



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Civil



Fundação Radier em Parabolóide Hiperbólico

AMANDA CARVALHO DA SILVA
(Licenciada em Engenharia Civil)

Trabalho de Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Civil na Área de Especialização de Estruturas

Orientadora:

Doutora Maria do Carmo Cachão Conde

Júri:

Presidente: Doutor Paulo Jorge Henriques Mendes

Vogais:

Licenciado, Especialista Jorge Alexandre Dias dos Reis de Barros
Doutora Maria do Carmo Cachão Conde

dezembro de 2022

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, que me deu força e coragem para vencer todos os obstáculos e dificuldades enfrentadas durante o meu mestrado.

Em especial ao meu noivo Rafael, que sempre esteve ao meu lado e que soube entender meus momentos de ausência. Obrigada meu amor pela paciência, motivação e compreensão durante esse dois anos.

À minha família, meu pai José Magno, minha mãe Divina e minhas irmãs Aline, Bianca e Beatriz, que mesmo de longe, me apoiaram e me deram força. Principalmente os meus pais que são meus maiores exemplos.

A minha orientadora Doutora Maria do Carmo Conde, obrigada paciência, dedicação, e competência demonstrada em cada detalhe do trabalho. Sem suas orientações, sugestões e correções esse trabalho não seria possível de ser realizado.

Ao Dr. Ronei Lombardi Filgueiras, apesar de não estar mais entre nós, pela oportunidade de poder desfrutar um pouco de seus conhecimentos durante a execução das fundações.

Ao Engenheiro Jésus, pela sabedoria compartilhada sobre o processo de execução das fundações paraboloide hiperbólico.

Ao Daniel, técnico de laboratório da obra, por me auxiliar e esclarecendo dúvidas sobre o solo e os ensaios de forma prestativa.

A todos, o meu muito obrigada.

RESUMO

Neste trabalho será apresentado o modelo de fundação radier em parabolóide hiperbólico, podendo ser uma alternativa estrutural para prédios residenciais, comerciais ou industriais, principalmente para solos que apresentam baixa capacidade de carga. Este método de fundação apresenta uma certa facilidade no processo construtivo, desde que sejam tomados os devidos cuidados durante o processo de execução. Por este motivo, o presente trabalho descreve as características práticas relacionadas com cada etapa construtiva da fundação, nomeadamente os cuidados que devem ser tomados com a localização, a escavação e a impermeabilização dos módulos, com a montagem das armaduras, a passagem das tubagens, a betonagem das cascas, os aterros e as demais atividades necessárias. Devido à falta de relatos de pesquisas e estudos técnicos por parte do meio académico, poucos tem o conhecimento ou já presenciaram o processo construtivo deste modelo de fundações. É este o intuito deste trabalho, apresentar um novo método que tem uma redução comprovada no consumo de materiais quando comparado com as fundações tradicionais, contribuindo tanto para a economia dos investimentos na fundação, como para a redução da extração de matéria-prima, podendo assim diminuir os impactos ambientais e consequentemente aumentar a competitividade no setor da construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação, fundação radier, fundação em casca, fundação radier em parabolóide hiperbólico, processo construtivo.

ABSTRACT

In this work the method of using the shallow foundation in hyperbolic paraboloid will be presented, which can be a structural alternative for residential, commercial or industrial buildings, especially for soils that have low load capacity. This foundation method presents a certain ease in the construction process, if care is taken during the execution process. As a result, the present work describes the related practical characteristics of the respective constructive stages of the foundation. In addition to describe the care that must be taken with the location, excavation, waterproofing of the modules, with the assembly of the reinforcements, the passage of the pipes, the concreting of the shells, the landfills and other necessary activities. Due to the lack of reports of research and technical studies by academia, few have the knowledge or have already witnessed the constructive process of this model of foundations. And that is the purpose of this work, to present a new method that has a proven reduction in inputs compared to traditional foundations, which can contribute to the economy of investments for the foundation, as well as to the reduction of the extraction of raw material, thus being able to reduce environmental impacts and consequently increase competitiveness in the construction sector.

KEYWORDS: Foundation, raft foundation, shell foundation, raft foundation in hyperbolic paraboloid, construction process

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO	2
1.2	JUSTIFICAÇÃO DA RELEVÂNCIA DO TEMA ESCOLHIDO	2
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2	FUNDAÇÕES RADIER	5
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
2.2	DEFINIÇÃO DE FUNDAÇÃO	5
2.2.1	<i>Blocos</i>	6
2.2.2	<i>Sapatas</i>	6
2.2.3	<i>Vigas de fundação</i>	7
2.2.4	<i>Radier</i>	8
2.3	CLASSIFICAÇÃO DO RADIER	9
2.3.1	<i>Material utilizado</i>	9
2.3.2	<i>Geometria</i>	13
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	18
3	FUNDAÇÃO EM CASCA	19
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
3.2	MODELOS COMUNS DE CASCAS	19
3.3	EXEMPLOS DE FUNDAÇÕES EM CASCA	21
3.3.1	<i>Cone</i>	21
3.3.2	<i>Domo invertido</i>	24
3.3.3	<i>Casca de parede fina em fundação contínua</i>	25
3.4	VANTAGENS E DESVANTAGENS NA UTILIZAÇÃO DAS FUNDAÇÕES EM CASCA	26
3.5	ESTUDOS REALIZADOS SOBRE A UTILIZAÇÃO DAS FUNDAÇÕES EM CASCA	26
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
4	FUNDAÇÃO EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO	31
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	31
4.2	SUPERFÍCIES HIPERBÓLICAS	31
4.2.1	<i>Formas das superfícies hiperbólicas</i>	32
4.3	DEFINIÇÃO DE CASCA EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO	35
4.4	MODELOS DE FUNDAÇÃO EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO	35
4.5	UTILIZAÇÃO DOS PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS EM COBERTURAS E FUNDAÇÕES	39
4.5.1	<i>A conceção estrutural de Félix Candela</i>	42

4.5.2	<i>Obras executadas</i>	43
4.6	PRINCIPAIS VANTAGENS	53
4.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5	ESTUDO DE CASO: CONDOMÍNIO RESIDENCIAL	55
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
5.2	DEFINIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	55
5.3	PROCESSO CONSTRUTIVO DA FUNDAÇÃO RADIER EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO	58
5.3.1	<i>Trabalhos de limpeza e terraplenagem</i>	58
5.4	PROCESSO DE EXECUÇÃO.....	73
5.4.1	<i>Conclusão do Edifício</i>	88
5.5	SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE	95
5.5.1	<i>Validação da argamassa e do betão estrutural</i>	96
5.5.2	<i>Inspeção durante o processo de execução do serviço</i>	98
5.6	ASPETOS RELEVANTES SOBRE EXECUÇÃO DAS FUNDAÇÕES RADIER EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO ..	102
5.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
6.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	105
6.1	CONCLUSÕES.....	105
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – FUNDAÇÃO TIPO BLOCO (LUSTOSA, 2018)	6
FIGURA 2.2 – SAPATAS ISOLADAS (LUSTOSA, 2018)	6
FIGURA 2.3 – SAPATA CORRIDA SUJEITA À AÇÃO DE UMA CARGA DISTRIBUÍDA LINEARMENTE (ENGENHARIA, 2019)	7
FIGURA 2.4 – SAPATA ASSOCIADA COMUM A DOIS PILARES (ENGENHARIA, 2019)	7
FIGURA 2.5 – VIGAS DE FUNDAÇÃO (LUSTOSA, 2018).....	7
FIGURA 2.6 – FUNDAÇÃO TIPO RADIER (LUSTOSA, 2018)	8
FIGURA 2.7 – FUNDAÇÃO EM GRELHA (BITTENCOURT, 2002).....	8
FIGURA 2.8 – RADIER EM BETÃO SIMPLES (NAKAMURA, 2021).....	9
FIGURA 2.9 – RADIER EM BETÃO ARMADO	10
FIGURA 2.10 – CABOS DE AÇO (OLIVEIRA ET AL., 2015).....	10
FIGURA 2.11 – CONFIGURAÇÃO DAS BAINHAS (OLIVEIRA ET AL., 2015).....	11
FIGURA 2.12 – APLICAÇÃO DE PRÉ-ESFORÇO POR PRÉ-TENSÃO (OLIVEIRA ET AL., 2015)	11
FIGURA 2.13 – RADIER EM BETÃO PRÉ-ESFORÇADO NUM EDIFÍCIO DA CIDADE DE FORTALEZA, NO ANO DE 1999. (CAUDURO, 2000)	12
FIGURA 2.14 – BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS (CONSTRUCAOCIVILPET, 2018)	12
FIGURA 2.15 – FUNDAÇÃO RADIER (PEREIRA, 2019)	13
FIGURA 2.16 – RADIER EM CAPITÉIS. (SOUZA, 2018).....	14
FIGURA 2.17 – SISTEMA WOOD FRAME (CONSTRUTORA CASA RÁPIDA, 2020)	14
FIGURA 2.18 – SISTEMA CONSTRUTIVO <i>STEEL FRAME</i> (PASSINI ET AL., 2014).....	15
FIGURA 2.19 – RADIER COM PEDESTAIS (SOUZA, 2018)	15
FIGURA 2.20 – RADIER NERVURADO. (SOUZA, 2018)	16
FIGURA 2.21 – RADIER EM CAIXÃO (SOUZA, 2018)	17
FIGURA 2.22 – RADIER ESTAQUEADO (SOUZA, 2018)	17
FIGURA 2.23 – RADIER FLUTUANTE. (SOUZA, 2018)	18
FIGURA 3.1 – TIPOS COMUNS DE CASCAS: A) CÚPULA; B) CASCAS HIPERBÓLICAS; C) CASCAS CILÍNDRICAS; D) PARABOLOIDE ELÍPTICO (CIRCULAR); E) PARABOLOIDE HIPERBÓLICO; F) CONÓIDES; G) DEPÓSITO DE ÁGUA FEITO DE UMA COMBINAÇÃO DE CONCHAS. (VARGHESE & SCIENCES, 2010)	20
FIGURA 3.2 – ANTENAS COM ESPIAS (GUYED MASTS), (STRINGFIXER)	22
FIGURA 3.3 – FUNDAÇÕES EM CASCA DE CONE: (A) SAPATA PARA COLUNA, (B) RADIER PARA CHAMINÉ (FIGUEIREDO, 2010)	23
FIGURA 3.4 – FUNDAÇÃO EM CASCA DE CONE INVERTIDO: (A) SAPATA PARA MASTRO, (B) RADIER PARA DEPÓSITO SUPERFICIAL (FIGUEIREDO, 2010)	23
FIGURA 3.5 – RADIER EM CONE DUPLO DOBRADO: A) SEÇÃO DIAMETRAL; B) VISTA ISOMÉTRICA (FIGUEIREDO, 2010).....	24
FIGURA 3.6 – RADIER EM DOMO ESFÉRICO INVERTIDO (FIGUEIREDO, 2010).....	25
FIGURA 3.7 – CASCA DE PAREDE FINA FUNDAÇÃO CONTÍNUA (PRONOZIN ET AL., 2019)	25

FIGURA 3.8 – A) MÉTODO DE COLINA DE FORMA LIVRE DE ISLER; B) UTILIZAÇÃO DO SOLO COMO COFRAGEM NA CONSTRUÇÃO DO MUSEU DE ARTE DE TESHIMA (FEICKERT & MUELLER, 2021)	27
FIGURA 3.9 – MODELOS DAS SAPATAS TRIANGULARES (SHALIGRAM, 2011)	30
FIGURA 4.1 – SUPERFÍCIE ANTICLÁSTICA (MOREIRA, 2008)	32
FIGURA 4.2 – MODELOS DE SUPERFÍCIES ANTICLÁSTICAS: A) CONE; B) SELA; C) PARABOLOIDE HIPERBÓLICO; D) CUME E VALE (MOREIRA, 2008)	33
FIGURA 4.3 – HIPERBOLOIDE DE UMA FOLHA (FIRMO, 2003)	33
FIGURA 4.4 – SUPERFÍCIES REGRADAS DESENVOLVÍVEIS OU DESENROLÁVEIS: CILINDRO E CONE (FIRMO, 2003)	34
FIGURA 4.5 – SUPERFÍCIE NÃO DESENVOLVÍVEIS OU EMPENADAS: PARABOLOIDE HIPERBÓLICO (FIRMO, 2003)	34
FIGURA 4.6 – GEOMETRIA DO PARABOLOIDE HIPERBÓLICO (FIGUEIREDO, 2010)	35
FIGURA 4.7 – A) PARABOLOIDE HIPERBÓLICO CÔNCAVA B) PARABOLOIDE HIPERBÓLICO CONVEXA (BRITO, 2010)	36
FIGURA 4.8 – SAPATA INDIVIDUAL EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO CÔNCAVA (FIGUEIREDO, 2010)	36
FIGURA 4.9 – SAPATA INDIVIDUAL EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO CÔNCAVA EXCÊNTRICA (FIGUEIREDO, 2010)	36
FIGURA 4.10 – SAPATAS COMBINADAS EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO CÔNCAVA (FIGUEIREDO, 2010)	37
FIGURA 4.11 – RADIER EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO CÔNCAVA (FIGUEIREDO, 2010)	37
FIGURA 4.12 – RADIER EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO CONVEXA (FIGUEIREDO, 2010)	37
FIGURA 4.13 – SAPATAS ISOLADAS CÔNCAVAS LIGADAS POR VIGAS CONTÍNUAS (FIGUEIREDO, 2010)	38
FIGURA 4.14 – PARQUE GUELL, BARCELONA, ESPANHA (HISOUR, 2016)	40
FIGURA 4.15 – ESCOLA AO LADO DA IGREJA DA SAGRADA FAMÍLIA, BARCELONA (BILLINGTON, 1992)	40
FIGURA 4.16 – HIPÓDROMO DA ZARZUELA EM MADRID (MOSQUERA, 2012)	41
FIGURA 4.17 – COBERTURA DA FÁBRICA ALFA-ROMEO EM MILÃO, GIORGIO BARONI (SOUSA, 2017)	41
FIGURA 4.18 – PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DE PARÁGUA ATRAVÉS DA ROTAÇÃO DE UMA PARCELA DE PARABOLOIDE HIPERBÓLICO (SOUSA, 2017)	42
FIGURA 4.19 – PLANOS DE CORTE UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DE UMA “PARCELA” DO PARABOLOIDE HIPERBÓLICO. (SOUSA, 2017)	43
FIGURA 4.20 – PAVILHÃO DE RAIOS CÓSMICOS, CIDADE UNIVERSITÁRIA NO MÉXICO (FANTINI, 2014)	43
FIGURA 4.21 – PARÁGUA EXPERIMENTAL, ALMACENES DE LAS ADUANAS (SOUSA, 2017)	44
FIGURA 4.22 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO EQUILÍBRIO DE FORÇAS (SOUSA, 2017)	45
FIGURA 4.23 – CONSTRUÇÃO DE LOS ALMACENES DE LAS ADUANAS NA CIDADE DO MÉXICO (FEICKERT & MUELLER, 2021)	46
FIGURA 4.24 – BOLSA DE VALORES NA CIDADE DO MÉXICO (ARCHITECTURE, 2018)	46
FIGURA 4.25 – REPRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA ASSIMÉTRICA DA BOLSA DE VALORES, REPRESENTANDO A INTERSEÇÃO DAS PORÇÕES DOS PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS (SOUSA, 2017)	47
FIGURA 4.26 – REPRESENTAÇÃO DO PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS NA IGREJA SAN ANTONIO DE LAS HUERTAS, LOCALIZADA NA COLONIA TLXAPANA, NA CIDADE DO MÉXICO (SOUSA, 2017)	47
FIGURA 4.27 – EFEITOS DE ILUMINAÇÃO SEPARANDO OS PARABOLOIDE HIPERBÓLICOS (ARCHITECTURE, 2021)	48
FIGURA 4.28 – RESTAURANTE LOS MANANTIALES EM XOCHIMILCO, CIDADE DO MÉXICO (AVENDANO, 2020)	48
FIGURA 4.29 – FÁBRICA BACARDÍ, EM CUAUTITLAN NO MÉXICO (SOUSA, 2017)	49

FIGURA 4.30 – TERMINAL DO AEROPORTO DE LAMBERT (SOUSA, 2017).....	49
FIGURA 4.31 – CATEDRAL METROPOLITANA – NOSSA SENHORA APARECIDA (GATES, SEM DATA).....	50
FIGURA 4.32 – ESTAÇÃO FERROVIÁRIA DE RIBEIRÃO PRETO (FRACALOSI, 2015).....	50
FIGURA 4.33 – TERMINAL RODOVIÁRIO DA ESTAÇÃO DE METRO VILA MARIANA (MEDRANO, 2013).....	51
FIGURA 4.34 – CROQUI DA FUNDAÇÃO E COBERTURA DO TERMINAL FERROVIÁRIO DA ESTAÇÃO DE METRO ANA ROSA (MEDRANO, 2013).....	51
FIGURA 4.35 – EXECUÇÃO DA CAMADA DE REGULARIZAÇÃO (FILGUEIRAS ET AL., 2012)	52
FIGURA 4.36 – ATERRO DAS MEMBRANAS (FILGUEIRAS ET AL., 2012).....	52
FIGURA 4.37 – PAVILHÃO INDUSTRIAL EM NOVA LIMA, MINAS GERAIS (BENKENDORF, 2015)	52
FIGURA 4.38 – CONDOMÍNIO CONTENTE I EM CORONEL FABRICIANO	53
FIGURA 4.39 – EXECUÇÃO DA FUNDAÇÃO RADIER EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO, CONDOMÍNIO CONTENTE I.	53
FIGURA 5.1 – RESIDENCIAL BURITIS EM CORONEL FABRICIANO (PREFEITURA DE CORONEL FABRICIANO, 2021)	56
FIGURA 5.2 – VISTA INTERIOR DO APARTAMENTO MODELO	56
FIGURA 5.3 – PLANTA DE IMPLANTAÇÃO	57
FIGURA 5.4 – FUNDAÇÃO RADIER EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO.....	57
FIGURA 5.5 – EXECUÇÃO DA ESTRUTURA EM BETÃO ARMADO UTILIZANDO COFRAGENS METÁLICAS	58
FIGURA 5.6 – TERRENO ONDE FOI CONSTRUÍDO O CONDOMÍNIO BURITIS	58
FIGURA 5.7 – LIMPEZA DO TERRENO COM REMOÇÃO DA CAMADA VEGETAL	59
FIGURA 5.8 – LOCALIZAÇÃO DA MANCHA DE EMPRÉSTIMO	59
FIGURA 5.9 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO SOLO PROVENIENTE DA MANCHA DE EMPRÉSTIMO.....	60
FIGURA 5.10 – EQUIPAMENTO DA CONCHA DE CASAGRANDE (MARINHO, 2020)	61
FIGURA 5.11 – DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ NA AMOSTRA 1	62
FIGURA 5.12 – ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE (LINO, SEM DATA)	63
FIGURA 5.13 – CURVA DE COMPACTAÇÃO DAS AMOSTRAS DO SOLO	64
FIGURA 5.14 – REMOÇÃO DO SOLO DA MANCHA DE EMPRÉSTIMO.....	65
FIGURA 5.15 – REMOÇÃO DO SOLO DA MANCHA DE EMPRÉSTIMO.....	65
FIGURA 5.16 – VISTA GERAL DA MANCHA DE EMPRÉSTIMO E DO LOCAL DE CONSTRUÇÃO DO ATERRO	66
FIGURA 5.17 – CONSTRUÇÃO DO ATERRO UTILIZANDO CILINDRO PÉS DE CARNEIRO	66
FIGURA 5.18 – PESAGEM DA GARRAFA DE AREIA (CANGUSSU, 2022)	67
FIGURA 5.19 – REALIZAÇÃO DA CAVIDADE NO SOLO COMPACTADO (CANGUSSU, 2022)	67
FIGURA 5.20 – PESAGEM E SECAGEM DO SOLO (CANGUSSU, 2022)	68
FIGURA 5.21 – PROCEDIMENTO COM A GARRAFA DE AREIA (CANGUSSU, 2022)	68
FIGURA 5.22 – ENSAIO COM O EXTRACTOR	69
FIGURA 5.23 – REMOÇÃO DO EXTRACTOR	69
FIGURA 5.24 – REMOÇÃO DO EXCESSO DO SOLO NO PROVETE	69
FIGURA 5.25 – REMOÇÃO DE UMA PORÇÃO DE SOLO DO PROVETE.....	70
FIGURA 5.26 – REMOÇÃO DO PROVETE DO INTERIOR DO EXTRACTOR	70
FIGURA 5.27 – PESAGEM DA PORÇÃO DE SOLO RETIRADA DO PROVETE.....	70

FIGURA 5.28 – SECAGEM DO SOLO	71
FIGURA 5.29 – CURVA DE COMPACTAÇÃO: ARGILA SILTOSA COM AREIA	71
FIGURA 5.30 – CURVA DE COMPACTAÇÃO: SILTE ROXO.....	72
FIGURA 5.31 – CURVA DE COMPACTAÇÃO: ARGILA ARENOSA.....	72
FIGURA 5.32 – PLANTA BAIXA DO RADIER.....	73
FIGURA 5.33 – CORTE DA FUNDAÇÃO EM RADIER COM PORMENOR DO PARABOLOIDE HIPERBÓLICO.....	73
FIGURA 5.34 – LOCALIZAÇÃO DOS MÓDULOS COM O AUXÍLIO DA TOPOGRAFIA.	74
FIGURA 5.35 – ESCAVAÇÃO DOS MÓDULOS COM RETROESCAVADORA.....	74
FIGURA 5.36 – ESCAVAÇÃO DOS MÓDULOS	75
FIGURA 5.37 – ESCAVAÇÃO DOS MÓDULOS	75
FIGURA 5.38 – UTILIZAÇÃO DE <i>GABARIT</i> PARA REGULARIZAÇÃO DOS MÓDULOS.....	76
FIGURA 5.39 – APLICAÇÃO DA CAMADA DE ARGAMASSA PARA REGULARIZAÇÃO.....	76
FIGURA 5.40 – REMOÇÃO DO <i>GABARIT</i> DOS MÓDULOS	77
FIGURA 5.41 – INSTALAÇÃO DAS TUBAGENS HIDROSSANITÁRIAS	77
FIGURA 5.42 – COLOCAÇÃO DE LONA PLÁSTICA COM O INTUITO DE PROTEGER AS ARMADURAS DO CONTATO COM O SOLO. 78	
FIGURA 5.43 – FORMAS DO RADIER	78
FIGURA 5.44 – PORMENOR DAS ARMADURAS DE CADA MÓDULO.....	79
FIGURA 5.45 – PORMENOR DAS ARMADURAS DAS NERVURAS E DOS ESTRIBOS	79
FIGURA 5.46 – EXECUÇÃO DA MONTAGEM DAS ARMADURAS EM CADA MÓDULO	80
FIGURA 5.47 – ARMADURAS ESPECIFICADAS NO PROJETO PARA CADA MÓDULO	80
FIGURA 5.48 – MONTAGEM DAS ARMAÇÕES NOS MÓDULOS	81
FIGURA 5.49 – BETONAGEM DOS MÓDULOS.....	81
FIGURA 5.50 – CURA QUÍMICA DOS MÓDULOS APÓS A BETONAGEM.....	82
FIGURA 5.51 – ATERRO DOS MÓDULOS	82
FIGURA 5.52 – PROCESSO DE ATERRO DOS MÓDULOS.....	83
FIGURA 5.53 – APLICAÇÃO DE CAMADA DE ARGAMASSA DE REGULARIZAÇÃO DO ATERRO	83
FIGURA 5.54 – EXECUÇÃO DA CAMADA DE ARGAMASSA DE REGULARIZAÇÃO SOBRE O ATERRO.....	84
FIGURA 5.55 – ARMADURA DA LAJE	84
FIGURA 5.56 – PORMENOR DA EMENDA DA MALHA DE ARMADURA DA LAJE.....	84
FIGURA 5.57 – ARMADURAS DO RADIER	85
FIGURA 5.58 – EXECUÇÃO DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS E DE TELECOMUNICAÇÕES	85
FIGURA 5.59 – PROJETO DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS E DE TELECOMUNICAÇÕES	86
FIGURA 5.60 – BETONAGEM DA LAJE EM RADIER	87
FIGURA 5.61 – EXECUÇÃO DA BETONAGEM DA LAJE EM RADIER.....	87
FIGURA 5.62 – EXECUÇÃO DA CURA DO BETÃO ATRAVÉS DE MANTA HÚMIDA	88
FIGURA 5.63 – EXECUÇÃO DAS MARCAÇÕES E FIXAÇÃO DOS ESPAÇADORES DAS PAREDES.....	89
FIGURA 5.64 – SERVIÇO DE MONTAGEM DAS ARMAÇÕES	89
FIGURA 5.65 – INSTALAÇÃO DOS KITS ELÉTRICOS DAS PAREDES	90

FIGURA 5.66 – INSTALAÇÃO DOS KITS ELÉTRICOS DA LAJE DO PISO ELEVADO	90
FIGURA 5.67 – PROJETO DAS COFRAGENS	91
FIGURA 5.68 – MONTAGEM DAS COFRAGENS INTERNAS	91
FIGURA 5.69 – MONTAGENS DAS COFRAGENS	92
FIGURA 5.70 – MONTAGEM DAS COFRAGENS	92
FIGURA 5.71 – EXECUÇÃO DA BETONAGEM	93
FIGURA 5.72 – EXECUÇÃO DA BETONAGEM	93
FIGURA 5.73 – DESCOFRAGEM	94
FIGURA 5.74 – DESCOFRAGEM	94
FIGURA 5.75 – EXECUÇÃO DA BETONAGEM DOS EDIFÍCIOS	95
FIGURA 5.76 – CONDOMÍNIO CONCLUÍDO (DIÁRIO DO AÇO, 2021)	95
FIGURA 5.77 – REALIZAÇÃO DO ENSAIO <i>SLUMP</i>	97
FIGURA 5.78 – FVS PARTE I – FUNDAÇÕES RADIER EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO: MODELO DE FVS 01	98
FIGURA 5.79 – FVS PARTE II – FUNDAÇÕES RADIER EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO: MODELO DE FVS 02	99
FIGURA 5.80 – FALTA DE ADENSAMENTO	99
FIGURA 5.81 – NÃO CONFORMIDADE NA PRIMEIRA ETAPA DE BETONAGEM	100
FIGURA 5.82 – ARMADURAS EM CONTATO COM O SOLO NA ZONA DAS TUBAGENS	100
FIGURA 5.83 – TUBAGENS DAS INSTALAÇÕES HIDRÁULICAS DANIFICADAS	101
FIGURA 5.84 – LOCAÇÃO ERRADA DOS ELETRODUTOS	101
FIGURA 5.85 – FALTA DE AMARRAÇÕES E ESPAÇADORES NAS ARMADURAS	102

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 5.1 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SOLOS PROVENIENTES DA MANCHA DE EMPRÉSTIMO.....	60
TABELA 5.2 – RESULTADOS DO ENSAIO DA CONCHA DE CASAGRANDE OBTIDOS NA AMOSTRA 1.....	61
TABELA 5.3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO.....	63
TABELA 5.4 – VALORES DO PESO VOLÚMICO E APARENTE SECO MÁXIMO E TEOR DE ÁGUA ÓTIMO	64
TABELA 5.5 – RESULTADOS DO ENSAIO CBR.....	64
TABELA 5.6 – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS PARA CONTROLO DA COMPACTAÇÃO.....	72

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Símbolos

Alfabeto romano

f_{ck}	<i>Resistência característica à compressão do betão</i>
GC	<i>Grau de compactação</i>
IG	<i>Índice de Grupo</i>
IP	<i>Índice de Plasticidade</i>
K	<i>curvatura gaussiana</i>
LL	<i>Limite de Liquidez</i>
LP	<i>Limite de Plasticidade</i>
w	<i>teor de água</i>
w_{opt}	<i>teor de água ótimo</i>

Alfabeto grego

γ_d	<i>peso volúmico seco</i>
$\gamma_d^{máx}$	<i>peso volúmico seco máximo</i>

Siglas

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
BA	<i>Bahia</i>
BH	<i>Belo Horizonte</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CES	<i>Construção Energética Sustentável</i>
DML	<i>Depósito de Material de Limpeza</i>
DNER	<i>Departamento Nacional de Estradas de Rodagem</i>
ENTAC	<i>Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído</i>
EUA	<i>Estados Unidos da América</i>
FVS	<i>Ficha de Verificação de Serviço</i>
HRB	<i>Highway Research Board</i>
HYPAR	<i>Fundação paraboloide hiperbólico</i>
LSF	<i>Light Steel Frame</i>
MD	<i>Hochtief, Montreal, Deconsult</i>
MG	<i>Minas Gerais</i>
MT	<i>Mato Grosso</i>
NBR	<i>Norma Brasileira</i>

PA *Pará*

RJ *Rio de Janeiro*

SP *São Paulo*

SUCS *Sistema Unificado de Classificação de Solos*

1 INTRODUÇÃO

A Engenharia de fundações consiste em uma atividade muito antiga tão antiga como a própria arte de construir, e com toda a certeza pode-se dizer que esta atividade está presente em todas as construções desenvolvidas pelo homem (Bowles, 1996). A partir da década de 30 do século passado, teorias analíticas de comportamento dos solos foram sendo desenvolvidas e aprimoradas, sendo capaz de referir, dentre outros, os trabalhos desenvolvidos por Terzaghi e Frolich (1936), Taylor (1948) e Skempton e MacDonald (1956).

Foi na década de 50 do século XX, a primeira utilização reconhecida das fundações em casca, através do arquiteto Felix Candela (1955) sendo considerado o pioneiro dos fundamentos da utilização das cascas. Candela preocupava-se com o estilo e a elegância e este foi seu incentivo para explorar a utilização das cascas como elemento estrutural. Essa motivação levou a uma extensa exploração de formas estruturais em forma de concha, muitas das quais ainda existem até hoje. Pode utilizar-se como exemplo os paraboloides hiperbólicos, também conhecidos por bases de concha “hypar”, que Candela imaginou e utilizou repetidamente no solo mexicano. Posteriormente, a fundação em parabolóide hiperbólico foi adequada para utilização em altos edifícios e ajustada para estruturas de tanques de água em solo de baixa capacidade resistente. Alguns países como os Estados Unidos, Rússia, Índia, México e entre outros, utilizaram as fundações em casca em solos de baixa capacidade resistente.

As cascas, em função da sua tipologia curva, contêm maior rigidez e resistência em comparação com os elementos estruturais de superfície plana, pois um elemento plano sofre flexão quando sujeito a cargas verticais. De acordo com T.M.Prateek e Dr. Vijay R. Rode (2020), a casca pode equilibrar um carregamento transversal aplicado à custa das tensões da membrana, com ações de flexão minimizadas.

As fundações planas, para resistir às solicitações da superestrutura desenvolvem esforços de corte e flexão. Já em uma fundação em casca os esforços solicitantes agem no próprio plano da superfície, seja como esforço normal de compressão ou corte. Esta diferença no comportamento estrutural conduz ao aperfeiçoamento no dimensionamento das estruturas em formato de casca, visto que o material estará sujeito sobretudo a esforços normais de compressão. É mais evidente a economia dos materiais nas fundações em casca quando executadas em betão estrutural, devido ao nível de desempenho sobre as

ações de esforços de compressão, proporcionando assim de forma inquestionável uma redução no consumo de material. Este modelo de fundação, quando executado da forma correta, apresenta ainda a vantagem de poder ser utilizado na maioria dos diferentes tipos de solos. Segundo Matheus Vinicius Santos (2016), as fundações do tipo radier distribuem de forma eficaz as cargas da superestrutura aos solos que possuem baixa capacidade resistente.

As evidentes vantagens económicas resultantes da utilização de estruturas de fundação em forma de cascas são comprovadas em diversos relatos de aplicações em várias partes do mundo (Kurian, 2006). No Brasil, o Dr. Ronei Lombardi Filgueiras foi o percurso desta arte, realizando diversas obras utilizando as fundações radier em parabolóide hiperbólico (Filgueiras et al., 2012).

Embora a utilização de fundações superficiais do tipo radier em forma de parabolóide hiperbólico apresente vantagens, nomeadamente devido à particularidade geométrica que conduz a soluções económicas em termos de consumo dos materiais utilizados na execução (aço e betão), esta técnica construtiva encontra-se pouco difundida meio técnico e tem sido pouco estudada no meio académico.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo o estudo de fundações em casca, utilizando a geometria parabolóide hiperbólico como um modelo de fundação superficial em radier, empregue como alternativa na execução da fundação de um condomínio residencial cujo solo de fundação apresenta baixa capacidade de suporte.

1.2 Justificação da relevância do tema escolhido

O tema proposto neste trabalho trata da aplicação do sistema de fundação radier em parabolóide hiperbólico, em betão armado, como solução estrutural da fundação de um edifício residencial. Esta técnica apresenta uma redução comprovada nos materiais (betão e aço) quando comparado com as fundações tradicionais, tendo como consequência uma redução de custos na execução, mesmo considerando a complexidade associada aos trabalhos de escavação. Segundo Feickert & Muelle (2021) a utilização das fundações em casca, proporciona um ganho de 72% quando comparado com uma fundação rasa tradicional e de 55% quando comprando com as fundações em estaca.

Este trabalho apresenta grande carácter inovador, e pretende contribuir para o estudo e divulgação de conhecimentos específicos do comportamento estrutural deste tipo de fundação, colmatando a escassez de informação tanto no meio técnico, principalmente para os profissionais responsáveis pelo dimensionamento (geotécnico e estrutural) de obras industriais e residenciais, como no meio académico. No Brasil, embora a execução de fundações radier em parabolóide hiperbólico seja uma técnica utilizada na fundação de edifícios desde o início dos anos 80 do século passado, poucos têm o conhecimento ou já presenciaram o processo construtivo deste modelo de fundações.

O modelo de fundação em casca não tem despertado interesse pelos profissionais no ramo de engenharia aspeto que poderá ser explicado pelo facto de no passado, as técnicas de utilização das cascas, como solução arquitetónica na construção de coberturas, envolvia, em geral, custos elevados, necessidade de mão de obra especializada na sua execução e complexidade do cálculo estrutural, sendo somente possível para poucos especialistas na época, pois era necessário compreender o ciclo completo, a saber, a compreensão do projeto, o cálculo estrutural e a execução da construção.

De acordo com Ribeiro et al. (2020), quando numa obra, várias soluções são possíveis, é importante refletir sobre as diversas alternativas e escolher aquela que promove um custo mais reduzido, assim como, um menor tempo de execução. É este também intuito deste trabalho, apresentar uma alternativa estrutural para fundações de prédios residenciais, industriais ou comerciais, em que o solo apresenta baixa capacidade resistente, e descrevendo as características práticas e os cuidados que devem ser tomados durante as fases construtivas.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos. No primeiro capítulo é a introdução do estudo, apresentando a justificação da relevância do tema escolhido e os objetivos pretendidos.

No capítulo 2 são apresentadas as definições das fundações em radier e as suas respetivas classificações. Além de identificar os tipos de radier existentes, sendo denominado o solo adequado para cada modelo, são também descritas as principais técnicas utilizadas e indicado qual modelo de fundação radier mais apropriado para cada tipo de construção.

No capítulo 3 é definido o que são as fundações em casca, sendo apresentada a variedade de cascas que podem ser utilizadas em vários métodos construtivos de coberturas e fundações. São indicadas as vantagens e desvantagens da utilização das fundações em casca. São ainda descritos alguns estudos realizados por diversos investigadores e académicos sobre a utilização das cascas na execução de fundações.

O capítulo 4 aborda o modelo de fundações paraboloide hiperbólico, sendo apresentado as características no intuito de compreender o comportamento estrutural deste modelo de casca. Além de demonstrar os modelos de fundação paraboloide hiperbólico existentes são apresentados diversos exemplos na construção civil onde foi utilizado este modelo de casca.

O capítulo 5 apresenta o caso de estudo relativo ao projeto de construção de um condomínio residencial que utilizou o modelo de fundações radier em paraboloide hiperbólico, apontando assim, as características práticas relacionadas com as etapas construtivas e os cuidados que devem ser tomados durante a execução. Além de apresentar o sistema de gestão de qualidade utilizada durante todas as etapas de execução das fundações.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões obtidas através da realização deste trabalho e as perspetivas de trabalho futuro.

2 FUNDAÇÕES RADIER

2.1 Considerações iniciais

No presente capítulo são apresentadas as definições das fundações radier e suas respectivas classificações. Além de identificar os tipos de radier existentes, sendo denominado o solo adequado para cada modelo, são também descritas as principais técnicas utilizadas e indicado qual modelo de fundação radier mais apropriado para cada tipo de construção.

2.2 Definição de Fundação

De acordo com Caputo (1988) o estudo de uma fundação envolve principalmente duas partes essenciais distintas, o estudo do terreno e o cálculo das cargas atuantes sobre a fundação.

Velloso & Lopes (2009) classificam as fundações em dois grandes grupos : fundações profundas e fundações superficiais. É também esta a classificação apresentada pela ABNT NBR 6122 (2019) que, para cada grupo, apresenta a seguinte descrição:

- a) Fundações profundas: transmitem a carga ao terreno através da base (resistência de ponta), da superfície lateral (resistência lateral) ou através da combinação das duas, sendo que a sua base ou ponta esteja assente a uma profundidade maior que oito vezes a menor dimensão da fundação em planta, com um mínimo de 3,0 m. Neste tipo de fundação estão incluídos os poços e as estacas.
- b) Fundações rasas (diretas ou superficiais): quando a base está assente a uma profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão, em planta, da fundação, recebendo aí as tensões distribuídas que equilibram a carga aplicada. Caso a fundação não tenha a mesma profundidade em todo o perímetro, adota-se a menor profundidade.

Ainda conforme a ABNT NBR 6122 (2019), as fundações superficiais podem ser divididas nos seguintes tipos: blocos, sapatas, vigas de fundação e radier.

2.2.1 BLOCOS

Os blocos são elementos que têm grande rigidez, sendo executados em betão ciclópico ou betão simples, portanto, não são armados, sendo executadas de modo que as tensões de tração desenvolvidas resistam somente pelo betão (Figura 2.1);

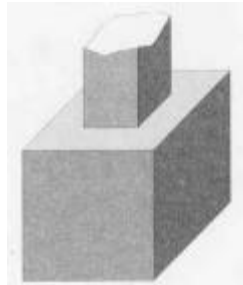


Figura 2.1 – Fundação tipo bloco (Lustosa, 2018)

2.2.2 SAPATAS

As sapatas são elementos de betão armado dimensionados de forma que as tensões de tração geradas não sejam resistidas pelo betão, mas sim pela utilização de armadura. As sapatas dividem-se em isoladas, corridas e associadas.

As sapatas isoladas são elementos de fundação que se destinam a acomodar um pilar, conforme ilustra a Figura 2.2.

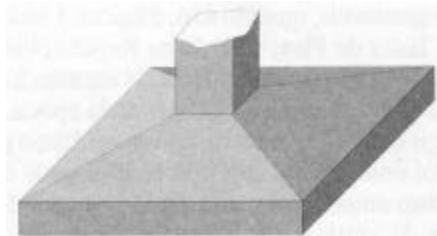


Figura 2.2 – Sapatas isoladas (Lustosa, 2018)

As sapatas corridas podem ser submetidas à ação de uma carga distribuída linearmente ou de três ou mais pilares ao longo de um mesmo alinhamento, desde que representem menos de 70 % das cargas da estrutura (ABNT NBR 6122, 2019). A Figura 2.3 mostra o exemplo de uma sapata corrida sujeita à ação de uma carga distribuída linearmente.

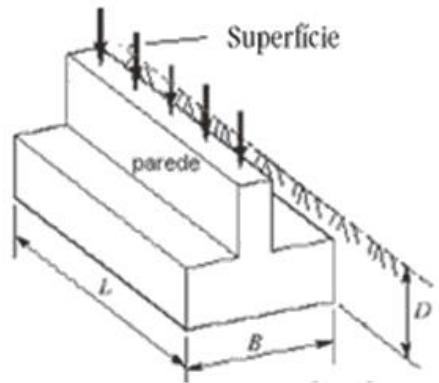


Figura 2.3 – Sapata corrida sujeita à ação de uma carga distribuída linearmente (Engenharia, 2019)

As sapatas associadas são comuns a dois pilares. Segundo a ABNT NBR 6122 (2019) esta denominação também se aplica a sapatas comuns a mais do que dois pilares, quando não alinhados e desde que representem menos de 70 % das cargas da estrutura. A Figura 2.4 mostra uma sapata associada comum a dois pilares.

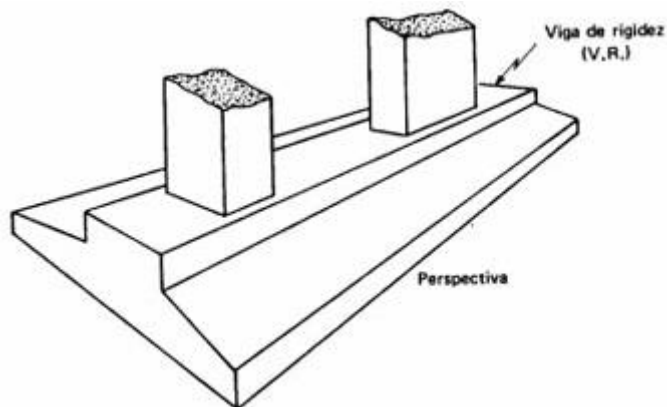


Figura 2.4 – Sapata associada comum a dois pilares (Engenharia, 2019)

2.2.3 VIGAS DE FUNDAÇÃO

As vigas de fundação são elementos comuns a vários pilares, conforme Figura 2.5, sendo que os centros gravitacionais sejam situados no mesmo alinhamento.

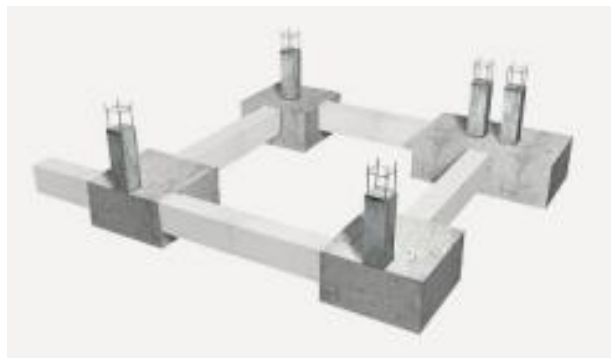


Figura 2.5 – Vigas de fundação (Lustosa, 2018)

2.2.4 RADIER

A NBR 6122 (ABNT NBR 6122, 2019) define radier como um elemento de fundação superficial dotado de rigidez para receber e distribuir mais do que 70 % das cargas da estrutura (Figura 2.6).



Figura 2.6 – Fundação tipo radier (Lustosa, 2018)

A norma do *American Concrete Institute (ACI) 360R-06 (2006)* define radier como uma laje apoiada no solo, sendo sua principal função sustentar as cargas provenientes da superestrutura através das tensões admissíveis do solo. As lajes em radier são elementos de fundações rasas, sendo caracterizada basicamente como uma laje pré-esforçada ou maciça de betão armado.

Conforme Singer (2014) o radier pode possuir espessura variável ou uniforme, e conter elementos como vigas e nervuras que contribuem para aumentar a rigidez, estes podem ser de betão simples, betão reforçado ou betão pré-esforçado.

Segundo Dória (2007) a fundação em radier é normalmente utilizada em solo de baixa capacidade resistente, procurando uniformizar os assentamentos, sendo que a fundação em radier pode também ser indicada quando o nível freático se situa próximo da superfície. Ainda de acordo com Dória (2007), antes de iniciar a execução da fundação, deve ser levado em conta os fatores que podem vir a intervir no desempenho do radier, como o tipo de solo, a qualidade do betão, o espaçamento das juntas e o acabamento da superfície.

A fundação do tipo radier pode ser substituída por uma fundação em grelha. Nesta tipologia a laje maciça é substituída por uma grelha constituída por elementos do tipo barra, como se pode observar Figura 2.7, onde cada barra corresponde a uma determinada faixa da laje, de acordo com a abertura escolhida para a malha.

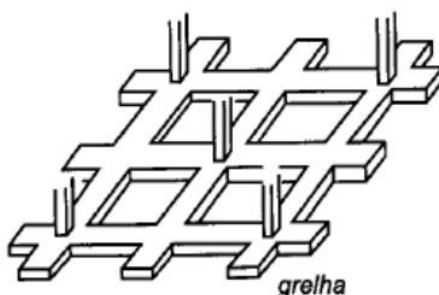


Figura 2.7 – Fundação em grelha (Bittencourt, 2002)

2.3 Classificação do radier

As fundações em radier podem ser classificadas quanto ao tipo de material utilizado na sua execução e também quanto à sua geometria.

2.3.1 MATERIAL UTILIZADO

Na execução da fundação em radier pode ser utilizado betão simples, betão armado, betão pré-esforçado e betão com fibras.

Radier em betão simples

A fundação radier em betão simples não possui qualquer tipo de armadura ou possui uma quantidade de armadura inferior ao mínimo exigido para o betão armado. Estas fundações são dimensionadas de forma que as tensões de tração produzidas são resistidas somente pelo betão. Na Figura 2.8 está sendo apresentado um radier em betão simples.



Figura 2.8 – Radier em betão simples (Nakamura, 2021)

Radier em betão armado

Na fundação radier em betão armado a laje é composta por armaduras de aço envolvidas por betão. Esta é a técnica mais utilizada e a mais comum em pequenas construções. A Figura 2.9 mostra a execução de um radier em betão armado onde é visível a malha das armaduras que posteriormente será envolvida pelo betão.

Segundo Dória (2007), a resistência à compressão do betão tem grande influência na definição da espessura do radier e nas propriedades das superfícies acabadas, assim como influência nas deformações

em razão da variação da temperatura e retração. É essencial para o desempenho estrutural em betão armado a determinação da sua resistência.



Figura 2.9 – Radier em betão armado

Radier em betão pré-esforçado

Conforme Albino (2011) no betão pré-esforçado as tensões internas (forças) são induzidas através de cabos de aço, conforme representado na Figura 2.10. O betão pré-esforçado pode ser executado segundo dois processos: pré-esforço por pós-tensão e pré-esforço por pré-tensão.

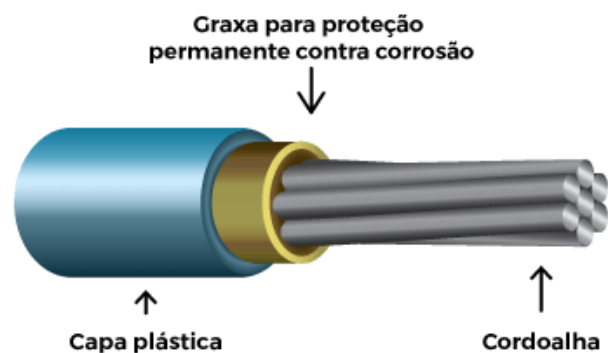


Figura 2.10 – Cabos de aço (Oliveira et al., 2015)

O processo que utiliza o pré-esforço por pós-tensão a armadura é tensionada depois da betonagem, quando o betão adquiriu a resistência necessária. Nesta circunstância, são utilizados como apoio partes do próprio elemento estrutural, produzindo, em seguida, aderência com o betão de modo permanente, através da injeção das bainhas. Na Figura 2.11, está representada a configuração das bainhas.

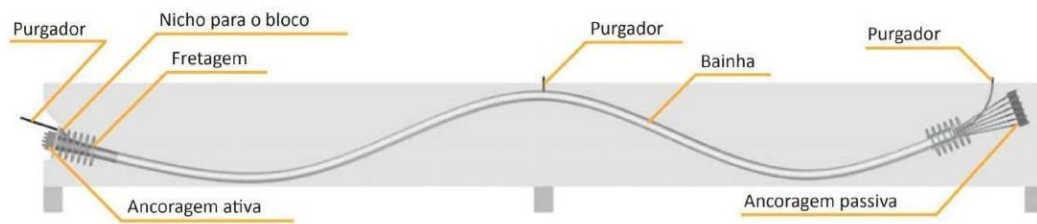


Figura 2.11 – Configuração das bainhas (Oliveira et al., 2015)

No processo de pré-esforço por pré-tensão a armadura é tensionada antes da betonagem, sendo utilizados apoios independentes do elemento estrutural. A Figura 2.12, mostra o esquema de pré-tensão utilizando cabeceira para a aplicação de carga. Após o endurecimento da mistura, a ligação entre a armadura de pré-esforço e os apoios é destruída, o que permite à armadura retornar ao diâmetro sem carga. O aumento do diâmetro mobiliza atrito no betão que consequentemente favorece a aderência da ancoragem ao betão.

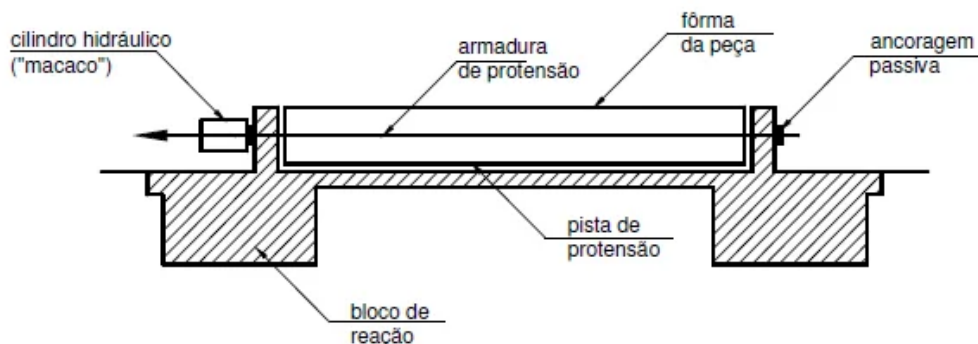


Figura 2.12 – Aplicação de Pré-esforço por pré-tensão (Oliveira et al., 2015)

No Brasil a utilização de cabos com graxa/cera envolvidos por bainha de plástico, conforme representado na Figura 2.10, são usadas na tecnologia de pré-esforço em radier e foi utilizada pela primeira vez na construção dum edifício na cidade de Fortaleza, no ano de 1999, (Figura 2.13) após o seminário que aconteceu em Embu/SP em julho de 1996 para atualização tecnológica em pré-esforço (Cauduro, 2000).

De acordo com Dória (2007) o sistema de cabos e seus acessórios requer um trabalho muito simples, facilitando assim sua execução.

Conforme Hanai (2000), o betão pré-esforçado por pós-tensão contém as seguintes vantagens em comparação com o radier em betão armado: redução de fissuração; menor espessura da laje; maior impermeabilização e rapidez na construção.

A utilização de cabos com graxa/cera, tem vantagens em comparação com o sistema de pré-esforço que utilizam bainhas metálicas, sendo apresentado os seguintes motivos: simplicidade na montagem dos cabos, redução das perdas por atrito, não precisa de preenchimento das bainhas, pode ser mais rápido na construção e geralmente é mais barato quando comparado com os gastos na execução do radier em betão armado.



Figura 2.13 – Radier em betão pré-esforçado num edifício da cidade de Fortaleza, no ano de 1999. (Cauduro, 2000)

Radier em betão reforçado com fibras

O betão reforçado com fibras, como se pode observar Figura 2.14, representa eficiência e agilidade no processo de betonagem. É um material caracterizado por apresentar uma matriz cementícia e fibras distribuídas em toda a sua matriz. As fibras podem ser metálicas (aço), sintéticas (polímeros), minerais (carbono, vidro) ou naturais.

Uma característica predominante está no reforço tridimensional que resulta da distribuição das fibras em toda a matriz do betão, criando um efeito de uma rede com milhares de fibras. A utilização de fibras de aço substitui os reforços convencionais, tais como malhas soldadas.

A utilização de fibras de aço proporciona benefícios estruturais ao betão. Garante, nomeadamente, o aumento da resistência à fadiga, da tenacidade e ao impacto. Além de proporcionar um maior controle da fissuração e melhoria da ductilidade.



Figura 2.14 – Betão reforçado com fibras (CONSTRUCAOCIVILPET, 2018)

2.3.2 GEOMETRIA

Em termos de geometria, as fundações em radier podem dividir-se em: radier simples, radier com capitéis, radier com pedestais, radier nervurado, radier em caixão, radier estaqueado e radier flutuante.

Radier simples

Radier simples é uma fundação rasa que se assemelha a uma laje ou placa que abrange toda a área da construção. O radier tem contato direto com o terreno recebendo as cargas dos pilares e paredes, que descarrega sobre o solo.

O radier pode ser tanto de betão armado como de betão pré-esforçado. A escolha é definida de acordo com as características definidas de cada projeto. Normalmente são utilizadas para obras de pequeno porte, conforme pode ser observado na Figura 2.15.



Figura 2.15 – Fundação radier (Pereira, 2019)

Radier com capitéis

Os radiers com capitéis, como ilustra a Figura 2.16, apresentam aumento da espessura sob os pilares. Este tipo de radier é executado em obras residenciais, quando os pilares nascem sobre o radier, e, por esse motivo, é necessário aumentar a rigidez nessa região.

O solo adequado para este tipo de fundação seria um solo estável, isto é, um solo não expansivo. A dimensão dos capitéis será influenciada pelas cargas aplicadas pelos pilares, assim como os assentamentos admissíveis.

A utilização do sistema de fundação em radier com capitéis é compatível com o sistema de *Wood Frame* e *Steel Frame*. E as principais técnicas utilizadas são: betão armado, betão pré-esforçado e betão com fibras.

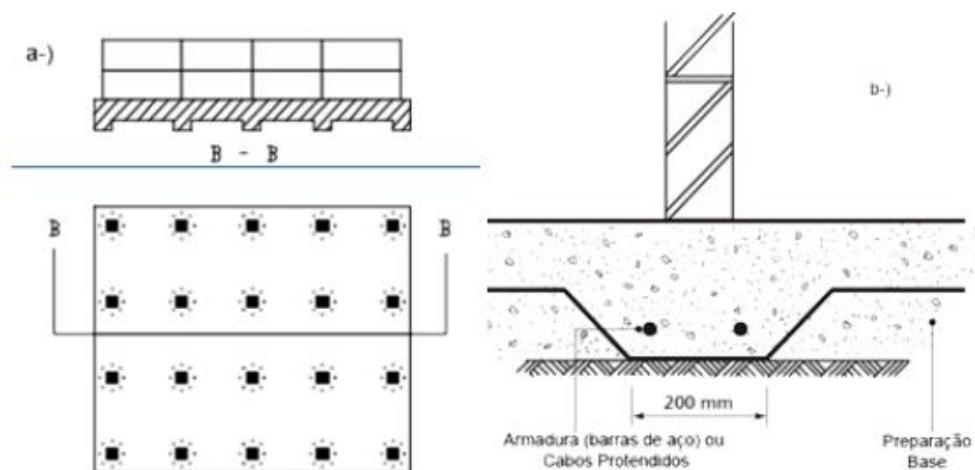


Figura 2.16 – Radier em capitéis. (Souza, 2018)

Conforme Molina & Junior (2010), o método *woof frame* para a construção de casas, consiste em um sistema construtivo industrializado e durável. Este sistema é executado com perfis de madeira tratada que forma painéis de pisos, paredes e cobertura, que podem ser revestidos com outros materiais, com o objetivo de aumentar os confortos acústicos e térmicos, além de proteger contra o fogo e as intempéries. Nos EUA, 95% das casas construídas utilizam este método. O sistema de *wood frame*, ilustrado na Figura 2.17, permite a construção de casas com até cinco pavimentos.



Figura 2.17 – Sistema Wood Frame (Construtora casa rápida, 2020)

A Figura 2.18 mostra o sistema construtivo *Light Steel Framing*. Este sistema é também conhecido como construção LSF ou estrutura em aço leve. Passini et al., (2014) considera esta método como fazendo parte do sistema CES (Construção Energética Sustentável).

Este sistema apresenta como principais vantagens a viabilidade nos cálculos, acarretando uma maior precisão na quantidade de materiais a ser utilizado, o tempo de execução e a mão de obra necessária, obtendo como resultado uma redução nos custos.



Figura 2.18 – Sistema construtivo *Steel Frame* (Passini et al., 2014)

Radier com pedestais

Os radiers com pedestais, conforme Figura 2.19, são executados em edifícios residenciais de vários pisos. Tal como na fundação em radier com capitéis, este sistema é também utilizado quando os pilares nascem sobre o radier, porém, os pilares devem conter uma dimensão maior na parte inferior, podendo assim, distribuir os carregamentos pontuais de modo mais uniforme.

Na utilização deste modelo de radier, não há recomendação em relação do tipo de solo, desde que respeite a tensão admissível do solo. No entanto, alguns pontos carecem de atenção, como por exemplo, a existência de solos colapsíveis, uma vez que, em geral, a tensão no solo proveniente do radier pode ser considerável. Outro aspecto a ser considerado, é o nível da água no perfil estratigráfico, que pode ocasionar uma laje de subpressão.

Este método é compatível com superestruturas em pilares de betão armado. Os radiers normalmente são executados em betão armado ou pré-esforçado.

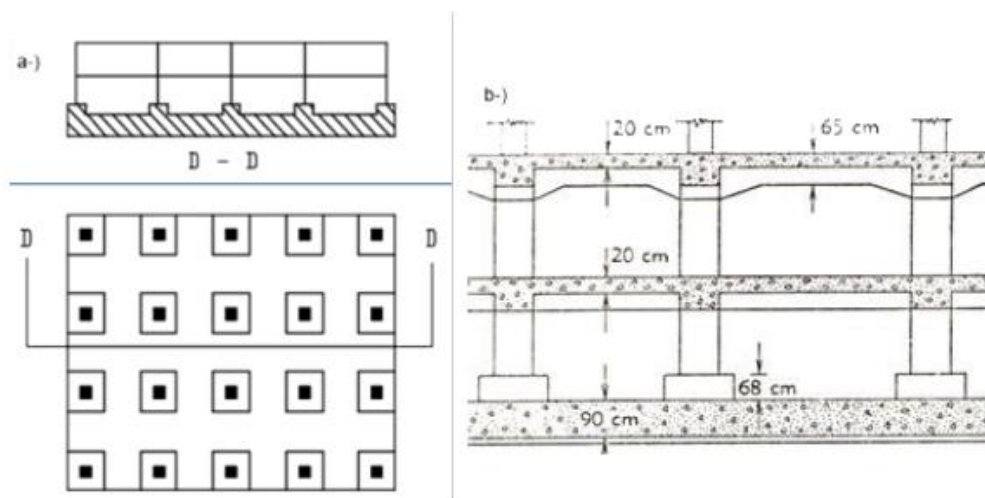


Figura 2.19 – Radier com pedestais (Souza, 2018)

Radier nervurado

Os radiers nervurados, representados na Figura 2.20, são normalmente executados em edifícios residenciais com vários pisos, sendo que a fundação precisa de rigidez para prevenir deformações e controlar os assentamentos. Este modelo de radier pode ser utilizado em solos expansivos, não expansivos e colapsíveis.

A fundação em radier nervurado é compatível com superestruturas em *Steel Frame*, *Wood Frame* e alvenaria estrutural. Os radiers nervurados são normalmente executados em betão armado ou pré-esforçado.

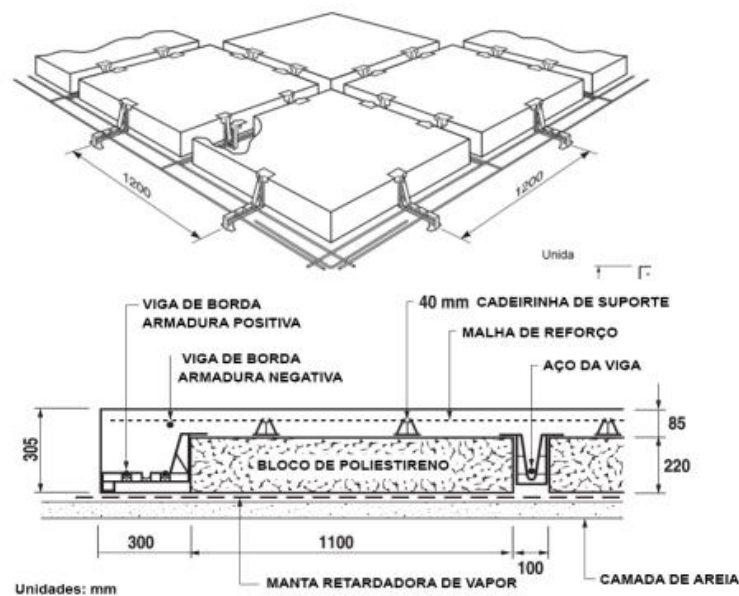


Figura 2.20 – Radier nervurado. (Souza, 2018)

Radier em caixão

O radier em caixão, representado na Figura 2.21, é executado em edifícios residenciais de vários pisos, onde elevado carregamento proveniente da superestrutura é transferido para o solo.

Recomenda-se a realização deste tipo de radier em solo de boa capacidade resistente (acima de 3.5 kgf/cm^2). Porém, deve salientar-se alguns aspectos, como por exemplo, o aparecimento de solos colapsíveis, em estratos do perfil estratigráfico uma vez que a tensão no solo originada pelo radier costuma ser considerável. Outro aspecto que deve ser considerado, é o nível da água no perfil estratigráfico, podendo ocasionar uma laje de subpressão, contudo este modelo de radier possui grande rigidez, podendo assim, minimizar os efeitos negativos.

Este método é compatível com superestruturas em *Steel Frame*, *Wood Frame*, alvenaria estrutural, e de betão armado. Os radiers nervurados são normalmente executados em betão armado ou pré-esforçado.

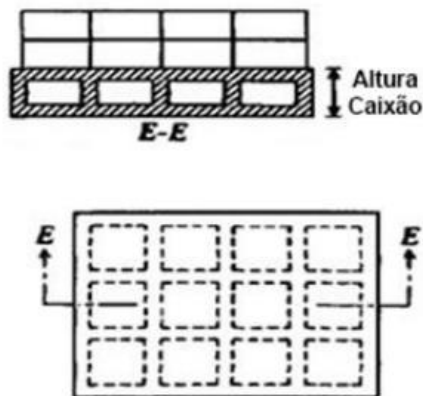


Figura 2.21 – Radier em caixão (Souza, 2018)

Radier estaqueado

Este modelo é indicado para situações que apresente um solo de baixa capacidade resistente. A introdução de algumas estacas sob o radier, conforme Figura 2.22, tem como o propósito reduzir os valores dos assentamentos, até chegar a um nível aceitável. (Rio, 1994).

De acordo com o exposto, será menor o número de estacas utilizadas, provavelmente três a quatro vezes menos do que a alternativa de fundação com estacas convencional, ou seja, a redução é na ordem de 65 a 75% no número de estacas. (Rio, 1994).

Os radier estaqueados são normalmente executados em obras industriais e residenciais, podendo também ser utilizado em solos expansivos, não expansivos e até mesmo colapsíveis.

A fundação em radier estaqueado é compatível com sistema em betão armado e alvenaria estrutural. Os radiers estaqueados, são normalmente executados em betão simples, betão armado, betão com fibras ou betão pré-esforçado.

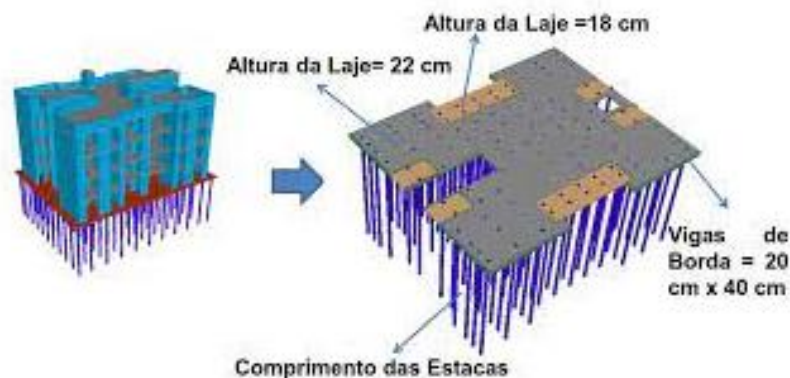


Figura 2.22 – Radier estaqueado (Souza, 2018)

Radier flutuante

O radier flutuante, conforme Figura 2.23, é executado em obras residenciais de médio e pequeno porte, normalmente até 10 pisos, sendo necessário para auxiliar na geometria do radier a execução de pisos enterrados.

O radier pode ser executado em solos expansivos e não expansivos, porém normalmente é mais utilizado em locais onde o solo apresenta baixa capacidade resistente.

Este método é compatível com superestruturas em *Steel Frame*, alvenaria estrutural, *Wood Frame* e de betão armado. Os raders normalmente são executados em betão armado, betão com fibras ou betão pré-esforçado.

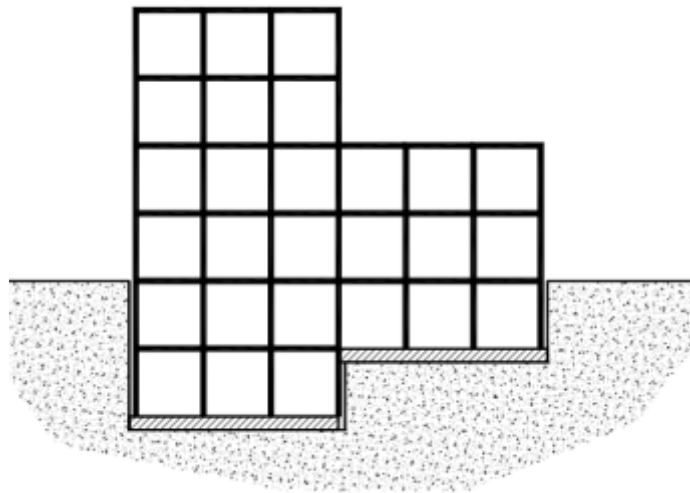


Figura 2.23 – Radier flutuante. (Souza, 2018)

2.4 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as fundações radier, tendo como ponto inicial a definição de fundação, sendo classificadas em dois grandes grupos: fundações profundas e fundações rasas. Em sequência, de acordo com a ABNT NBR 6122 (2019), foram divididos e explicados os diferentes tipos de fundações rasas existentes, como: blocos, sapatas, vigas de fundação e radier. Como ponto essencial deste trabalho, foi realizada a classificação das fundações em radier: (i) segundo os diferentes tipos de materiais utilizados na execução, consistindo em betão simples, betão armado, betão pré-esforçado e betão com fibras; (ii) segundo as diferentes geometrias existentes nas fundações em radier, sendo: radier simples, radier com capités, radier com pedestais, radier nervurado, radier em caixão, radier estaqueado e radier flutuante. Foi também indicado o tipo de solo mais adequado para cada modelo, as principais técnicas utilizadas e qual o modelo de fundação radier mais apropriado a cada tipo de construção.

3 FUNDAÇÃO EM CASCA

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é definido o que são as fundações em casca, sendo apresentada a variedade de cascas que podem ser utilizadas em vários métodos construtivos de coberturas e fundações. São indicadas as vantagens e desvantagens da utilização das fundações em casca. São ainda descritos alguns estudos realizados por diversos investigadores e académicos sobre a utilização das cascas na execução de fundações.

3.2 Modelos comuns de cascas

As fundações em casca são apontadas como económicas em comparação com outros modelos fundações. Se forem utilizadas vigas e lajes, os momentos fletores e os esforços por corte serão grandes e conseqüentemente as secções também serão grandes, devido a tais situações requerem a utilização de fundações de grande porte quando ocorre baixa capacidade de carga no solo. As cascas agem principalmente em compressão ou tração, sendo mais eficientes e económicas nesta situação. Em fundações menores, a quantidade de material necessário para uma casca sustentar uma carga será significativamente menor quando comparado com elementos de flexão, como lajes e vigas. Porém, o trabalho que envolve a construção das cascas (execução da superfície da casca, execução dos moldes, supervisão, fabricação do aço, etc.) será maior, em comparação com as fundações tradicionais.

Uma breve explicação dos modelos comuns de cascas utilizadas na Engenharia Civil, conforme Figura 3.1.

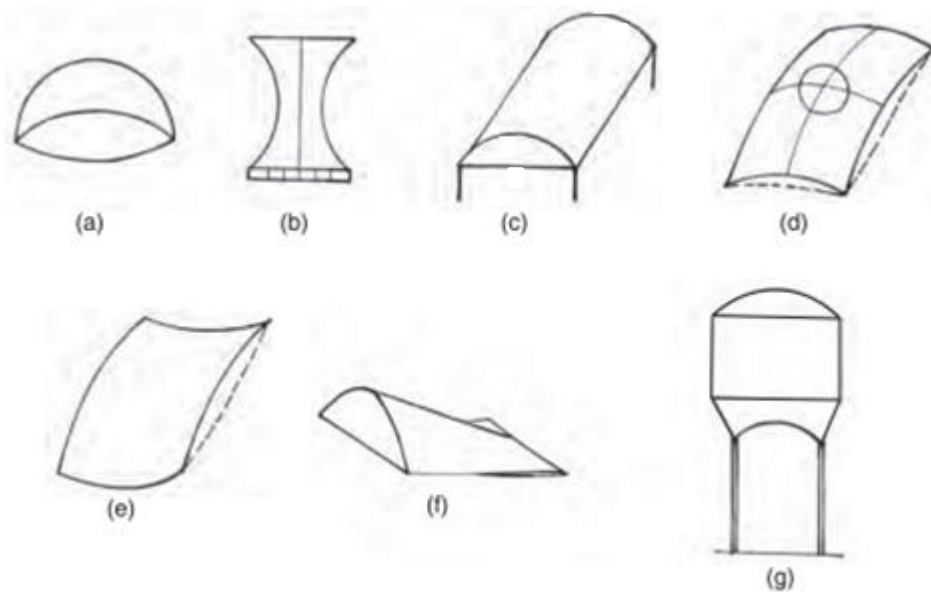


Figura 3.1 – Tipos comuns de cascas: a) Cúpula; b) Cascas hiperbólicas; c) Cascas cilíndricas; d) Paraboloide Elíptico (circular); e) Paraboloide Hiperbólico; f) Conóides; g) Depósito de água feito de uma combinação de conchas. (Varghese & Sciences, 2010)

- Cúpulas: São superfícies obtidas pela rotação de uma curva plana em torno de um eixo situado no plano da curva. É uma casca com curvatura positiva, sendo que obtém resultados bons em projeto, em exceção de cascas com pequenas distâncias, perto dos limites. Obtemos uma cúpula esférica, se a curva for um círculo. Pode-se ter uma cúpula elíptica, cúpula cônica etc. (Figura 3.1 (a)).
- Cascas hiperbólicas: Têm uma curvatura negativa, significa que se curva para dentro ao invés de curvar para fora ou serem retas. Pode-se usar como exemplo a utilização em torres de arrefecimento (Figura 3.1 (b)).
- Cascas cilíndricas: A superfície média de uma casca cilíndrica é formada pela translação de uma curva plana, ao longo de uma linha reta. De acordo com a curva, pode-se obter conchas “cilíndricas, cilíndricas paraboloides, cilíndricas elípticas, circulares” e outros tipos de cascas. As cascas cilíndricas circulares podem ser longas conforme seu comprimento é grande em comparação com seu raio, caso contrário, são curtas - elas são comumente usadas para coberturas (Figura 3.1 (c)).
- Cascas paraboloides: é produzido quando tanto a geratriz quanto a diretriz são parábolas quadráticas. São divididas em paraboloides circulares, paraboloides elípticos ou paraboloides hiperbólicos, de acordo com as interseções do paraboloides com um plano horizontal arbitrário, resulta num círculo, numa elipse ou numa hipérbole. Desde modo, quando acontece duas parábolas serem desiguais e as duas apontam para baixo, resulta num paraboloides elíptico. Quando as parábolas são iguais, obtemos um paraboloides circular. Quando as duas parábolas têm curvaturas opostas, obtemos um paraboloides hiperbólico (Figura 3.1 (d) e (e)).

- Conóides (conchas inclinadas): A superfície média de um conóide é formada pelo movimento de uma linha reta (geratriz) ao longo de uma curva plana em uma extremidade e outra linha reta na outra extremidade, a linha reta sendo paralela ao plano da curva. Pode-se verificar que a curva é substituída por uma linha reta elevada em uma extremidade, e a outra superfície formada é um parabolóide hiperbólico (Figura 3.1 (f)).

Combinação de conchas: Muitas estruturas, como por exemplo, reservatórios de água, são formadas através de combinações de diferentes tipos de cascas (Figura 3.1 (g)).

De acordo com P.C. Varghese (2016), quando as cascas são descontinuadas nos bordos por vigas de bordo, ocorre flexão nessas junções. Uma diferença relevante entre as cascas de diferentes curvaturas são as suas perturbações nos bordos, conforme indicado abaixo:

- Para as cascas com curvatura positiva, os efeitos de bordo, tem a tendência de amortecer rapidamente e normalmente são restritos a pequenas distâncias do bordo. Nesta situação dará bons resultados para a teoria das membranas. Este é o caso das cúpulas esféricas.
- Para as cascas de curvatura zero, também são amortecidos os efeitos de bordo, mas comparado com a curvatura positiva é menos.
- Para as cascas de curvatura negativa, são significativos os efeitos em boa parte da casca. Sendo assim, não são insignificantes os efeitos de bordo nas cascas em parabolóide hiperbólico.

3.3 Exemplos de fundações em casca

Embora haja uma variedade de cascas que podem ser utilizadas em vários métodos construtivos de coberturas, as que podem ser adequadas para ser adotadas em fundações, são poucas. Além de não serem muito populares, devido à dificuldade de moldar as superfícies para a fundação e de encontrar matérias de apoio para a execução. É mais difícil a execução das fundações em casca comparando com as fundações convencionais, normalmente utilizadas, como sapatas e estacas. Na sequência são apresentados alguns tipos comuns de geometrias em cascas utilizadas em fundações.

3.3.1 CONE

De modo geral é possível mencionar que poucas cascas são capazes de competir com a simplicidade da forma de execução do cone. Conforme mostrado na Figura 3.3, a sapata cônica, rotacionalmente simétrica, executada em betão armado, possivelmente é a forma mais simples que se pode materializar numa fundação em casca. A estimativa de armadura radial e circular é tão simples como numa fundação circular plana, enquanto a execução é apenas um pouco mais difícil. A espessura da casca poderá ser uniforme, ou poderá ir variando ao longo da geratriz. Porém, devido ao plano circular, o uso da

casca de cone está limitado às sapatas individuais, sendo diferente comparando com as paraboloides hiperbólicas, onde pode ser usada em radier ou sapatas combinadas. (Figueiredo, 2010)

As fundações em cones, conforme apresentado na Figura 3.3, com dimensões grandes podem ser utilizadas em chaminés, construções em altura, em substituição das formas convencionais octogonal ou circular.

Conforme Figueiredo (2010) a casca apresenta na Figura 3.4 está na posição invertida, e pode ser adequada para sapatas estruturais para mastros de antenas espiadas (*guyed masts*), podendo ser observada na Figura 3.2. Dependendo da quantidade de área necessária de solo, uma casca de cone invertida de grande dimensão, pode ser utilizada como radier para estruturas cilíndricas, para reservatórios enterrados e estruturas elevadas, tais como reservatórios de água, que são suportados por uma fileira circular de pilares.



Figura 3.2 – Antenas com espigas (*guyed masts*), (Stringfixer)

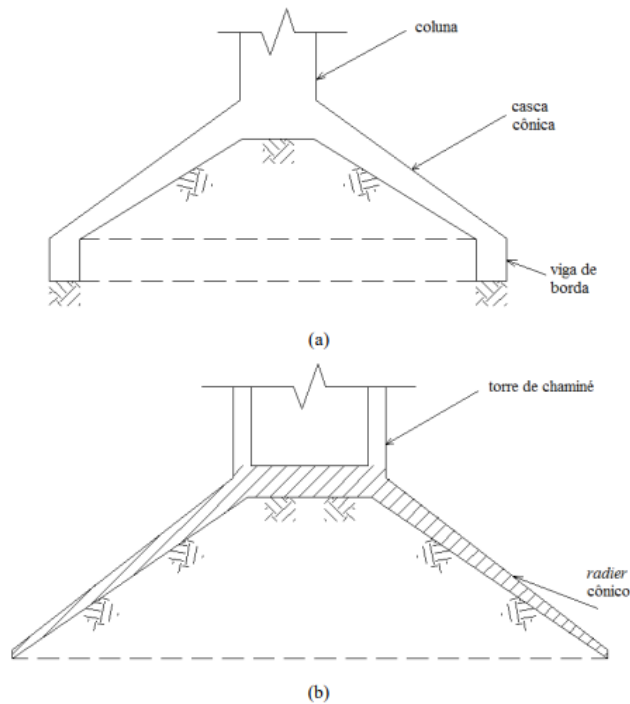


Figura 3.3 – Fundações em casca de cone: (a) sapata para coluna, (b) radier para chaminé (Figueiredo, 2010)

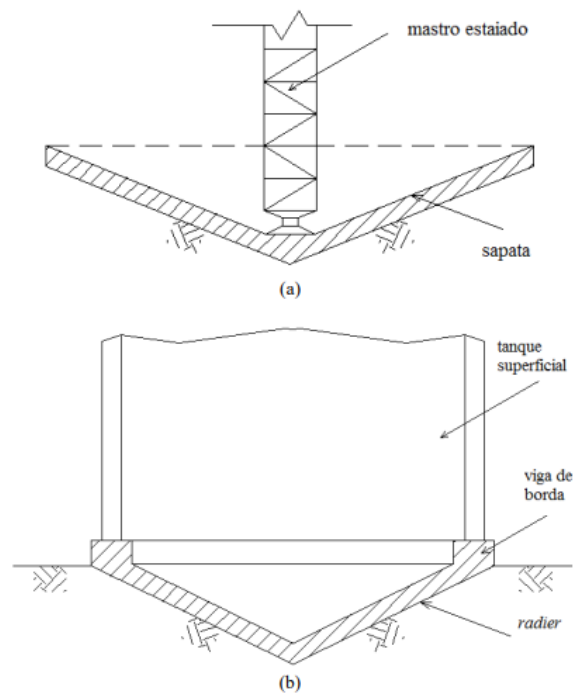


Figura 3.4 – Fundação em casca de cone invertido: (a) sapata para mastro, (b) radier para depósito superficial (Figueiredo, 2010)

Conforme apresentado na Figura 3.5, pode-se combinar um cone com o tronco invertido com um tronco de cone vertical. Este modelo de fundação tem o aspeto de uma placa dobrada, e devido a este motivo é chamado de "fundação em casca de cone duplo dobrado", sendo uma alternativa para o radier anelar simples com elevada espessura. É importante perceber que a forma poderia resultar numa

membrana anelar que são fixadas nos bordos internos e externos, podendo ser levada a circunferência ao longo do seu centro (Figueiredo, 2010).

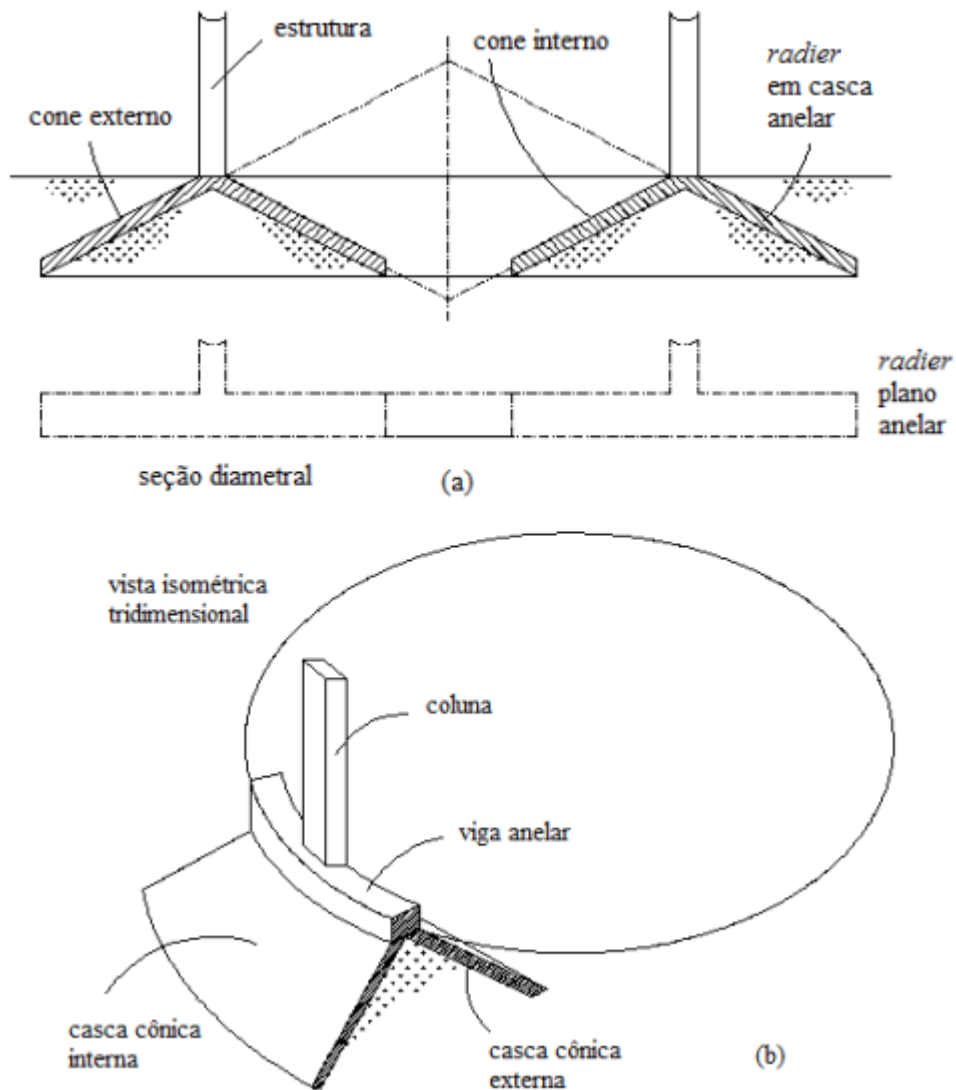


Figura 3.5 – Radier em cone duplo dobrado: a) seção diametral; b) vista isométrica (Figueiredo, 2010)

3.3.2 DOMO INVERTIDO

Para estruturas elevadas ou circulares, também em reservatório de água por cima de reservatórios enfileirados em círculo. Em fundações de grande espessura podem ser utilizados radiers anelares ou circulares ou domos invertidos de parede fina. A carga da coluna é transferida para o domo invertido através de uma viga anelar localizada no bordo do domo, conforme foi representado na Figura 3.6. Além dos domos esféricos, podem ser também utilizadas outras cascas, como o parabolóide elipsoide ou rotacional.

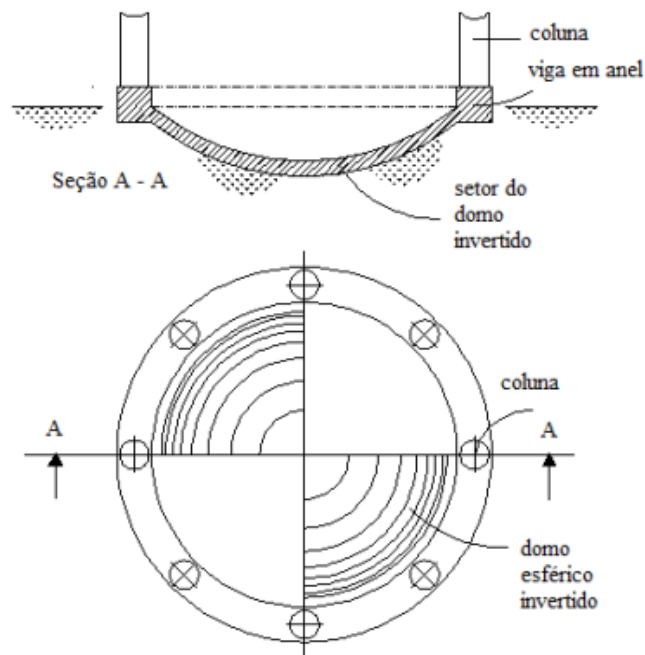


Figura 3.6 – Radier em domo esférico invertido (Figueiredo, 2010)

3.3.3 CASCA DE PAREDE FINA EM FUNDAÇÃO CONTÍNUA

De acordo com Pronozin et al., (2019) a fundação de casca de parede fina em fundação contínua, tem a característica de distribuir de forma controlada a pressão reativa sobre a fundação contínua e as cascas, sendo assim permitido, reduzir a profundidade do estado de compressão em 30%.

A fundação é constituída por elementos que diferem em modo de operação e rigidez, conforme Figura 3.7. A fundação contínua, de largura b_1 é a primeira a ser executada, funcionando com uma estrutura de suporte para paredes ou colunas de suporte de carga. A casca de paredes finas na parte central é a segunda (largura b_2), unindo as fundações contínuas adjacente numa sapata de esteira. A sua função é transferir uma parte da carga da estrutura para o solo na parte central.

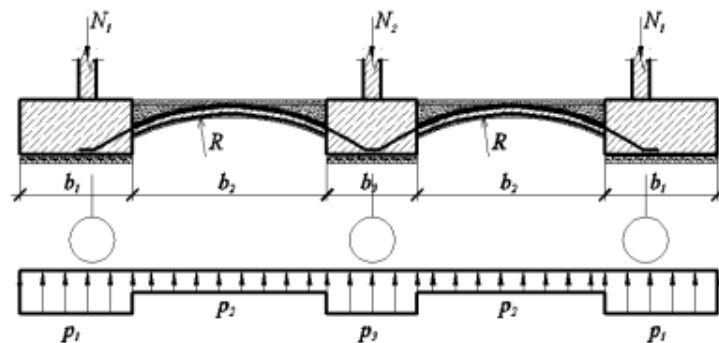


Figura 3.7 – Casca de parede fina fundação contínua (Pronozin et al., 2019)

3.4 Vantagens e desvantagens na utilização das fundações em casca

Vantagens na utilização da fundação em casca

- Maior capacidade de carga.
- As cascas podem oferecer duas grandes vantagens, a pré-fabricação e o pré-esforço.
- Economia de custo para projeto e tempo.
- Diminuição do custo da fundação, através da redução das armaduras em aço e demais matérias.
- A possibilidade de construir estruturas em solos de baixa capacidade resistente

Desvantagem da fundação em casca

- Custo de mão de obra elevado, associado ao processo construtivo.
- A execução das cascas exige empreiteiros de cofragem especializados.
- Indisponibilidade de materiais de apoio no meio acadêmico.
- Mão de obra não qualificada, metodologias de construção inexperientes e atrasadas são as principais deficiências que exigem atenção merecida no uso de fundações em casca (Kurian, 2006).

3.5 Estudos realizados sobre a utilização das fundações em casca

De acordo com Feickert & Mueller (2021) devido ao crescimento populacional global e da rápida urbanização, é esperado que, até 2060, duplique a área de edifícios construídos. Sendo, por isso, de prever aumento do investimento em novas construções. Entretanto, o setor da construção, pelas práticas correntes de projeto e construção, é responsável pela emissão de pelo menos 11% de gases com efeito estufa.

Os elementos estruturais e as fundações são dos que mais contribuem para o carbono incorporado, conseqüentemente, representam um dos sistemas com maior potencial para limitar as emissões. Inspirando-se na história, é possível realizar a redução dos materiais através da utilização das cascas finas. São apresentados exemplos históricos que demonstram a capacidade de economia dos materiais e a melhoria do desempenho geotécnico, sendo o primeiro exemplo moderno realizado pelo Félix Candela, construído no México em 1953 (Feickert & Mueller, 2021). O exemplo mais significativo de economia de material foi de até 72% em comparação com uma fundação de radier convencional, enquanto outros projetos alcançaram uma economia de até 50% (Feickert & Mueller, 2021). Anteriormente, outras pesquisas contribuíram para interpretar e definir a capacidade da fundação em casca, mas mesmo após

as pesquisas, não foram muito utilizadas, porque apesar de tudo, em diversos contextos e sobretudo devido à dificuldade em obter mão de obra qualificada.

Um ponto positivo da fundação em casca é o aproveitamento do solo escavado durante a execução. A reutilização do solo no reaterro oferece grandes benefícios, nomeadamente, o baixo custo e a ausência de desperdício, influenciando no destaque para utilização das fundações em casca.

A utilização do solo como cofragem ou reaterro não é um conceito novo, de acordo com Feickert & Mueller (2021), Heinz Isler cunhou o termo "colina de forma livre", no seu artigo 'New Shapes for Shells' (1960) como um método para projetar cascas, onde o solo é moldado na forma desejada e o betão é colocado no topo (Figura 3.8 a). Outro exemplo, com uma escala muito maior, é ilustrado na Figura 3.8 b, que mostra a utilização do solo como cofragem na construção do Museu de Arte de Teshima.



Figura 3.8 – a) Método de colina de forma livre de Isler; b) Utilização do solo como cofragem na construção do Museu de Arte de Teshima (Feickert & Mueller, 2021)

Os exemplos apresentados na Figura 3.8, necessitam de trabalhadores qualificados para preparar, de forma manual, o solo para ser utilizado como cofragem. De acordo com os contextos ocidentais, este método é demorado e caro, podendo assim explicar o porquê de as cascas na fundação não terem sido amplamente utilizadas. A seguir neste capítulo são descritas algumas aplicações históricas das fundações em casca e o custo dos materiais poupados.

Dado o desempenho das fundações em casca, é essencial relatar alguns resultados e impactos na área da geotecnia. Na bibliografia foram encontrados alguns trabalhos, onde foram estudados diferentes tipos de fundações em casca, tais como: cónica, parabolóide hiperbólico, esférica, cilíndricas entre outras.

Várias teorias, estudos e investigações experimentais foram relatadas para analisar as tensões e deformações nas fundações em casca. Em alguns relatos, foi também analisada a distribuição da pressão no contato entre a fundação e o solo, concluindo os resultados ser não uniforme a distribuição da pressão. No entanto, o projeto estrutural de fundações é baseado na teoria das membranas, onde a distribuição da pressão no contato da fundação com o solo é assumida como uniforme.

De acordo com Abdel-Rahman (1996), estes foram alguns dos autores que relataram esses resultados Pandian, N. S., and Ranganatham (1970); Kurian, N. P., and Varghese (1971); Bhattacharya, B., and Ramaswamy (1977); Jain, V. K., Nayak, G. C., and Jain (1977); Das, Y. C., and Kedia (1977);

Fareed, A., and Dawoud (1979); Dierks, K., and Kurian (1981); Chongzhang (1984); Huang-Yih (1984); Nath, Y., and Jain (1985); Paliwal, D. N., Sinha, S. N., and Choudhary ; Paliwal, D. N., and Rai (1986); Melerski (1988).

Abdel-Rahman (1996) refere a existência de estudos teóricos e experimentais onde foi analisada a capacidade de resistência das fundações em casca e a realização de comparações entre fundações em casca e os modelos convencionais. Em todos os estudos chegaram à mesma conclusão, confirmando a economia dos materiais e o bom desempenho durante a execução das fundações em casca comparando com as demais fundações convencionais. (Kurian (1971), Kurian, N. P., and Varghese (1973), Kuran, N. P., and Mohan (1980), Dierks, K., and Kurian (1988)),

Sharma (1973) realizou um estudo de campo em uma fundação em casca esférica, com três metros de diâmetro, utilizada na fundação de um reservatório de água. Os resultados revelaram uma redução de 32% na deflexão máxima em comparação com uma fundação plana. Além de ser constatado uma economia de 30% nas armaduras e betão.

Sharama (1984) realizou uma investigação teórica comparando o gasto de materiais substituindo as fundações planas com secção circular e quadrada, por fundações em casca cónicas e paraboloides hiperbólicas, respetivamente. Os resultados indicaram uma economia de 38 % e 45 % em materiais de construção quando foram usadas as fundações em casca com a geometria cónica e paraboloide hiperbólica, respetivamente.

Kuran, N. P., & Shah (1984) realizaram os estudos com as fundações em casca de geometria cónica e em domo invertido. O resultado deste estudo revelou vantagens na utilização das fundações em casca especialmente em situações que envolve a transmissão de cargas elevadas em solos de baixa capacidade resistente.

Chunxiao (1985) relatou a utilização de fundação em casca, em substituição de fundação em estacas para construção de um reservatório de água na China. Após execução verificou uma economia de 24,30% em betão e 22,80% em armadura de aço.

Abdel-Rahman (1990) e Hanna e Abdel-Rahman (1990) realizaram pesquisas sobre o comportamento geotécnico das fundações em casca e consideraram que estas se comportam de forma idêntica quando comparadas com as fundações planas convencionais.

Nicholls & Izadi (1968) realizaram um estudo experimental sobre fundações paraboloides hiperbólicas, procurando analisar a distribuição da pressão na superfície de contato com o solo, comparando com os modelos circulares e quadrados. Após a análise, verificaram que no modelo em casca a pressão de contato no perímetro é cerca de 1,5 vezes superior à pressão medida no centro. Os autores consideram que este aumento da pressão se deve ao efeito de arco. Verificaram ainda que tanto os valores da capacidade carga como os valores dos assentamentos obtidos para os modelos em casca foram significativamente melhores que os obtidos para os modelos de fundação convencional.

Kurian e Devaki (2005) realizaram estudos em três configurações de casca: cónica, esférica e paraboloide hiperbólico. Verificaram a influência do ângulo de atrito na interface entre a fundação e o

terreno, do tipo de solo e das diferentes condições de carregamento, abrangendo cargas verticais e horizontais e momentos, na avaliação da capacidade de carga e dos assentamentos das fundações em casca. Os resultados obtidos revelaram uma superioridade geral das fundações em casca.

Huat and Mohammed (2006) investigaram o comportamento geotécnico das cascas triangulares, utilizando uma análise não linear de elementos finitos com o *software* de elementos finitos PLAXIS. Após análise, concluíram que as fundações em casca têm melhor capacidade de carga, quando comparadas com as fundações convencionais em sapata com uma área da seção transversal semelhante.

Martins et al. (2009) realizou uma análise técnico e económica sobre a utilização das cascas como uma solução de fundação para um silo industrial vertical. Primeiramente projetadas em uma laje rígida e plana, a fundações foram otimizadas através de modelação numérica, utilizando o Método dos Elementos Finitos, adotando como modelo para a fundação uma casca em forma de cone invertido. Este estudo teve como resultado, relativamente à solução inicial, uma redução no consumo de aço de 23% e no consumo do betão de 60%. O resultado obtido não foi supressa para os autores, visto que, num elemento de fundação plana, são originados os momentos fletores quando este fica sujeito a uma carga vertical, juntamente com o seu peso próprio. Já nas estruturas cónicas, até mesmo quando estão presentes esforços de flexão assumem valores de importância secundárias.

Remo Rinaldi (2012) realizou um estudo que engloba o desenvolvimento de novas geometrias de fundação em casca, utilizando a casca invertida sob condições de carregamento vertical. Neste estudo incluiu a validação numérica através de um estudo comparativo seguindo-se uma análise bidimensional dos modelos de casca utilizando o *software* geotécnico disponível para análise dos elementos finitos. Foi também realizada uma análise paramétrica, onde foram analisados aspetos relacionados com a geometria das cascas (inclinação e espessura das cascas) quando aplicadas em solo granular. Os resultados do estudo revelaram um desempenho comparável entre o modelo de fundação em casca e casca invertida, com um aumento da capacidade de carga de 3 % a 5 % para estes últimos e uma notável melhoria de 42 % a 45 % em relação às sapatas planas convencionais. Como conclusão o autor refere que o desempenho das fundações em casca é superior, quando comparado com as demais e devem ser consideradas e exploradas sempre que possível.

Al-Azzawi (2013) realizou uma investigação com as cascas cónica, onde analisou o sistema de interação entre a fundação em casca e o solo, através de modelação numérica utilizando o método dos elementos finitos. Foram analisados os resultados obtidos e comparados com resultados obtidos já realizadas. Obtendo assim, bons resultados, tendo um maior percentual de diferença de 14% no valor da capacidade de carga.

Shaligram (2011) analisou uma fundação contínua com secção em casca triangular, apoiada em duas camadas de areia e reforçada com geotêxtis. Sendo que a camada superior de areia é mais fraca do que a camada seguinte. Os modelos das sapatas triangulares têm os seguintes ângulos: 60°, 90°, 120°, 150° e 180°, conforme pode ser observado na Figura 3.9. A fundação foi assente em areia homogénea e reforçada com diferentes camadas de geotêxtis. Os resultados indicaram que a capacidade de carga final

aumenta quando diminui o ângulo do vértice. Observou que a camada de geotêxtil em vários níveis abaixo da fundação em casca mostrou um aumento na capacidade de carga final e diminuição do assentamento.

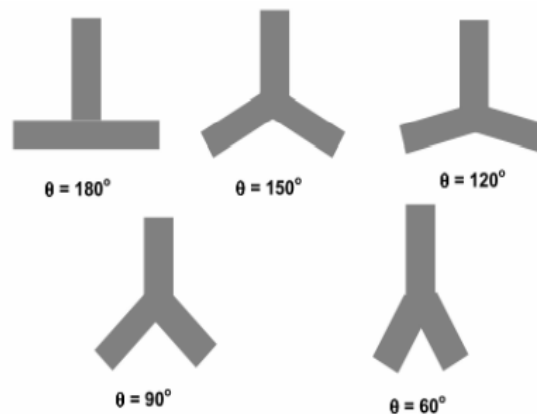


Figura 3.9 – Modelos das sapatas triangulares (Shaligram, 2011)

Pronozin et al (2019) apresenta um estudo de um edifício com vários pisos, utilizando fundações contínuas unidas por cascas cilíndricas planas com uma base térrea. Sendo o solo na base constituído por uma camada de solo de maior resistência com camadas subjacentes compressíveis. A utilização de uma fundação tradicional nas condições indicadas seria dificilmente possível. Uma justificação para utilizar fundações rasas é a redução dos assentamentos. Além disso, aumenta a capacidade de suporte da base do solo e reduz o consumo do aço e do betão em 20% a 50% quando comparado com as fundações tradicionais, por exemplo, fundações em estaca e laje.

De acordo com Feickert & Mueller (2021) a utilização da fundação em casca pode economizar até 40% dos materiais, quando comparado com as vigas de betão e até 70% quando comparado com as lajes planas de betão.

3.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as fundações em casca, foi realizada primeiramente uma breve explicação dos modelos comuns de cascas utilizadas na Engenharia Civil para diversos métodos de construção. Posteriormente foi apresentado alguns tipos comuns de geometrias em cascas utilizadas em fundações e as vantagens e desvantagens da sua utilização. Na sequência foram apresentados diversos estudos, através de investigadores e académicos, sobre a utilização das fundações em casca.

4 FUNDAÇÃO EM PARABOLOIDE HIPERBÓLICO

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo aborda o modelo de fundação em parabolóide hiperbólico, e serão apresentadas as características deste tipo de fundação no intuito de compreender o comportamento estrutural deste modelo de casca. Além de demonstrar os modelos de fundação parabolóide hiperbólico existentes serão apresentados diversos exemplos na construção civil que utilizaram.

4.2 Superfícies hiperbólicas

Entre os diversos modelos de cascas descritos no capítulo anterior, as fundações em parabolóides hiperbólicos unidas por um sistema de vigas de bordo e cumeeiras, que também são conhecidas como HYPAR, foram desenvolvidas para suportar cargas de colunas em diversas partes do mundo. Posteriormente, as fundações HYPAR foram sendo adaptadas para edifícios altos e para estruturas como reservatórios de água em zonas com solo de baixa capacidade resistente.

Segundo o Engenheiro Ronei Lombardi Filgueiras especialista em estruturas, principalmente superfícies hiperbólicas:

“Os parabolóides hiperbólicos são superfícies anticlásticas, que podem trabalhar, portanto, exclusivamente com tensões de membrana e são também superfícies de dupla curvatura de tratamento analítico mais simples. Quando analisamos esforços de membrana, só usamos as equações da estática. Se nossos cálculos forem valores relativamente baixos para as tensões, os alongamentos e encurtamentos na estrutura serão desprezíveis e teremos certeza de que qualquer deformação será desprezível. Portanto, o comportamento real de estrutura e as investigações teóricas convergem para

a concordância, já que estas últimas se baseiam nas verdades abstratas da estática lógica e não em hipóteses nebulosas baseadas em simplificações das propriedades físicas do material. Com membranas físicas podemos realizar de maneira eficiente e económica o ideal para a construção civil: podemos criar micro-espacos, separados ou integrados através de plataformas, vedações, coberturas, contenções, etc, que sempre terão, além das vantagens estruturais, um apelo estético não subjetivo, posto que correspondem à condição de máxima simplicidade. Com associação dessas membranas poderemos construir uma miríade de obras: armazéns, pavilhões, auditórios, residências, enfim, toda a gama de edificações.” (Firmo, 2003)

No intuito de compreender melhor o comportamento estrutural das cascas, deve primeiramente familiarizar com a característica geométrica, conforme será apresentado a seguir.

4.2.1 FORMAS DAS SUPERFÍCIES HIPERBÓLICAS

Superfícies anticlásticas

A forma de boa parte das estruturas contemporâneas tem como base a geometria de uma superfície anticlástica. De acordo com Moreira (Moreira, 2008), refere-se a uma superfície em que um conjunto de elementos arqueados tracionados agem em sentido oposto a um conjunto semelhante de elementos suspensos (Figura 4.1). Fisicamente, os dois conjuntos caracterizam as direções que constitui a membrana.

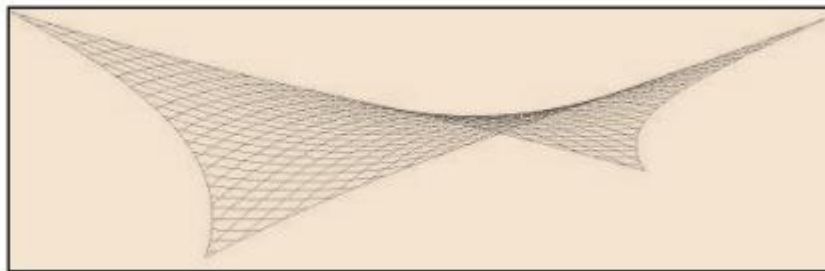


Figura 4.1 – Superfície anticlástica (Moreira, 2008)

Este formato tem uma característica muito importante, em que a superfície, na sua totalidade é passível de ser pré-esforçada sem ocorrer mudanças importantes na sua forma. Além de possuir nítidos caminhos de esforços para trações ascendentes e descendentes. Na Figura 4.2. estão representados quatro modelos comuns de superfícies anticlásticas: cone, sela, paraboloides hiperbólicos e cume e vale.

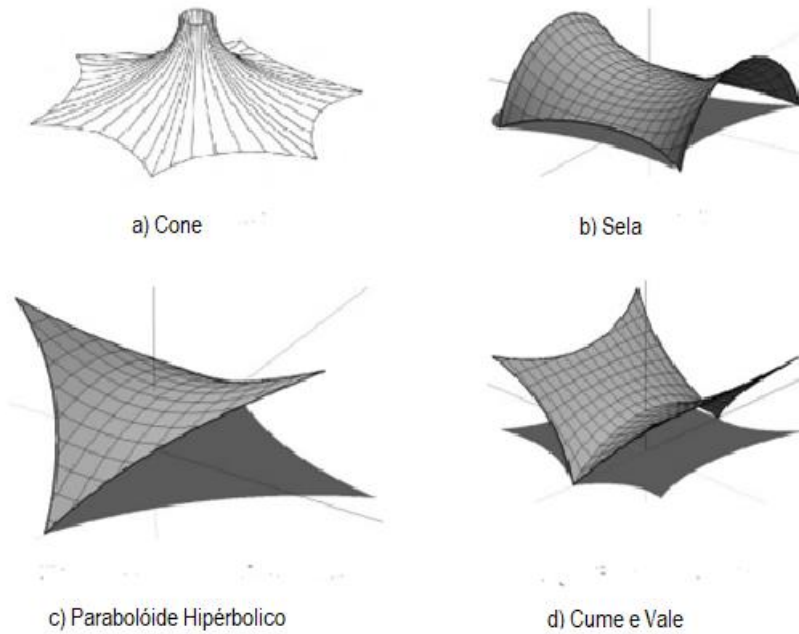


Figura 4.2 – Modelos de superfícies anticlásticas: a) cone; b) sela; c) parabolóide hiperbólico; d) cume e vale (Moreira, 2008)

Superfícies regradadas

Com o propósito de definir as superfícies hiperbólicas, antes deve definir-se o que são superfícies regradadas.

Segundo Firmo (2003) uma superfície é regradada quando em qualquer ponto dela é possível passar uma reta contida nessa mesma superfície. Esta reta é designada por geratriz e por diretriz qualquer curva desta superfície que corte todas retas nela contida. A Figura 4.3. ilustra, como exemplo de uma superfície regradada, um hiperboloide de uma folha.

As superfícies regradadas podem ser divididas em duas categorias: desenroláveis ou desenvolvíveis e não-desenvolvíveis ou empenadas.

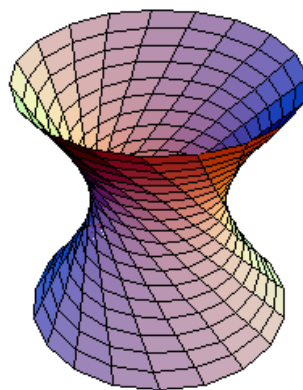


Figura 4.3 – Hiperboloide de uma folha (Firmo, 2003)

As superfícies desenroláveis ou desenvolvíveis são superfícies curvas que podem ser desenroladas e contidas num plano. Pode-se utilizar como exemplo deste tipo de superfície o cilindro e o cone, representados na Figura 4.4.

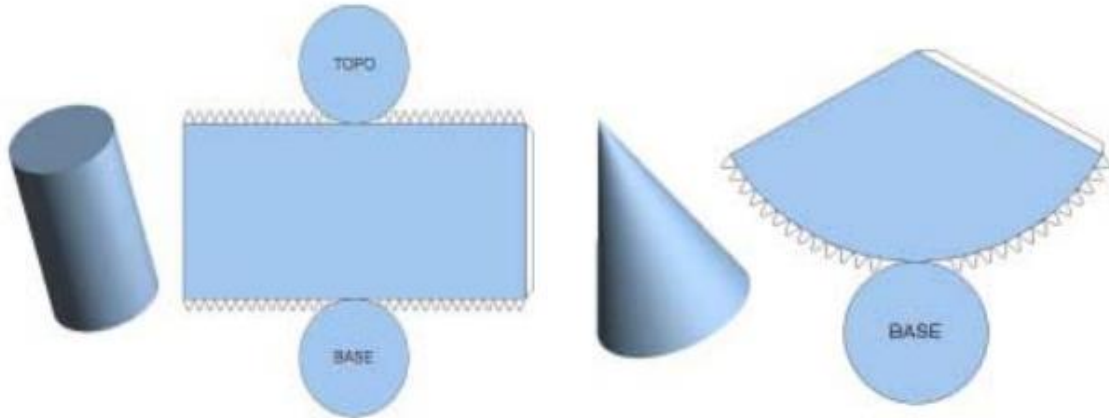


Figura 4.4 – Superfícies regradas desenvolvíveis ou desenroláveis: cilindro e cone (Firmo, 2003)

Nas superfícies regradas não desenvolvíveis ou empenadas, ao contrário do exemplo anterior, não é possível obter a sua planificação, sendo impossível desenrolar de forma a obter toda a superfície assente sobre um plano. Neste tipo de superfície as diretrizes são retas reversas, ou seja, duas geratrizes, mesmo que muito próximas, nunca estão contidas no mesmo plano.

As superfícies hiperbólicas são não desenvolvíveis ou empenadas, porque suas diretrizes são reversas entre si, produzindo um efeito de “empenamento”, gerando assim uma dupla curvatura onde as curvas são orientadas em sentido oposto na superfície. A Figura 4.5 mostra, como exemplo, um parabolóide hiperbólico de revolução em uma só folha.

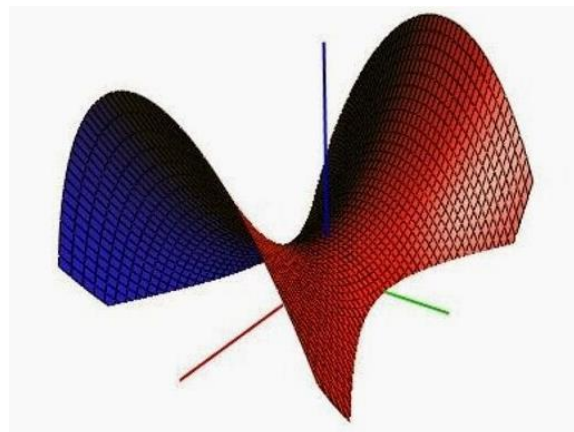


Figura 4.5 – Superfície não desenvolvíveis ou empenadas: parabolóide hiperbólico (Firmo, 2003)

4.3 Definição de casca em parabolóide hiperbólico

A casca em parabolóide hiperbólico é criada através do movimento de uma parábola côncava sobre outra parábola convexa, conforme mostra na Figura 4.6. Sendo assim é uma superfície constituída por dois conjuntos de parábolas com um ângulo reto entre elas. Quando elas são iguais obtém um parabolóide hiperbólico retangular. São geradas ao longo das direções inclinadas de 45° as principais direções das parábolas nos parabolóides hiperbólicos retangulares. Pode observar-se que a superfície é composta por linhas retas com alterações na inclinação, mas paralelas e com ângulo reto no plano de uma para a outra, transformando assim numa superfície que pode ser criada através da deslocação de duas linhas retas ortogonais. Estas linhas retas também podem ser chamadas de geradoras da superfície.

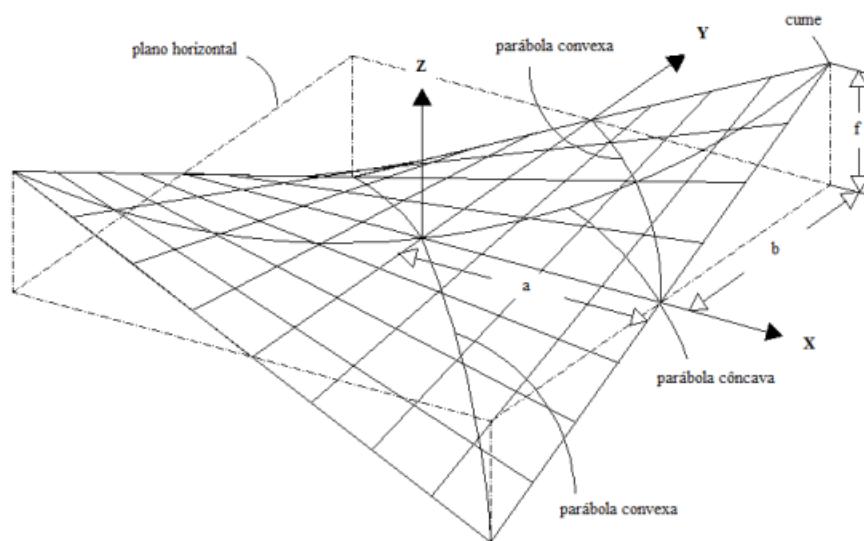


Figura 4.6 – Geometria do parabolóide hiperbólico (Figueiredo, 2010)

4.4 Modelos de fundação em parabolóide hiperbólico

A casca parabolóide hiperbólica é conhecida pela sua elegância e versatilidade, como será apresentado posteriormente em alguns projetos executados. Mas para as fundações, não tem nenhuma importância o plano estético da estrutura, mas sim a economia, o desempenho estrutural e a sua viabilidade técnica. Sendo uma casca anticlástica, que podem trabalhar exclusivamente com tensões da membrana e que são duplamente curvada e possui translação como superfície regradada (Mellerski, 1988). Este modelo de casca, comparado com os demais modelos, pode ser utilizado em projetos de fundação na engenharia, tendo várias opções de utilização na construção.

A duas opções de fundações parabolóides hiperbólicas são: a côncava e a convexa (Figura 4.7).

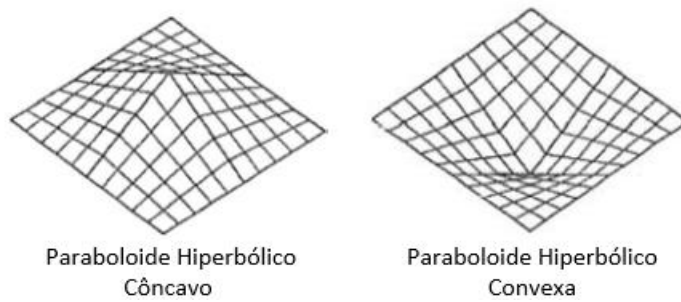


Figura 4.7 – a) Paraboloide hiperbólico côncava b) Paraboloide hiperbólico convexa (Brito, 2010)

E conforme as Figura 4.8 a Figura 4.13 podem ser utilizadas de diversas formas, como: sapata individual, sapata individual excêntrica, sapatas combinadas, em radier convencional e invertido e através de sapatas isoladas ligadas por vigas contínuas.

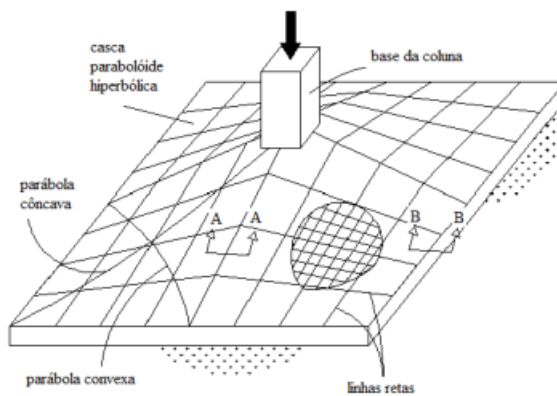


Figura 4.8 – Sapata individual em parabolóide hiperbólica côncava (Figueiredo, 2010)

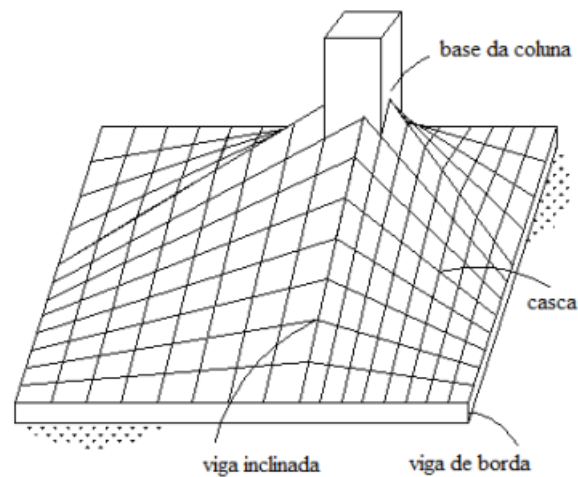


Figura 4.9 – Sapata individual em parabolóide hiperbólica côncava excêntrica (Figueiredo, 2010)

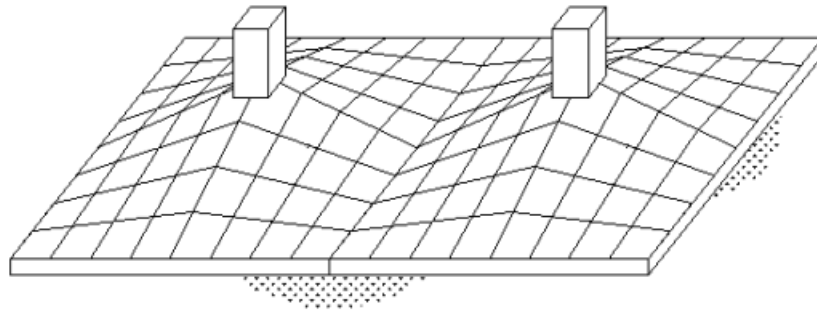


Figura 4.10 – Sapatas combinadas em parabolóide hiperbólicas côncava (Figueiredo, 2010)

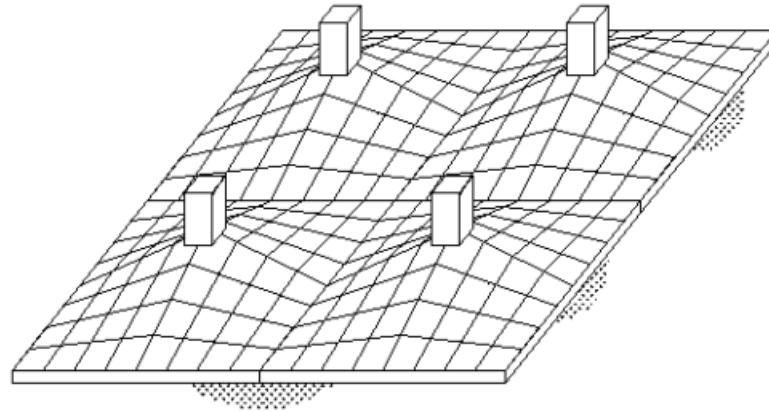


Figura 4.11 – Radier em parabolóide hiperbólico côncava (Figueiredo, 2010)

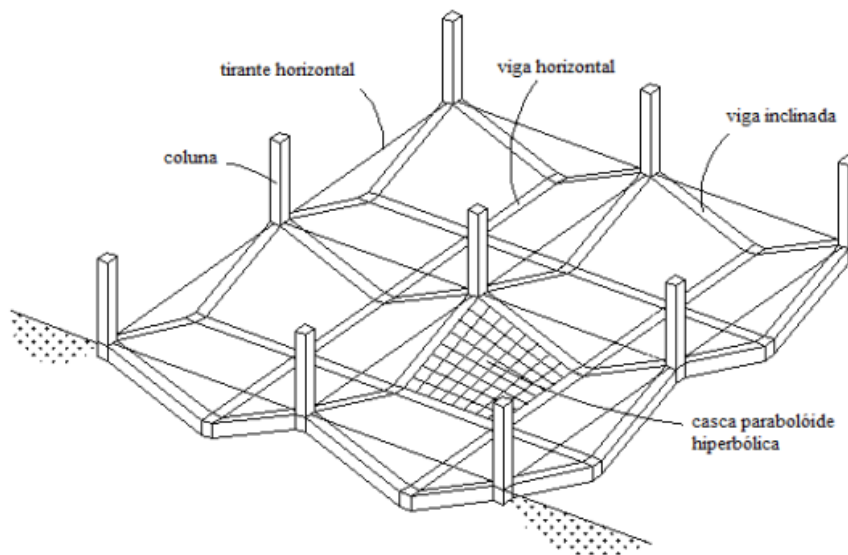


Figura 4.12 – Radier em parabolóide hiperbólico convexa (Figueiredo, 2010)

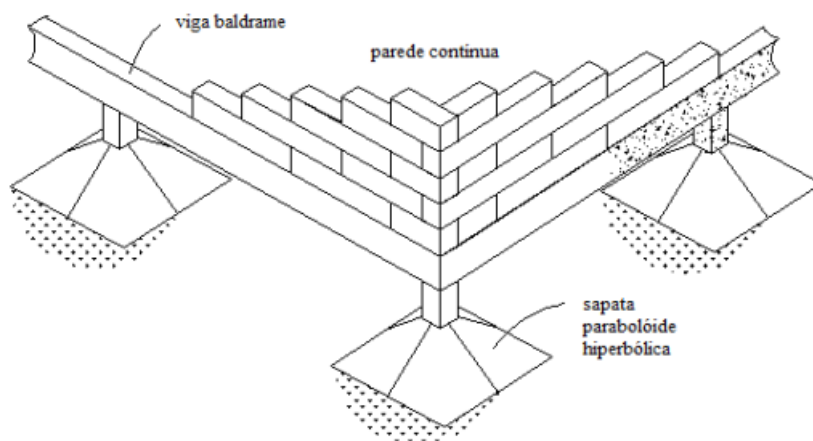


Figura 4.13 – Sapatas isoladas côncavas ligadas por vigas contínuas (Figueiredo, 2010)

A fundação em parabolóide hiperbólico quando comparada com uma fundação convencional, apresenta diversas vantagens, nomeadamente, a quantidade de betão à tração neste método de fundação é muito menor do que nas fundações convencionais, a qual tende a resistir aos momentos fletores. Por esse motivo, as fissuras no betão são praticamente eliminadas, reduzindo assim o risco de corrosão das armaduras devido à humidade do subsolo. Assim como toda estrutura em casca a sua seção está submetida somente aos esforços normais, sendo sempre distribuídos igualmente sobre a seção transversal, proporcional assim melhoria na utilização dos materiais e por consequência uma maior economia. Este tipo de fundação exige menor volume de betão. No entanto, é necessário levar em consideração que a construção necessita trabalho extra na execução da forma geométrica, sendo, por isso, a economia final dependente do gasto com o betão, com o aço e com a mão de obra.

Pode considerar-se Felix Candela como precursor da arte deste tipo de fundação, mas no Brasil o engenheiro Dr. Ronei Lombardi Filgueiras foi detentor da patente dos sistemas *Hyparsystems* (Fundação parabolóide hiperbólico) e responsável técnico das empresas CREAR e DENDRON, tornando a marca registada das empresas que tem sido utilizada há mais de 30 anos, com exclusividade.

De acordo site da empresa CREAR Engenharia (2017), essas são as principais obras executadas em fundação parabolóide hiperbólico pela empresa no Brasil:

- 93 Edifícios do Conjunto Habitacional Santa Cruz Industrial em Contagem, MG para Andrade Valladares Eng.Ltda.;

- 46 Edifícios do Conjunto Habitacional João Paulo II, no bairro Tirol, para Andrade Valladares Engenharia e Construtora Ltda.;

- 11 Edifícios no bairro Tirol e 6 no Barreiro, Belo Horizonte, MG para a firma Emisa Empreendimentos Imobiliários Ltda.;

- Edifício de 9 pavimentos à Rua Humaitá c/ Rua Anchieta -Padre Eustáquio, BHte, MG para Mascarenhas Barbosa Roscoe S/A.;

- 31 Prédio no conjunto Cristina II, Santa Luiza, MG, para a Ouro Preto Eng. Ltda.;

- Diversos prédios escolares da CARPE nas seguintes cidades: Manhumirim, Coronel Fabriciano, Juiz de Fora, Pouso Alegre, Passa Quatro, Itamarandiba, Brasópolis, Cruz Vera, Guanhões, Teófilo Otoni, Araxá, Varginha, Moema, Itaipé, Senador Amaral, Alpinópolis, Itajubá e outros;
- 5 Prédios em Juiz de Fora e 3 em Campo Grande, RJ, para a Planear Engenharia;
- Diversos ginásios esportivos para as AABB nas principais cidades: Itabuna (BA), Santarém (PA), Rondonópolis (MT) e outros;
- 6 Prédios à Rua Pouso Alegre, 2516 em Belo Horizonte, MG para Atenas Engenharia Ltda.;
- Usina de Álcool para a Fundação Artur Bernardes, em Viçosa, MG;
- Hospital Dom Bosco à rua das Pedrinhas, em Venda Nova, Belo Horizonte, MG;
- 4 Edifícios do Parque das Castanheiras, em Montes Claros, MG;
- Ginásio do Bemge, em Betim, MG;
- Agência do Banco de Crédito Real de Minas Gerais, em Itatiaiuçu, MG;
- Colégio Santa Maria da Universidade Católica de Minas Gerais, no Bairro Cidade Nova, Belo Horizonte, MG;
- Edifício de 9 pavimentos à Rua Serranos, Belo Horizonte, MG para a firma Construtora Nortebel Ltda.;
- Diversos prédios escolares, para a SUDECAP, em Belo Horizonte, MG.;

4.5 Utilização dos paraboloides hiperbólicos em coberturas e fundações

As coberturas em forma de parabolóide hiperbólico foram utilizadas pela primeira vez em duas casas localizadas no Parque Guell, nas encostas do Monte Carmelo em Barcelona, Espanha. Estas habitações, ilustradas na Figura 4.14, foram criadas pelo arquiteto António Gaudí com início da construção em 1900. De acordo com Billington (1992) a cobertura com forma semelhante a uma sela, suscitou um grande fascínio para Gaudí, porque era "de uma ordem superior e complexidade maior do que as formas usuais da Idade Média que estavam sendo revividas naquele momento."

O modelo utilizado por Gaudí tinha três vantagens sobre as tradicionais formas. (I) a curvatura oposta, um arco descendente em uma direção e um arco para cima em outra, que torna a superfície da cobertura muito mais rígida. O formato tem menos tendência a empenar, por isso a espessura pode ser mais fina do que uma cúpula ou um tecto em forma de barril relativamente grande. (II) a cobertura é construída por abóbadas de azulejos catalão, o laminado das telhas tem capacidade para transportar tensão (no arco ascendente) e compressão (no arco descendente). (III) a forma parabolóide hiperbólica pode conter na sua superfície linhas retas, característica impossível quando se utiliza uma superfície esférica. Após esta construção a casca parabolóide hiperbólica tornou-se mais fácil de construir, principalmente em betão, como Candela demonstrou mais tarde.



Figura 4.14 – Parque Guell, Barcelona, Espanha (Hisour, 2016)

Conforme Billington (1992), para o arquiteto António Gaudí, este modelo geométrico, o parabolóide hiperbólico, tinha um profundo significado religioso, ele considerou esta forma como "um milagre da matemática" e "atribuiu propriedades sagradas a trindade de linhas retas que determinam tal superfície."

Em 1909, Gaudí desenvolveu uma nova estrutura para cobertura, uma escola ao lado da Igreja da Sagrada Família em Barcelona, como ilustra a Figura 4.15, provavelmente a cobertura mais antiga na forma de parabolóide hiperbólico em grande escala.

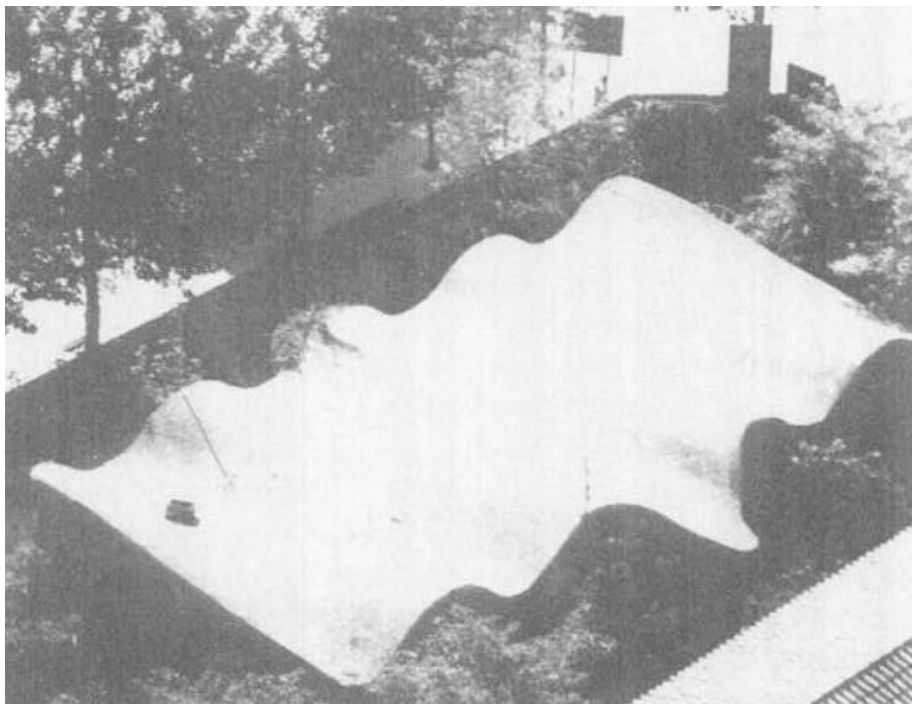


Figura 4.15 – Escola ao lado da igreja da Sagrada Família, Barcelona (Billington, 1992)

Pela primeira vez, realizou uma cobertura pendendo das paredes, onde se pode ver claramente a espessura e suavidade das curvas. Quando Gaudí foi confrontado pela primeira vez, depois da conclusão da construção, o mesmo referiu estar impressionado pela sua fantasia e exuberância.

Estas obras serviram de inspiração e grande estímulo para outros artistas estruturais, especialmente Eduardo Torroja e Candela.

Eduardo Torroja começou a projetar estruturas em betão armado no fim da década de 1920, mas somente em meados de 1930 caracterizou a sua visão. O primeiro trabalho foi uma casca hiperboloide em consola para cobrir as arquibancadas do hipódromo de Madrid chamado Hipódromo da Zarzuela (Figura 4.16).



Figura 4.16 – Hipódromo da Zarzuela em Madrid (Mosquera, 2012)

A espessura da casca é de apenas 50 mm no seu bordo livre, por este motivo tem uma aparência extraordinariamente leve. No entanto, a casca é muito resistente, como prova da sua força, a cobertura resistiu aos bombardeamentos que aconteceram durante a Guerra Civil Espanhola.

Em 1934, Giorgio Baroni, utilizou o paráguas, um elemento resultante de um parabolóide hiperbólico, construído como cobertura da fábrica da Alfa-Romeo em Milão, como mostra a Figura 4.17.

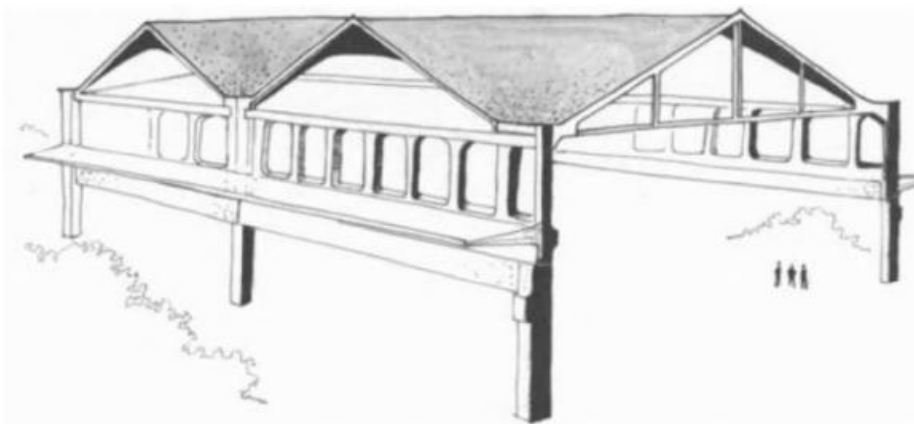


Figura 4.17 – Cobertura da fábrica Alfa-Romeo em Milão, Giorgio Baroni (Sousa, 2017)

4.5.1 A CONCEÇÃO ESTRUTURAL DE FÉLIX CANDELA

Félix Candela nasceu em 27 de janeiro de 1910 em Madrid, onde cresceu e depois de alguns anos estudou Arquitetura na Escola Superior de Arquitetura de Madrid, onde tinha uma preferência especial pela geometria. Além de um interesse em particular pelo estudo da mecânica dos materiais e pela análise das estruturas, desenvolvendo grandes capacidades de cálculo juntamente com o talento pela geometria, resultando a sua formação num grande compromisso entre o fator estético da estrutura e a mecânica estrutural. Félix Candela construiu muitas estruturas em casca, principalmente no México.

Uma das características das obras de Félix Candela, foi o resultado da combinação entre o engenheiro de estruturas, o arquiteto e o construtor, tudo na mesma pessoa. Referente a isso, tem uma relevância de acordo com a seguinte citação: "Devo esclarecer que, embora seja arquiteto por educação, a minha atividade profissional é ser construtor e adjudicatário de obras e, portanto, as minhas preocupações são, em geral, do tipo económico" (Sousa, 2017).

De acordo com Tomas M. R. de Souza (2017), um dos princípios económicos fundamentais para Félix Candela era a necessidade de "evitar, dentro do possível, os esforços de flexão, mediante a seleção da forma estrutural apropriada". Por esta razão, este princípio é apropriado para estruturas em alvenaria ou betão, conforme a limitação da resistência à tração.

Um dos mais importantes aspetos que definiu as obras de Candela foi a utilização constante dos paraboloides hiperbólicos. Esta forma contribui e satisfaz, importantes requisitos, tanto em termos construtivos como em termos estruturais. Conforme Sousa (2017) o modelo paraboloide hiperbólico permitia o equilíbrio principalmente pela membrana e tem a característica de poder ser constituída por elementos lineares, que auxilia no processo de execução das cofragens. Sousa (2017) refere ainda que o processo de execução do modelo de casca consistia na composição de formas complexas através de parcelas de paraboloides hiperbólicos seccionados por diferentes planos, conforme se pode observar na Figura 4.19 e na Figura 4.18.

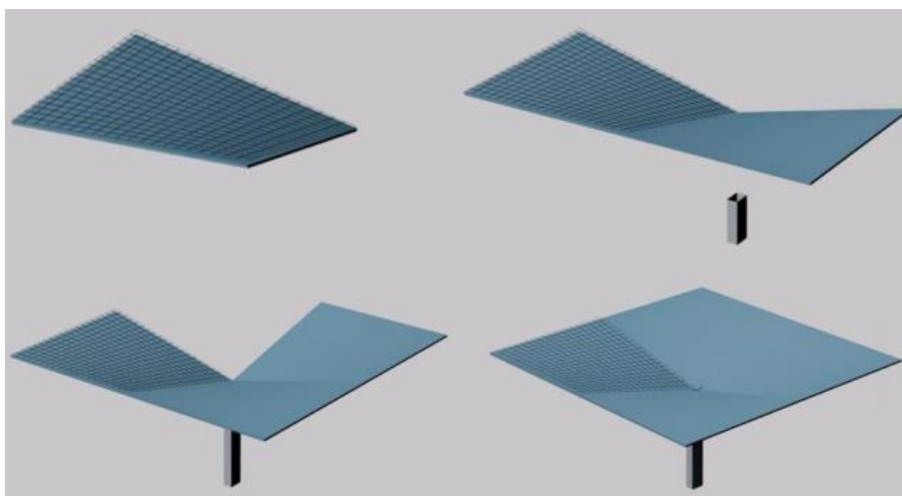


Figura 4.18 – Processo de construção de Parágua através da rotação de uma parcela de paraboloide hiperbólico (Sousa, 2017)

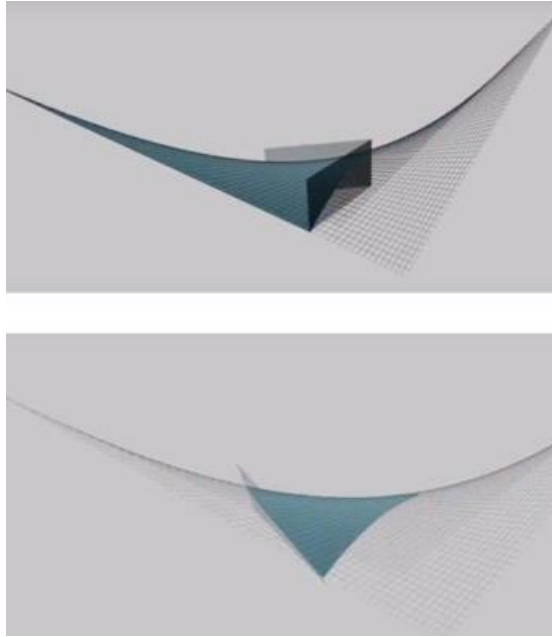


Figura 4.19 – Planos de corte utilizados na execução de uma “parcela” do parabolóide hiperbólico. (Sousa, 2017)

4.5.2 OBRAS EXECUTADAS

Em 1951 na Cidade Universitária no México, foi construída a primeira obra utilizando o modelo parabolóide hiperbólico, como mostra a Figura 4.20, sendo o Pavilhão de Raios Cósmicos, um laboratório especializado na desintegração nuclear e na medição de raios cósmicos, necessitava de uma cobertura que não ultrapasse a espessura de 1,5 cm. Esta restrição levou Candela a utilizar os parabolóides hiperbólicos, utilizando o argumento de que o modelo geométrico proporciona a rigidez necessária para a construção da cobertura com a espessura exigida. Esta construção proporcionou fama internacional a Candela.



Figura 4.20 – Pavilhão de Raios Cósmicos, Cidade Universitária no México (Fantini, 2014)

A Figura 4.21 ilustra a estrutura nomeada por Candela como “Paráguas”. Esta estrutura é constituída por quatro partes de um parabolóide hiperbólico regrado, apoiada por um único pilar no centro.

De acordo com Tomas Manuel (Sousa, 2017), em 1952 foi executada a primeira estrutura paráguas experimental, contendo uma planta quadrada de 10x10 m, uma flecha de 1 m e espessura de 4 cm. Algumas semanas após a construção, verificaram uma deformação relevante nos cantos, cerca de 5 cm, e vibrações causadas pela ação do vento. Com intuito de resolver o problema, criaram uma segunda estrutura experimental com planta quadrada de dimensão 8x8 m, flecha de 70 cm e espessura de 8,3 cm. Porém, apesar do aumento da espessura, a deformação nos cantos permaneceu. A diminuição da flecha permitiu a melhoria no comportamento sob ação do vento, devido à diminuição da superfície exposta.

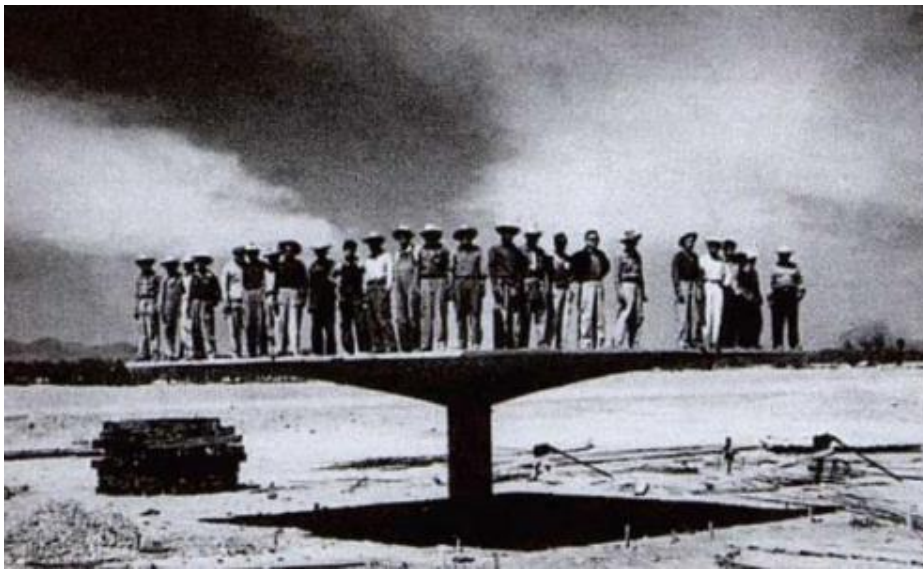


Figura 4.21 – Paráguas experimental, Almacenes de Las Aduanas (Sousa, 2017)

Após diferentes experiências com este modelo de estrutura, Candela concluiu que o problema de deformação excessiva nos cantos pode ser solucionado com o aumento da flecha que, de acordo com Figura 4.22, leva à diminuição das forças criadas para garantir o binário equilibrante. Considerando a predominância dos esforços das membranas, quase exclusiva, através da análise do equilíbrio dos binários para as cargas verticais, é possível entender o efeito da flecha no desempenho deste modelo e quantificar os esforços alcançados.

O aumento da flecha para diminuir as deformações nos cantos da estrutura exige um aumento da área exposta ao vento, obtendo esforços indesejados. Sendo assim, em algumas situações, foram acrescentados elementos para aumentar a rigidez, procurando garantir caminhos de força para a ação do vento até o pilar de apoio.

Esta experiência proporcionou a Candela uma lição para determinar a flecha ideal, que irá depender da área da cobertura.

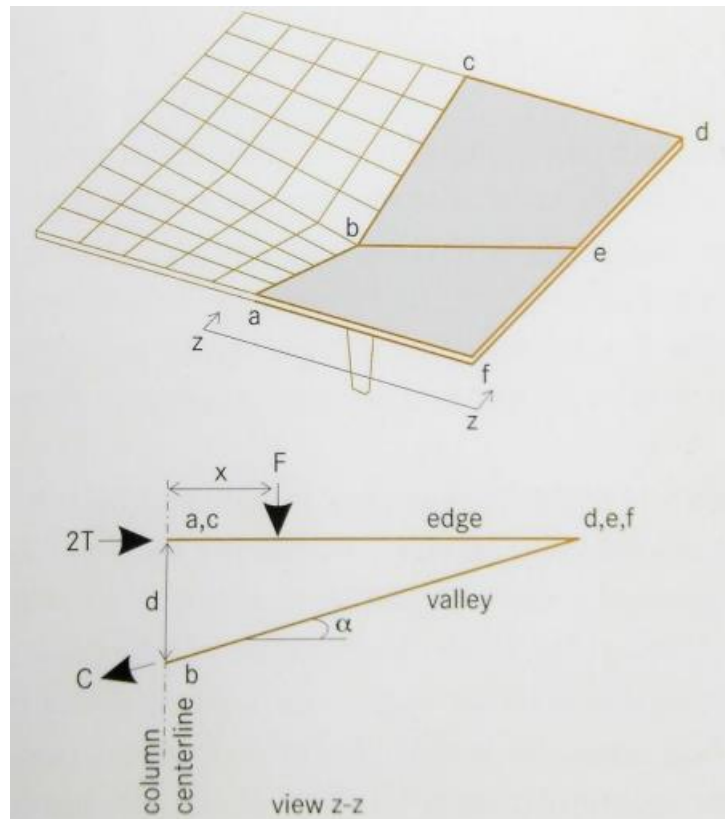


Figura 4.22 – Esquema representativo do equilíbrio de forças (Sousa, 2017)

O primeiro exemplo de fundação em parabolóide hiperbólico foi em 1953, na construção de Los Almacenes de las Aduanas na cidade do México, conforme Figura 4.23, foi realizado por Félix Candela e Carlos Recamier. De acordo com Feickert & Mueller (2021), Candela utilizou um arranjo linear combinado de parabolóides hiperbólicos, que derivam a sua força da sua forma, em vez da massa, como é típico em sapatas planas. Sendo que o parabolóide hiperbólico é uma superfície anticlástica, duplamente curvada, que obtém como resultado uma grande resistência à encurvadura. Além disso, este modelo possui superfícies regradas, constituídas por dupla curvatura, e por isso podem ser formadas por linhas retas, o que proporciona benefícios na etapa de construção. Na fundação executada, os parabolóides hiperbólicos mediam individualmente 3,05 m x 4,95 m e uma elevação de 0,76 m. As cascas tinham uma espessura de 152 mm e foram reforçadas com armadura de 9,53 mm e em centros de 203 mm. Este exemplo de fundação, não tinha vigas de bordo, mas existia no perímetro um reforço com varões de aço com 15,88 mm de diâmetro (Feickert & Mueller, 2021). Após finalização da fundação, Candela observou que o custo final foi menor quando comparado com outros modelos de fundação que suporta a mesma carga.

De acordo com Feickert & Mueller (2021), este modelo de fundação em casca cria um sistema espacial que distribui as cargas aplicadas principalmente por forças no plano ou membrana para o solo abaixo, ao invés de flexão e o betão é utilizado de forma mais eficaz, através da compressão direta. Conforme Kurian (2006), se as tensões induzidas são principalmente as compressivas, verifica-se uma redução na espessura e no reforço de aço pode ser conseguida para a mesma carga aplicada.

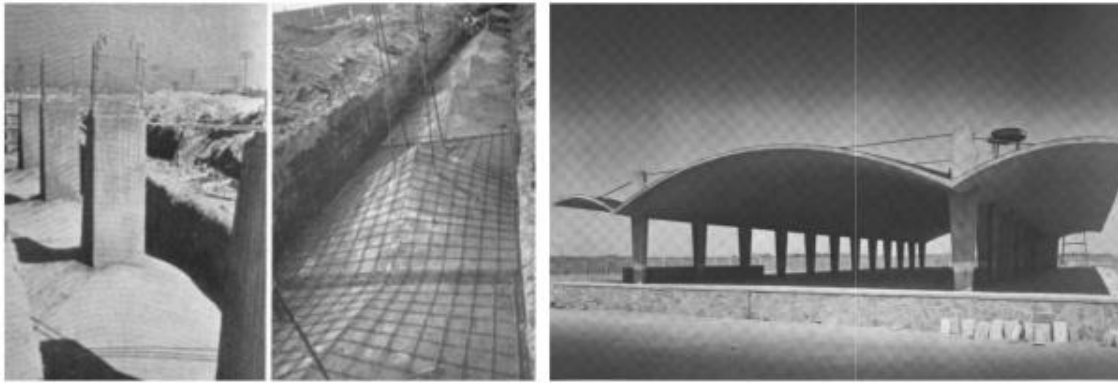


Figura 4.23 – Construção de Los Almacenes de las Aduanas na cidade do México (Feickert & Mueller, 2021)

A Figura 4.24 mostra o edifício da Bolsa de valores, na cidade do México, projetado por Candela em 1955. Félix Candela projetou esta estrutura juntando duas porções diferentes resultantes do parabolóide hiperbólico que rodavam duas vezes sobre o eixo central, obtendo como resultado uma estrutura assimétrica de quatro lados, como representado na Figura 4.25. Nos bordos de ligação entre porções, nas nervuras, a estrutura apresenta maior rigidez devido ao aumento da espessura. Em quase todas as estruturas Félix Candela utilizava este modo de aumentar a rigidez, exigindo uma concentração de força nas nervuras e proporcionando uma espessura muito reduzida no restante da estrutura.



Figura 4.24 – Bolsa de valores na cidade do México (Architecture, 2018).

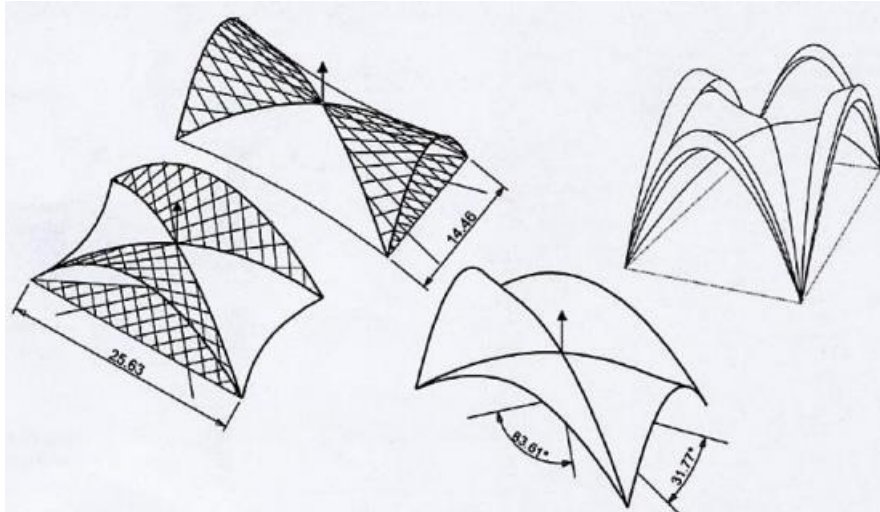


Figura 4.25 – Representação da estrutura assimétrica da Bolsa de valores, representando a interseção das porções dos paraboloides hiperbólicos (Sousa, 2017).

A Figura 4.26 apresenta a igreja San Ant3nio de las Huertas, localizada na Colonia Tlxapana, na cidade do M3xico, foi constru3da utilizando a mesma t3cnica do exemplo anterior, composta por quatro paraboloides hiperb3licos iguais, com rota33o em torno de um eixo vertical. Proporcionou uma estrutura sim3trica de quatro lados, cada paraboloides cont3m uma planta quase quadrada, com uma altura entre 7,5 e 10 metros no t3rmino dos arcos, onde o bordo livre fornece uma sensa33o de leveza 3 igreja. Destacando o efeito da ilumina33o separando os paraboloides entre si e das paredes laterais, conforme Figura 4.27, deixaram um espa3o aberto para criar aberturas com vidro, proporcionando assim, a entrada de luz na igreja.

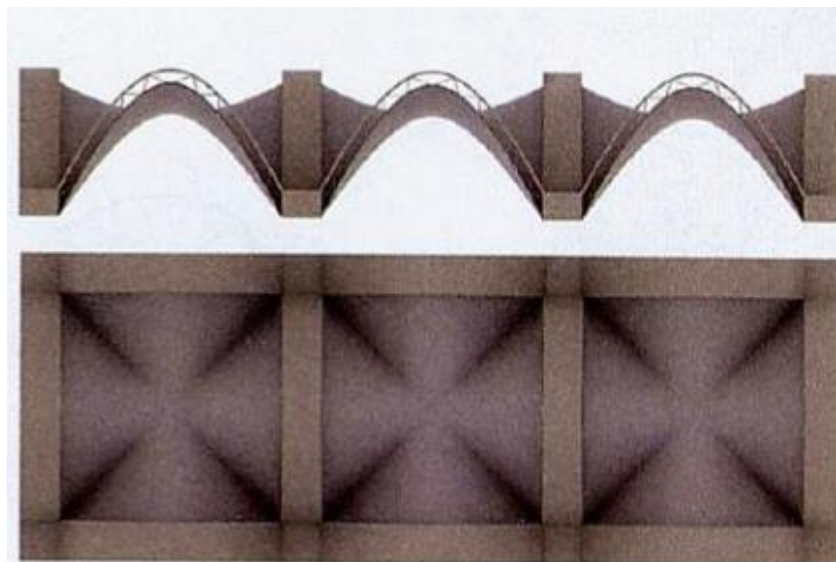


Figura 4.26 – Representa33o do paraboloides hiperb3licos na igreja San Antonio de las Huertas, localizada na Colonia Tlxapana, na cidade do M3xico (Sousa, 2017)



Figura 4.27 – Efeitos de iluminação separando os paraboloides hiperbólicos (Architecture, 2021)

Em 1957 foi construído o restaurante Los Manatales na região de Xochimilco na cidade do México. A estrutura é constituída por quatro paraboloides hiperbólicos de bordo livre, a forma da cobertura lembra uma flor flutuando num lago. A estrutura é composta por um vão livre de 30 m e cada gomo cria uma abertura para o exterior. Conforme pode ser verificado na Figura 4.28, a cobertura apresenta grande ousadia estrutural e beleza, com camadas extremamente finas de betão, com espessura média de cerca de 6 cm.



Figura 4.28 – Restaurante Los Manantiales em Xochimilco, Cidade do México (Avendano, 2020)

Em 1960, foi construída a Fábrica Bacardí, em Cuautitlan no México, conforme mostra a Figura 4.29 a construção é semelhante à do restaurante Los Manantiales, inicialmente constituída por três estruturas em casca com nervuras. Mas conforme Tomas M. R. de Sousa (2017), o ímpeto de Candela

para a construção da fábrica surgiu após observar o Terminal do Aeroporto de Lambert, St. Louis, nos Estados Unidos, ilustrado na Figura 4.30.



Figura 4.29 – Fábrica Bacardí, em Cuautitlán no México (Sousa, 2017)

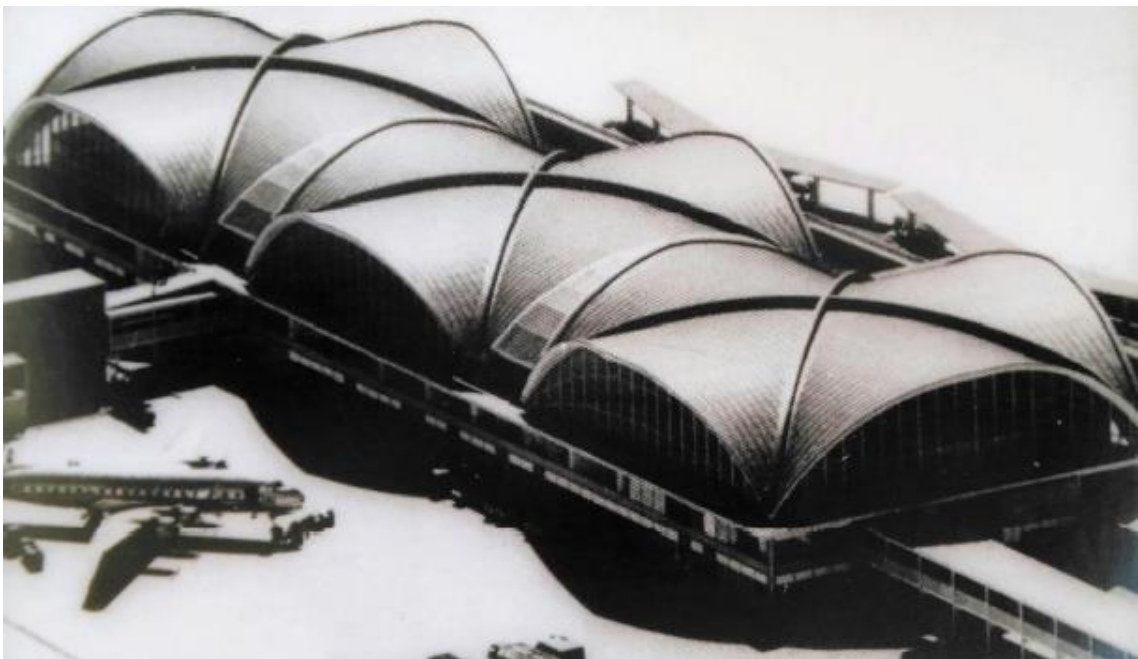


Figura 4.30 – Terminal do Aeroporto de Lambert (Sousa, 2017)

Candela considerou a oportunidade de construir a empresa Bacardí com uma estrutura semelhante ao terminal do Aeroporto de Lambert, mas de forma que fosse mais simples e elegante. Após a construção da cobertura, pode-se considerar algumas diferenças significativas, como a rigidez dos bordos, a espessura das cascas e o modo de reforço das nervuras.

Após a execução das obras citadas anteriormente, Felix Candela ganhou grande prestígio e reconhecimento no ramo da construção e arquitetura.

Em 1958 foi iniciada a construção da Catedral Metropolitana – Nossa Senhora Aparecida ou também chamada de Catedral de Brasília, representada na Figura 4.31. A sua arquitetura foi concebida por Oscar Niemeyer e foi considerada uma obra-prima, graças à execução da estrutura venceu o prémio

Pritzker em 1988. O projeto consiste numa circunferência de 60 m de diâmetro constituída pela distribuição de 16 pilares. A junção dos pilares forma um parabolóide hiperbólico sustentado por dois anéis de betão armado. O primeiro anel, sob tração, funciona como tirante, contornando toda a base da estrutura, absorvendo todos os esforços gerados pelos pilares. O segundo anel, sob compressão, encontra-se dentro dos pilares, e tem a função de impedir que as colunas se fechem.



Figura 4.31 – Catedral Metropolitana – Nossa Senhora Aparecida (Gates, sem data)

Em 1961 o arquiteto Oswaldo Bratke construiu a estação ferroviária de Ribeirão Preto, como pode ser visto na Figura 4.32. A estrutura é constituída por trinta e oito módulos quadrados em parabolóide hiperbólico de betão armado, com 10 m de comprimento cada módulo e 60 cm de espessura, sustentada por um pilar central.



Figura 4.32 – Estação Ferroviária de Ribeirão Preto (Fracalossi, 2015)

A cobertura e a fundação do terminal rodoviário da estação de Metro Vila Mariana e Ana Rosa (Figura 4.33 e Figura 4.34), foram executadas em 1974 por um grupo de brasileiros que trabalhavam na empresa alemã HMD (Hochtief, Montreal, Deconsult) coordenados por Ricardo H. Medrano (2013). A cobertura e a fundação são constituídas por paraboloides hiperbólicos com um pilar central, gerando um grande balanço na cobertura. Espelharam nas tecnologias de Candela, para projetar a estrutura, procurando alcançar uma solução mais leve e econômica. (Medrano, 2013)



Figura 4.33 – Terminal rodoviário da estação de metro Vila Mariana (Medrano, 2013)

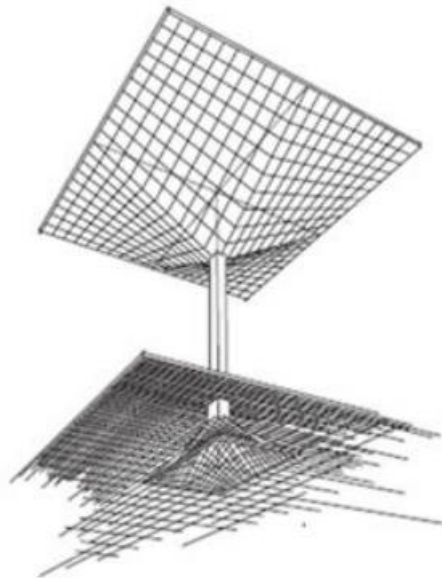


Figura 4.34 – Croqui da fundação e cobertura do terminal ferroviário da estação de metro Ana Rosa (Medrano, 2013)

No ano de 2012 no XIV ENTAC (Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído) em Juiz de Fora, o Engenheiro Ronei Lombardi Filgueiras, o Professor Fernando Cordeiro da Silva do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e o Professor Cláudio José Martins do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, apresentaram o artigo como o tema “Utilização da Membrana Hiperbólica como opção para fundação

Radier”, onde foi ilustrado o processo de execução deste método de fundação, como apresentado na Figura 4.35 e na Figura 4.36.



Figura 4.35 – Execução da camada de regularização (Filgueiras et al., 2012)



Figura 4.36 – Aterro das membranas (Filgueiras et al., 2012)

Em Nova Lima, Minas Gerais executaram um pavilhão industrial com fundação em casca com a forma parabolóide hiperbólico, conforme Figura 4.37.



Figura 4.37 – Pavilhão industrial em Nova Lima, Minas Gerais (Benkendorf, 2015)

Em 2019, foi iniciada a construção de um empreendimento na cidade de Coronel Fabriciano, Minas gerais. O condomínio é composto por 288 unidades, sendo as fundações realizadas pelo método de radier em parabolóide hiperbólico, conforme apresentado nas Figura 4.38 e Figura 4.39.



Figura 4.38 – Condomínio Contente I em Coronel Fabriciano



Figura 4.39 – Execução da fundação radier em parabolóide hiperbólico, condomínio Contente I.

4.6 Principais vantagens

As principais vantagens a destacar nas cascas com a forma parabolóide hiperbólico são:

- Ter uma boa resistência a eventos de instabilidade;
- Apresentar uma boa resistência, permitindo a execução de soluções com grande valor estético, versáteis, ligeiras e com uma grande economia de materiais;
- Corresponder às exigências produzindo principalmente esforços no plano;
- Este modelo de casca tem uma análise estrutural perfeitamente desenvolvida;

- Na utilização de betão pré-esforçado e betão armado, proporciona facilidade na betonagem da estrutura e na montagem da cofragem.

As principais vantagens e características das fundações em parabolóide hiperbólico, de acordo com a empresa CREAM Engenharia (2017), são:

- A fundação parabolóide hiperbólica é a melhor opção quando o solo apresenta baixa capacidade resistente e é submetido a cargas elevadas;
- Quando uma estrutura é constituída por uma única de fundação, os assentamentos diferenciais são próximos de zero,
- A betonilha é um elemento participante da fundação. No processo construtivo é eliminado o lintel, por incorporar em todos os blocos de coroamento.
- Este método, além de prático e económico, permite a redução do tempo de execução da obra, visto que ao finalizar, a primeira laje já estará pronta e com as esperas dos pilares acabadas;
- Este método não utiliza cargas de impacto, portanto elimina possíveis danos em obras próximas.
- Obra limpa

4.7 Considerações finais

Neste capítulo foi definido o que são fundações em parabolóide hiperbólico. Foi explicado o comportamento estrutural da casca, as suas definições e os principais modelos existentes. Posteriormente foi realizada uma revisão bibliográfica dos diversos exemplos de construções executadas em todo o mundo que utilizaram as cascas parabolóides hiperbólicas. E na sequência foram apresentadas as principais vantagens das fundações em parabolóide hiperbólico.

5 ESTUDO DE CASO: CONDOMÍNIO RESIDENCIAL

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é apresentado o caso de estudo relativo ao projeto de construção de um condomínio residencial que utilizou o modelo de fundações radier em parabolóide hiperbólico, apontando assim, as características práticas relacionadas com as etapas construtivas e os cuidados que foram considerados na execução das fundações. É também apresentado o sistema de gestão de qualidade utilizada durante todas as etapas de execução das fundações.

5.2 Definição e localização do estudo de caso

O empreendimento localizado na Rua Vereador José Antônio Barbosa, nº 505, Bairro São Vicente, no município de Coronel Fabriciano – Minas Gerais faz parte do Programa Minha Casa Minha Vida do Governo Federal, onde atende a faixa 01 do Programa, ou seja, famílias com vencimento mensal de até R\$ 1.600,00, (cerca de 320 euros).

O empreendimento foi dividido em dois condomínios, conforme pode ser verificado na Figura 5.1, sendo Buritis I com 220 apartamentos e Buritis II com 280 apartamentos, que totalizam 500 apartamentos e sistemas de infraestruturas para atender aos futuros proprietários, como pavimentação das vias, redes de abastecimento de água, esgoto sanitário e drenagem pluvial, bem como, dois equipamentos comunitários dentro do condomínio, que inclui dois campos polidesportivos, dois *playgrounds*, dois centros sociais, duas guaritas, dois depósitos de material de limpeza e dois depósitos de lixo.

O condomínio residencial é composto por 25 blocos, cada um com 20 apartamentos, distribuídos pelo rés-de-chão e quatro andares elevados.



Figura 5.1 – Residencial Buritis em Coronel Fabriciano (Prefeitura de Coronel Fabriciano, 2021)

Cada apartamento é composto por dois quartos, sala, cozinha conjugada com área de serviço e casa de banho. A Figura 5.2 mostra a vista interior do apartamento modelo.



Figura 5.2 – Vista interior do apartamento modelo

A Figura 5.3 ilustra a planta de implantação do condomínio, onde estão representados os 25 blocos que o compõem. A fundação do condomínio foi executada através da fundação radier em parabolóide hiperbólico (Figura 5.4). Cada condomínio era constituído por um radier com um bloco e doze raders com 2 blocos. Cada bloco com a dimensão de 15x19 m.



Figura 5.5 – Execução da estrutura em betão armado utilizando cofragens metálicas

O Engenheiro Dr. Ronei Lombardi Filgueiras foi contratado para prestar serviços de projeto e realizar o acompanhamento técnico das infraestruturas das fundações em radier em parabolóide hiperbólico através da empresa DENDRON Estruturas em Membrana LTA.

5.3 Processo construtivo da fundação radier em parabolóide hiperbólico

5.3.1 TRABALHOS DE LIMPEZA E TERRAPLENAGEM

A Figura 5.6 mostra o terreno no local onde foi construído o condomínio. O terreno foi considerado uma turfa, que corresponde a um solo de baixa resistência devido à existência de vegetação, raízes e restos de animais. O terreno apresentava também locais lamacentos devido à presença de água.



Figura 5.6 – Terreno onde foi construído o condomínio Buritis

A primeira etapa do processo construtivo foi a limpeza do terreno com remoção da camada vegetal, conforme ilustra a Figura 5.7. Após finalizar, foi constatado em alguns pontos do terreno, que o nível freático estava muito próximo da superfície, causando assim zonas pantanosas.

De acordo com o projeto, e com o objetivo de garantir a cota de implantação do condomínio foi necessário construir um aterro. Previamente à construção do aterro, foi construído um dreno de fundo para evitar que a água proveniente do nível freático atingisse o corpo do aterro. Este dreno foi realizado com manta geotêxtil, brita e enrocamento.



Figura 5.7 – Limpeza do terreno com remoção da camada vegetal

O solo utilizado na construção do aterro foi proveniente de uma mancha de empréstimo localizada em terrenos adjacentes ao condomínio, podendo ser visto sua localização na Figura 5.8. As características geotécnicas do solo foram determinadas com recurso a ensaios de laboratório. Assim, foram realizados os ensaios para determinação da curva granulométrica, dos limites de consistência, o ensaio Proctor normal e o ensaio CBR (*California Bearing Ratio*). Para a realização dos ensaios foram recolhidas duas amostras, em locais distintos do local da mancha de empréstimo, identificadas como amostra 1 e amostra 2.



Figura 5.8 – Localização da mancha de empréstimo

Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo foi efetuada pelo método de peneiração, segundo a norma de ensaio ABNT NBR 7181 (2016), conduzindo à distribuição granulométrica indicada na Tabela 5. e às curvas granulométricas apresentadas na Figura 5.9. A sua análise permite verificar que o solo é constituído predominantemente pela fração fina, e que a percentagem de areia e de pedregulho correspondem apenas a cerca de 24%. Verifica-se ainda a coincidência entre as curvas granulométricas obtidas, o que permite concluir da homogeneidade do solo.

Tabela 5.1 – Composição granulométrica dos solos provenientes da mancha de empréstimo

Composição Granulométrica (Escala ASHTO)				
	Pedregulho	Areia grossa	Areia fina	Pass.# 200
Amostra 1	1,5%	18,0%	4,6%	76,0%
Amostra 2	1,5%	18,6%	3,2%	76,7%

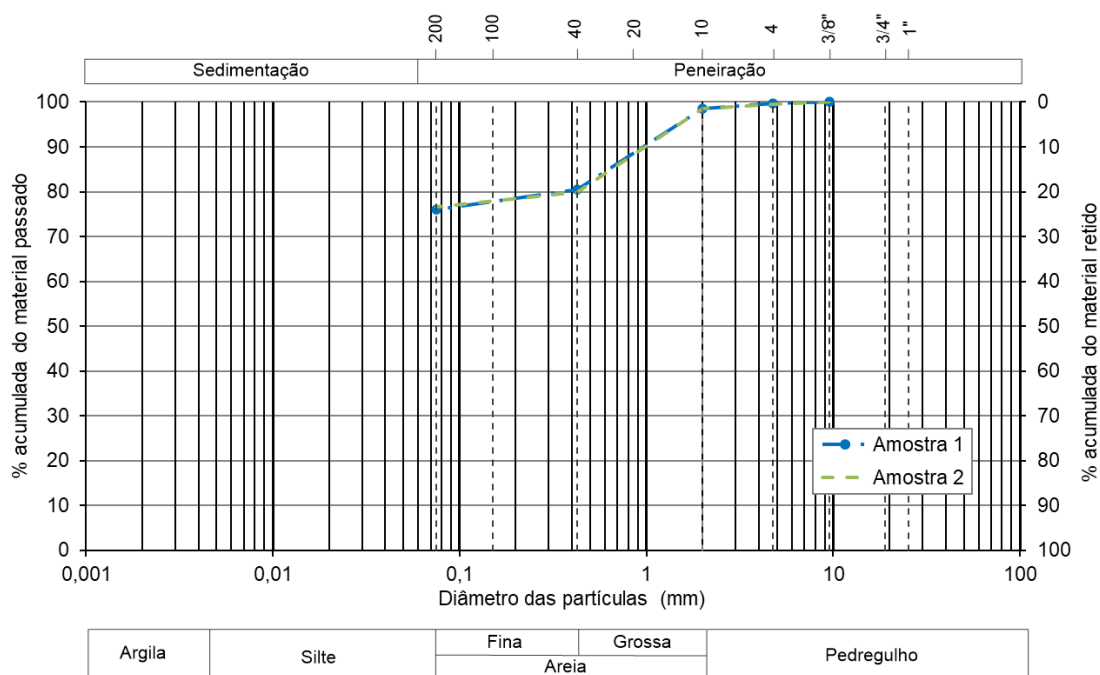


Figura 5.9 – Curvas granulométricas do solo proveniente da mancha de empréstimo

Limites de consistência

Os ensaios para determinação dos limites de consistência incluem a determinação do limite de liquidez (LL) e do limite de plasticidade (LP).

O limite de liquidez (LL) definido como o teor de água correspondente à fronteira entre os estados plástico e líquido do solo, ou seja, o solo torna-se plástico caso tenha um teor de água inferior ao limite de liquidez. O ensaio foi realizado através do método da concha de Casagrande e de acordo com o método de ensaio DNER-ME 122 (1994).

O equipamento da concha de Casagrande, ilustrado na Figura 5.10, é constituído por uma base em ebonite, uma concha em latão, um sistema de fixação da concha à base e um parafuso com uma manivela que movimenta a concha (Marinho, 2020). Neste ensaio uma pasta de solo é colocada na concha, o limite de liquidez corresponde ao teor de água com que o solo fecha um sulco num comprimento de 1 cm sob o impacto de 25 pancadas.



Figura 5.10 – Equipamento da concha de Casagrande (Marinho, 2020)

Na Tabela 5.2 estão indicados os resultados obtidos na amostra 1 no ensaio da concha de Casagrande. A

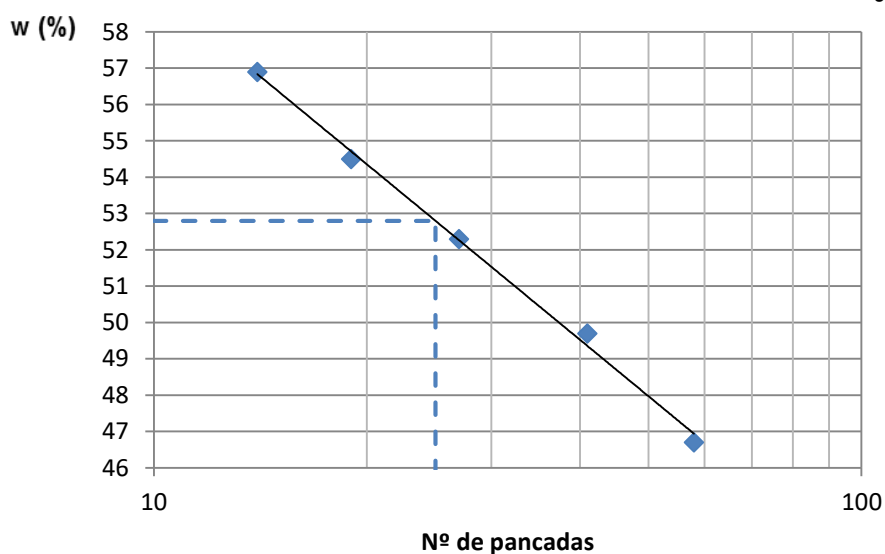


Figura 5.11 mostra, como exemplo, a determinação do limite de liquidez para a amostra 1 onde se obteve o valor de 35 %.

Tabela 5.2 – Resultados do ensaio da Concha de Casagrande obtidos na amostra 1

Cápsula n.º	1	2	3	4	5
w (%)	56.9	54.5	52.3	49.7	46.7
Nº de Pancadas	14	19	27	41	58

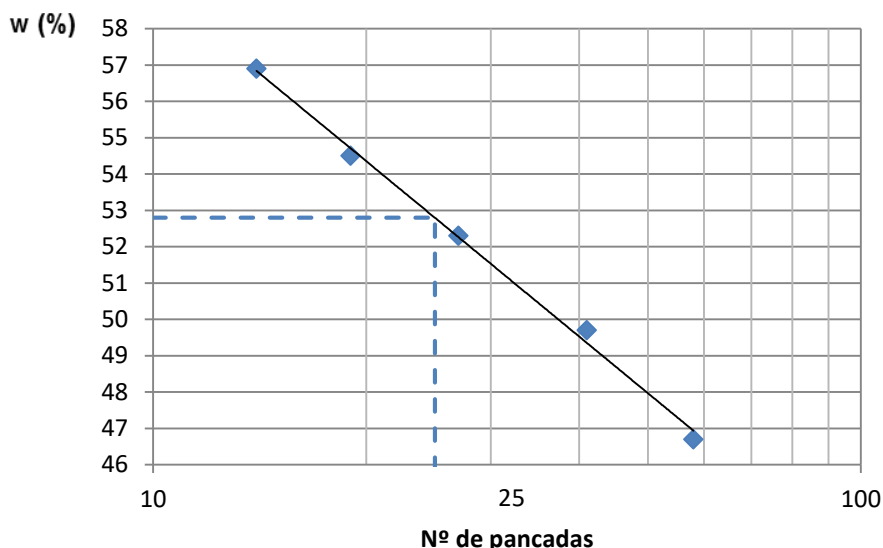


Figura 5.11 – Determinação do limite de liquidez na amostra 1

O limite de plasticidade (LP) é o teor de água corresponde à fronteira entre os estados semi-sólido e plástico do solo. De acordo com ABNT NBR 7250 (1982), a plasticidade é uma propriedade dos solos finos, onde para determinados limites de teor em água, o solo admite grandes deformações permanentes, sem sofrer rutura, fissuração ou variação de volume apreciável.

Para a descrição dos solos finos, a plasticidade é muito importante, uma vez que através do ensaio de granulometria a característica da plasticidade não é definida.

Segundo a ABNT NBR 7250 (1982), a plasticidade define a consistência, sendo a facilidade relativa na qual o solo pode deformar. De acordo com a consistência, o solo pode ser dividido em mole, muito mole, rígido e duro.

O limite de plasticidade foi determinado de acordo com a ABNT NBR 7250 (1982). Neste ensaio, um cilindro de solo é rolado sobre uma placa de vidro, como pode ser observado na Figura 5.12. O limite de plasticidade é obtido determinando o teor de água para o qual um cilindro do solo, com 3 mm de diâmetro, atinge a rotura. Para atender as normativas de experimentação, para determinar o limite de plasticidade de um solo é necessário determinar o valor médio do teor de água obtido em pelo menos três provetes de solo.

Os resultados obtidos nos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade, para as amostras 1 e 2 recolhidas na mancha de empréstimo, são expressos na Tabela 5.3. Nesta tabela são indicados ainda os valores do índice de plasticidade (IP) do solo, calculados pela equação (equação 5.1). A análise dos valores do índice de plasticidade permite concluir, segundo Caputo (1988), que se trata de um solo de elevada plasticidade, pois apresenta valores de $IP > 15\%$.

$$IP = LL - LP \quad (5.1)$$



Figura 5.12 – Ensaio de limite de plasticidade (Lino, sem data)

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de determinação dos limites de consistência do solo

Amostra	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
1	53,0	32,7	20,1
2	51,1	30,8	20,3

A granulometria do solo juntamente com os valores dos limites de consistência permitiram classificar o solo quanto ao sistema de classificação HRB (Highway Research Board) e quanto ao sistema SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos).

No sistema HRB, o solo, de ambas as amostras, foi classificado como argiloso A-7-6, com mais de 35 % passado no peneiro #200 e LL superior a 50 %, e índice de grupo (IG) igual a 15 na amostra 1 e igual a 14 na amostra 2.

No sistema SUCS ambas as amostras de solo pertencem ao grupo dos solos finos, sendo classificadas como MH – silte elástico arenoso, com mais de 50 % do solo passante no peneiro #200 e LL superior a 50 %.

Ensaio de compactação Proctor

O ensaio de compactação Proctor é um dos principais e mais importantes procedimentos de estudo e de controle e manutenção da qualidade dos aterros em solo compactado. Através deste ensaio, obtém-se o peso volúmico aparente seco máximo e o teor de água ótimo do solo compactado com uma dada energia de compactação.

Os ensaios de compactação Proctor foram realizados conforme a norma ABNT NBR 7182 (2016). O ensaio baseia-se em compactar um provete de solo num molde cilíndrico, fazendo alterar o teor de água até obter o ponto de compactação máxima, no qual, se também obtém o teor de água ótimo de compactação.

Na Tabela 5.4 são apresentados os pares de valores de peso volúmico aparente seco máximo e do teor de água ótimo correspondente para cada amostra de solo obtidos através dos ensaios de

compactação, nos quais foi aplicada a energia do ensaio Proctor normal. A Figura 5.13 apresenta a curva de compactação obtida de cada uma das amostras.

Tabela 5.4 – Valores do peso volúmico e aparente seco máximo e teor de água ótimo

Amostras	γ_{dmax} (g/m ³)	w_{opt} (%)
1	1,490	21,7
2	1,515	21,2

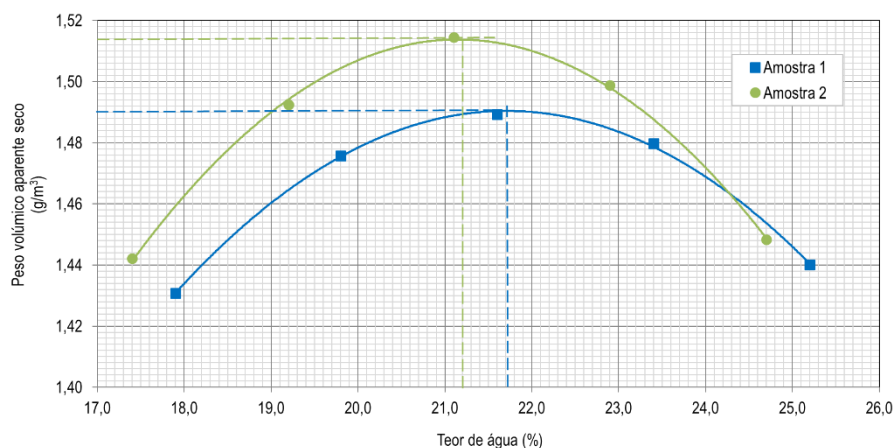


Figura 5.13 – Curva de compactação das amostras do solo

Ensaio CBR (California Bearing Ratio)

O ensaio CBR é um método empírico que possibilita a análise do comportamento de resistência e deformação do solo através de um índice. O CBR é a relação, em percentagem, entre a força necessária para um pistão normalizado penetrar num provete de solo compactado até determinada profundidade e a força necessária para que o mesmo pistão penetre até à mesma profundidade e com a mesma velocidade num provete de material padrão.

O ensaio CBR foi realizado conforme a norma ABNT NBR 9985 (1987). A compactação dos provetes foi realizada utilizando a energia de compactação do ensaio Proctor normal e o teor de água ótimo estimado nos ensaios de compactação. Na Tabela 5.5 são apresentados os resultados obtidos no ensaio CBR.

Tabela 5.5 – Resultados do ensaio CBR

Amostras	γ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)	CBR (%)	Expansão (%)
1	1,490	21,7	6,6	1,20
2	1,515	21,2	9,0	1,08

Construção do aterro

Depois da caracterização do solo proveniente das manchas de empréstimo, foi iniciada a construção do aterro. A Figura 5.14 e a Figura 5.15 mostram a escavação e remoção do solo da mancha de empréstimo. A Figura 5.16 ilustra uma vista geral da mancha de empréstimo e do local de construção do

aterro. O aterro foi executado com camadas de 20 a 25 cm de espessura. Devido à inclinação do terreno o aterro apresenta uma altura variável, tendo havido necessidade de realizar entre três a quinze camadas para que fosse atingida a altura total do aterro. A Figura 5.17 mostra a execução do aterro utilizando o cilindro pés de carneiro. Além do cilindro pés de carneiro de rolos vibratórios, nos trabalhos de terraplenagem foram também utilizadas pás escavadoras, caminhões basculante e caminhões com depósito para água, como pode ser observado. Em cada camada, o técnico de laboratório realizava ensaios *in situ*. Através destes ensaios foi possível saber o grau de compactação em cada camada do aterro e de acordo com os resultados encontrados, o técnico de laboratório aceitava ou não o início da próxima camada.



Figura 5.14 – Remoção do solo da mancha de empréstimo



Figura 5.15 – Remoção do solo da mancha de empréstimo



Figura 5.16 – Vista geral da mancha de empréstimo e do local de construção do aterro

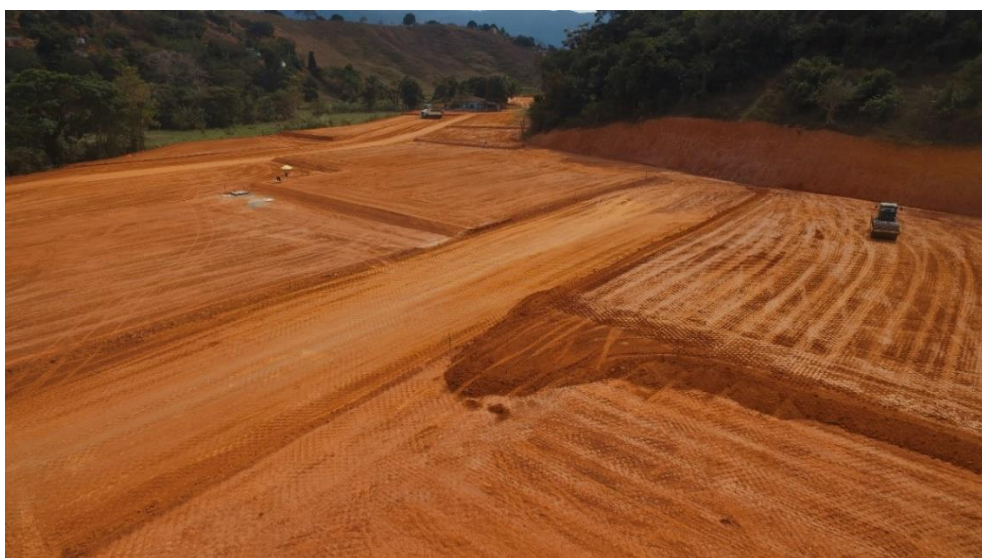


Figura 5.17 – Construção do aterro utilizando cilindro pés de carneiro

Controlo de compactação do solo

Após a compactação de cada camada de solo foi realizado o controlo da compactação comparando os resultados obtidos em campo com os determinados em ensaios de referência realizados em laboratório. Para a realização dos ensaios de referência foram recolhidas, na mancha de empréstimo, três amostras de solo, com as quais foram realizados em laboratório ensaios Proctor, de acordo com a norma ABNT NBR 7182 (2016), para obtenção da curva de compactação e a partir dela, os valores do peso volúmico aparente seco máximo e do teor de água ótimo do solo, que são condições essenciais para manter as características de resistência do solo ao longo de toda a vida útil da obra. No campo, e em cada camada de solo compactada, foram realizados ensaios com a garrafa de areia, de acordo com a ABNT NBR 7185 (1986) ou com o cilindro de cravação, conforme a ABNT NBR 9813 (2016), com o objetivo de determinar,

o peso volúmico aparente seco. O teor de água no campo foi também determinado através do ensaio *Speedy*, de acordo com a DNER-ME 052 (1994), ou do método da frigideira.

Os resultados do peso volúmico aparente seco e do teor em água obtidos nos ensaios de campo foram comparados com os obtidos em laboratório, permitindo estimar o grau de compactação do solo e o desvio do teor de água do solo compactado relativamente ao valor do teor de água ótimo obtido em laboratório.

Ensaio da garrafa de areia

O ensaio da garrafa de areia é utilizado para determinar *in situ* o peso volúmico aparente seco de solos no estado natural ou compactados. Este ensaio foi realizado conforme a ABNT NBR 7185 (1986) e consiste na substituição do volume de solo retirado de um furo por igual volume de areia de peso volúmico conhecido. A execução do ensaio segue os seguintes passos:

- 1) Para realizar o ensaio é necessária uma garrafa de vidro ou de plástico, com capacidade de 3500 cm³, contendo um gargalo rosqueado, funil metálico com registo e rosca. Primeiramente deve-se pesar a garrafa com areia de peso volúmico conhecido no seu interior, conforme apresentado na Figura 5.18.



Figura 5.18 – Pesagem da garrafa de areia (Cangussu, 2022)

- 2) Nivelar a superfície do aterro e posicionar a bandeja com um orifício circular no centro, de acordo com a Figura 5.19. Com um escopro e uma marreta foi realizado um furo no solo compactado com diâmetro igual ao do furo central da bandeja e profundidade correspondente à espessura da camada a ensaiar.



Figura 5.19 – Realização da cavidade no solo compactado (Cangussu, 2022)

- 3) O solo escavado foi pesado para determinar o peso do solo húmido (Figura 5.20 (a)). Do material escavado foi retirado um provete para determinar o teor de água do solo compactado (Figura 5.20 (b)).



(a)



(b)

Figura 5.20 – Pesagem e secagem do solo (Cangussu, 2022)

- 4) Depois do furo escavado é posicionada a garrafa de areia com o funil apiado sobre a bandeja, deve-se abrir o registro, deixando a areia escoar livremente até parar o movimento dentro do garrafa, de acordo com a Figura 5.21. Fecha-se o registro e pesa-se o garrafa com a areia restante. Conhecido o peso da areia que preenche o furo e o peso volúmico da areia foi possível estimar o volume do furo. Com os valores do peso do solo escavado e do volume do furo foi determinado o peso volúmico aparente seco e o grau de compactação do solo..



Figura 5.21 – Procedimento com a garrafa de areia (Cangussu, 2022)

Extractor

Este ensaio é executado conforme a ABNT NBR 9813 (2016) e segue os seguintes passos:

- 1) O extractor é assente sobre o solo nivelado;
- 2) O restante equipamento é montado e é iniciada a cravação do extractor, através de queda livre do pilão de cravação, conforme Figura 5.22, tendo cuidado de manter a haste na posição vertical. A cravação deve ser constante, de modo que o extractor fique com o bordo superior 1 cm abaixo da superfície do terreno.



Figura 5.22 – Ensaio com o extractor

- 3) Retirar o conjunto de cravação com auxílio de uma picareta, escavando o terreno próximo do extractor, como mostra a Figura 5.23.



Figura 5.23 – Remoção do extractor

- 4) Utilizando uma espátula e uma régua biselada, remove-se o excesso de solo em ambas as faces do provete, como mostra a Figura 5.24.



Figura 5.24 – Remoção do excesso do solo no provete

- 5) Remove-se do centro do provete uma porção de solo para determinar o teor de água do solo compactado, Figura 5.25.



Figura 5.25 – Remoção de uma porção de solo do provete

- 6) Retira-se o provete do interior do extrator, Figura 5.26.



Figura 5.26 – Remoção do provete do interior do extractor

- 7) Realizar a pesagem da porção de solo retirada do provete, Figura 5.27.



Figura 5.27 – Pesagem da porção de solo retirada do provete

- 8) Realizar a secagem do solo, conforme Figura 5.28. Em seguida, efetuar a pesagem do solo seco para determinar o teor de água do solo compactado e o grau de compactação do aterro.



Figura 5.28 – Secagem do solo

Ensaio Speedy

O ensaio *Speedy* foi usado para determinar o teor de água do solo compactado. Foi realizado de acordo com a DNER-ME 052 (1994) e consiste em fazer reagir a água presente no solo com carboneto de cálcio (CaC_2) no interior de uma garrafa *Speedy*, em que vai ocorrer liberação de gás acetileno, aumentando a pressão no interior da garrafa. O volume de gás libertado, determinado por um manómetro, é diretamente proporcional ao volume de água da amostra ensaiada.

Durante a execução do aterro foram realizados ensaios Proctor na macha de empréstimo e foi possível observar a mudança do tipo de solo, conforme a profundidade da retirada aumentava. Como exemplo mostra-se da Figura 5.29 à Figura 5.31 três das curvas de compactação obtidas e que serviram de referência para o processo de controlo de compactação das camadas de aterro.

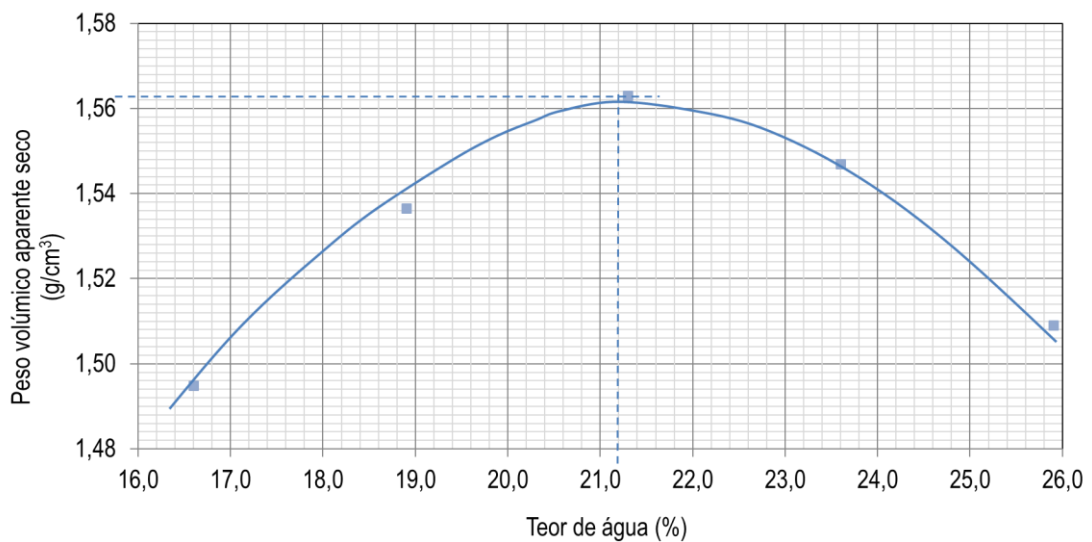


Figura 5.29 – Curva de compactação: argila siltosa com areia

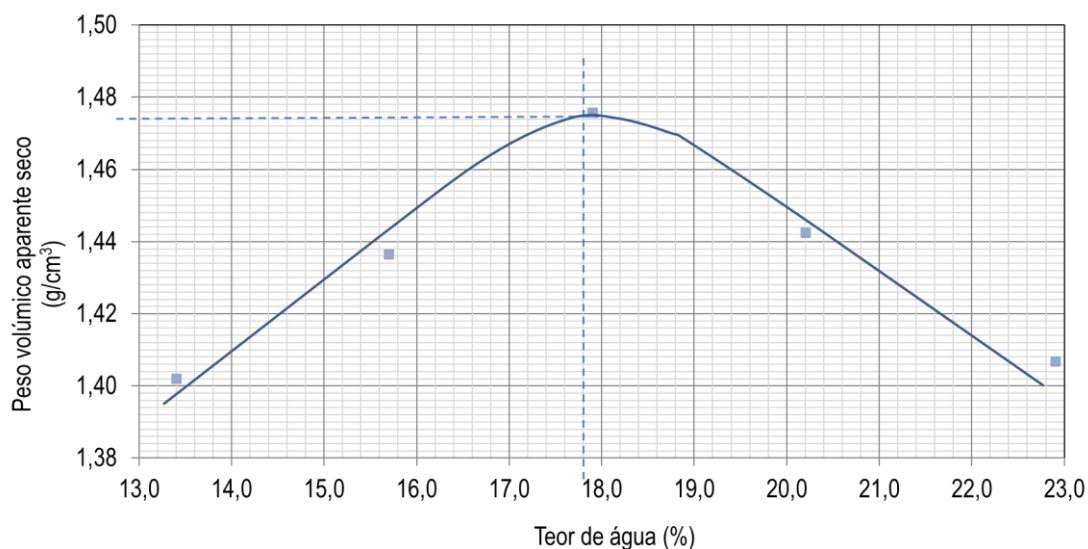


Figura 5.30 – Curva de compactação: silte roxo

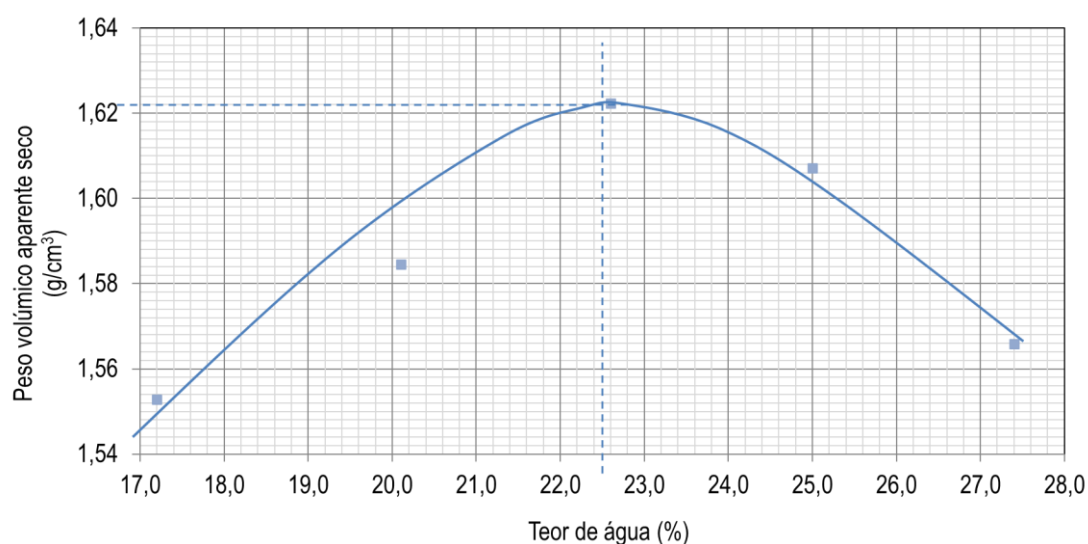


Figura 5.31 – Curva de compactação: argila arenosa

Conforme especificação do projeto, os ensaios realizados *in situ* deveriam alcançar um grau de compactação igual ou superior a 95% e teor de água igual a teor de água ótimo +/- 2%.

Na Tabela 5.6 estão indicados, como exemplo, alguns dos resultados obtidos durante o processo de controle de compactação.

Tabela 5.6 – Resultados dos ensaios realizados para controle da compactação

Amostras	γ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)	GC (%)		Δw (%)	
			min	máx	min	máx
Argila siltosa com areia	1,563	21,3	100,1	95,9	-1,7	1,20
Silte roxo	1,476	17,9	96,7	98,7	0,1	0,3
Argila arenosa	1,622	22,6	95,1	99,6	-1,3	2,0

5.4 Processo de execução

Gabarit do radier em parabolóide hiperbólico

Primeiramente, foi verificado se o projeto de fundação estava concluído, revisto e aprovado para iniciar a execução. Na Figura 5.32 e Figura 5.33 está representada a planta baixa do radier e o corte com o pormenor dos parabolóides hiperbólicos, respetivamente.

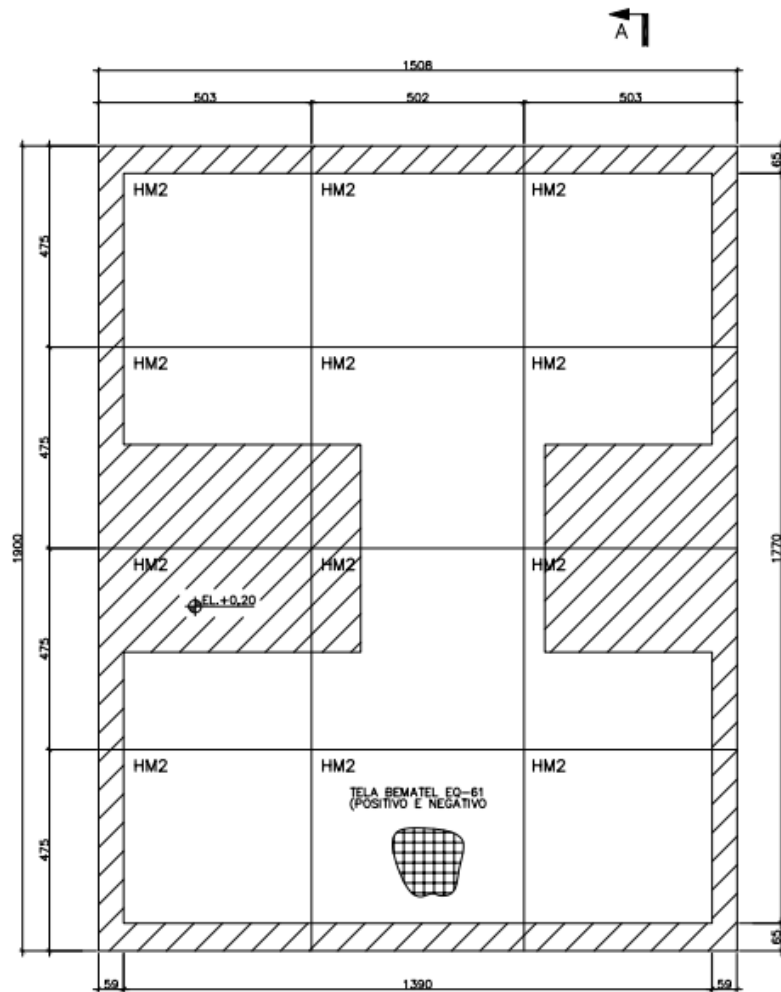


Figura 5.32 – Planta baixa do radier

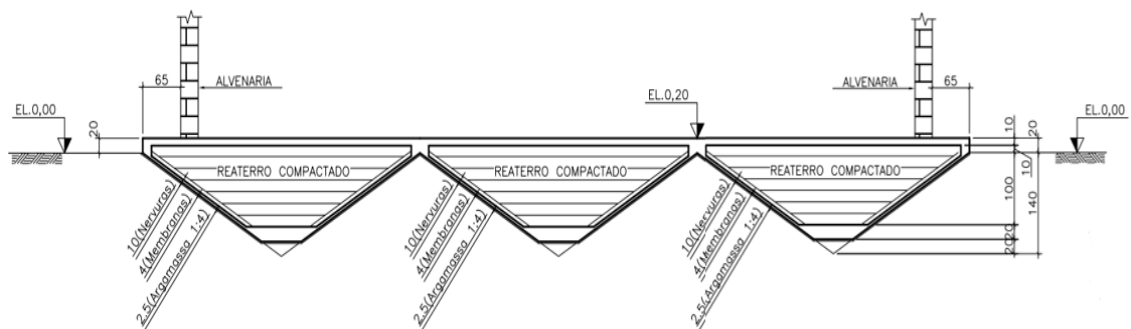


Figura 5.33 – Corte da fundação em radier com pormenor do parabolóide hiperbólico

Os módulos foram localizados e piquetados, como pode ser observado na Figura 5.34, seguindo as especificações do projeto e tendo como responsáveis pela execução o topógrafo e o encarregado.



Figura 5.34 – Localização dos módulos com o auxílio da topografia.

Escavação dos módulos

Após a marcação dos módulos, foi iniciada a escavação dos módulos com uma retroescavadora, como pode ser observado nas Figura 5.35 e Figura 5.36.



Figura 5.35 – Escavação dos módulos com retroescavadora



Figura 5.36 – Escavação dos módulos

Depois dos módulos estarem no formato desejado (piramidal), foi colocado um *gabarit* para orientar as diretrizes das curvaturas das direções de cada módulo, de acordo com a Figura 5.37 e Figura 5.38, e realizar acertos e regularizar os módulos foram realizados. Os módulos são humedecidos e posteriormente é realizada a compactação através de meios manuais.



Figura 5.37 – Escavação dos módulos



Figura 5.38 – Utilização de *gabarit* para regularização dos módulos

Colocação da 1ª camada de argamassa

Concluída a regularização dos módulos, foi colocada uma camada de argamassa de cimento/areia com traço de 1:4 para regularização, com espessura média de 2,5 cm. Este processo foi realizado utilizando um *gabarit* para auxiliar, como mostrado na Figura 5.39. Um dia após a colocação da camada de argamassa, deve ser removido o *gabarit* do módulo e em seguida regularizados esses pontos com argamassa, conforme Figura 5.40. A colocação desta camada de argamassa tem como objetivo não só fazer a regularização dos módulos, mas também impermeabilizar e proteger as armaduras do contato com o solo.



Figura 5.39 – Aplicação da camada de argamassa para regularização



Figura 5.40 – Remoção do *gabarit* dos módulos

Instalação prediais

Finalizado o processo de regularização dos módulos foram colocadas as instalações de esgoto primário e secundário e águas pluviais, como mostra a Figura 5.41. Estas instalações, realizadas de acordo com o projeto; foram colocadas sobre o terreno limpo e nivelado. Posteriormente, as tubagens foram cobertas com lona plástica com o intuito de proteger as armaduras do contato com o solo, conforme Figura 5.42.



Figura 5.41 – Instalação das tubagens hidrossanitárias



Figura 5.42 – Colocação de lona plástica com o intuito de proteger as armaduras do contato com o solo.

Formas do radier

Deve-se montar os painéis conforme projeto e marcação do radier, de acordo com o Figura 5.43. Os encontros dos painéis devem ser bem fixados para que não ocorra folgas. Executar o travamento das formas por meio de escoras inclinadas, tirantes, tensores, cunhas, *etc.*, de acordo com as dimensões dos painéis e da carga de colocação a suportar. Conferir todo o conjunto e partes e autorizar para betonagem, verificando principalmente: alinhamento lateral, prumo, nível, travamento, estanqueidade, esquadro e limpeza do fundo.

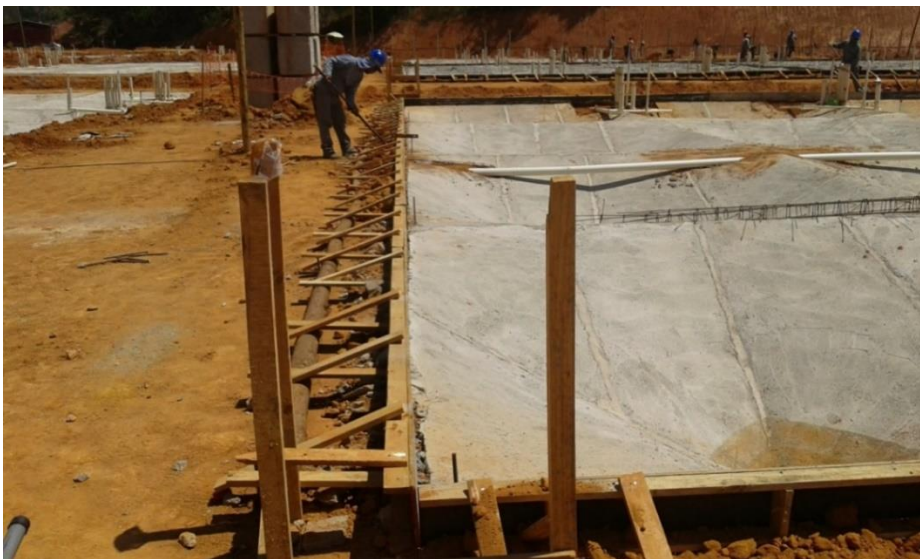


Figura 5.43 – Formas do radier

Armadura do módulo das membranas

São produzidas as armaduras das nervuras que são colocadas nos bordos superiores dos módulos. Todos os módulos terão nervuras e estribos colocadas conforme especificação do projeto, conforme Figura 5.44, Figura 5.45 e Figura 5.46.

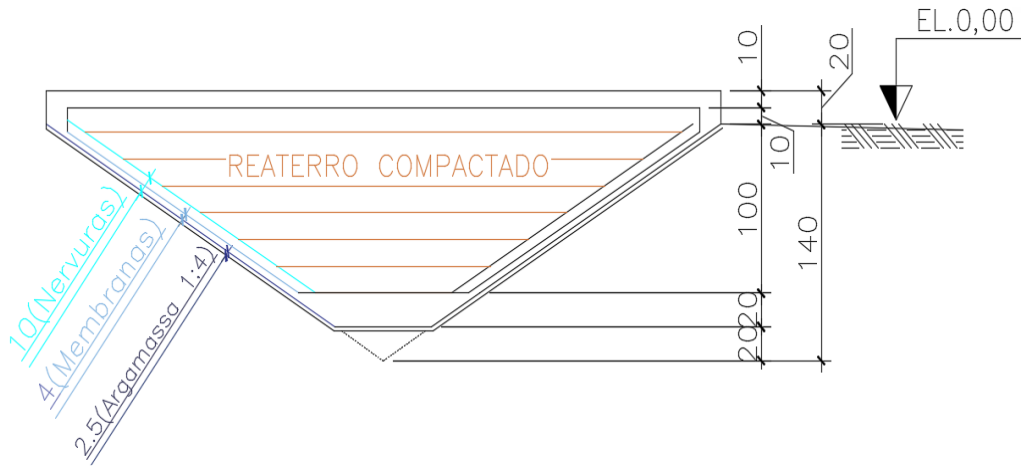
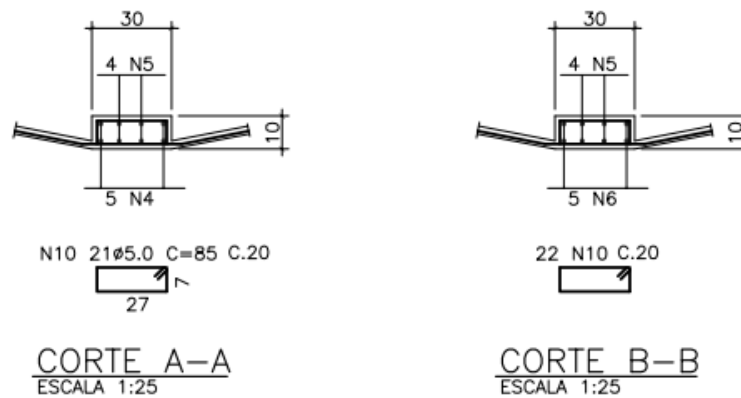


Figura 5.44 – Pormenor das armaduras de cada módulo



ESTRIBOS – RADIER TIPO 2

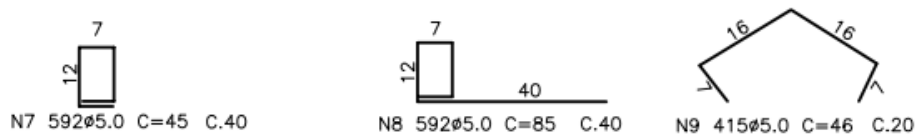


Figura 5.45 – Pormenor das armaduras das nervuras e dos estribos



Figura 5.46 – Execução da montagem das armaduras em cada módulo

No corpo das membranas foram colocadas armaduras com malha quadrada de 18 cm e 6,3 mm de diâmetro em aço CA-50, conforme especificação do projeto, (Figura 5.47 e Figura 5.48). A meio dos planos da membrana foram distribuídos 5 varões de aço CA-50 diâmetro 12,5 mm, de modo a ligar as nervuras que se encontram nas extremidades opostas de cada membrana. Estas armaduras de reforço da membrana foram instaladas nos dois sentidos de cada módulo.

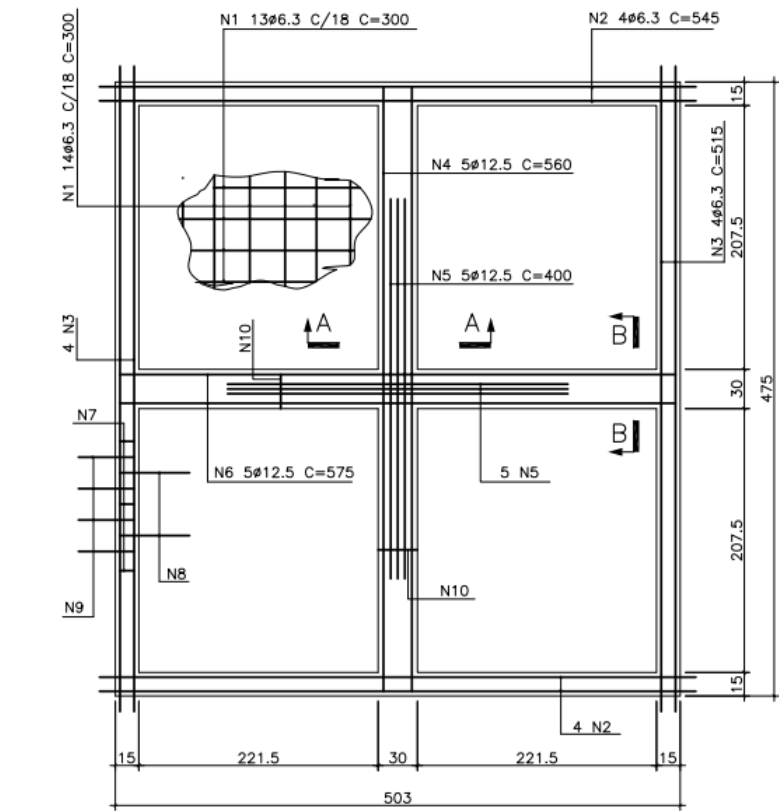


Figura 5.47 – Armaduras especificadas no projeto para cada módulo



Figura 5.48 – Montagem das armações nos módulos

Betonagem dos módulos

Na betonagem dos módulos foi utilizado betão estrutural do tipo C25, aplicado a partir de camião betoneira. As membranas e as nervuras foram betonadas do topo para a base dos módulos e com uma espessura de 4 cm. A Figura 5.49 ilustra a betonagem dos módulos.



Figura 5.49 – Betonagem dos módulos

Cura dos módulos

Logo após a betonagem foi realizada a cura dos módulos. A cura pode ser realizada através da cura hidráulica, mantendo o betão húmido por meio de aplicação de água ou através de cura química. A Figura 5.50 mostra a aplicação da cura química após a betonagem dos módulos.



Figura 5.50 – Cura química dos módulos após a betonagem

Aterro dos módulos

Depois do processo de cura foi iniciado o aterro dos módulos. O solo retirado da escavação dos módulos foi reutilizado no processo de aterramento dos mesmos, proporcionando um estaleiro limpo e com facilidade de movimentação.

O reaterro foi realizado em camadas de 20 cm, compactadas mecanicamente até chegar a extremidade de cada módulo, como mostra a Figura 5.51 e Figura 5.52.



Figura 5.51 – Aterro dos módulos



Figura 5.52 – Processo de aterro dos módulos

2º camada de argamassa de regularização sobre o reaterro

Concluído o preenchimento dos módulos com o solo compactado, foi executada a aplicação da 2ª camada de argamassa sobre o reaterro com a colocação sobre este de uma camada de argamassa de cimento/areia com o traço 1:4 e espessura de 2,5 cm, conforme Figura 5.53 e Figura 5.54.



Figura 5.53 – Aplicação de camada de argamassa de regularização do aterro



Figura 5.54 – Execução da camada de argamassa de regularização sobre o aterro

Armação do radier

Depois da camada de argamassa, foi posicionada a malha EQ-61 de armadura positiva da mesa de compressão, constituída por uma malha quadrada de 15 cm em aço CA-60, de acordo com a Figura 5.32. Em seguida foram colocadas as instalações elétricas e de telecomunicações e, posteriormente, realizada a montagem das armaduras negativas, conforme apresentado na Figura 5.55 e Figura 5.57. A Figura 5.56 ilustra a emenda das armaduras sobrepostas de 20 cm.

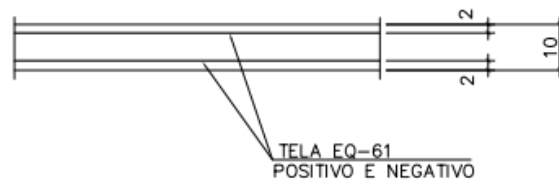


Figura 5.55 – Armadura da laje



Figura 5.56 – Pormenor da emenda da malha de armadura da laje



Figura 5.57 – Armaduras do radier

Instalações prediais

Sobre a armadura EQ – 61 positiva, conforme descrito no tópico anterior e como pode ser observado na Figura 5.58, foram colocadas as tubagens para a instalação dos cabos elétricos e de telecomunicação. Toda a instalação, realizada conforme projeto da Figura 5.59, foi verificada a sua fixação às armaduras antes da realização da betonagem da laje em radier.



Figura 5.58 – Execução das instalações elétricas e de telecomunicações

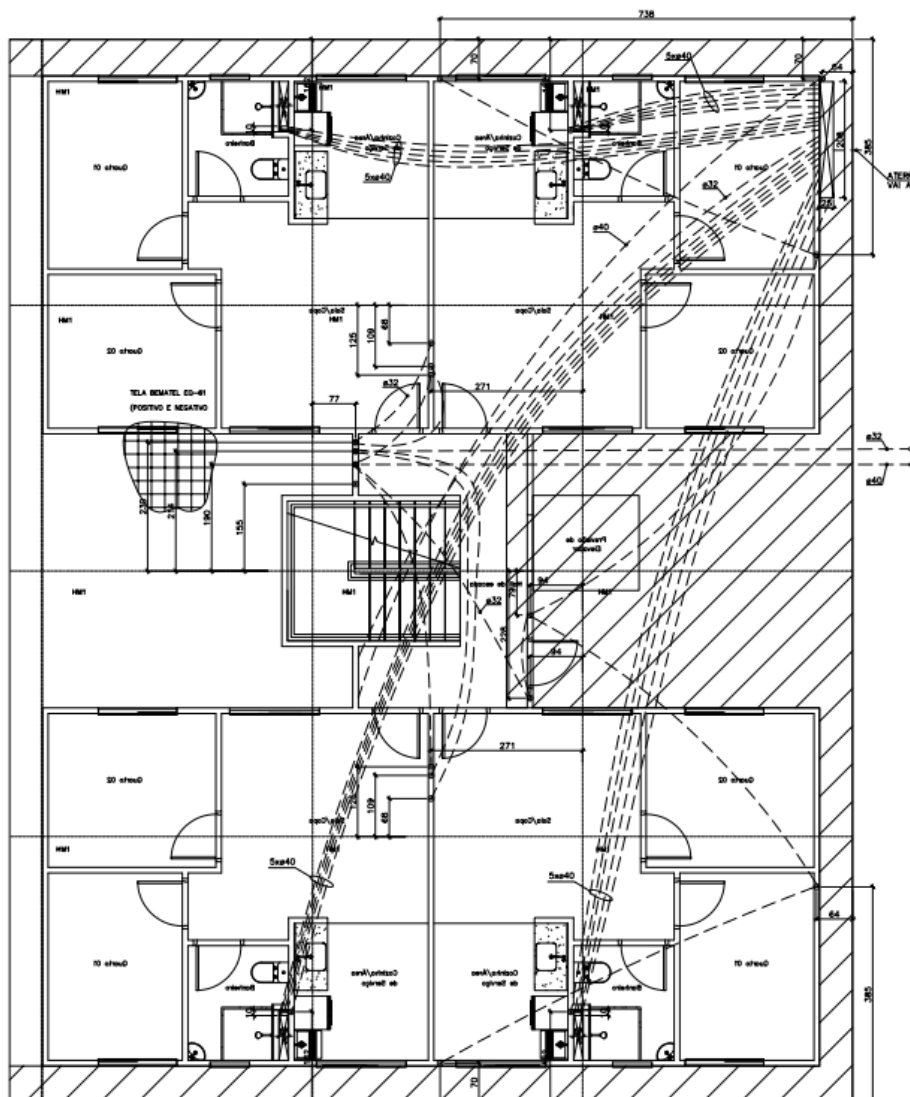


Figura 5.59 – Projeto das instalações elétricas e de telecomunicações

Betonagem da laje do radier

Finalizadas todas as atividades, foi iniciada a betonagem da laje em radier, com uma espessura de 10 cm. Durante a execução do serviço deve realizar movimentos circulares evitando falhas e vazios e utilizar a régua vibratória para melhor adensamento e nivelamento do betão, como é mostrado nas Figura 5.60 e Figura 5.61. A cura do betão foi realizada por molhagem uma vez por dia, durante os três dias subsequentes à betonagem, conforme Figura 5.62.



Figura 5.60 – Betonagem da laje em radier



Figura 5.61 – Execução da betonagem da laje em radier



Figura 5.62 – Execução da cura do betão através de manta húmida

5.4.1 CONCLUSÃO DO EDIFÍCIO

Finalizada a fundação radier em parabolóide hiperbólico, foi iniciada a execução da estrutura. No caso desta obra, a estrutura foi realizada em betão armado utilizando cofragem metálica. O radier foi o ponto inicial para a execução da estrutura, durante a betonagem foram adicionados ao radier a armadura de arranque para servir de referência na execução das paredes.

Será apresentado a seguir, de forma sucinta, a execução da estrutura em betão armado utilizando as cofragens metálicas.

- 1) O primeiro passo da execução das paredes foi a marcação e fixação dos espaçadores, conforme Figura 5.63. Os espaçadores são utilizados com o objetivo de guiar a montagem das cofragens metálicas e impedir o fechamento das cofragens.



Figura 5.63 – Execução das marcações e fixação dos espaçadores das paredes

- 2) Execução da montagem das armaduras (gaiolas) das paredes, conforme Figura 5.64.



Figura 5.64 – Serviço de montagem das armaduras

- 3) Execução da instalação dos kits elétricos, de acordo com a Figura 5.65 e Figura 5.66.



Figura 5.65 – Instalação dos kits elétricos das paredes



Figura 5.66 – Instalação dos kits elétricos da laje do piso elevado

- 4) Execução da montagem das cofragens internas/externas, como pode ser observado nas Figura 5.68, Figura 5.69 e Figura 5.70. A montagem das cofragens seguia a sequência de acordo com o projeto da Figura 5.67. Cada divisão do apartamento tinha uma cor e uma numeração específica, para facilitar a montagem e desmontagem da cofragem.

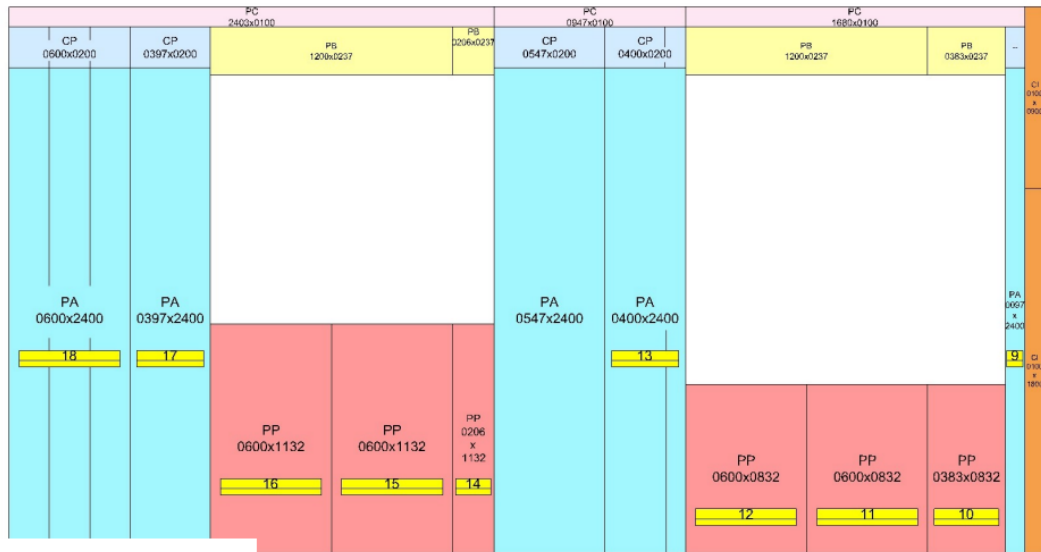


Figura 5.67 – Projeto das cofragens



Figura 5.68 – Montagem das cofragens internas



Figura 5.69 – Montagens das cofragens



Figura 5.70 – Montagem das cofragens

5) Execução da betonagem das lajes dos pisos elevados, conforme Figura 5.71 e Figura 5.72.



Figura 5.71 – Execução da betonagem



Figura 5.72 – Execução da betonagem

- 6) Retirada da cofragem, como pode ser observado nas Figura 5.73 e Figura 5.74 . Após 12h da betonagem, era realizado, pelo técnico de laboratório, o rompimento do provete de betão. Caso o betão tenha atingido a resistência solicitada em projeto, era retirada a confrangem e iniciada a montagem desta noutra fração.



Figura 5.73 – Descobragem



Figura 5.74 – Descobragem

- 7) O processo de execução da estrutura foi realizado até finalizar todos os blocos, como mostrado na Figura 5.75.



Figura 5.75 – Execução da betonagem dos edifícios

8) A Figura 5.76 mostra aspecto final do condomínio concluído.



Figura 5.76 – Condomínio concluído (Diário do aço, 2021)

5.5 Sistema de gestão da qualidade

Durante a execução da fundação radier em parabolóide hiperbólico deve-se priorizar a qualidade de execução de cada etapa do processo construtivo, garantindo materiais de qualidade e procedentes de fornecedores previamente selecionados e qualificados. Os procedimentos de produção são analisados criticamente e aprovados por pessoal capacitado, principalmente para aqueles serviços considerados

específicos e controlados, onde a deficiência do produto acabado possa surgir, eventualmente, depois do produto estar em uso ou o serviço tenha sido entregue.

Os materiais utilizados com função estrutural como a argamassa e o betão provenientes de central, devem ser validados antes da sua aplicação, podendo essa validação ser realizada por um laboratório contratado ou pelo laboratório do fornecedor.

5.5.1 VALIDAÇÃO DA ARGAMASSA E DO BETÃO ESTRUTURAL

Os requisitos e controlo do desempenho como a resistência à compressão da argamassa e do betão estrutural, podendo ser industrializados ou produzidos em obra, devendo em qualquer dos casos serem executados conforme as especificações indicadas no projeto. Na execução desta obra, foi obrigatória a dosagem experimental da argamassa e do betão, portanto, em cada camião betoneira que chegou à obra, e antes da aplicação da argamassa ou do betão, foram realizados ensaios *slump* para avaliar a trabalhabilidade, ou a moldagem de provetes para avaliar a resistência à compressão.

Durante a execução da obra, verificou-se a necessidade de controlar a qualidade da argamassa e do betão utilizado. O material era recebido pelo engenheiro e pelo técnico de laboratório, que identificavam o local onde seria aplicado, e cada camião era monitorado através de anotações no formulário de Controlo e Rastreabilidade. Este controlo permitiu um completo acompanhamento dos materiais utilizados, portanto, permitiu rastrear o local da aplicação.

Ensaio *slump*

O objetivo da realização do ensaio *slump* é avaliar a trabalhabilidade do betão e verificar se contém as características necessárias conforme solicitado em projeto, o ensaio foi realizado conforme as NBR NM 67 (1998) e ABNT NBR 10342 (1992).

No caso do betão proveniente de central utilizado na fundação, assim que o camião estacionava no local da obra, deve-se movimentar o betão para homogeneizar, o funcionário da central de betonagem e o técnico de laboratório retiravam uma amostra para a realização do ensaio de abatimento *slump*. Este ensaio é realizado compactando betão fresco no interior de um molde com a forma tronco-cónica, em três camadas com volumes aproximadamente iguais. Em seguida é retirado o molde suavemente, num intervalo de tempo entre 5 s a 10 s, e medido o abaixamento do betão, que corresponde à diferença entre a altura do molde e a altura do cone de betão abatido (Figura 5.77). Função do resultado obtido, era autorizada ou não a descarga do betão.



Figura 5.77 – Realização do ensaio *slump*

Moldagem de provetes

Após a aceitação dos materiais, estes eram descarregados e era retirada da betoneira uma amostra para a confecção quatro provetes para os ensaios de compressão. Estes ensaios eram realizados levando os provetes à rotura aos 7 e aos 28 dias, conforme as normas ABNT NBR 5738 (2015) e ABNT NBR 5739 (2018). Dispondo dos equipamentos e materiais necessários, foram construídos os provetes utilizando moldes cilíndricos de 10x20 cm ou 15x30 cm, confeccionados em aço ou outros materiais não absorventes. Os moldes devem ter as superfícies internas lisas e sem defeitos e durante a construção dos provetes não devem sofrer deformações. Os moldes cilíndricos devem possuir dispositivos de fixação às respectivas placas da base e devem ser untados internamente com uma fina camada de óleo mineral antes de serem preenchidos com betão. Os moldes devem ser colocados sobre uma base nivelada, livre de choques e vibrações. Os provetes devem ser moldados em local próximo àquele onde serão armazenados nas primeiras 24 horas. A construção dos provetes não deve sofrer interrupções. O provete é colocado nos moldes em 3 camadas no caso do provete de 15x30 cm e em 2 camadas no provete de 10x20 cm. O adensamento de cada camada é executado com haste metálica lisa de 600 mm por 16 mm. No molde de 15x30 cm, são aplicadas 25 pancadas por camada; no molde de 10x20 cm, 12 pancadas por camada. Após o adensamento de cada camada, a superfície do topo dos provetes, deve ser alisada utilizando uma colher de pedreiro. Depois de construídos, os provetes devem ser imediatamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do betão e protegê-lo da ação das intempéries. Os provetes devem permanecer em superfície plana e isenta de qualquer tipo de vibração

durante 24 horas. Decorrido este tempo, deverão ser retirados da obra e transportados para o laboratório, onde serão desmoldados, identificados e acondicionados.

5.5.2 INSPEÇÃO DURANTE O PROCESSO DE EXECUÇÃO DO SERVIÇO

Após a conclusão de um serviço ou durante a sua execução, o engenheiro, mestre de obra ou o encarregado, verifica se o serviço executado está de acordo com os requisitos previstos. O engenheiro de qualidade e os estagiários verificam e registam as inspeções na Ficha de Verificação de Serviço – FVS. Para cada modalidade de serviço é preenchido um modelo de formulário. Caso durante a verificação das FVS encontre serviços não-conformes, estes devem ser registados e reinspeccionados subsequentemente até que a não-conformidade esteja resolvida. Todos devem estar cientes das não-conformidades e o engenheiro de qualidade deve assegurar que as etapas subsequentes não se iniciem, enquanto não tiver sido concluída a inspeção e os devidos controlos tenham sido verificados e validados pelas funções responsáveis.

Nas Figura 5.78 e Figura 5.79 são apresentados alguns exemplos de FVS que podem ser utilizados durante a execução da fundação paraboloide hiperbólico.

FICHA DE VERIFICAÇÃO DE SERVIÇOS / PRODUÇÃO		FUNDAÇÃO RADIER PARABOLOIDE - PARTE I									
OBRA:											
BLOCO:											
Item de Inspeção	Escavação dos Módulos		Aplicação de Argamassa e=2,5 cm		Armação das Lâminas e Nervuras		Concretagem Membranas e Nervuras - e=4 cm		Reaterro compactado		
Método de Verificação	Visual		Trena		Visual		Trena		Ensaio Proctor		
Local/Tolerância:	Conforme Projeto		+/- 5mm		Conforme Projeto		+/- 5mm		≥ 95% P.N		
	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	
	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	
	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	
	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	
	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	
	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	/ /	
Descrição da NC:											
Tratativa da NC:											
Legenda	<input checked="" type="checkbox"/> C = CONFORME		<input checked="" type="checkbox"/> NC = NÃO CONFORME		<input checked="" type="checkbox"/>		REINSPECIONADO				
DATA DO FECHAMENTO E LIBERAÇÃO DO SERVIÇO	___/___/___					RESPONSÁVEL PELA INSPEÇÃO: _____					
RESPONSÁVEL PELA LIBERAÇÃO:	_____										

Figura 5.78 – FVS Parte I – Fundações radier em paraboloide hiperbólico: Modelo de FVS 01

FICHA DE VERIFICAÇÃO DE SERVIÇOS / PRODUÇÃO			FUNDAÇÃO RADIER PARABOLOIDE - PARTE II					
OBRA:								
BLOCO:			DATA ABERTURA DO SERVIÇO ____/____/____					
Item de Inspeção	Aplicação de Argamassa sobre reaterro		Armação da Laje		Concretagem da Laje e=8 cm		Limpeza do serviço	
Método de Verificação	Visual		Visual		Trena		Visual	
Local/Tolerância:	Conforme Projeto		Conforme Projeto		+/- 5mm		100% limpo	
	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC
	/	/	/	/	/	/	/	/
	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC
	/	/	/	/	/	/	/	/
	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> NC
	/	/	/	/	/	/	/	/
Descrição da NC:								
Tratativa da NC:								
Legenda	<input checked="" type="checkbox"/> C = CONFORME	<input checked="" type="checkbox"/> NC = NÃO CONFORME	<input checked="" type="checkbox"/>	REINSPECIONADO				
DATA DO FECHAMENTO E LIBERAÇÃO DO SERVIÇO	____/____/____				RESPONSÁVEL PELA INSPEÇÃO: _____			
RESPONSÁVEL PELA LIBERAÇÃO:								

Figura 5.79 – FVS Parte II – Fundações radier em parabolóide hiperbólico: Modelo de FVS 02

Alguns exemplos de não conformidades encontradas durante a execução das FVS

- 1) **Não conformidade:** Após a remoção da cofragem verificou-se que em alguns pontos o radier não ficou uniforme, devido à falta de adensamento do betão, como pode ser observado na Figura 5.80.



Figura 5.80 – Falta de adensamento

Correção: Conforme indicado pelo engenheiro responsável, os pontos vazios foram preenchidos com betão.

- 2) **Não conformidade:** Após execução da primeira etapa da betonagem foi verificado que o nível deixado para a segunda etapa em alguns blocos foi inferior a 10 cm, como mostra a Figura 5.81.



Figura 5.81 – Não conformidade na primeira etapa de betonagem

Correção: Foi realizada uma reunião com todos os encarregados e engenheiros sobre este assunto, solicitando que durante a betonagem, todos os pontos fossem verificados, para que o projeto fosse executado conforme o projeto.

Para os pontos no meio do radier que ficaram visivelmente mais altos foi solicitado o auxílio da topografia para fazer o levantamento das cotas em todo o radier e verificar se não irá haver interferência na cota final do radier.

- 3) **Não conformidade:** armaduras em contato com o solo na zona das tubagens hidráulicas, conforme ilustra a Figura 5.82.



Figura 5.82 – Armaduras em contato com o solo na zona das tubagens

Correção: Nestes pontos as armaduras foram colocadas sobre uma lona.

- 4) **Não conformidades:** Após compactação do reaterro, foram danificadas algumas tubagens das instalações hidráulicas, como pode ser observado na Figura 5.83.



Figura 5.83 – Tubagens das instalações hidráulicas danificadas

Correção: As tubagens foram descobertas e substituídas.

- 5) **Não conformidade:** localização dos eletrodutos com medidas diferentes das estabelecidas pelo projeto, conforme Figura 5.84



Figura 5.84 – Locação errada dos eletrodutos

Correção: Foi solicitado o correto posicionamento conforme as medidas indicadas no projeto.

- 6) **Não conformidades:** Falta de amarrações e espaçadores em alguns blocos, como mostra a Figura 5.85 .



Figura 5.85 – Falta de amarrações e espaçadores nas armaduras

Correção: Foram realizadas as amarrações e adicionados os espaçadores nos locais em falta.

Estes foram alguns dos exemplos de não conformidade verificados durante a execução das fundações. A qualidade deve ser sempre priorizada durante a realização de cada etapa de execução e as FVS revelaram ser um instrumento importante de auxílio na verificação e controlo das atividades realizadas.

5.6 Aspetos relevantes sobre execução das fundações radier em parabolóide hiperbólico

Após a execução da fundação radier em parabolóide hiperbólico, pode apresentar-se as seguintes observações:

- Durante o processo de escavação dos módulos, os moldes auxiliaram no processo de corte e acerto dos módulos;
- As camadas de argamassa facilitaram a marcação e amarração das armaduras, além de protegerem as armaduras do contato direto com o solo;
- A betonagem dos módulos foi realizada de forma rápida e fácil, devido ao baixo consumo de betão, dada a espessura reduzida de cada camada (cerca de 4 cm);
- Facilidade na passagem de tubagens elétricas, de telecomunicações, de água e etc;
- O consumo de utilização de madeira é reduzido;
- Este método de fundação possibilita obter um estaleiro de obra limpo e organizado;

- O radier facilita o início da execução da estrutura, por possibilitar a marcação do local das paredes;
- A betonilha fica praticamente pronta após a finalização do radier;
- Os passeios em redor da construção já são considerados no radier;
- Na questão económica, os materiais necessários para execução da fundação são relativamente mais baixos quando comparado com outro método tradicional;
- Devido ao baixo consumo de material, contribui para a redução dos impactos ambientais associados a extração da matéria-prima como: inertes, aço e madeira. E não pode deixar de considerar o processo de escavação dos módulos, que não gera resíduos, pois o solo escavado foi reutilizado no processo de reaterro dos módulos.

5.7 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado um estudo de caso relativo ao projeto de construção de um condomínio residencial que utilizou o modelo de fundações radier em parabolóide hiperbólico, sendo primeiramente definido a sua localização e as características do condomínio. Na sequência é apresentado o processo de execução da fundação radier em parabolóide hiperbólico, sendo demonstrado o passo a passo da execução, desde a preparação do terreno com a limpeza, trabalhos de terraplanagem, até o ponto de conclusão com a betonagem da laje do radier e o processo de cura. Também foi apresentado de forma sucinta, o modelo de estrutura realizada no condomínio, sendo uma estrutura em betão armado utilizando conrfranges metálicas. Posteriormente foi apresentado o sistema de gestão de qualidade utilizada durante todas as etapas de execução das fundações em radier em parabolóide hiperbólico, sendo um processo essencial para garantir a qualidade em todas as etapas do processo construtivo.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi apresentar a utilização da geometria parabolóide hiperbólico como um modelo de fundação superficial em radier, empregue como alternativa na execução da fundação de um condomínio residencial cujo solo de fundação apresenta baixa capacidade de suporte. A partir deste objetivo foram realizadas revisões bibliografias sobre as fundações radier, as fundações em casca, e as fundações em parabolóide hiperbólico, no intuito de compreender as suas geometrias existentes, os materiais utilizados durante a sua execução, o modelo apropriado para cada tipo de construção, suas vantagens e desvantagens e seu comportamento estrutural.

Após a apresentação desta análise foi possível compreender o processo de execução da fundação radier em parabolóide hiperbólico, sendo demonstrado o passo a passo da execução, desde o preparo do terreno com a limpeza, ensaios e terraplanagem, até o ponto de conclusão com a betonagem da laje do radier e o processo de cura. Também foi apresentado o sistema de gestão de qualidade utilizada durante todas as etapas de execução das fundações em radier em parabolóide hiperbólico, sendo um processo essencial para garantir a qualidade em todas as etapas do processo construtivo.

Após a execução das fundações no condomínio, pode-se perceber um desempenho satisfatório, no ponto de vista estrutural. Não houve qualquer tipo de patologia após a finalização da construção, podendo afirmar que o método utilizado garantiu a estabilidade da construção. No ponto de vista econômico, foi constatado uma economia significativa em comparação com outras construções de mesma dimensão, onde foi utilizado outro modelo de fundação. A rápida execução da fundação também foi uma das vantagens no cronograma da obra, possibilitou ajustar o cronograma e adiantar a entrega da obra.

A execução da fundação radier parabolóide hiperbólico no condomínio Residencial Buritis I e II despertou grande interesse nas empresas de construção das cidades vizinhas, devido a agilidade,

facilidade e benefícios que trouxe durante a construção do condomínio. Portanto, os resultados obtidos durante este estudo foram positivos, garantindo que o modelo de fundação utilizada foi uma boa alternativa para a realização do condomínio.

Após diversos relatos positivos na utilização da fundação radier paraboloide hiperbólico, poucos tem o conhecimento ou já presenciaram na prática a execução. Foi também intuito deste trabalho, apresentar algo novo, que possa tornar ainda mais competitivo o ramo da construção civil. Um método que proporciona economia, tornando possível realizar uma obra com um orçamento reduzido, sem perder a qualidade na execução. Além de ser um sistema que não oferece barulhos, vibrações, poeira e grandes riscos quanto a periculosidade e insalubridade aos responsáveis pela execução, pelo facto de ser um método fácil, rápido, limpo e com uma profundidade máxima de um metro.

Com o setor da construção em Portugal cada vez mais competitivo e inovador, utilizar este novo método de fundação pode alavancar e revolucionar o mercado português. Com todos os relatos positivos apresentados neste trabalho, pode-se concluir que a utilização deste método tem um ótimo potencial de crescimento e de geração de bons resultados, portanto, as empresas têm muito a ganhar.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Como desenvolvimentos futuros, o ponto de partida, será realizar a caracterização do terreno no local da obra. Esta caracterização irá permite identificar as características geológicas e geotécnicas do terreno, nomeadamente identificar qual tipo de solo, estimar as suas características de resistência e deformação e a existência do nível freático. Esta informação irá permitir fazer o dimensionamento das fundações em radier em paraboloide hiperbólicas, e estimar o custo de execução das fundações.

Posteriormente pode-se realizar um estudo comparativo do condomínio Buritis I e II citado no estudo de caso, com o condomínio Residenciais Esperança III, realizado na cidade de Caratinga/Minas Gerais. O condomínio Residenciais Esperança III faz parte do programa habitacional Casa Verde e Amarela (antigo Minha Casa Minha Vida) do Governo Federal. Sendo composto por 120 apartamentos.

A estrutura realizada na execução do condomínio Residenciais Esperança III foi a mesma utilizada no condomínio Buritis I e II, sendo em betão armado utilizando cofragem metálica. Mas a fundação utilizada na execução do condomínio foi em estacas o que possibilitará também realizar um estudo comparativo do desempenho dos dois métodos de fundação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Rahman, M. (1996). *Geotechnical behavior of shell foundations* [Tese de doutoramento]. Concordia University.
- ABNT NBR 10342, Concreto - Perda de abatimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brasil (2011).
- ABNT NBR 5738. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpo de prova, Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brasil (2015).
- ABNT NBR 5739. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brasil (2018).
- ABNT NBR 6122, Projeto e execução de fundações. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brasil (2019).
- ABNT NBR 7181. Solo - Análise granulométrica., Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brasil (2016).
- ABNT NBR 7182. Solo - Ensaio de compactação, Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brasil (2016).
- ABNT NBR 7185. Solo - Determinação da massa específica aparente, «in situ» com emprego do frasco de areia, Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro. Brasil (1986).
- ABNT NBR 7250. Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos., Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brasil (1982).
- ABNT NBR 9813. Solo — Determinação da massa específica CIL BIS, Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brasil (2016).
- ABNT NBR 9985. Reguladores de pressão para fluidos., Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro. Brasil (1987).
- Al-Azzawi, A. A. (2013). A Study of the Behavior of Shell Footings using Finite Element Analysis. *Eng. & Tech. Journal*, 31(19), 90–102.
- Albino, F. S. (2011, junho). *O que é laje sobre o solo (radier)?* Fck Engenharia. http://www.radierprotendido.com.br/radier_protendido.htm
- American Concrete Institute (ACI) 360R-06, (2006).
- Architecture, H. (2018, fevereiro). *Bolsa de valores*. Hidden Architecture. <https://hiddenarchitecture.net/bolsa-de-valores-de-mexico/>
- Architecture, H. (2021, julho). *San Antonio de las Huertas Church*. Hidden Architecture. <https://hiddenarchitecture.net/san-antonio-de-las-huertas-church/>
- Avendano, R. P. (2020, outubro). *Pandemia frena la restauración de «Los manantiales», de Félix Candela*. Cronica Queretaro. https://cronicaqueretaro.com/notas-pandemia_frena_la_restauracion_de_los_manantiales_de_felix_candela-14582-2020
- Benkendorf, A. (2015, maio). *Execução de fundação em casca Parabolóide Hiperbólica de um galpão industrial*. @construçãocivil. <https://construcaocivil.info/execucao-de-fundacao-em-casca-paraboloide-hiperbolica-de-um-galpao-industrial/>
- Bhattacharya, B., and Ramaswamy, G. S. (1977). «A finite element analysis of funicular shells on a two parameter foundation model.»

- Billington, D. P. (1992). *The Tower and the Bridge The New Art of Structural Engineering*. The New Art of Structural Engineering.
- Bittencourt, D. M. A. (2002, fevereiro). Sistemas de fundação: sobre o projeto de fundações. Em *Puc Goiás* (p. 25). <http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17430/material/PUC-FUND-02.pdf>
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design*. McGraw-Hill, 5 ed.
- Brito, L. D. (2010). *Recomendações para o projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento*. São Carlos.
- Bujang B.K. Huat and Thamer A. Mohammed. (2006). *Finite Element Study Using FE Code (PLAXIS) on the Geotechnical Behavior of Shell Footings*. 2(1), 104–108.
- Cangussu, N. (2022, janeiro). PAV (4) - Densidade in Situ. *YouTube*. <https://www.youtube.com/watch?v=hEYu81Nd5IU&t=209s>
- Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos solos e suas aplicações* (6.ª ed.). LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- Cauduro, E. L. (2000). Execução de radiers protendidos - Simplicidade e Economia. *42º Congresso Brasileiro do concreto*.
- Chongzhang, H. (1984). «*Rational calculation of conic shells.*»
- Chunxiao, W. (1985). *Design and construction of M type shell structure foundation for spheroidal tank*.
- CONSTRUCAOCIVILPET. (2018, Maio 12). *Fibras para concreto*. *civilizacaoengenhaira*. <https://civilizacaoengenhaira.wordpress.com/2018/10/29/fibras-para-concreto/>
- Construtora casa rápida. (2020, Junho 20). *Wood Frame*. <https://construtoracasarapida.com.br/wood-frame/>
- CREAR Engenharia. (2017, fevereiro). *CREAR Engenharia e os sistemas de estrutura em membranas*. Conteções Hyparwall. http://www.crear.com.br/crear2017/obras_calabrai_02-dk.htm
- Das, Y. C., and Kedia, K. K. (1977). «*Shells on elastic foundations.*»
- Diário do aço. (2021, julho). *Sorteio de 260 moradias ocorrerá dia 30 em Fabriciano*. <https://www.diariodoaco.com.br/noticia/0090057-sorteio-de-260-moradias-ocorrera-dia-30-em-fabriciano>
- Dierks, K., and Kurian, N. P. (1981). «*Zum Verhalten von Kegelschalenfundamenten unter entrischer und exzentrischer Belastung.*»
- Dierks, K., and Kurian, N. P. (1988). *Zum Verhalten von Kugel und Doppelkegelschalen- fundamenten unter zentrischer und exzentrischer Belastung*.
- Dória, L. E. S. (2007). *Projeto de estrutura de fundação em concreto do tipo radier* [Dissertação de Pós-Graduação]. Universidade Federal de Alagoas.
- Engenharia, E. (2019, Maio 4). *Sapatas de fundação*. <https://www.escolaengenharia.com.br/sapatas-de-fundacao/>
- Fantini, B. R. (2014, Maio 28). *Arcos e Parabolóides*. <http://grandes-vaos-n6b.blogspot.com/2014/06/sistemas-estruturais-grandes-vaos.html>
- Fareed, A., and Dawoud, R. (1979). «*Cylindrical shells on elastic foundation.*»
- Feickert, K., & Mueller, C. T. (2021). Thin shell foundations : Historical review and future opportunities. *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures, 1953*(August), 1953.
- Felix Candela. (1955). *Structural applications of hyperbolic paraboloidal shells*. *Journal of the American Concrete*

Institute.

- Figueiredo, O. de A. (2010). *Comportamento estrutural de fundações em parabolóide hiperbólico para edifícios residenciais*.
- Filgueiras, R. L., Silva, F. C. da, & Martins, C. J. (2012). Utilização da membrana hiperbólica como opção para fundação em radier. *XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, 3058–3066.
- Firno, C. da S. (2003). *Estruturas Tubulares enrijecidas por superfícies de dupla curvatura (hiperbólicas)*. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Fracalossi, I. (2015, setembro). *Clássicos da Arquitetura: Estação Ferroviária de Ribeirão Preto / Oswaldo Bratke*. Archdaily. <https://www.archdaily.com.br/br/772977/classicos-da-arquitetura-estacao-ferroviaria-de-ribeirao-preto-oswaldo-bratke>
- Gates, M. (sem data). *Brasília / os ursos da Igreja por Niemeyer*. Secret World. Obtido 2 de Junho de 2022, de <https://sworld.co.uk/2/131060/photoalbum/brasilia-os-ursos-da-igreja-por-niemeyer>
- Hanai, J. B. (2000). Lajes de Edifícios em Concreto Protendido com Cabos Pós-Tracionados – Manual de Projeto. *Tradução do Relatório Técnico nº 43, Concrete Society*. São Carlos.
- Hanna, A., & Abdel-Rahman, M. M. (1990). Ultimate bearing capacity of triangular shell strip footings on sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(12).
- Hanna, A., & El-Rahman, M. A. (1990, dezembro). Ultimate bearing capacity of triangular shell strip footings on sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(12), 1851–1862. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:12\(1851\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:12(1851))
- Hisour. (2016, janeiro). *Hisour Arte Cultura Historia*. Claroscuro. <https://www.hisour.com/es/heritage-tourism-39035/%0Ahttps://www.hisour.com/es/chiaroscuro-17636/>
- Huang-Yih. (1984). «*The theory of conical shell and its applications*.» Proc. Sih Engrg Mech. Div, Specialty Conf. in Engrg. Mech. in Civil Engrg, ASCE, University of Wyoming, Laramie, Wyoming.
- Jain, V. K., Nayak, G. C., and Jain, O. P. (1977). «*General behaviour of conical shell foundation*.»
- Karl Terzaghi and Otto Karl Fröhlich. (1936). *Theorie der setzung von tonschichten* (Leipzig, W). Universidade da Califórnia.
- Kuran, N. P., and Shah, S. H. (1984). Economy of conical and inverted dome shell foundations. *Journal of the Institution of Engineers (India), Part CI(64)*, 281–286.
- Kuran, N. P., and Mohan, C. S. (1980). *Contact pressures under shell foundations*.
- Kurian, N. P., and Varghese, P. C. (1971). *Model studies on the elastic behaviour of hyperbolic footings in sand*.
- Kurian, N. P., and Varghese, P. C. (1973). *A simplified approach to the tending of umbrella shell, and single Appar and plate on elastic foundation*.
- Kurian, N. P. (1971). «*Investigations on the structural performance of hyperbolic paraboloid shell footings on sand*.»
- Kurian, N. P. (2006). *Shell Foundations: Geometry, Analysis, Design and Construction*. Alpha Science International Limited.
- Kurian, N. P., & Jayakrishna Devaki, V. M. (2005). Analytical studies on the geotechnical performance of shell foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 562–573. <https://doi.org/10.1139/t04-110>
- Lino, A. (sem data). Ensaio Casa Grande. Em *Mecânica dos solos* (p. 14). <http://casas.mitula.com.co/offer-detalle/666/96635434937979493/2/1/casas-barrio-simon-bolivar-bogota/Doomos?cc=1>

- Lustosa, F. F. (2018). *Análise do processo executivo de fundação direta: Sapata isolada e radier*. Centro Universitário de João Pessoa - UNIPÉ.
- Marinho, F. (2020, maio). *Limite de liquidez e limite de plasticidade*. Guia da engenharia. <https://www.guiadaengenharia.com/limite-liquidez-plasticidade/>
- Martins, C. J., Figueiredo, O. A., Martins, L. A., & Peixoto, R. A. F. (2009, julho). Silo foundation optimization through reinforcement concrete shell structure. *WIT Transactions on the Built Environment*, 106, 233–243. <https://doi.org/10.2495/OP090211>
- Medrano, C. R. M. M. and R. H. (2013). Processo Construtivo e Expressão das Cascas em Concreto Armado no Brutalismo. *X Seminário Docomomo Brasil*, 11.
- Melerski, E. (1988). «*Thin shell foundation resting on stochastic soil.*»
- Molina, J. C., & Junior, C. C. (2010, dezembro). Sistema construtivo em «wood frame» para casas de madeira. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, 31(2), 143. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2010v31n2p143>
- Moreira, R. (2008). *Utilização de Membranas Tensionadas Leves na Execução de Estruturas Especiais*. Universidade do Porto.
- Mosquera, J. (2012, outubro). *Arquiscopio*. <https://arquiscopio.com/archivo/2012/10/16/hipodromo-de-lazarzuela/?lang=pt>
- DNER-ME 052, Pub. L. No. Solos e agregados miúdos-determinação da unidade com emprego do « Speed», 1 (1994).
- DNER-ME 122, Pub. L. No. Solos-determinação do limite de liquidez-método de rederência e método expedito (1994).
- Nakamura, J. (2021, agosto). *Radier de concreto é solução de fundação rasa para vários tipos de solo*. ACEWEB. <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/radier-de-concreto-e-solucao-de-fundacao-rasa-para-varios-tipos-de-solo/17269>
- Nath, Y, and Jain, R. K. (1985). «*Orthotropic anular Shells on elastic foundations.*»
- NBR NM 67. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brasil (1998).
- Nicholls, R. L., & Izadi, M. V. (1968). «*Design and testing of cone and hy par footings.*»
- Oliveira, A., Farias, I., Ferreira, A., & Barros, E. (2015, Junho 29). *O que é concreto protendido?* sh. <https://sh.com.br/pt/o-que-e-concreto-protendido/>
- P.C. Varghese. (2016). *Design of Reinforced Concrete Foundations* (Vol. 4, Número 1). PHI Learning Private Limited.
- Paliwal, D. N., Sinha, S. N., and Choudhary, B. K. (1986). «Shallow spherical shells on Pasternak foundation.» Em *J. Engrg. Mechanics, ASCE*, 112 (2).
- Pandian, N. S., and Ranganatham, B. V. (1970). *Hyperbolic paraboloidal shell foundations*. (Proc. Symp).
- Passini, S., Augusto, G., Luiz, G., & Aparecida, F. (2014, janeiro). Steel Frame na construção civil. *12º Encontro Científico Cultural Interinstitucional*, 1–14. <http://www.reformolar.com.br/construcao-rapida-e-limpa/>
- Pereira, C. (2019, março). *O que é radier?* Escola Engenharia. <https://www.escolaengenharia.com.br/radier/>
- Prateek, T. M., & Rode, V. R. (2020). Finite element analysis of Funicular shell footing on Winkler foundation. *International Journal of Engineering Development and Research*, 8(2), 340–348. www.ijedr.org
- Prefeitura de Coronel Fabriciano. (2021, julho). *Prefeitura de Fabriciano vai sortear no mais 260 moradias para os inscritos no Fabri Meu Lar*. <https://www.fabriciano.mg.gov.br/materia/prefeitura-de-fabriciano-vai-sortear-no-mais-260-moradias-para-os-inscritos-no-fabri-meu-lar>

-
- Pronozin, Y., Maltseva, T., Poroshin, O., & Medvedeva, A. (2019, janeiro). Thin-walled shell foundations. *MATEC Web of Conferences*, 265, 05032. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926505032>
- Remo Rinaldi. (2012). Inverted Shell Foundation Performance In Soil. *Inverted Shell Foundation Performance In Soil*, April.
- Ribeiro, F. R. C., Silva, M. de S., Monteiro, L. M. de S., Parente, L. M., Lima, C. J. F. de, & Modolo, R. C. E. (2020, abril). Utilização de radier em residências populares: estudo de caso. *Congresso Brasileiro de Patologia das construções*, 1695–1704. <https://doi.org/10.4322/cbpat.2020.165>
- Rio, P. (1994, fevereiro). Radiers Estaqueados. Em *Radiers Estaqueados* (Número 1972, pp. 31–59). https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3957/3957_3.PDF
- Santos, M. V., Ramos, P. V. B., Júnior, W. R. A., Teixeira, A. L., & Goes, J. R. (2016, novembro). A Utilização da Fundação do Tipo Radier. *Semana Nacional de Ciência e Tecnologia 2016 – IFS, November 2016*. <https://www.researchgate.net/publication/342217676>
- Shaligram, P. S. (2011). Behaviour of triangular shell strip footing on georeinforced layered sand. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2(2), 192–196.
- Sharama, A. k. (1984). «*Economy in shell foundations in soft soils.*»
- Sharma, A. K. (1973). *Investigation of spherical sheil foundation.*
- SINGER, M. F., & SILVA, L. G. (2014). *Análise de soluções para radier: Estudo sobre o uso de concreto reforçado com fibras de aço* (Número c). Universidade Federal do Paraná.
- Skempton, A. W. e Macdonald, D. H. (1956). *The allowable settlement of buildings*. Proceedings of Institute of Civil Engineering.
- Sousa, T. M. R. de. (2017). *Diferentes Concepções de Estruturas tipo Casca e a Influência no Comportamento Estrutural*. Universidade da Beira interior.
- Souza, F. A. de. (2018). Radier Simples, Armado e Protendido. *Instituto de Engenharia*.
- Stringfixer. (, Junho). *Mastro estaiado*. https://stringfixer.com/pt/Guyed_tower
- Taylor, D. W. (1948, dezembro). Fundamentals of soil mechanics. Em *John Wiley & Sons, Inc.* (Vol. 36). https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2_4
- Varghese, P. C., & Sciences, H. (2010). *Design of reinforced concrete foundations* (Vol. 4, Número 1). Asoke K. Ghosh, PHI Learning Private Limited.
- Velloso, D. D. A., & Lopes, F. D. R. (2009). *Fundações: critérios de projeto, investigacao do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas: Vol. c*. Oficina de Textos.