valores concisos com relação ao decaimento, por causa de arredondamento dos resultados do software;
- As tendências se aproximam de uma reta horizontal devido a baixa perda de eficiência e constância dos resultados;
- Os valores de R^2 são de 0,9464 e 0,6574 respectivamente para valores mínimos e máximos de umidade.

Para o diâmetro de 60 cm, a taxa de calor cresceu consideravelmente e a perda de eficiência devido à interação entre estacas é mínima. Fato evidenciado na figura 5.48, na qual se nota que a interação no interior da estaca é menor por ter diâmetro maior e a interferência entre as estacas é pequena, figura 5.49, pois está relacionado ao fato do bulbo de calor entre elas quase não se interceptar.

A baixa variação da troca de calor gera perda de eficiência máxima de 0,20%. Isto evidencia pouca a interferência térmica entre as estacas. Com relação à tendência, as polinomiais de segundo grau tem valor baixo para valores mínimos de umidade e valores aceitáveis para valores máximos de umidade. Para os valores mínimos de umidade, justifica-se pois o fato do bloco com 6 estacas perdem mais eficiência que o esperado, sendo um ponto fora da curva. Porém como a diferença é mínima, o valor de R^2 precisa ser revisto com cuidado, já que quando se analisa os números de troca de calor, a diferença é mínima entre um bloco e outro.

5.2. COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS PARA MESMO NÚMERO DE ESTACAS E DIFERENTES DIÂMETROS

Nesta etapa, discute-se a diferença entre os resultados de troca de calor, variando o diâmetro das estacas e comparando esta variação para mesmo número de estacas no bloco, tubulação e

umidade. Apresenta-se o valor em W/m e em porcentagem de variação, adotando-se o diâmetro D03 como base comparativa.

5.2.1. COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS PARA TUBULAÇÃO U

Apresentam-se os resultados nas figuras 5.50 e 5.51 e tabelas 5.1 e 5.2.

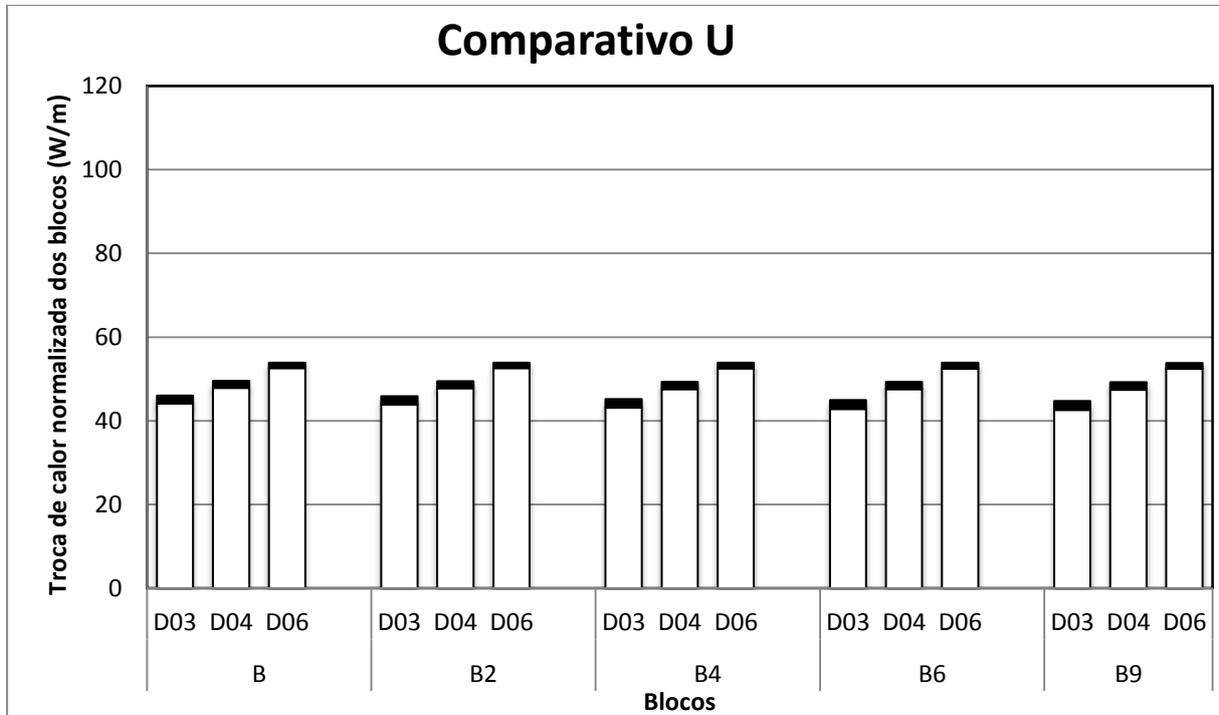


Figura 5.50. Taxa de troca de calor entre estacas com uma volta.

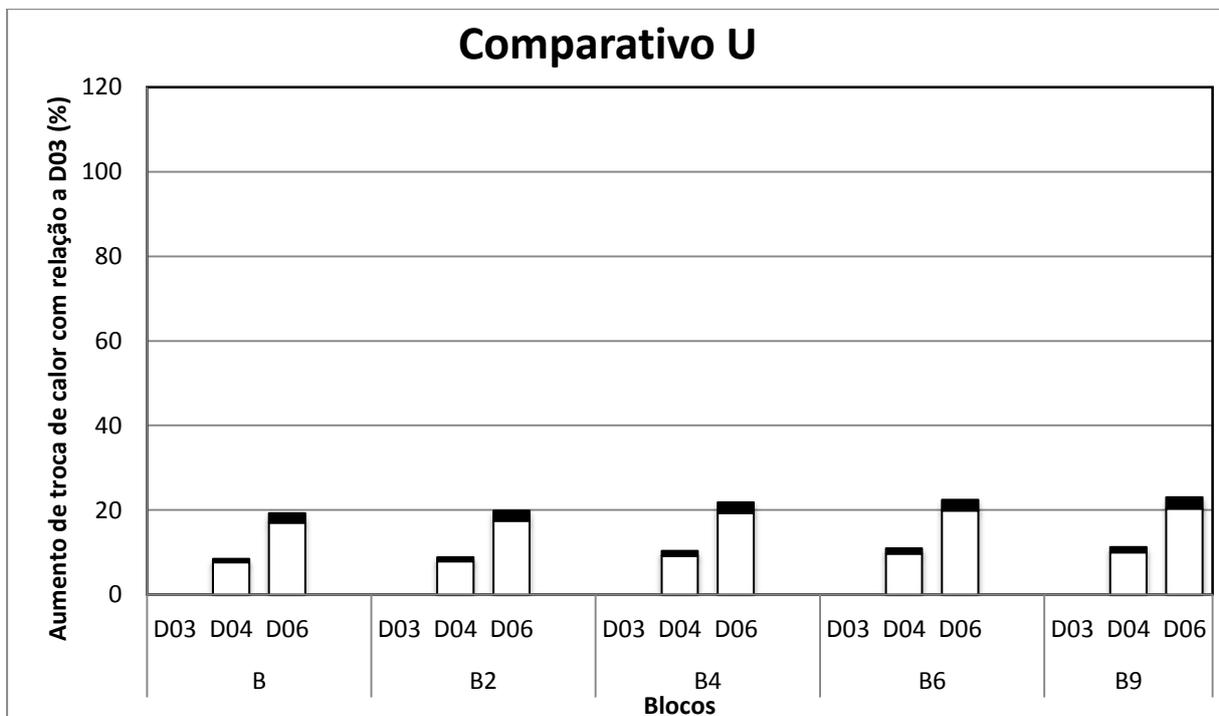


Figura 5.51. Variação da taxa de troca de calor com relação às estacas de 30 cm de diâmetro e tubulação com uma volta.

A figura 5.51 representa o aumento da troca de calor relacionado para o aumento do diâmetro das estacas de 30 cm para outros diâmetros. Esse aumento é medido em % e utiliza a equação 5.1 para cálculo.

$$DQ_L = \frac{Q_{LD0x} - Q_{LD03}}{Q_{LD03}} (\%) \quad (5.1)$$

Na qual DQ_L é o aumento de troca de calor com relação ao diâmetro de 30 cm, Q_{LD0x} é a troca de calor para outros diâmetros e Q_{LD03} a troca de calor para diâmetro de 30 cm nas estacas. Ressaltando que a comparação é feita modificando o diâmetro das estacas e mantendo as outras configurações.

A tabela 5.1 mostra a média da troca de calor entre as estacas para uma volta e diferentes diâmetros. Esta média leva em consideração todas as estacas de todos blocos para mesma configuração e em resumo ela demonstra o aumento da troca de calor com o aumento do diâmetro das estacas. Mostra-se também quantos graus as estacas trocam com o solo. Ela representa a diferença entre a temperatura de entrada e saída média das estacas para as configurações explicitadas. Já a tabela 5.2 mostra em porcentagem o quanto aumenta a troca de calor variando o diâmetro das estacas de 30 cm para 40 cm ou 60 cm.

Tabela 5.1. Média da troca de calor dos blocos para estacas com uma volta na tubulação.

	W+ (W/m)	W- (W/m)	Média (W/m)	ΔT W+ C° ou K	ΔT W- C° ou K	ΔT Média C° ou K
D03	45,33	43,29	44,31	0,310	0,297	0,304
D04	49,36	47,61	48,48	0,340	0,330	0,335
D06	53,85	52,51	53,18	0,370	0,360	0,365

Tabela 5.2. Variação da troca de calor média com relação às estacas com 30 cm de diâmetro e tubulação com uma volta.

	W+ (%)	W- (%)	Média (%)
D03	--	--	--
D04	8,88	9,98	9,43
D06	18,8	21,31	20,05

Com os dados apresentados acima, observa-se que:

- Com o aumento do diâmetro das estacas para todos os tipos de blocos e para as configurações de umidade, houve leve aumento da taxa de calor trocada.

- A temperatura que se perde circulando fluido pelas tubulações das estacas são da ordem de 0,30 C° ou K, sendo que quanto maior o diâmetro, maior a diferença entre a temperatura de entrada e saída da estaca.
- O aumento de eficiência com relação ao aumento do diâmetro é, em média, 9,43% e 20,05% para os diâmetros 40 cm e 60 cm respectivamente.
- A perda de eficiência é bastante suave e se concentra nos diâmetros 30 cm e 40 cm.

Com base nas observações acima, conclui-se que a tubulação com apenas um volta (U) é adequada para todos diâmetros, uma vez que não se perde muita eficiência com o aumento do número de estacas nos blocos. Conclui-se portanto que do menor ao maior espaçamento o calor irradiado interfere pouco nas estacas vizinhas.

5.3. COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS PARA BLOCOS COM MESMO NUMERO DE ESTACAS E TUBULAÇÃO 2U

Apresenta-se os resultados nas figuras 5.52 e 5.53 e tabelas 5.3 e 5.4.

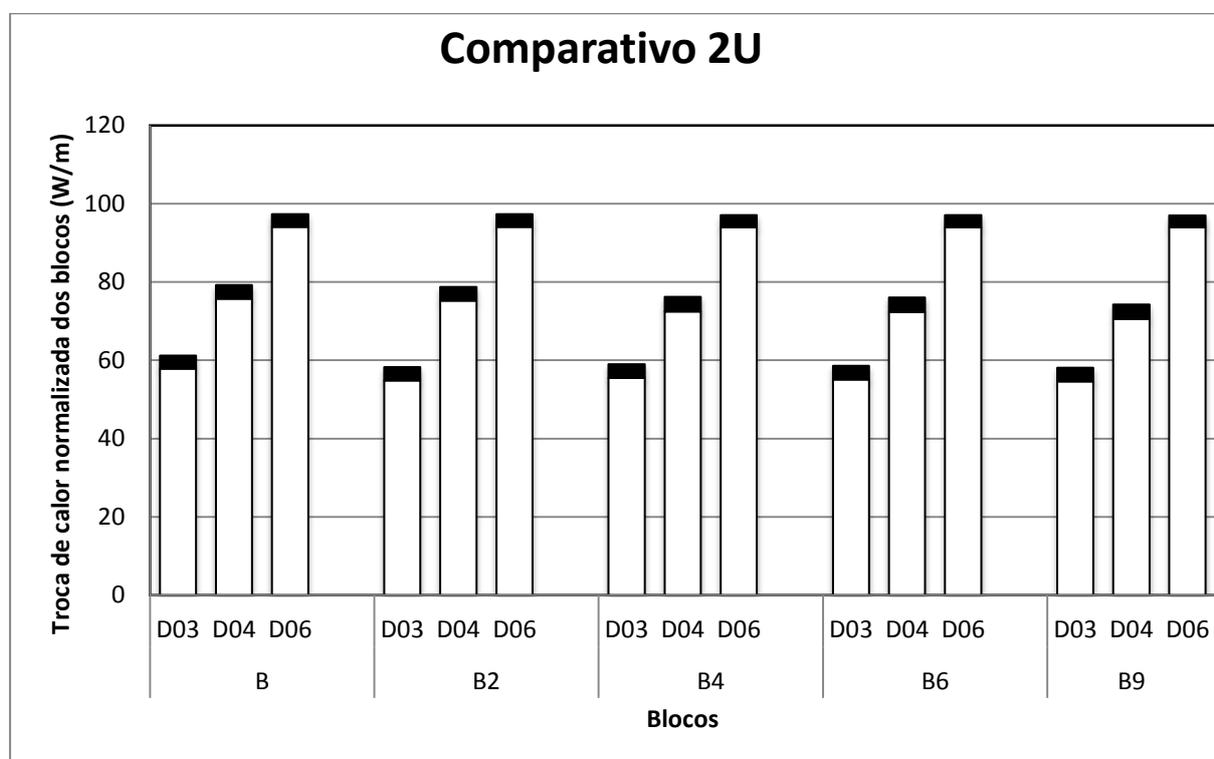


Figura 5.52. Taxa de troca de calor entre estacas com duas voltas.

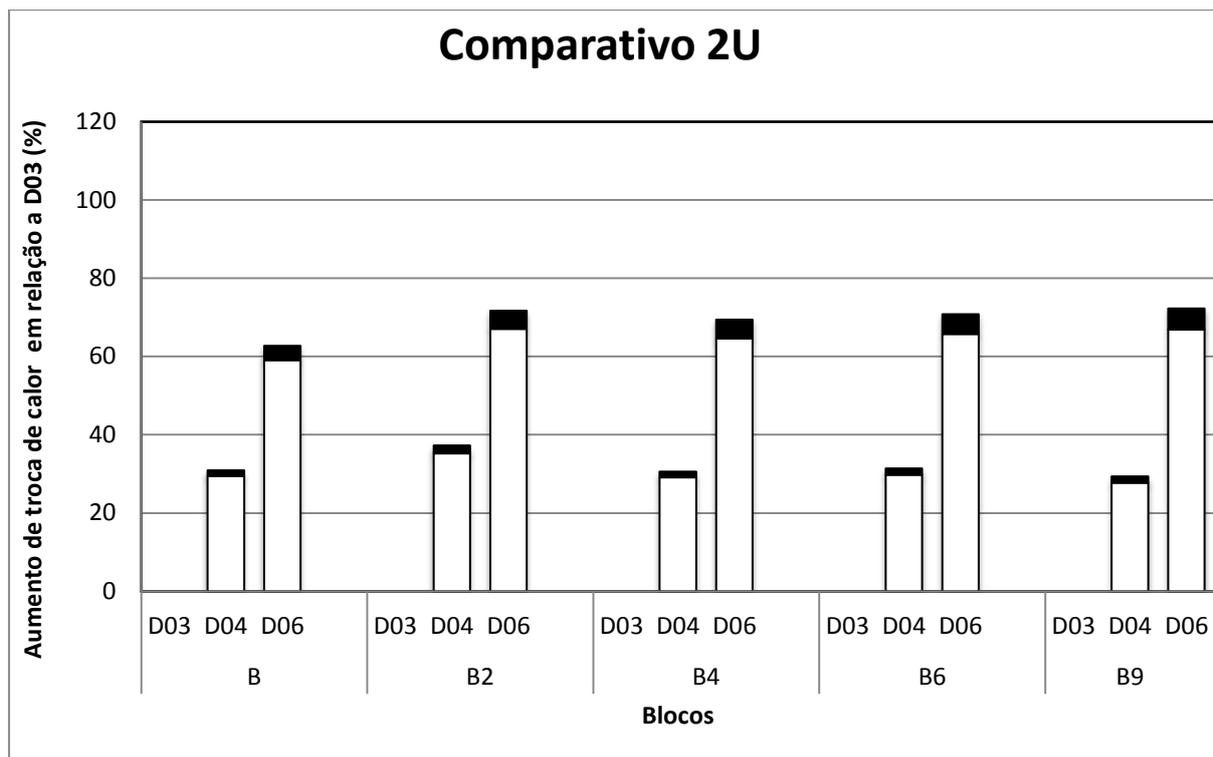


Figura 5.53. Variação da taxa de troca de calor com relação às estacas de 30 cm de diâmetro e tubulação com duas voltas.

A figura 5.53 utiliza a equação 5.1 para fins de cálculo. Nela, a mesma análise da figura 5.51 é feita, porém ela utiliza os resultados de tubulações com duas voltas. Nesta compara-se o aumento em porcentagem da troca de calor das estacas com diâmetro de 40 cm e 60 cm em relação às estacas de 30 cm de diâmetro.

As tabelas 5.3 e 5.4 resumem os resultados da troca de calor com aumento do diâmetro das estacas, mantendo duas voltas nas tubulações.

Tabela 5.3. Média da troca de calor dos blocos para estacas com duas voltas na tubulação.

	W+ (W/m)	W- (W/m)	Média	ΔT W+ C° ou K	ΔT W- C° ou K	ΔT Média C° ou K
D03	59,01	55,52	57,26	0,405	0,377	0,391
D04	76,85	73,23	75,04	0,518	0,496	0,507
D06	97,14	93,99	95,56	0,670	0,650	0,660

Tabela 5.4. Variação da troca de calor média com relação às estacas com 30 cm de diâmetro e tubulação com duas volta.

	W+ (%)	W- (%)	Média
D03	--	--	--
D04	30,24	31,91	31,08
D06	64,67	69,36	67,02

Com os dados apresentados acima, observa-se que:

- Como esperado, a taxa de troca de calor cresce com o aumento do diâmetro das estacas, porém para esta configuração de tubulação, entre um diâmetro e outro a taxa aumenta de maneira mais acentuada com o aumento do diâmetro.
- A variação média quando se compara estacas com diâmetro de 30 cm aumentam 31,07% e 67,01%, respectivamente para os diâmetros de 40 cm e de 60 cm.
- Para tubulações com duas voltas, a diferença entre a temperatura de entrada e saída da tubulação das estacas em média aumentaram muito, sendo para esta configurações entre 0,391 e 0,660 para D03 e D06 respectivamente.

As informações discutidas acima mostram que o crescimento de diâmetro para esta configuração aumenta a taxa de troca de calor das tubulações com 40 cm e 60 cm de uma maneira considerável. Em comparação com apenas uma volta na tubulação a troca de calor quase dobra, vide tabela 5.1, porém para tubulação com 30 cm, ela não se mostra muito viável, já não gera um aumento considerável na taxa de crescimento para duas voltas na tubulação.

5.4. COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS PARA BLOCOS COM MESMO NUMERO DE ESTACAS E TUBULAÇÃO 3U

Apresentam-se os resultados nas figuras 5.54 e 5.55 e tabelas 5.5 e 5.6.

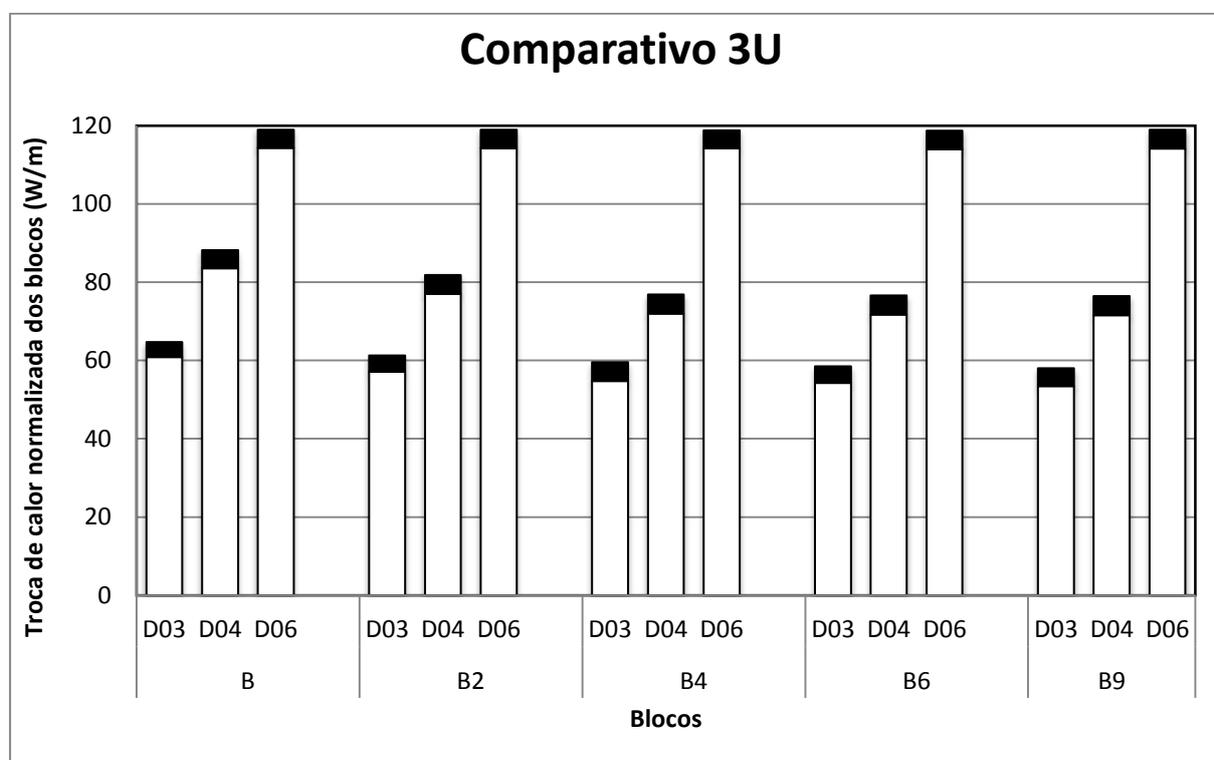


Figura 5.54. Taxa de troca de calor entre estacas com três voltas.

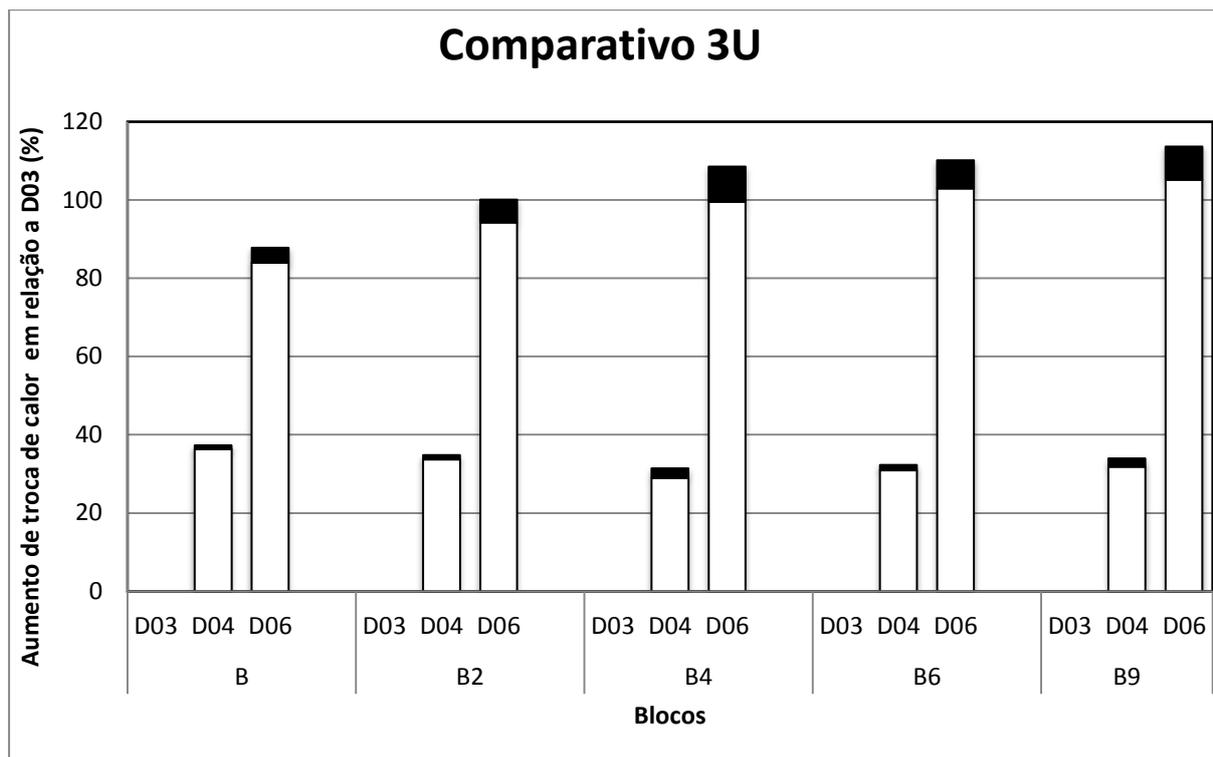


Figura 5.55. Variação da taxa de troca de calor com relação às estacas de 30 cm de diâmetro e tubulação com três voltas.

Para estacas com três tubulações, a tabela 5.5 mostra todo o potencial que as estacas com diâmetro de 60 cm têm para trocar calor. Entretanto diâmetros de 30 cm e de 40 cm com três voltas, não há um aumento acentuado de troca de calor. Pensando apenas na variação do diâmetro para três voltas, fica evidente conforme tabela 5.6 que o aumento para diâmetro de 60 cm é muito maior que para 40 cm.

Tabela 5.5. Média da troca de calor dos blocos para estacas com três voltas na tubulação..

	W+ (W/m)	W- (W/m)	Média (W/m)	ΔT W+ C° ou K	ΔT W- C° ou K	ΔT Média C° ou K
D03	60,38	56,06	58,22	0,406	0,376	0,391
D04	79,95	75,14	77,55	0,533	0,498	0,516
D06	118,86	114,13	116,49	0,820	0,782	0,801

Tabela 5.6. Variação da troca de calor média com relação às estacas com 30 cm de diâmetro e tubulação com três voltas.

	W+ (%)	W- (%)	Média (%)
D03	--	--	--
D04	32,33	33,95	33,14
D06	97,14	104,02	100,58

Com os dados apresentados acima, observa-se que:

- Para 3 voltas (3U), há queda evidente de eficiência para diâmetros de 30 cm e 40 cm.

- A taxa de troca de calor para o diâmetro 60 cm é em média 113,62% maior que para o diâmetro de 30 cm.
- A variação média com o aumento de diâmetro de 30 cm para 40 cm é bem próximo para duas voltas (2U) e três voltas (3U) na tubulação, sendo 57,26 W/m e 58,22 W/m para estacas de 30 cm. Para tubulações com 2 ou 3 voltas tem-se 75,04 W/m e 77,55 W/m para estacas de 40 cm.
- Para 3 voltas na tubulação, a diferença entre a temperatura de entrada e saída da tubulação fica entre 0,391 e 0,801 °C ou K para D03 ou D06 respectivamente.

Conclui-se a partir das observações acima que para tubulação com 3U o diâmetro mais eficiente é de 60 cm e que estacas com 30 cm e 40 cm o aumento de 2 voltas para 3 é antieconômico, já que aumenta os custos, e em contrapartida a eficiência não cresce de maneira considerável.

5.5. COMPARATIVO ENTRE DIÂMETROS

Nas figuras 5.56 a 5.58, seguem as comparações entre as possíveis configurações para cada diâmetro.

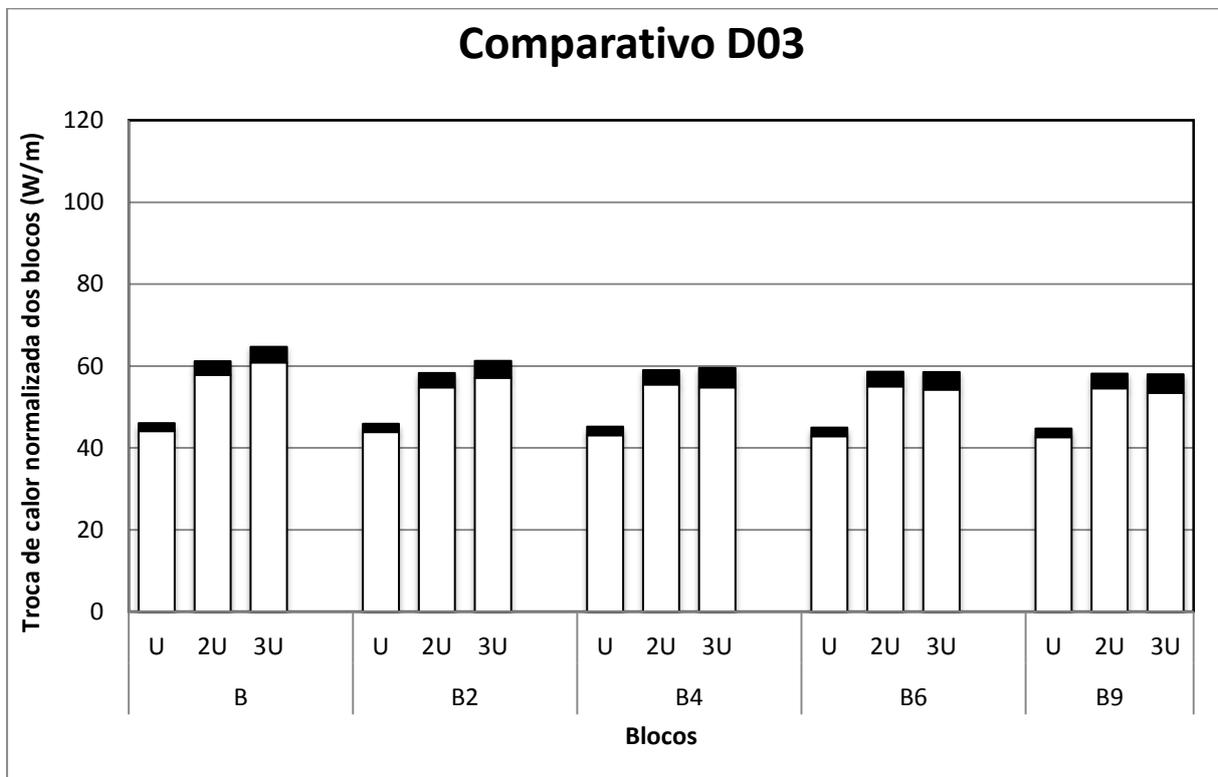


Figura 5.56. Taxa de troca de calor para estacas de 30 cm de diâmetro e as 3 configurações de tubulação.

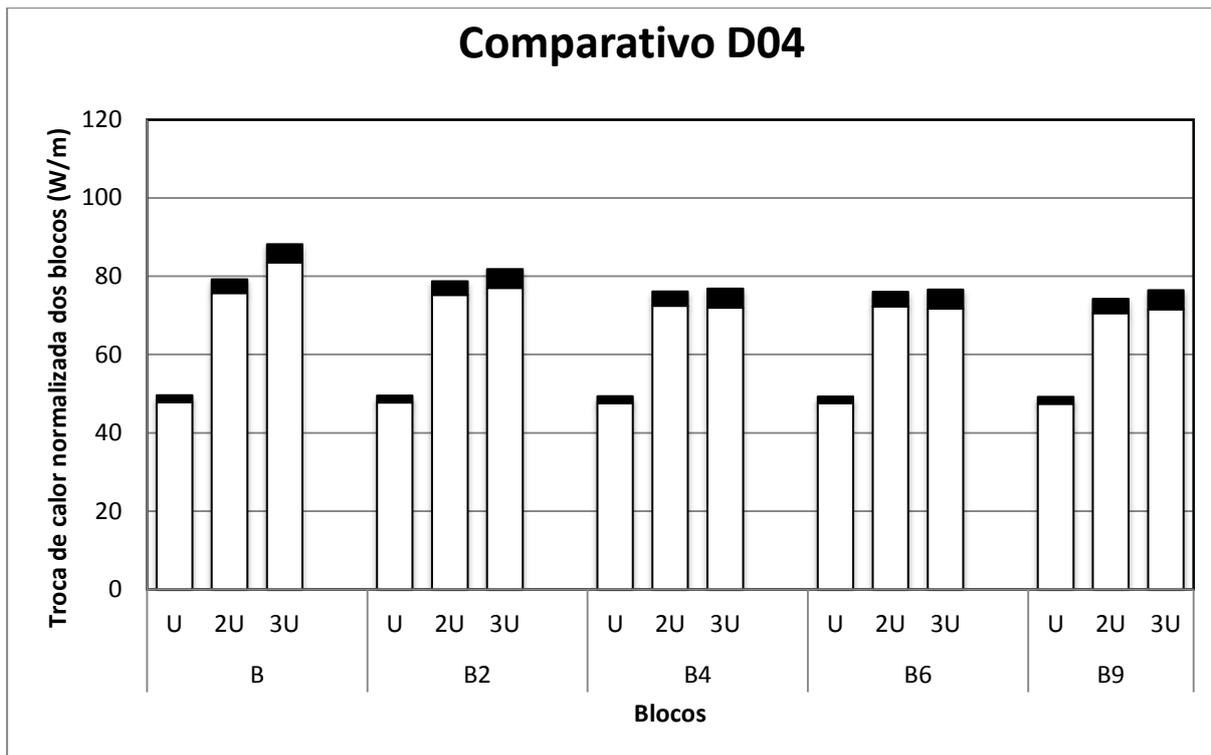


Figura 5.57. Taxa de troca de calor para estacas de 40 cm de diâmetro e as 3 configurações de tubulação.

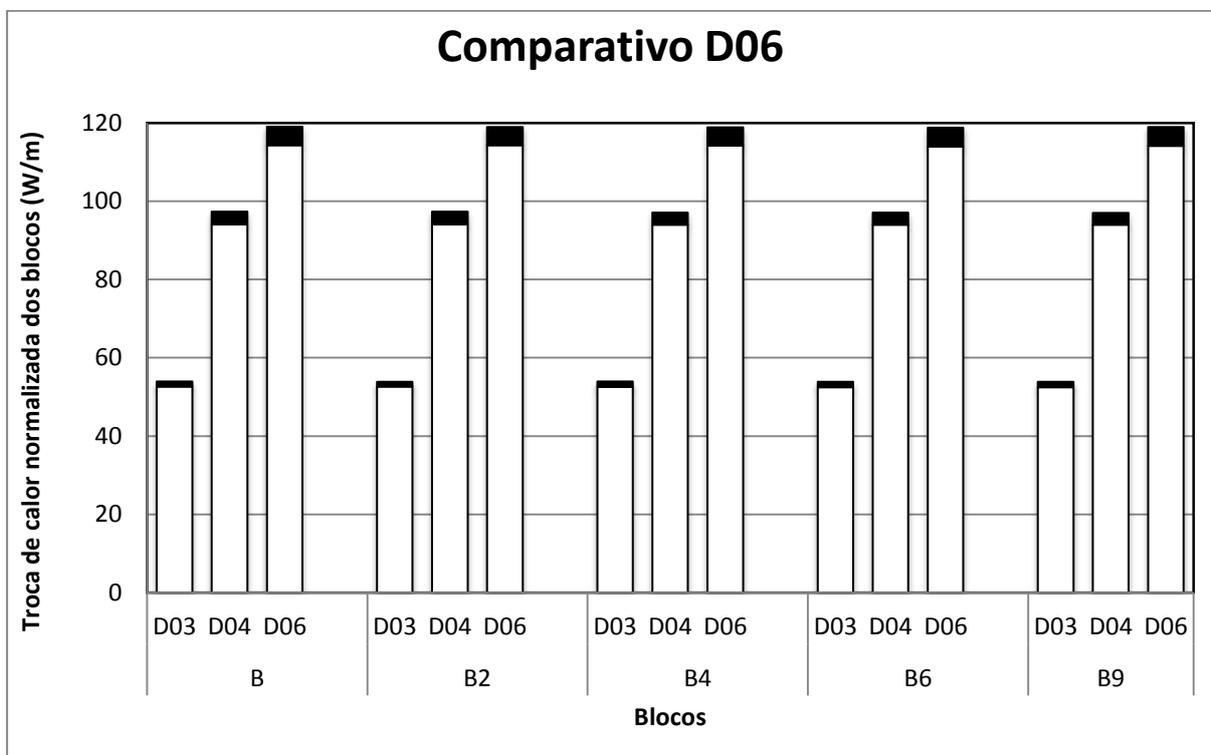


Figura 5.58. Taxa de troca de calor para estacas de 60 cm de diâmetro e as 3 configurações de tubulação.

As figuras e tabelas acima nos levam às seguintes observações:

- A troca de calor em blocos com 4 ou mais estacas para diâmetros de 30 e 40 cm em comparação com tubulações com 2 ou 3 voltas é praticamente a mesma;
- Blocos com estacas de 30 cm de diâmetro e 1 ou 2 estacas na tubulações com 3 voltas, aumentam a troca de calor, já blocos com 4, 6 ou 9 estacas não incrementam a troca de calor aumentando de 2 para 3 voltas na tubulação.
- Diâmetro de 40 cm nas estacas geram aumento considerável quando aumenta-se de 1 para 2 ou 3 voltas nas tubulações. Porém, blocos com 4 ou mais estacas, o aumento de duas para três voltas não implica em aumento de troca de calor.
- Diâmetro de 60 cm em estacas comportam três voltas na tubulação e o aumento do número de voltas aumenta a taxa de troca de calor de maneira considerável, ver figura 5.58.

Conclui-se das informações acima, que conforme o diâmetro da estaca aumenta há um limiar de número de voltas da tubulação que a mesma consegue trocar calor de maneira eficiente, além disto se torna economicamente inviável. Isto se dá devido ao tamanho que o bulbo alcança e isto começa a perturbar a troca de calor nas estacas vizinhas dos blocos, assim como no interior da própria estaca. Esta interação é maior quando se tem mais voltas da tubulação dentro das estacas. De maneira geral, o aumento do número de voltas gera crescimento da taxa de troca de calor, porém não de uma maneira proporcional, dependendo das configurações dos blocos e estacas.

Para o Distrito Federal, nas condições de análise e configuração das fundações, no caso de diâmetro de 30 cm para as estacas, o mais indicado são duas voltas na tubulação, enquanto que para 40 cm de diâmetro em estacas, três voltas na tubulação resultam em maior troca de calor apenas para blocos com ou uma ou duas estacas. Para estacas com 60 cm de diâmetro em todos os blocos estudados três voltas na tubulação geram resultados maiores de troca de calor quando em comparação com duas voltas.

Quando o diâmetro poder ser escolhido levando em consideração a maior troca de calor sem prejuízo técnico-econômico ao projeto de fundações, o diâmetro de 60 cm e três voltas na tubulação é o mais indicado por ter melhor desempenho térmico frente a todos outros tipos de configurações supracitadas.

5.6. VARIAÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO E TROCA DE CALOR

A fim de estudar a importância da saturação na troca de calor, utilizou-se o bloco B9-D04-2U de exemplo. Modificou a saturação e fez todo processo de cálculo de parâmetros térmicos e simulações para compreender como seriam os novos resultados de troca de calor. Para isto, considerou-se saturação de 1% e 100%, e valores mínimos e máximos de saturação do solo de Brasília e o resultado encontra-se na tabela 5.7 e figura 5.59.

Na tabela 5.7 há 4 valores de saturação do solo, os extremos foram acrescentados para identificar o máximo e mínimo, enquanto os valores medianos correspondem aos máximos e mínimos que geralmente ocorrem no solo estudado. Na segunda coluna tem-se a troca de calor correspondente para os níveis de saturação.

Tabela 5.7. Resultado da troca de calor do bloco B9-D04-2U com variação da saturação.

Saturação (%)	Troca de calor (W/m)
1,00	29,00
58,40	70,56
72,45	74,19
100,00	79,38

Como nota-se na figura 5.59, o valor de saturação e troca de calor não se relacionam de maneira linear, e conforme o valor de saturação cai abaixo de 50%, a troca de calor começa a cair consideravelmente até atingir o seu valor mínimo.

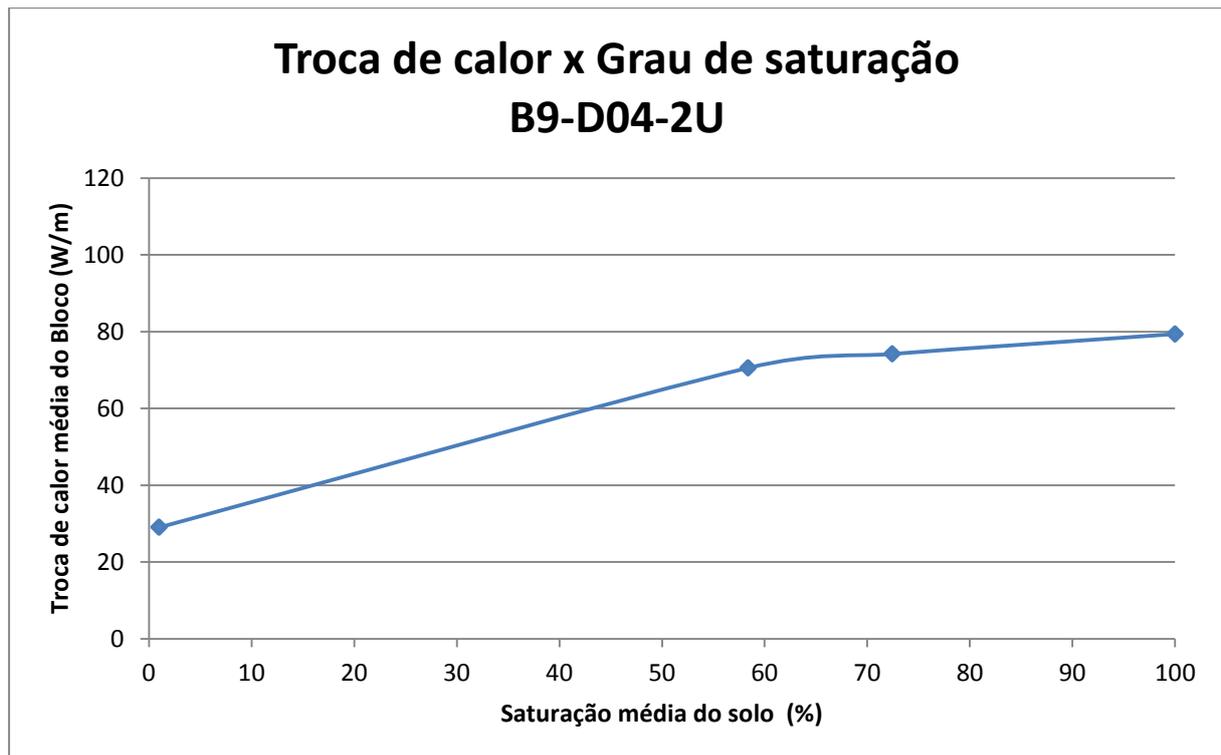


Figura 5.59. Resultado da troca de calor, com variação da saturação, para bloco B9-D04-2U.

Barry-Macaulay (2015), afirma que a diferença na resposta da condutividade térmica do solo com o aumento da saturação ocorre devido ao tamanho das partículas de solo. Para caso de solos granulares que contém menos partículas, com um pequeno aumento na saturação já se pode ligar as partículas através da água adsorvida, fenômeno chamado de saturação crítica (Barry-Macaulay, 2013). Qualquer aumento depois disto cresce muito pouco a condutividade do solo. Quando se trata de solos finos, o grau de saturação precisa ser maior, pois há maior número de partículas e conseqüentemente se necessitam de mais água para saturar o contato entre as mesmas.

5.7. SUMÁRIO GERAL DO CAPÍTULO

A figura 5.60 reúne os resultados médios das taxas de calor normalizadas por metro de estaca para todos blocos e configurações, auxiliando na compreensão desse item que cita as principais observações do capítulo, sendo elas:

- As estacas imersas em blocos de fundação tem influência das estacas próximas. Quando o bulbo de calor delas se intercepta, a diferença de temperatura entre o solo e estaca diminui, conseqüentemente reduz-se também na troca de calor das mesmas.
- Quanto mais estacas próximas interagindo entre si, menor a eficiência de cada uma das estacas. As estacas do centro tem piores resultados.
- Para estacas com 30 cm de diâmetro, três voltas na tubulação implica em aumento de troca de calor somente para blocos com 1 e 2 estacas, sendo que para outros duas voltas geram mesmo resultado, vide figura 5.60.
- Estacas com 40 cm tem o mesmo comportamento de estacas de 30 cm, ver figura 5.60.
- Estacas com 60 cm não mostram interação entre si dentro do mesmo bloco e crescem sua troca de calor com aumento de voltas na tubulação, ver figura 5.60. Isso se dá porque o espaçamento experimentado pelas estacas é maior que os bulbos de calor, fazendo com que elas não se interceptem termicamente e isto faz com que a posição que a estaca ocupa ou o número de estacas no bloco não tenha influência no resultado final da troca de calor.

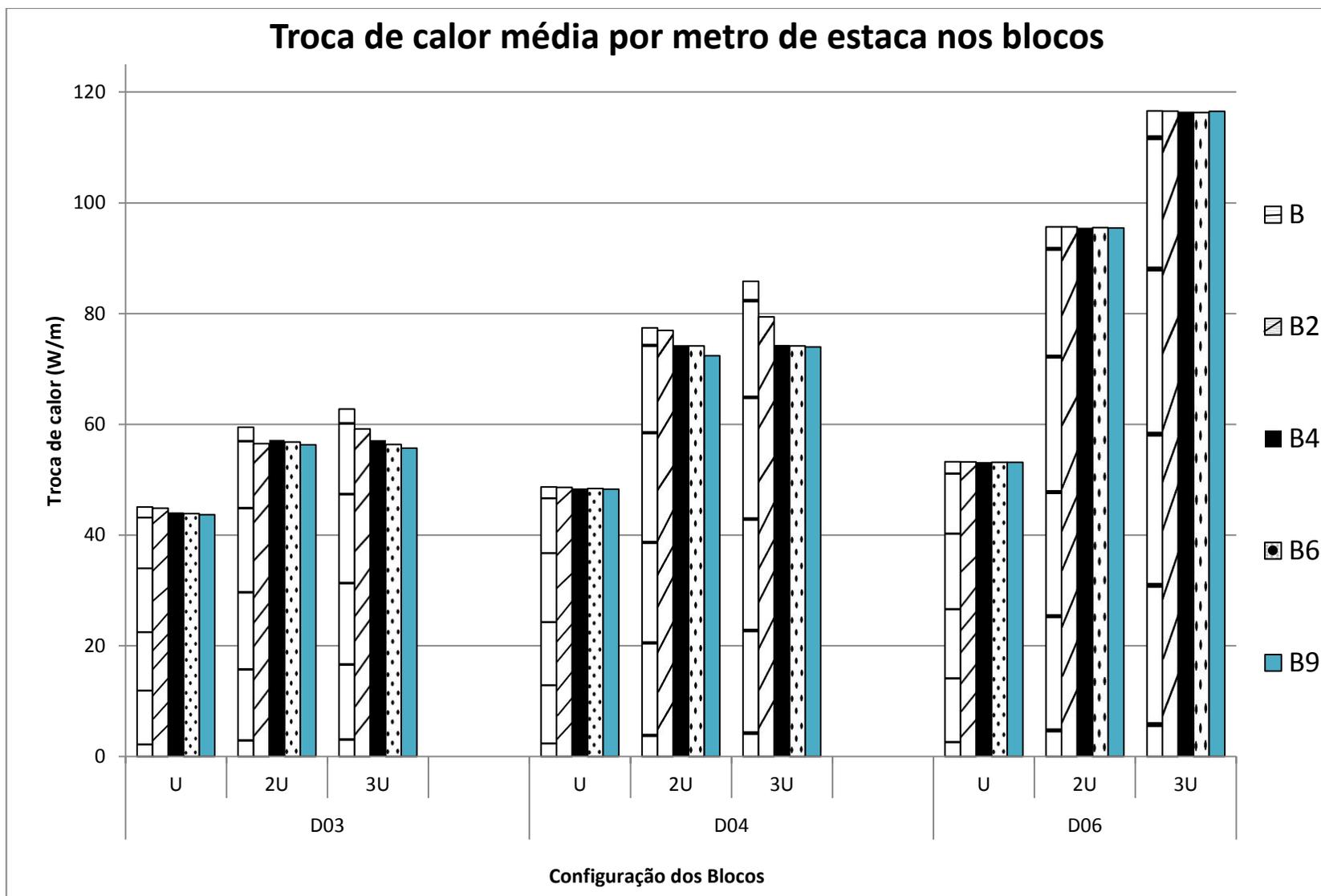


Figura 5.60. Resumo geral da troca de calor normalizada de todos grupos de estaca.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DA DISSERTAÇÃO

6.1. OBSERVAÇÕES GERAIS

De forma geral a pesquisa atingiu os objetivos traçados durante seu planejamento. O primeiro passo foi o estudo do solo, por meio de sondagens e caracterização do mesmo. Adicionalmente executou-se um poço de visita para estimar o perfil de temperatura do solo. Seguindo o passo a passo, executou-se o cálculo dos parâmetros térmicos do solo, como condutividade térmica (K) e a capacidade calorífica específica (Cp) para cada metro do solo até a profundidade desejada, considerando valores máximos e mínimos de umidade nos cálculos. Utilizou-se de correlações de Kersten (1949) e equações semi-empíricas de Johansen (1975), Cotê e Konrad (2005) e Lu et al. (2007).

Analisando-se exemplos de edifícios típicos do DF de diversos locais, determinavam-se as principais configurações utilizadas. Tomando-as como base, fez-se certas parametrizações a fim de analisar outros fatores importantes para troca de calor. Por fim, simulou-se as configurações determinadas por meio do software *COMSOL Multiphysics v5.2*. Após, fez-se tratamento dos dados e analisou-se de diversas maneiras os resultados. Nestas simulações foram variados os diâmetros das estacas, o número de estacas nos blocos de fundação, o número de voltas das tubulações e os valores dos parâmetros térmicos do solo. Como comparativo utilizou-se a média de troca de calor por metro por estacas. Além da eficiência dos blocos, também analisou-se a eficiência das estacas conforme sua posição dentro do bloco. Com este processo, chegaram-se às seguintes conclusões:

- A troca de calor de uma estaca é influenciada por três questões geométricas: a área de contato entre estaca e o solo, a interferência entre o calor que irradia da tubulação no sentido de descida e de subida e a temperatura irradiada entre as estacas;
- O aumento do diâmetro das estacas aumenta a troca de calor média da mesma. Isto ocorre porque as tubulações ficam próximas às paredes das estacas, com isto o aumento do diâmetro cresce a distância entre as tubulações (descida e subida), além de aumentar a área de contato entre a estaca e o solo. Desta maneira há menor interferência entre a temperatura irradiada da tubulação de um lado e outro da estaca, proporcionando maior gradiente de temperatura e conseqüentemente maior troca de calor na estaca;
- A perda de eficiência de uma estaca dentro do bloco depende do número de estacas que interagem com a mesma naquela posição. Desta maneira, mesmo em blocos com

diferentes números de estacas, quando as mesmas estão em posições equivalentes tem o mesmo comportamento térmico quando possuem as outras configurações iguais;

- O aumento do diâmetro e conseqüentemente da distância entre estacas, diminui as diferenças de eficiência entre estacas do mesmo bloco. Bulbos se interceptam de maneira mais sutil, gerando menos interferência no gradiente de temperatura que governa a troca de calor;
- Para blocos iguais, o aumento do diâmetro das estacas e conseqüentemente do espaçamento, mantém mais constante a eficiência térmica das estacas, devido à menor interferência entre os bulbos de calor das mesmas;
- O aumento do número de tubulações dentro de uma estaca aumenta a interferência entre os mini bulbos de temperatura, diminuindo o gradiente de temperatura e conseqüentemente a perda de calor e eficiência;
- Conforme aumenta-se o diâmetro das estacas mantendo-se o espaçamento relativo, a diferença na eficiência térmica dentro dos blocos diminui;
- Estacas com diâmetro 60 cm, suportam a instalação de 3 voltas sem perdas expressivas de eficiência;
- Para estacas com diâmetro de 60 cm, a eficiência aumenta consideravelmente com o aumento de uma para duas voltas, porém não aumentam na mesma proporção quando aumenta de duas para três voltas;
- Estacas com 30 cm ou 40 cm de diâmetro experimentam aumento considerável de troca de calor apenas quando aumenta o número de voltas da tubulação de uma para duas voltas, o acréscimo da terceira não gera crescimento expressivo para blocos com 4 estacas ou mais. Este fato é explicado pelo aumento de interação térmica dentro e fora das estacas.
- Para diâmetros menores, quanto maior o número de voltas, maior a perda de eficiência entre estacas com relação a sua posição. Esse fato se dá devido ao aumento do raio de calor, que gera maior interação entre os bulbos das diferentes estacas.
- Para diâmetros de 30 cm e 40 cm, quando os valores das propriedades térmicas diminuem devido a variação de umidade, a troca de calor cai, porém a interação entre as estacas é maior, fato este que gera maiores decaimentos de eficiência dos blocos e estacas. Isso aparentemente ocorre devido ao fato das duas principais propriedades térmicas diminuírem com o declínio de umidade do solo, sendo elas a condutividade térmica (K) e Capacidade térmica específica (Cp).

6.2. CONCLUSÕES

Pensando em um projeto utilizando estacas trocadoras de calor no DF, a pesquisa permitiu alcançar as seguintes recomendações:

Em um projeto na qual o diâmetro das estacas é um fator imutável recomenda-se para os seguintes diâmetros:

- 30 cm: para blocos com 1 e 2 estacas três voltas na tubulação e blocos com mais estacas recomenda-se apenas duas voltas.
- 40 cm: mesma consideração das estacas de 30 cm.
- 60 cm: utilizar para todos os blocos 3 voltas, acredita-se que 4 ou mais voltas poderiam gerar maior troca de calor.

No caso de um projeto que necessite do máximo de energia térmica e o diâmetro das estacas é um fator mutável, recomenda-se que:

- Dentre os diâmetros e tubulações estudadas, se utilize estacas de 60 cm de diâmetro e três voltas na tubulação.

Por fim, um fator muito relevante mas que não pode ser modificado em projeto, a umidade do solo, tem influência direta nas taxas de troca de maneira geral independente da configuração das estacas. Quando a umidade é maior, aumenta a taxa de troca de calor e quando é menor faz esse valor cair consideravelmente.

6.3. CRÍTICAS E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Realizar medição por meio de equipamentos portáteis das propriedades térmicas do solo como Condutividade térmica (K) e Capacidade calorífica específica (Cp) e comparar com os valores calculados por meio de equações semi-empíricas;
- Comparar os resultados das simulações numéricas feitas com as propriedades térmicas adquiridas por meio das amostras com um ensaio TRT para confrontar o erro entre as mesmas;
- Uma das principais propriedades que devem ser consideradas para projeto de estruturas geotérmicas, é o perfil de temperatura do solo, sendo que nesta dissertação fez-se de maneira não muito assertiva. Por este motivo, recomenda-se que realize uma medição do perfil de temperatura do solo que dure alguns meses, para se avaliar como é a variação de temperatura ao longo do ano para solo de Brasília;

- Simular para estacas com diâmetro de 40 cm e 60 cm e quatro voltas ou mais na tubulação, a fim de identificar qual potencial máximo de troca de calor das estacas para esses diâmetros;
- Realizar as simulações numéricas de um edifício real para as propriedades térmicas aferidas de maneira mais próxima da “real”, considerando-se sua fundação. Com isto comparar a eficiência técnica e econômica do sistema frente a outras soluções de condicionamento de ambientes e condições gerais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKROUCH, G. (2014) Energy piles in cooling dominated climates. Ph. D. Thesis, Texas A&M University, Austin, United States of America, 240 p.
- ALVES, V. M., SCHMID, A. L. (2015). Cooling and heating potential of underground soil according to depth. *Energy and Buildings*(90), 41-50.
- BARBOSA, V. (2016). A nova era da energia renovável já começou no Brasil. Acesso em: 11 do 09 de 2017. *Exame*. Fonte: exame.com: <http://exame.abril.com.br/economia/noticias/a-nova-era-da-energia-renovavel-ja-comecou-no-brasil>
- BARRY-MACAULAY, D., BOUAZZA, A., SINGH, R. M., WANG, B., & RANJITH, P.G. (2013). Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region. *Engineering Geology*, 164, 131-138.
- BARRY-MACAULAY, D., BOUAZZA, A., WANG, B. & SINGH, R.M. (2015) Evaluation of soil thermal conductivity models. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(11), 1892-1900.
- BIDARMAGHZ A., NARSILIO G., JOHNSTON I., (2013) Numerical Modelling of Ground Heat Exchangers with Different Ground Loop Configurations for Direct Geothermal Applications. 3343-3346 p.
- BLANCO, S.B. (1995). Aspectos de Geologia de Engenharia Escavação do Metrô de Brasília. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 018/95, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92 p.
- BRANDL, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, II, 81-122.
- BRANDL, H., ADAM, D., & MARKIEWICZ, R. (2006). Ground-Sourced energy wells for heating and cooling of buildings. *Acta Geotechnica slovenica*, 13(01). 5-27.
- BRANDL, H. (2013) Thermo-Active Ground-Source Structures for Heating and Cooling. *Procedia Engineering*. 57 (2013), 9–18.
- CARDOSO, F.B.F. (2002). Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-009A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 357 p.
- CARVALHO, M.N (1995). Seminário da Disciplina Geotecnia dos Solos Tropicais., Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 6 p.
- EUROCODE 7, TC 341 – Ground Investigation and testing, N 525 – Geothermal Testing – Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock using a Borehole Heat Exchanger, 2011.
- COMISSÃO EUROPÉIA. (2011). Acesso em 09 de 09 de 2016, disponível em Europa 2020: http://ec.europa.eu/europe2020/targets/eu-targets/index_pt.htm
- CÔTÉ, J., & KONRAD, J.-M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 443-458.
- EMBRAPA (1978) Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Boletim Técnico, nº 53, SNLCS, Rio de Janeiro, RJ, 455 p.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. (2016). *Relatório Energético Nacional*. Síntese, Rio de Janeiro.

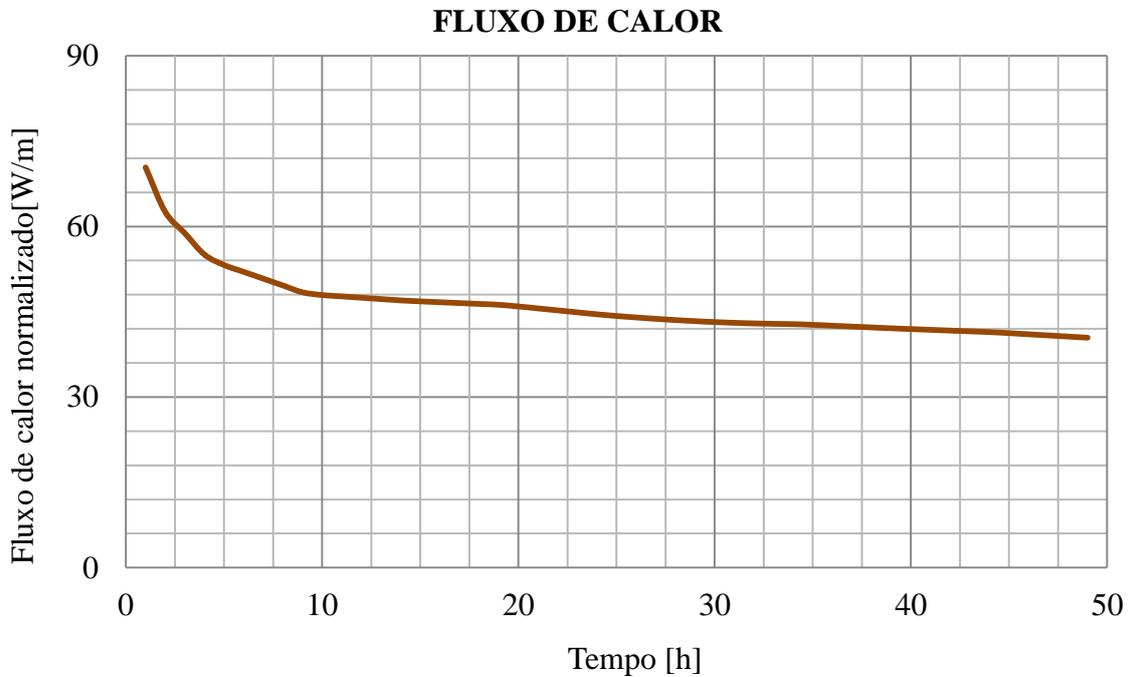
- ENNIGKEIT, A., & KATZENBACH, R. (2001). The double use of piles as foundations and heat exchanging elements. *Soil mechanics and geotechnical engineering*, 893-896.
- EUROBSER'ER. (2014). The state of renewable energies in europe. 212 p.
- FAROUKI, O. T. (1981). Thermal properties of soils. Hanover, New Hampshire, Estados Unidos da América. 137 p.
- FREITAS-SILVA, F.H. & CAMPOS, J.E.G (1998) Geologia do Distrito Federal. Inventário Hidrogeológico do Distrito Federal, Freitas-Silva, F.H. & Campos, J.E.G (eds.), UnB/IEMA, Brasília, DF, Parte I, pp. 1-86.
- GEOHERMAL COMMUNITIES. (2010). Shallow geothermal systems. *Geothermal Systems and Technologies*. (pp. 48-60).
- GUIMARÃES, R.C. (2002). Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao estudo do Desempenho de Estacas Escavadas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 091A/02, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.
- HEMMINGWAY, P., & LONG, M. (2011). Geothermal Training and Research. *Geothermal Energy-Progress and Research*, 43-46.
- HILLEL, D. (1998). Environmental soil physics. Ambest, Massachusetts, United States of America: Elsevier. 771 p.
- IBRACON (2017). Materiais de construção civil e princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. IBRACON, São Paulo, SP, Vol.1,
- INPE (2016). CPTEC. Acesso em: 14 de 12 de 2016. INPE. Fonte: <http://www.inpe.br/>
- JOHANSEN, O. (1975). Thermal conductivity of soils (Ph.D. dissertation). Trondheim, Norway (CRREL Draft Translation 637, 1977).
- JOHN W. LUND. (1999) Reconstruction of a pavement geothermal deicing system. *Geo Heat Center Bulletin*. 17 p.
- HORAI, KI-ITI. (1971) Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Journal of Geophysical Research*, 20(5,) 1278-1308.
- LALOUI, L., NUTH, M., & VULLIET, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(8), 763–781.
- LHENDUP, T.; AYE, L. e FULLER, R.J. (2014). In situ measurement of borehole thermal properties in Melbourne. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 73, pp. 285 – 293.
- SPIERS, L. (2010). Largest Geothermal Project Using Energy Piles™ in UK Completes First Phase at One New Change London. 8 p.
- LHENDUP, T.; AYE, L. e FULLER, R.J. (2014). In Situ Measurement of borehole thermal properties in Melbourne. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 73, pp. 285 – 293.
- LU, S., REN, T., GONG, Y., & HORTON, R. (2007). An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1), 8-14.
- LUND, J. W. (1999). Reconstruction of a pavement geothermal deicing system. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 20(1), 14-17.
- MARAGON, M. (2005). Elementos de Geologia. Notas de Aula, Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Transportes e Geotecnia, Juiz de Fora. 68 p.

- TEIXEIRA, M., M. (2013) *Radiação, condução e convecção*. Fonte: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/radiacao-conducao-conveccao.htm>
- MÁRTIL, I. (de 2016). *A história do preço do petróleo: bemvidos*. Acesso em 09 de 09 de 2016, disponível em: <http://www.esquerda.net/printpdf/41333>
- MIDTTOMME, K., ROALDSET, E. & AAGAARD, P.(1997) Thermal conductivity of selected claystones and mudstones from England. *Clay Minerals*. 33, 131-145
- KERSTEN, MILES S. (1949) Thermal properties of soils. Engineering experiment station. Bulletin No. 28, 21(LII) .
- MOEL, M. D., BACH, P. M., BOUAZZA, A., SINGH, R. M., & SUN, J. O. (2010). Technological advances and applications of geothermal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2683-2696.
- MOTA, N.M.B. (2003). *Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-013A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p.
- MOTTA, B., C. (2015). *Condução Térmica*. Acesso em: 11 de 09 de 2017. The extraordinary world of physics. Fonte: <http://theextraordinaryworldofphysics.blogspot.com.br/2015/05/conducao-termica-conducao-termica.html>
- NETO, L. (2015). *Estudo Experimental da Resposta Térmica de Fundações por Estacas Trocadoras de Calos em um Solo não Saturado*. São Carlos, São Paulo, Brasil: Universidade de São Paulo-EESC. 130 p.
- ONU. (2016). *A ONU e o meio ambiente*. Fonte: [nacoesunidas.org: https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/](https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/)
- OROZCO, H. C. (2016). *Validação do Ensaio TRT para o Estudo Paramétrico da Troca de Calor de uma Estaca de Energia em um Solo Tropical*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-262/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169 p.
- PASTORE, E.L. (1996). *Descrição do Perfil de Solo do Campo Experimental da UnB*. Comunicação Pessoal confirmada em setembro de 2000.
- PALUD, D., HUBBUCH, M., (2007) Measured Thermal Performances of the Energy Pile System of the Dock Midfield at Zürich Airport. *European Geothermal Congress 2007*, Unterhaching, Germany, 1-7.
- PALUD, D., (2013) A case study: The dock midfield of Zurich Airport. *Energy Geostructures – Innovation in Underground Engineering*, Laloui, L. & Donna, A., London, UK, 281-296.
- PARK, H., LEE, S.-R., & CHOI, S. Y.-C. (2012). Evaluation of thermal response and performance of PHC energy piles: Field experiments and numerical simulation. *Applied* 103 (2013) 12-24
- PHILIP, J. G. (2013) Thermal Fluids for Ground Source Heat Pumps. *Ensuring System Efficiency & Longevity*, 32 p.
- ROBERTSON, E. C. (1988). *THERMAL PROPERTIES OF ROCKS*. USGS, Reston, Virginia, 106 p.

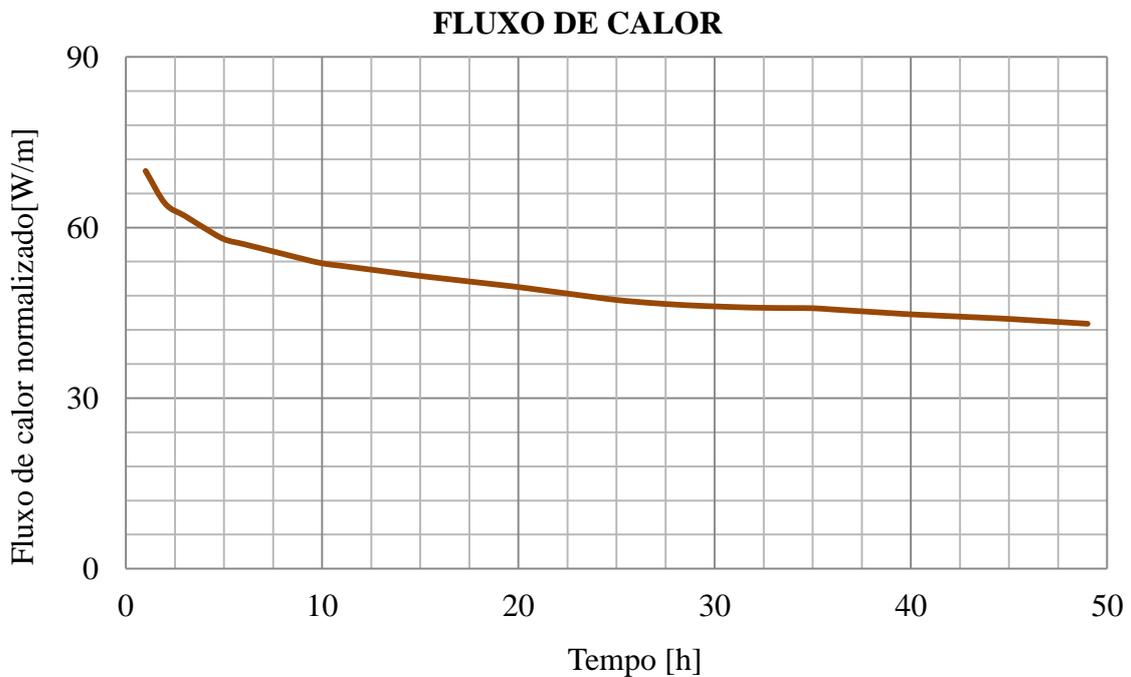
- SEPASKHAH, A.R., AND L. BOERSMA. 1979. Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:439–444.
- SILVA, R., (2017) Análise térmica pelo método de elementos finitos. Fonte: <http://www.esss.com.br/blog/2017/01/analise-termica-pelo-metodo-de-elementos-finitos/>
- SMITH, G. D. (1942). *Illinois Agr. Expt. Sta. Bull.* 490, 137-184
- SMITH, W. O. AND BYERS, H. G. (1938). The thermal conductivity of dry soils of certain of the great soil groups: *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* v. 3, pp. 13-19.
- SURYATRIYASTURI, M., & BURLON, H. M. (2012). Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3344-3354.
- TARNAWSKI, V.R., GORI, F. (2002) Enhancement of the cubic cell soil thermal conductivity model. *Int. J. Energy Res.* 26:143–157.
- WIKIPEDIA (2017). Dióxido de Titânio.
- WU, R. (2009). Energy Efficiency Technologies – Air Source Heat Pump vs. Ground Source Heat Pump. *Journal of Sustainable Development*, 2(2), 14-22.
- YASUHIRO, H., HISASHI, S., MAKOTO, N., HIDEKI, K., KIYOSHI, O., (2007) Field performance of an energy pile system for space heating. *Energy and Buildings* 39 (2007) 517–524

8. ANEXOS

ANEXO A- PADRÃO DE TROCA DE CALOR DURANTE O PERÍODO DE 50 HORAS PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES

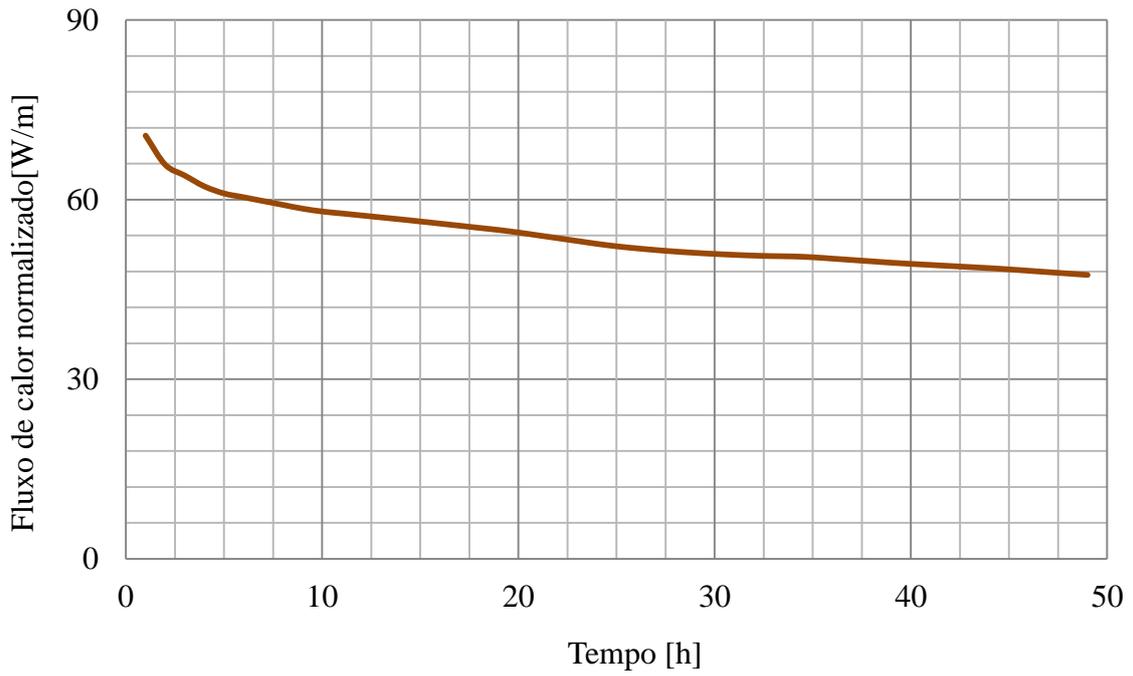


B-D03-U-W+



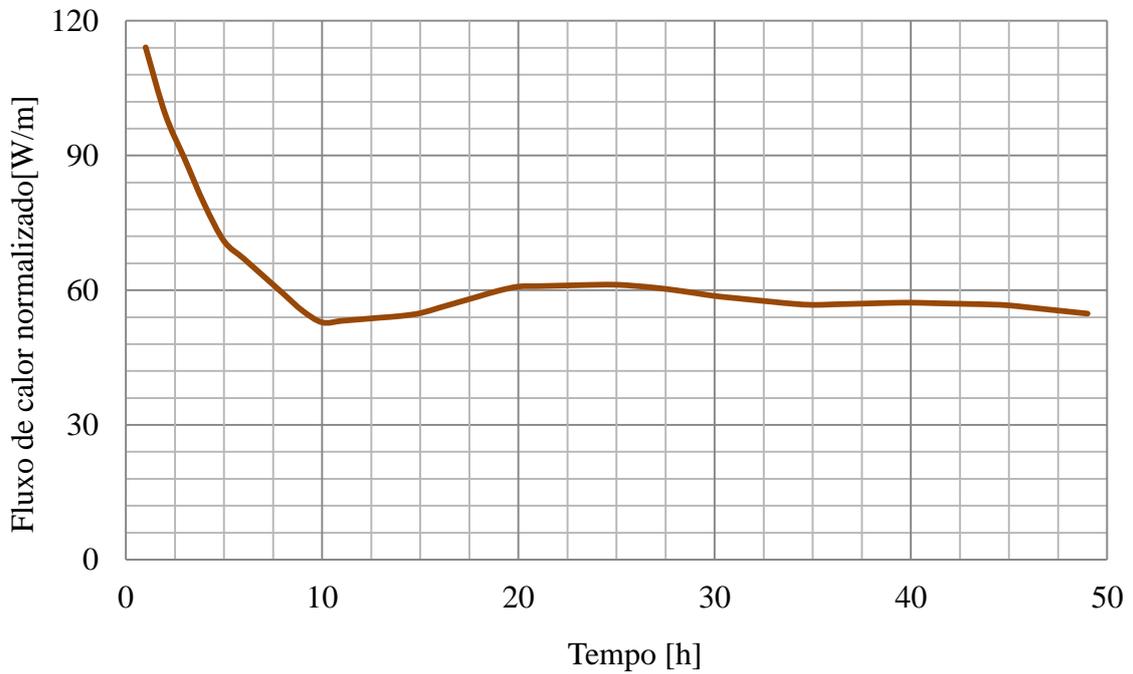
B-D04-U-W+

FLUXO DE CALOR



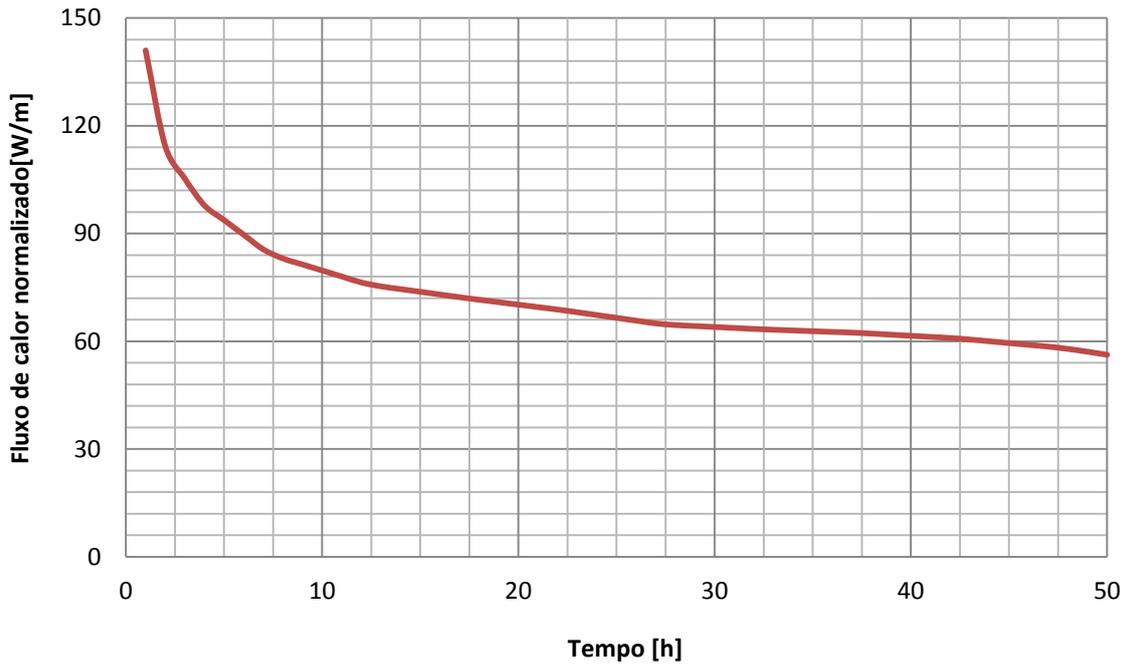
B-D06-U-W+

FLUXO DE CALOR



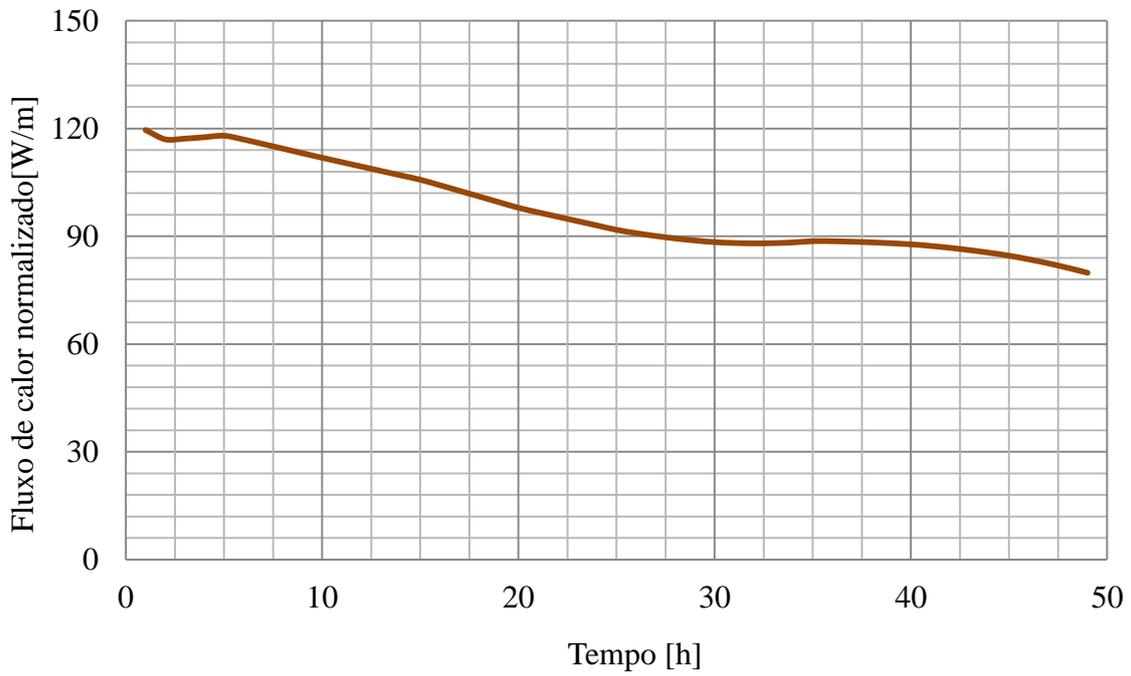
B-D03-2U-W+

FLUXO DE CALOR



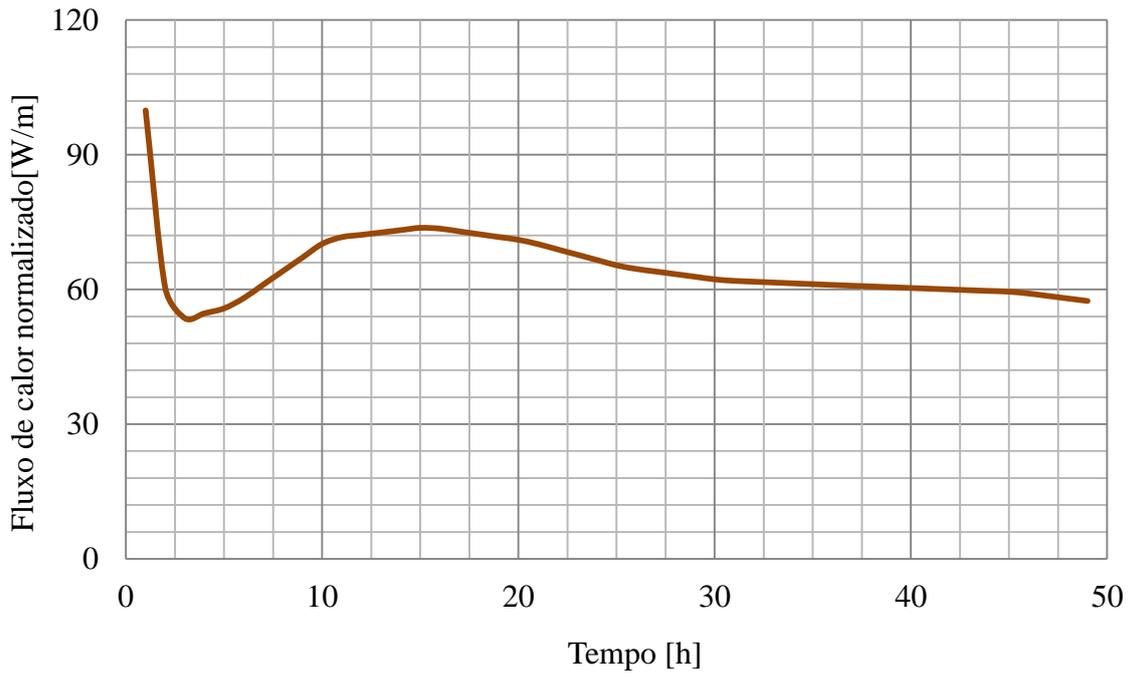
B-D04-2U-W+

FLUXO DE CALOR



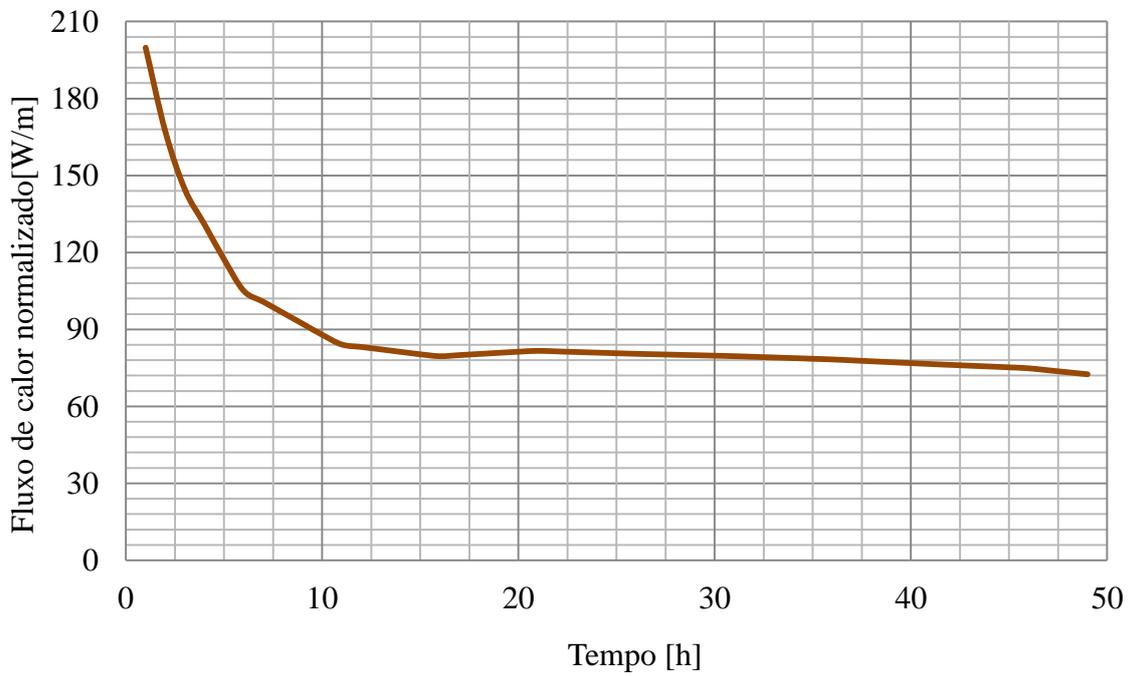
B-D06-2U-W+

FLUXO DE CALOR



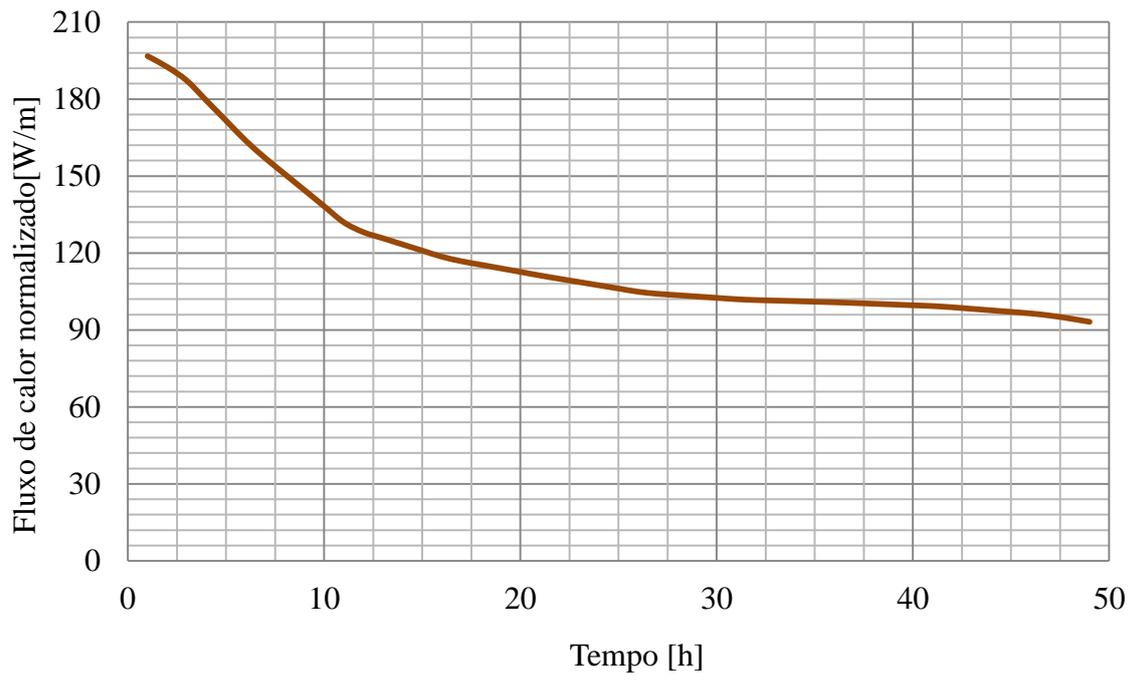
B-D03-3U-W+

FLUXO DE CALOR



B-D04-3U-W+

FLUXO DE CALOR



B-D06-3U-W+