UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
COLEGIADO DE ENGENHARIA CIVIL
PROJETO DE GRADUAÇÃO

JÉSSICA LUCIO CALIARI
SARA MARIA NUNES ROSA

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO MÓVEL 6118 TOOL PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE FUNDAÇÕES RASAS

VITÓRIA
2021

JÉSSICA LUCIO CALIARI
SARA MARIA NUNES ROSA

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO MÓVEL 6118 TOOL PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE FUNDAÇÕES RASAS

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Lorenzo Augusto Ruschi e Luchi

VITÓRIA
2021

JÉSSICA LUCIO CALIARI
SARA MARIA NUNES ROSA

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO MÓVEL 6118 TOOL PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE FUNDAÇÕES RASAS

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 20 de maio de 2021

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Lorenzo Augusto Ruschi e Luchi
Universidade Federal do Espírito Santo
DEC/CT/UFES
Orientador

Prof. MSc. Fernando Musso Junior
Universidade Federal do Espírito Santo
DEC/CT/UFES

Prof. Dra. Elisabeth Junges
Universidade Federal do Espírito Santo
DEC/CT/UFES

A Margareth dos Santos Madeira (in memorian), fonte de força e inspiração para nós. Saber que você estaria vibrando conosco essa conquista nos deu força para continuar.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer, em primeiro lugar, a Deus, que em tudo nos conduziu e nos sustentou.

Agradecemos também ao nosso orientador, Prof. Dr. Lorenzo Augusto Ruschi e Luchi, por ter aceitado o desafio de nos orientar para desenvolver esse trabalho em menos de cinco meses. Muito gratas por todo apoio e suporte.

Ao Prof. MSc. Fernando Musso Junior, pelos materiais fornecidos, pelo auxílio prestado diante de nossas dúvidas e pela dedicação na criação da planilha eletrônica FMJ Tool, grande inspiração para este aplicativo.

A Rafael Cosmo, agradecemos pelas contribuições com o aplicativo, principalmente por se dispor a criar as imagens utilizadas nele.

À Universidade Federal do Espírito Santo, pela oportunidade de cursar uma graduação gratuita e de qualidade.

Às nossas famílias, aos nossos namorados, aos nossos amigos e colegas de trabalho, somos gratas pelo apoio emocional, pela paciência conosco em meio aos estresses próprios do desenvolvimento de um Projeto de Graduação e por nos ajudarem a testar o funcionamento do aplicativo.

Por fim, a Margareth dos Santos Madeira (in memorian), por todo apoio e acolhida e por ter nos dado nossa grande amiga e agora companheira de profissão, Isabella Madeira Bueno.

Seremos eternamente gratas.

RESUMO

A utilização de tecnologia faz parte do cotidiano de estudantes, professores e profissionais da engenharia. No que diz respeito ao cálculo estrutural, é comum a utilização de *softwares* computacionais, porém não há aplicativos para *smartphone* de referência, de fácil acesso e amplamente divulgados, que respeitem a norma técnica brasileira. O objetivo deste trabalho é continuar o desenvolvimento do aplicativo 6118 Tool, para o bom e eficiente emprego da Norma Técnica ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, em continuidade ao trabalho iniciado por Cosmo (2019). O aplicativo é voltado para estudantes e professores de engenharia civil, técnicos de edificações e arquitetos. Os módulos do aplicativo desenvolvidos neste trabalho permitem o dimensionamento de sapatas isoladas (retangulares ou circulares), sapatas corridas, sapatas associadas e vigas de equilíbrio. Esses módulos foram validados com exemplos obtidos na bibliografia e também desenvolvidos manualmente. O aplicativo pode ser utilizado tanto em smartphones com sistema operacional Android quanto iOS.

Palavras-chave: Norma ABNT NBR 6118, *mobile learning*, aplicativo para smartphone, fundações, sapata, viga de equilíbrio, 6118 Tool.

ABSTRACT

The use of technology is part of students', professors' and engineering professionals' daily lives. With regard to structural calculation, the use of computer software is common, but there are no reference smartphone applications, easily accessible and widely publicized, which respects the Brazilian Concrete Code. The objective of this work is to continue the development of the 6118 Tool application, for the good and efficient use of the Brazilian Technical Code ABNT NBR 6118: 2014 - Design of concrete structures - Procedure, in continuity with the work started by Cosmo (2019). The application is aimed at students and professors of Civil Engineering, building technicians and architects. The application modules developed in this work allow the dimensioning of isolated footing (rectangular or circular), strip footing, combined footing and strap beams. These modules were validated with examples obtained in the bibliography and also developed manually. The application can be used both on smartphones with Android and iOS operating systems.

Keywords: Code ABNT NBR 6118, mobile learning, smartphone application, foundations, spread footing, strap beam, 6118 Tool.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes tipos de fundações 20
Figura 2 – Diferentes tipos de fundações: sapata, tubulão e estacas, respectivamente 24
Figura 3 – Sapata isolada 25
Figura 4 – Radier 25
Figura 5 – Fundação profunda: estaca 26
Figura 6 – Fundação profunda: tubulão 27
Figura 7 – Bloco de coroamento 27
Figura 8 – Viga integrada à sapata alavancada 30
Figura 9 – Viga não integrada à sapata isolada com carga centrada 30
Figura 10 – Funcionamento e os esforços internos da viga de equilíbrio 32
Figura 11 – Logomarca do aplicativo “6118 Tool” 33
Figura 12 – Interface do Thunkable 34
Figura 13 – Telas do aplicativo mostrando as definições de leiaute escolhidas ... 34
Figura 14 – Subdivisões propostas para o dimensionamento de viga, pilar, laje e fundação 35
Figura 15 – Início do módulo de vigas e de fundações, respectivamente 36
Figura 16 – Mapa de navegação: sapata retangular com altura variável (1/2) 38
Figura 17 – Mapa de navegação: sapata retangular com altura variável (2/2) 39
Figura 18 – Mapa de navegação: sapata retangular com altura constate (1/2) 40
Figura 19 – Mapa de navegação: sapata retangular com altura constate (2/2) 41
Figura 20 – Mapa de navegação: sapata circular com altura variável (1/2) 42
Figura 21 – Mapa de navegação: sapata circular com altura variável (2/2) 43
Figura 22 – Mapa de navegação: sapata circular com altura constante (1/2) 44
Figura 23 – Mapa de navegação: sapata circular com altura constante (2/2) 45
Figura 24 – Mapa de navegação: sapata corrida com altura variável (1/2) 46
Figura 25 – Mapa de navegação: sapata corrida com altura variável (2/2) 47
Figura 26 – Mapa de navegação: sapata corrida com altura constante (1/2) 48
Figura 27 – Mapa de navegação: sapata corrida com altura constate (2/2) 49
Figura 28 – Mapa de navegação: sapata associada com altura variável (1/2) 51
Figura 29 – Mapa de navegação: sapata associada com altura variável (2/2) 52
Figura 30 – Mapa de navegação: sapata associada com altura constante (1/2) ... 53

Figura 31 – Mapa de navegação: sapata associada com altura constante (2/2) ... 54
Figura 32 – Mapa de navegação: viga de equilíbrio ... 55
Figura 33 – *Screen* “Especificações de projeto: força normal” para sapata retangular ... 56
Figura 34 – Correlações empíricas entre N_{SPT} e parâmetros do solo ... 57
Figura 35 – Pressão admissível de acordo com o tipo de solo ... 58
Figura 36 – Screen “Especificações de projeto: momentos” para sapata isolada retangular ... 59
Figura 37 – Impossibilidade de dimensionar sapata flexível na *screen* “dimensões de projeto” ... 62
Figura 38 – *Screen* de dimensões de projeto em planta para sapata associada ... 64
Figura 39 – Impossibilidade de dimensionar sapata parcialmente tracionada na *screen* “tensão máxima sob a sapata” ... 68
Figura 40 – *Screen* “tensões de cálculo e armadura” da sapata associada com altura constante ... 70
Figura 41 – Diagrama de Momento Fletor da viga de rigidez ... 72
Figura 42 – Diagrama de Força Cortante da viga de rigidez ... 72
Figura 43 – Sapata associada em planta ... 73
Figura 44 – Detalhamento da armadura na *screen* “Fôrmas e armação” ... 74
Figura 45 – *Screen* “cava e lastro” ... 75
Figura 46 – *Screen* “Resumo” ... 76
Figura 47 – *Screen* “Dados da viga de equilíbrio” ... 80
Figura 48 – *Screen* “Reações na viga de equilíbrio” ... 82
Figura 49 – Tração na sapata S2 ... 84
Figura 50 – Valor de Q_{S1} fora dos limites estabelecidos ... 85
Figura 51 – *Screen* “Esforços internos na viga de equilíbrio” ... 86
Figura 52 – Screen “Verificação de seção retangular” ... 87
Figura 53 – Exemplo resolvido de sapata isolada retangular com momento fletor 89
Figura 54 – Primeira validação da sapata isolada retangular ... 90
Figura 55 – Segunda validação da sapata isolada retangular ... 91
Figura 56 – Terceira validação da sapata isolada retangular ... 92
Figura 57 – Quarta validação da sapata isolada retangular ... 93
Figura 58 – Sapata modelada no CAD/TQS ... 94
Figura 59 – Volume de concreto e área de formas da sapata isolada retangular ... 94

Figura 60 – Peso de aço da sapata isolada retangular 95
Figura 61 – Volume do tronco de cone 96
Figura 62 – Exemplo resolvido de sapata isolada circular 97
Figura 63 – Validação da sapata circular (1/2) 98
Figura 64 – Validação da sapata circular (2/2) 99
Figura 65 – Cálculo de volume de um cindindo..... 100
Figura 66 – Cálculo de volume de um tronco de cone 100
Figura 67 – Exemplo resolvido de sapata corrida 101
Figura 68 – Primeira validação da sapata corrida 102
Figura 69 – Segunda validação da sapata corrida 103
Figura 70 – Terceira validação da sapata corrida 104
Figura 71 – Quarta validação da sapata corrida..... 105
Figura 72 – Exemplo resolvido de sapata isolada 106
Figura 73 – Validação do centro de carga da sapata associada 107
Figura 74 – Exemplo para validação da viga de rigidez 108
Figura 75 – Validação da viga de rigidez 108
Figura 76 – Diagramas da viga de rigidez 109
Figura 77 – Exemplo de cálculo de viga de equilíbrio 110
Figura 78 – Primeira parte da validação do módulo de viga de equilíbrio 111
Figura 79 – Sequência de resultados da validação da viga de equilíbrio 112
Figura 80 – Resultados apresentados por Luchi (2021)..... 112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das sapatas 29
Tabela 2 – Resumo das escolhas de Cosmo (2019) para o aplicativo..... 33
Tabela 3 – Comparação dos resultados do gabarito da prova e do aplicativo 99
Tabela 4 – Comparação dos resultados do exercício resolvido e do aplicativo para viga de rigidez 109
Tabela 5 – Comparação dos resultados do exercício resolvido e do aplicativo para viga de equilíbrio 111

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19

1.1 OBJETIVOS 20

1.1.1 Objetivo Geral 20

1.1.2 Objetivos Específicos 20

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21

2.1 BREVE REVISÃO DA LITERATURA 21

2.2 ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO DE CONCRETO 23

2.2.1 Sapatas 28

2.2.2 Viga de Equilíbrio 31

3 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO 33

3.1 RESUMO DO DESENVOLVIMENTO DE COSMO (2019) 33

3.2 DIVISÃO DO APLICATIVO EM MÓDULOS 35

3.3 ESCOLHA DAS ESTRUTURAS CALCULADAS 36

4 FUNÇÕES E RECURSOS IMPLEMENTADOS OU REFINADOS 37

4.1 MAPAS DE NAVEGAÇÃO 37

4.1.1 Sapata Isolada Retangular 37

4.1.2 Sapata Isolada Circular 42

4.1.3 Sapata Corrida 46

4.1.4 Sapata Associada 50

4.1.5 Viga de Equilíbrio 54

4.2 FORMULAÇÕES NO MENU DE SAPATAS 56

4.2.1 *Screen* “Especificações de projeto: força normal” 56

4.2.2 *Screen* “Especificações de projeto: momento fletor” 59

4.2.3 *Screen* “Dimensões de projeto” 60

4.2.4 *Screen* “Tensão máxima sob a sapata” 67

4.2.5 *Screen* “Tensões de cálculo e armadura” 69

4.2.6 *Screen* “Fôrma e armação” 73

4.2.7 *Screen* “Cava e lastro” 75

4.2.8 *Screen* “Resumo” 76

4.3 FORMULAÇÕES NO MENU DE VIGA DE EQUILÍBRIO 79

4.3.1 *Screen* “Viga de equilíbrio” 79

4.3.2 *Screen* “Reações na viga de equilíbrio” 82

4.3.3 *Screen* “Esforços internos na viga de equilíbrio” 85

5 VALIDAÇÃO 89

5.1 SAPATA ISOLADA RETANGULAR 89

5.2 SAPATA ISOLADA CIRCULAR 97

5.3 SAPATA CORRIDA 101

5.4 SAPATA ASSOCIADA 106

5.5 VIGA DE EQUILÍBRIO 110

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 113

6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS 113

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 115

ANEXO – *E-MAIL* COM GABARITO DA QUESTÃO 01 DA PROVA DE 2018/01 ENVIADO PELO PROF. FERNANDO MUSSO JUNIOR 119

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias digitais são instrumentos que contribuem para mudanças em práticas sociais como a comunicação, a socialização, a organização, a mobilização e a aprendizagem. Dentre essas inovações, encontra-se o *smarthphone,* cada vez mais presente no cotidiano da população e que possui ferramentas que podem auxiliar no processo de ensino-aprendizagem e promover a interatividade dos discentes. (SILVA; TRAJANO; LIMA, 2018)

Entretanto, no Brasil, mesmo que muito se discuta sobre a introdução desta tecnologia no ambiente acadêmico, ainda é incomum a utilização prática de aparelhos eletrônicos por parte do corpo discente para fins de aprendizado nas instituições de ensino. (BRUZZI, 2016)

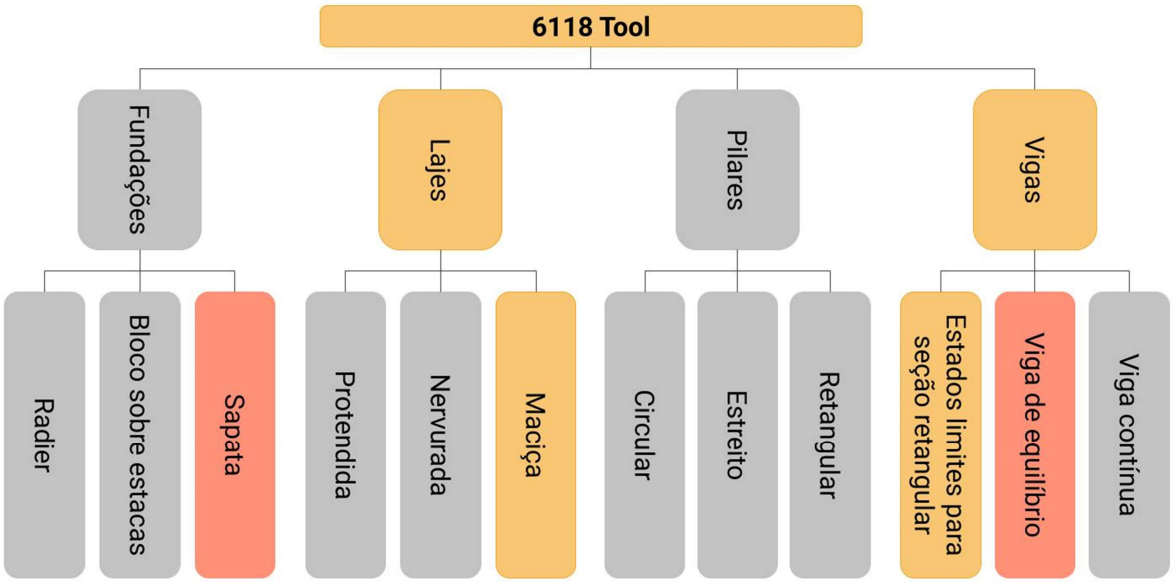
A Engenharia Civil, neste contexto, realizou grandes avanços com a inserção de recursos tecnológicos para representações gráficas de projetos, sendo amplamente divulgado na graduação o uso de *softwares* como o AutoCAD e o Revit. Porém, quando se entra na conjuntura de disciplinas de dimensionamento de estruturas, ainda é comum a utilização exclusiva de livros, apostilas e, em algumas situações, planilhas eletrônicas.

Acreditando na relevância de um aplicativo que conseguiria inserir o *smarthphone* no aprendizado na área de dimensionamento de estruturas de concreto para os cursos de engenharia, arquitetura e técnico em edificações, Cosmo (2019) iniciou o desenvolvimento do 6118 Tool, um aplicativo para o eficiente emprego da Norma Técnica ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.

Inicialmente, o aplicativo previa os módulos de vigas, pilares, lajes e fundações, divididos nas seções indicadas na Figura 1. Estão representadas em laranja as seções desenvolvidas por Cosmo (2019), em cinza as seções ainda não elaboradas, e em salmão as produzidas no presente trabalho.

A seção de sapatas, desenvolvida nesse trabalho, havia sido iniciada por Cosmo (2019), porém não publicada. Esta contava inicialmente com sapatas isoladas retangulares e circulares, de altura constante e variável.

Figura 1 – Estruturas previstas, desenvolvidas anteriormente e desenvolvidas nesse trabalho



Fonte: Autor

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os principais objetivos do trabalho, divididos entre objetivos gerais e objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo geral continuar o desenvolvimento do aplicativo de dimensionamento de estruturas de concreto, 6118 Tool, iniciado por Cosmo (2019). Tal continuação se dará pela finalização e aperfeiçoamento do módulo de cálculo de sapatas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

a) Depurar e otimizar o código já existente;
b) Implementar modelos de sapatas ainda não contemplados;
c) Validar o aplicativo desenvolvido com exemplos obtidos na bibliografia e também desenvolvidos manualmente;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BREVE REVISÃO DA LITERATURA

No ano de 2007, a Apple Inc. lançou o iPhone, seu primeiro *smartphone*, revolucionando o mercado da telefonia móvel e da tecnologia em geral. O novo produto contava com a incorporação de tecnologias já existentes nos demais aparelhos, porém com um diferencial: a existência de um sistema operacional intuitivo e de uso relativamente simples, o iOS. (QUEIROZ, 2018).

Já em 2008, foi inaugurada App Store, uma loja aberta de aplicativos que permitia que o usuário personalizasse seu dispositivo baixando os aplicativos que mais lhe interessassem. Tais inovações foram responsáveis pela popularização do uso dos *smartphones* e pelo surgimento da indústria do desenvolvimento de *softwares* para dispositivos móveis. (QUEIROZ, 2018)

Sendo o surgimento dos *smartphones* algo recente, igualmente o são os trabalhos feitos nessa área. Na Engenharia Civil, a maior parte dos estudos se dá no campo de estruturas, porém, para apresentar um panorama acerca do desenvolvimento acadêmico de aplicativos móveis, serão apresentados alguns trabalhos de outros campos da Engenharia Civil.

Na área de estruturas, Oliveira (2014) desenvolveu um aplicativo Android para o dimensionamento de vigas em concreto armado de modo que atenda aos requisitos da NBR 6118/2014, apresentando resultados semelhantes aos cálculos realizados manualmente. Foi produzido na plataforma de desenvolvimento Eclipse com o plugin ADT (Android Development Tools).

Longo (2015) também realizou um trabalho na área de estruturas. O aplicativo desenvolvido para plataforma Android, por sua vez, é voltado para a análise estrutural para estruturas reticuladas planas. Foi concebido visando o uso educacional, por isso apresenta elementos de cálculo, como matrizes de rigidez dos elementos.

Para outros campos da Engenharia Civil, serão apresentados os estudos de Oliveira e Vaz (2016), Braga, Menezes Filho, Freire (2017) e Ferreira, *et al* (2020).

O primeiro tratou-se do desenvolvimento de um aplicativo Android para cálculos relacionados ao projeto geométrico horizontal de estradas. Seu objetivo é auxiliar estudantes da Engenharia Civil, podendo também ser consultado por profissionais da área e foi programado através do Android Studio. (OLIVEIRA; VAZ, 2016)

Braga, Menezes Filho, Freire (2017) produziram um aplicativo Android para cálculos referentes à hidráulica de canais e condutos livres destinado a estudantes e profissionais, podendo ser usado como apoio ao ensino. Sua criação foi realizada também através do Android Studio.

Ferreira, *et al* (2020) elaboraram o aplicativo AUTOARRIMOS, para verificação de estabilidade de muros de gravidade constituídos de concreto ciclópico, visando tornar o trabalho de cálculo mais ágil e podendo ser usado como ferramenta educacional. Este foi desenvolvido com a ferramenta MIT App Inventor 2, tendo sido previamente elaborados roteiros de cálculos de seis perfis de muro no software PTC Mathcad Express Prime 6.0.

É possível perceber que predomina o desenvolvimento de aplicativos para a plataforma Android, gerando uma lacuna de acesso a esses recursos, uma vez que, segundo a Statcounter (2021), 13,19% dos *smartphones* utilizados no Brasil possuem sistema operacional iOS.

Nesse cenário, Cosmo (2019) criou um aplicativo para o projeto de estruturas de concreto armado, o 6118 Tool, através da ferramenta Thunkable-X, que permite o desenvolvimento de um aplicativo em plataforma cruzada, podendo ser utilizado em *smartphones* com sistema operacional tanto Android, quanto iOS. O programa permite a verificação dos estados-limites últimos e de serviço de seções retangulares e o dimensionamento de lajes maciças apoiadas sobre vigas e é voltado para estudantes e professores de Engenharia Civil, técnicos de edificações e arquitetos.

2.2 ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO DE CONCRETO

Segundo Batos (2019), a Fundação é a parte de uma estrutura composta por elementos estruturais, geralmente construídos abaixo do nível final do terreno, e que são responsáveis por transmitir ao solo as ações que atuam na edificação.

A transferência desses esforços de maneira adequada é necessária pois o solo geralmente tem resistência muito inferior à do concreto do pilar ou da parede estrutural que chegaria no primeiro pavimento, sendo necessário projetar um elemento que dissipe essa carga pelo solo.

Num conceito recente e adequado, Rebelo (2020) define fundação como um sistema composto pelo elemento de fundação e pelo maciço geotécnico (solo e/ou rocha) envolvido.

Araújo (2014) afirma que o estudo das fundações é uma das etapas de maior complexidade dentro de um projeto de edificação, envolvendo análises de característica de solos e entendimento do comportamento da estrutura. Araújo (2014, p. 257) cita ainda os seguintes itens como pré-requisitos para uma boa fundação:

> - Deve se situar a uma profundidade adequada, para evitar danos causados por escavações ou por futuras construções na sua vizinhança;
> - Deve ser segura contra a ruptura do solo;
> - Seus recalques devem ser compatíveis com a capacidade de acomodação da estrutura, especialmente os recalques diferenciais.

A fundação superficial, rasa ou direta é definida pela NBR 6122:2010 (p. 2), como:

> Elemento de fundação em que a carga é transmitida ao terreno pelas tensões distribuídas sob a base da fundação, e a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente à fundação é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação.

São exemplos de fundações superficiais as sapatas e os radiers.

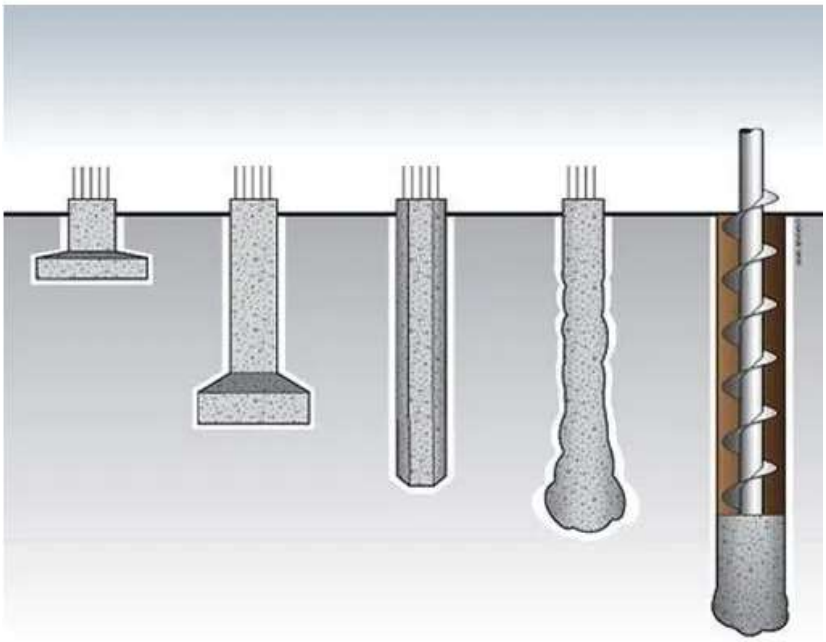
Fundação profunda, por sua vez, é definida pela NBR 6122:2010 (p. 3), como:

> Elemento de fundação que transmite a carga ao terreno pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, devendo sua ponta ou base estar assente

> em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3.0m.

Neste tipo de fundações encontram-se as estacas e os tubulões.

Figura 2 – Diferentes tipos de fundações: sapata, tubulão e estacas, respectivamente



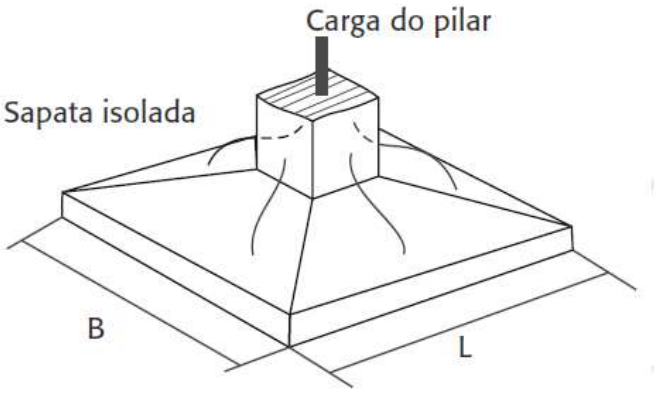
Fonte: Renzeti Arq. e Construção (2021)

As sapatas são definidas pela NBR 6122:2010 (p. 2), como:

> “elemento de fundação superficial, de concreto armado, dimensionado de modo que as tensões de tração nele resultantes sejam resistidas pelo emprego de armadura especialmente disposta para esse fim”.

Essas são o objeto principal desse trabalho e serão abordadas com mais particularidades no item “2.2.1”.

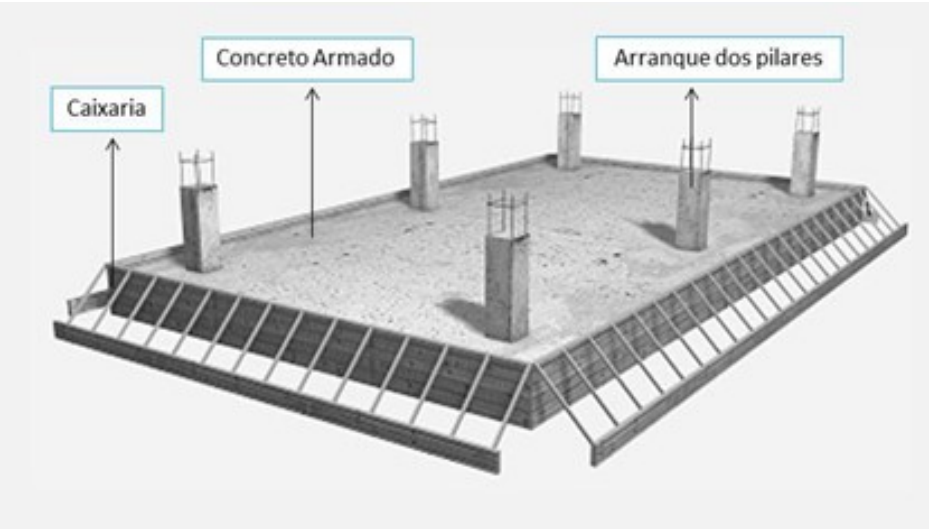
Figura 3 – Sapata isolada



Fonte: Campos (2015)

As fundações em placas, ou radiers, são estruturas flexíveis, podendo ter duas configurações: pilares que se apoiam diretamente em uma laje maciça ou pilares que se apoiam em uma sistemas de vigas, ligados, por sua vez, a uma laje maciça (ARAÚJO, 2014). Segundo Rebelo (2020), quando a soma da área total de todas as sapatas ultrapassar de 60% a 70% de área do edifício, deve-se pensar nesse tipo de solução para a fundação. Já Araújo (2014), afirma haver economia na utilização do radier a partir de 50% de área de sapatas em relação à área do edifício.

Figura 4 – Radier



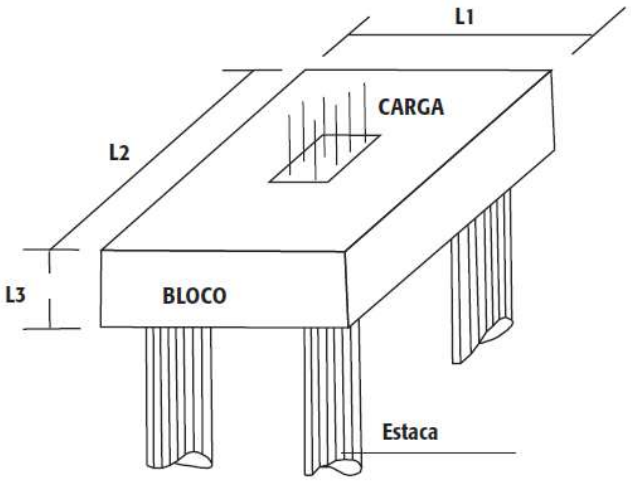
Fonte: Schneider (2020)

As estacas, por sua vez, são elementos esbeltos, cravadas ou perfuradas no solo, cuja finalidade é transmitir as cargas a pontos resistentes do solo por meio de sua

extremidade inferior (resistência de ponta) ou do atrito lateral da estaca (resistência de fuste) ou ainda pela combinação das duas (CINTRA, 2005).

As estacas podem ser pré-moldadas, sendo alguns exemplos as estacas de madeira, de concreto e metálica ou moldadas *in loco*, sendo alguns exemplos as estacas-broca, Strauss, Franki, raiz e hélice.

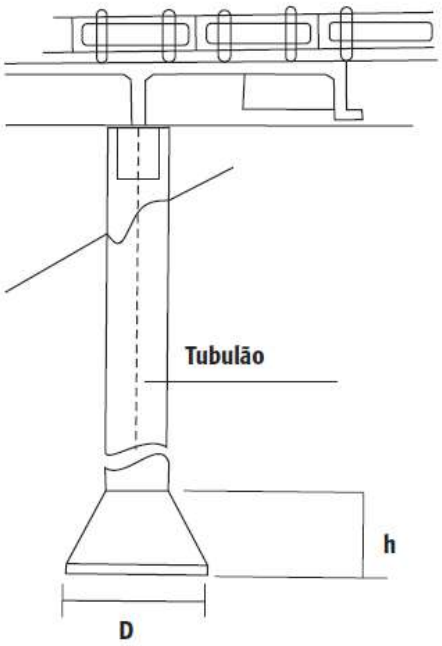
Figura 5 – Fundação profunda: estaca



Fonte: Campos (2015)

Por fim, o tubulão pode ser comparado a uma sapata que atinge maiores profundidades. A transferência de carga do pilar ao solo ocorre por sua base, sendo ignorado o atrito lateral. São construídos por meio da concretagem de um poço aberto no maciço e geralmente é dotado de uma base alargada (REBELO, 2020).

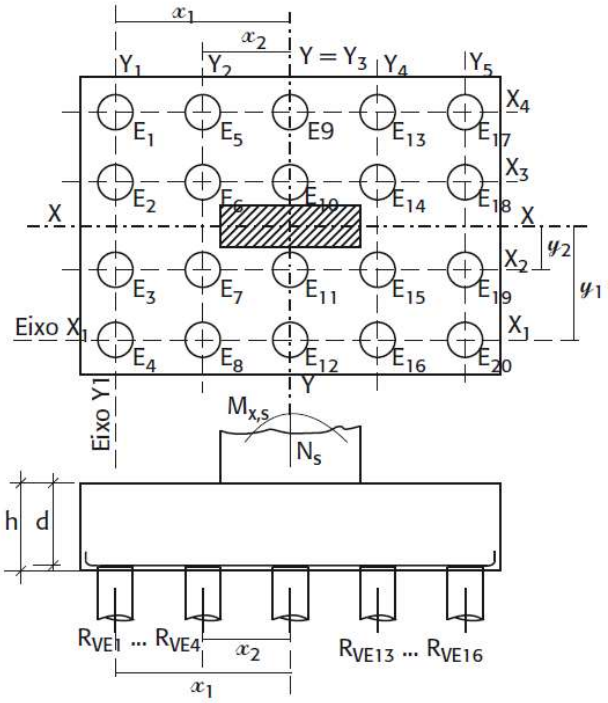
Figura 6 – Fundação profunda: tubulão



Fonte: Campos (2015)

Tanto as estacas quanto os tubulões necessitam de um elemento de transição que faça a sua ligação com a superestrutura. Usualmente, tem-se como elemento de transição os chamados blocos de coroamento.

Figura 7 – Bloco de coroamento



Fonte: Campos (2015)

Sendo as sapatas o objeto principal deste trabalho, essas serão abordadas com maiores particularidades.

2.2.1 Sapatas

As sapatas são elementos de fundação indicados quando o terreno apresenta, na sua superfície, resistência satisfatória para as cargas da estrutura e é suficientemente homogêneo para evitar recalques diferenciais expressivos (ARAUJO, 2014).

De acordo com a sua dimensão as sapatas podem ser classificadas como rígidas e flexíveis. Segundo a NBR 6118:2014, a sapata pode ser considerada rígida quando se verifica a seguinte expressão, nas direções longitudinal e transversal:

$$h \geq (a - a_p)/3 \tag{1}$$

Sendo:

h a altura da sapata;

a a dimensão da sapata em uma determinada direção;

a_p a dimensão do pilar na mesma direção.

Ainda de acordo com a norma, em casos de sapatas rígidas pode-se admitir plana a distribuição de tensões normais no contato sapa-terreno, caso não se disponha de informações mais detalhadas a respeito.

Além disso, a NBR 6118:2014, (p.189) afirma que, nas sapatas rígidas, o comportamento estrutural pode ser caracterizado por:

> a) Trabalho à flexão nas duas direções, admitindo-se que, para cada uma delas, a tração na flexão seja uniformemente distribuída na largura correspondente da sapata. Essa hipótese não se aplica à compressão na flexão, que se concentra mais na região do pilar que se apoia na sapata e não se aplica também ao caso de sapatas muito alongadas em relação à forma do pilar.
> b) Trabalho ao cisalhamento também em duas direções, não apresentando ruptura por tração diagonal, e sim por compressão diagonal. Isso ocorre porque a sapata rígida fica inteiramente dentro do cone hipotético de punção, não havendo, portanto, possibilidade física de punção.

Já as sapatas flexíveis, segundo a NBR 6118:2014 (p.189), apresentam o seguinte comportamento:

> a) Trabalho à flexão nas duas direções, não sendo possível admitir tração na flexão uniformemente distribuída na largura correspondente da sapata. A concentração de flexão junto ao pilar deve ser, em princípio, avaliada.
> b) Trabalho ao cisalhamento que pode ser descrito pelo fenômeno da punção.

Para o desenvolvimento do aplicativo, considerou-se apenas a possibilidade de inserção de sapatas rígidas, sendo feita essa verificação durante a entrada de dados pelo usuário, visto que sapatas flexíveis possuem uso incomum e formulação de maior complexidade.

Outra classificação importante é a que considera o tipo de carga que as sapatas transferem ao solo. Dessa forma, as sapatas são classificadas, segundo Campos (2015), em: isolada, corrida, associada ou alavancada.

Tabela 1 – Classificação das sapatas

TIPO	**Carga que transfere**
Isolada	Carga concentrada em um único pilar. Distribui a carga em duas direções.
Corrida	Carga linear (parede). Distribui a carga em apenas uma direção
Associada	Cargas concentradas de mais de um pilar transferidas através de uma viga que as associa. Utilizada quando há interferência entre duas sapatas isoladas.
Alavancada	Carga concentrada transferida através de viga-alavanca. É utilizada em pilar de divisa com o objetivo de centrar a carga do pilar com a área da sapata

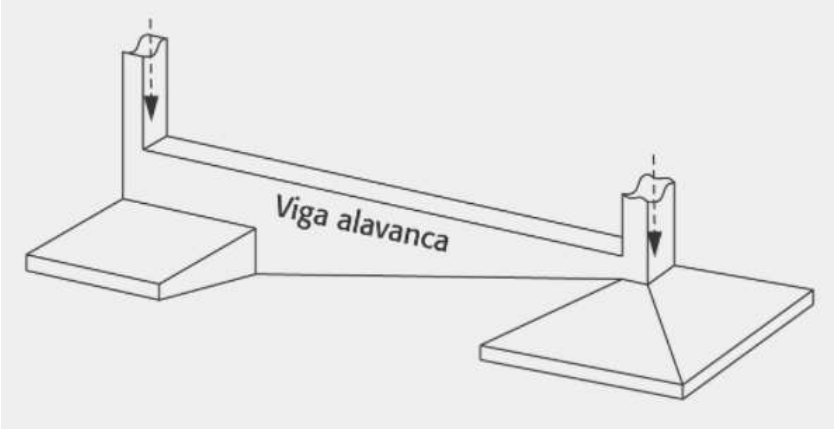
Fonte: Adaptado de Campos (2015)

Em pilares de divisa, a carga que chega na sapata é excêntrica em relação a ela, uma vez que a fundação não pode avançar no terreno vizinho. Desse modo, é necessária a existência de um elemento que transporte horizontalmente essa carga vertical para o centro de carga da sapata, a viga alavanca (CAMPOS, 2015).

Segundo Campos (2015), existem duas formas de realizar esse deslocamento da carga vertical:

a) Integrando a viga alavanca à sapata, de modo que a carga seja levantada e desça para a fundação através da sapata alavancada;

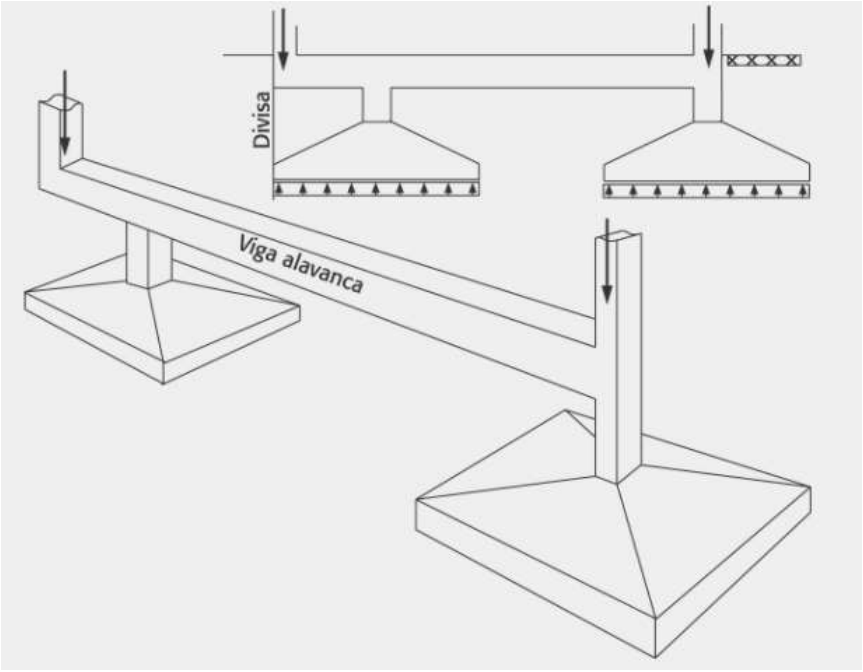
Figura 8 – Viga integrada à sapata alavancada



Fonte: Campos (2015)

b) Não integrando a viga alavanca à sapata, de modo que a carga desça para a fundação através de uma sapata isolada com carga centrada;

Figura 9 – Viga não integrada à sapata isolada com carga centrada



Fonte: Campos (2015)

Para este trabalho, escolheu-se a opção apresentada no item b), por ser comumente encontrada em projetos estruturais.

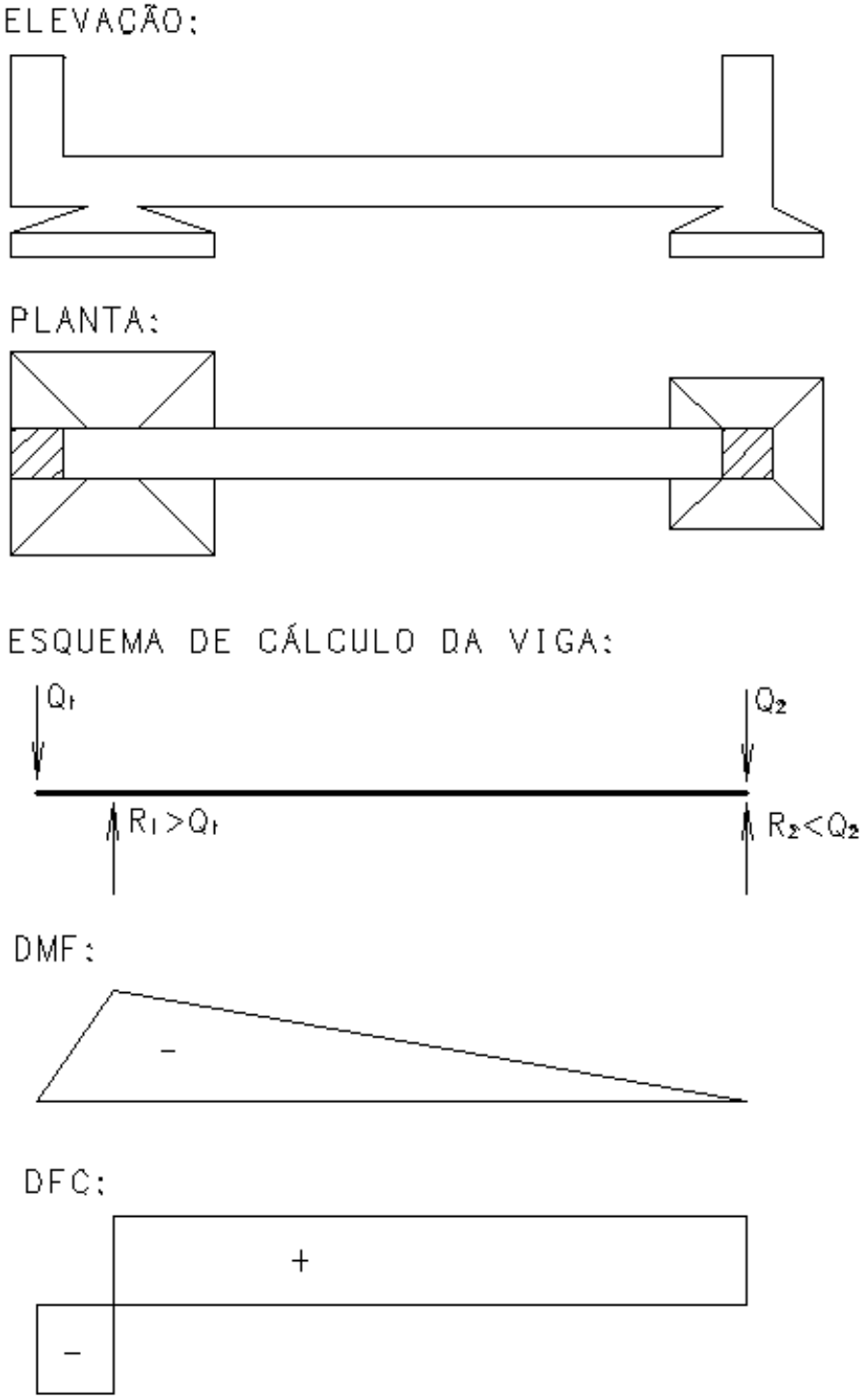
2.2.2 Viga de Equilíbrio

Para Campos (2015), viga de equilíbrio é apenas a viga integrada à sapata, enquanto a não integrada seria denominada viga de transição. Porém, segundo a NBR 6122:2019 (p. 9), viga de equilíbrio é o “elemento estrutural que recebe as cargas de um ou dois pilares (ou pontos de carga) e é dimensionado de modo a transmiti-las centradas às fundações”. Nesse trabalho, será adotada a definição da NBR 6122:2019, por essa ser mais abrangente.

Além de transmitir a carga vertical do pilar para a sapata, a viga de equilíbrio também é responsável por absorver o momento fletor gerado pela aplicação da carga excêntrica. (BASTOS, 2019)

O funcionamento e os esforços internos de uma viga de equilíbrio padrão estão representados na Figura 10.

Figura 10 – Funcionamento e os esforços internos da viga de equilíbrio



Fonte: Adaptado de Lopes e Velloso (2012)

3 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO

A seguir estão resumidas as escolhas feitas anteriormente por Cosmo (2019) para o desenvolvimento do aplicativo e descritas as principais etapas do desenvolvimento do presente trabalho.

3.1 RESUMO DO DESENVOLVIMENTO DE COSMO (2019)

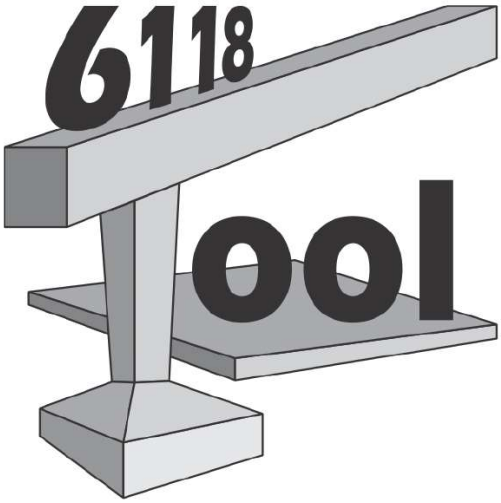
A Tabela 2 apresenta um resumo das escolhas feitas por Cosmo (2019) na concepção do aplicativo:

Tabela 2 – Resumo das escolhas de Cosmo (2019) para o aplicativo

Elemento	**Escolha tomada**	**Representação**
Nome do aplicativo	6118 Tool	Figura 11
Ferramenta de programação	Thunkable	Figura 12
Leiaute básico	Elementos de concreto – cor cinza de diferentes tonalidades Fundo – RGBA: 139; 87; 42; 0,5 Botões de navegação – RGBA: 245; 166; 35; 0,5	Figura 13
Delimitação do conteúdo	Estruturas de concreto viga, pilar, laje e fundação	Figura 14

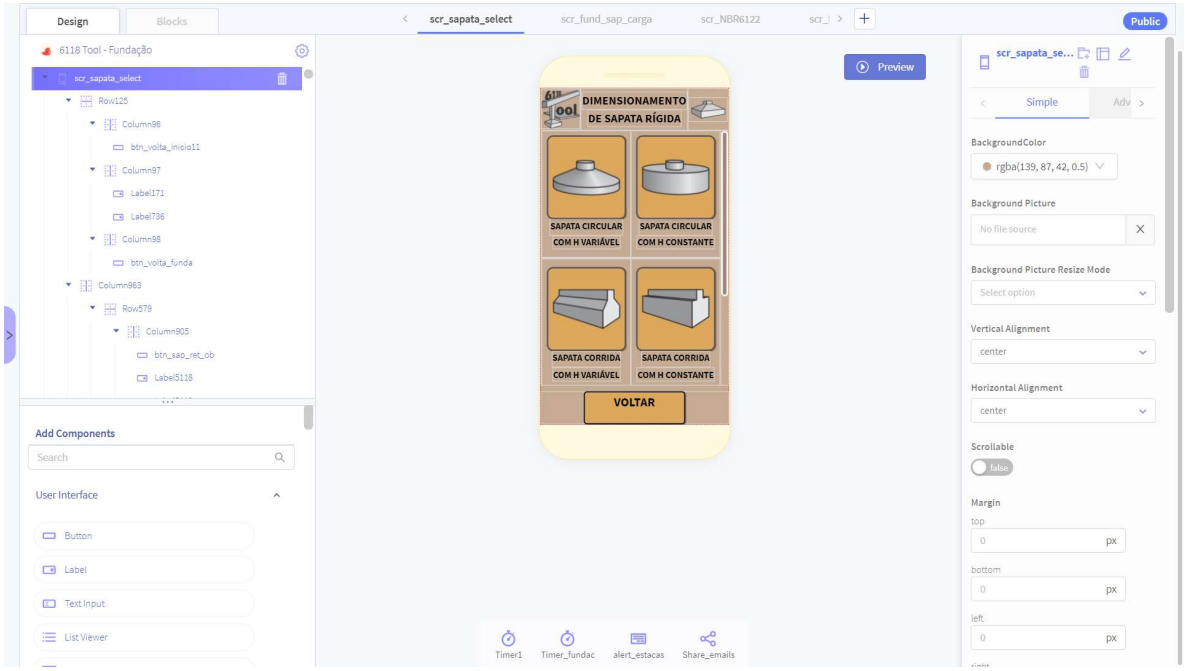
Fonte: autor

Figura 11 – Logomarca do aplicativo “6118 Tool”



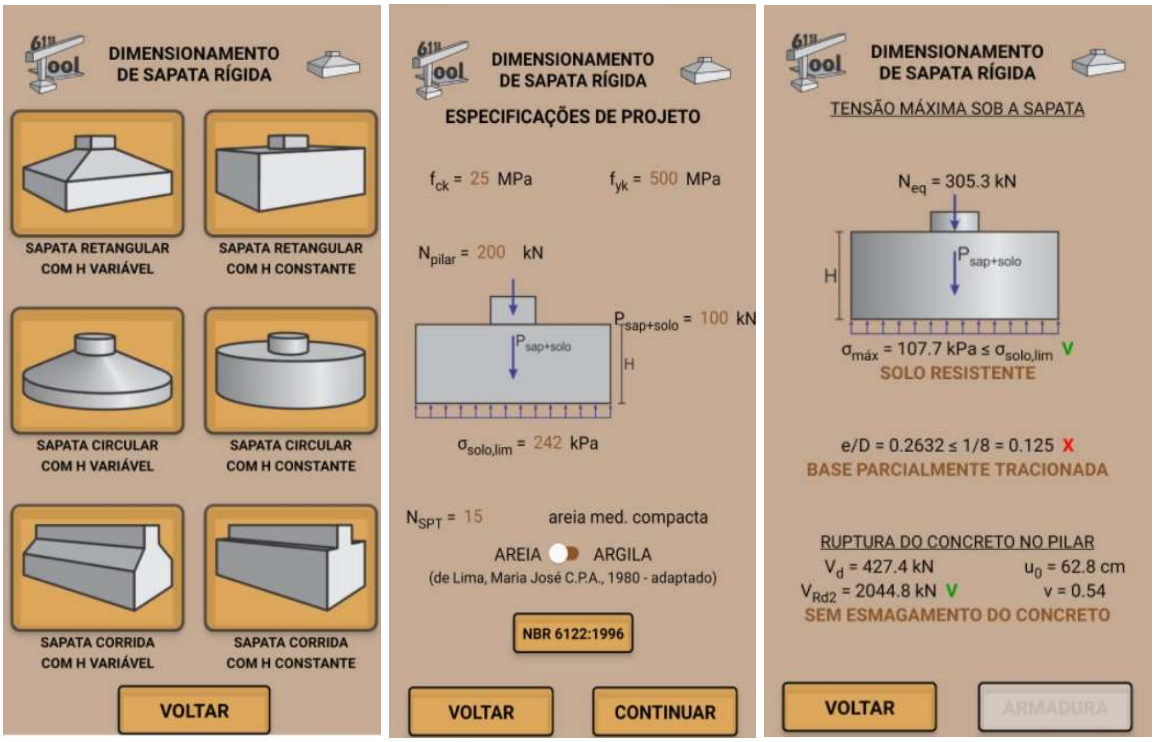
Fonte: Cosmo (2019)

Figura 12 – Interface do Thunkable



Fonte: *print screen* da interface do Thunkable

Figura 13 – Telas do aplicativo mostrando as definições de leiaute escolhidas



Fonte: Autor

Figura 14 – Subdivisões propostas para o dimensionamento de viga, pilar, laje e fundação

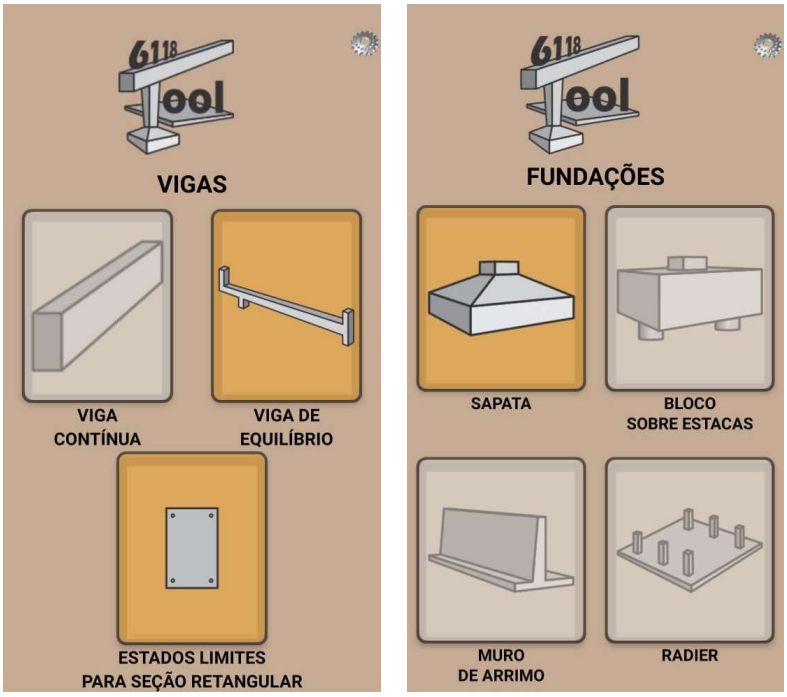
Fonte: Cosmo (2019)

3.2 DIVISÃO DO APLICATIVO EM MÓDULOS

A plataforma Thunkable apresenta um limite de 50 MB por projeto. O projeto do aplicativo 6118 Tool não chegava a 5 MB, porém ao atingir um total de 44 *screens*, não foi mais possível adicionar as novas *screens* necessárias para a continuidade do programa. Além disso, devido à quantidade de componentes, o Thunkable passou a apresentar grande lentidão para fazer as adequações necessárias.

Portanto, para ser possível a continuação do desenvolvimento do 6118 Tool, foi definido que esse seria dividido em quatro módulos: de vigas, de pilares, de lajes e de fundações.

Figura 15 – Início do módulo de vigas e de fundações, respectivamente



Fonte: Autor

3.3 ESCOLHA DAS ESTRUTURAS CALCULADAS

Foi definido que o presente projeto abrangerá todas as sapatas classificadas de acordo com o tipo de carga que transferem ao solo segundo Campos (2015): sapata isolada, sapata corrida, sapata associada e sapata alavancada.

Para a sapata isolada foram previstas duas geometrias possíveis para sua base: retangular ou circular.

Já para previsão da sapata alavancada foi inserido no menu de “Vigas” a “Viga de Equilíbrio”, que não será integrada à sapata, para a determinação da carga que será considerada no dimensionamento da última. Assim, a sapata passa então a ser dimensionada como uma sapata isolada usual.

Para todas as sapatas são previstas duas especificações de altura: variável ou constante.

4 FUNÇÕES E RECURSOS IMPLEMENTADOS OU REFINADOS

As funções e recursos implementados até o fechamento deste projeto englobam as definições expressas no item 3.3.

Serão apresentadas as funções implementadas ou refinadas no formato de Mapa de Navegação, bem como será exposto quais funções são continuações do trabalho desenvolvido por Cosmo (2019) e quais foram adicionadas neste trabalho.

Neste mapa, o ponto inicial, no caso de Sapatas, é o menu de “Fundações” e, no caso de Viga de Equilíbrio, é o menu de “Vigas”.

Após, serão expostas as formulações consideradas durante o desenvolvimento do código, tanto da fração desenvolvida por Cosmo (2019) e refinada durante este trabalho, quanto da fração desenvolvida inteiramente no decorrer deste projeto.

4.1 MAPAS DE NAVEGAÇÃO

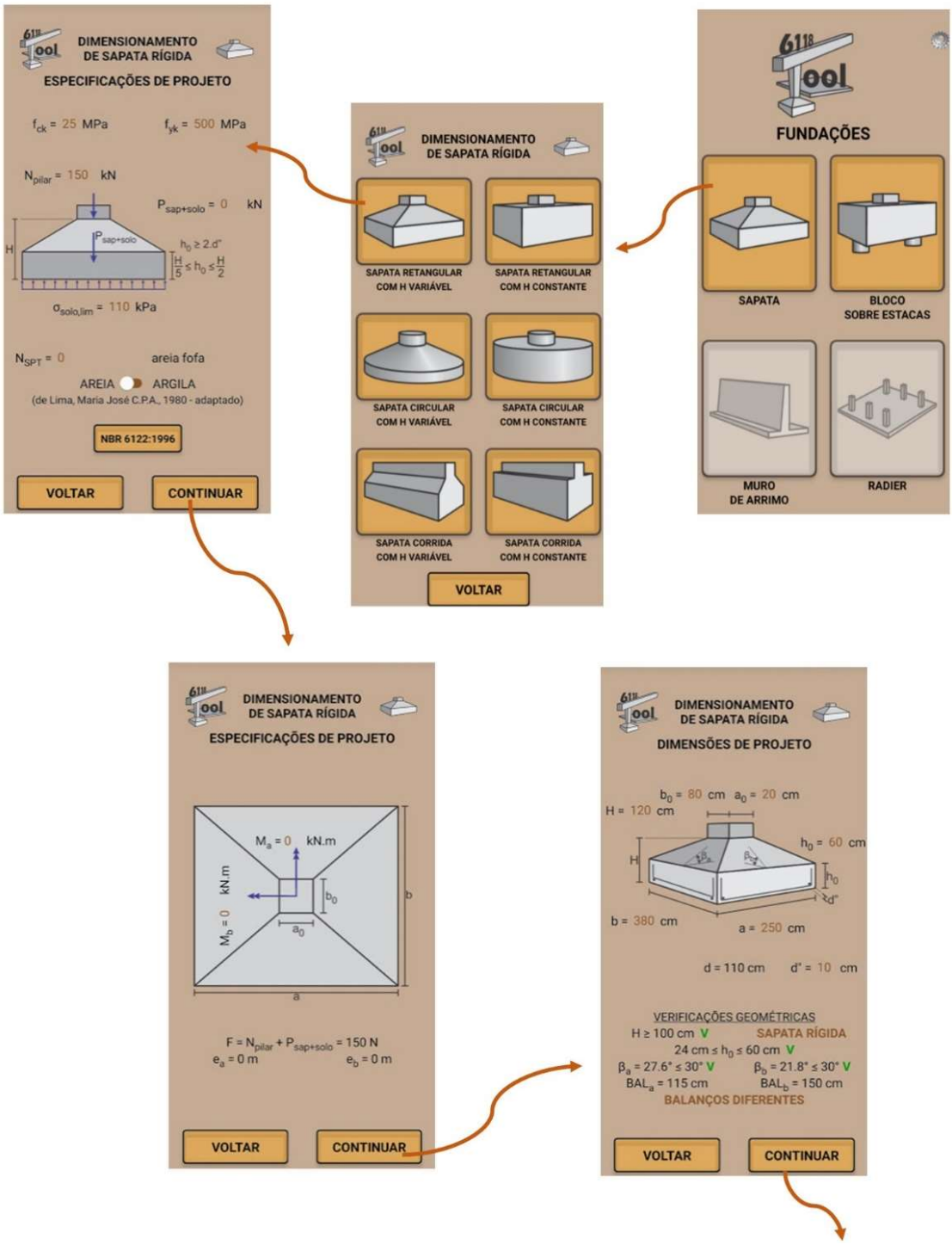
4.1.1 Sapata Isolada Retangular

O código das sapatas isoladas retangulares começou a ser desenvolvido por Cosmo (2019), que, na parte referente a “recomendações para trabalhos futuros”, sugeriu a continuação do desenvolvimento do aplicativo, otimizando o código, depurando alguns recursos e corrigindo erros pontuais.

O presente trabalho, para sapata isolada retangular, teve por função seguir as recomendações acima, tanto para sapatas com altura constante quanto para sapatas com altura variável.

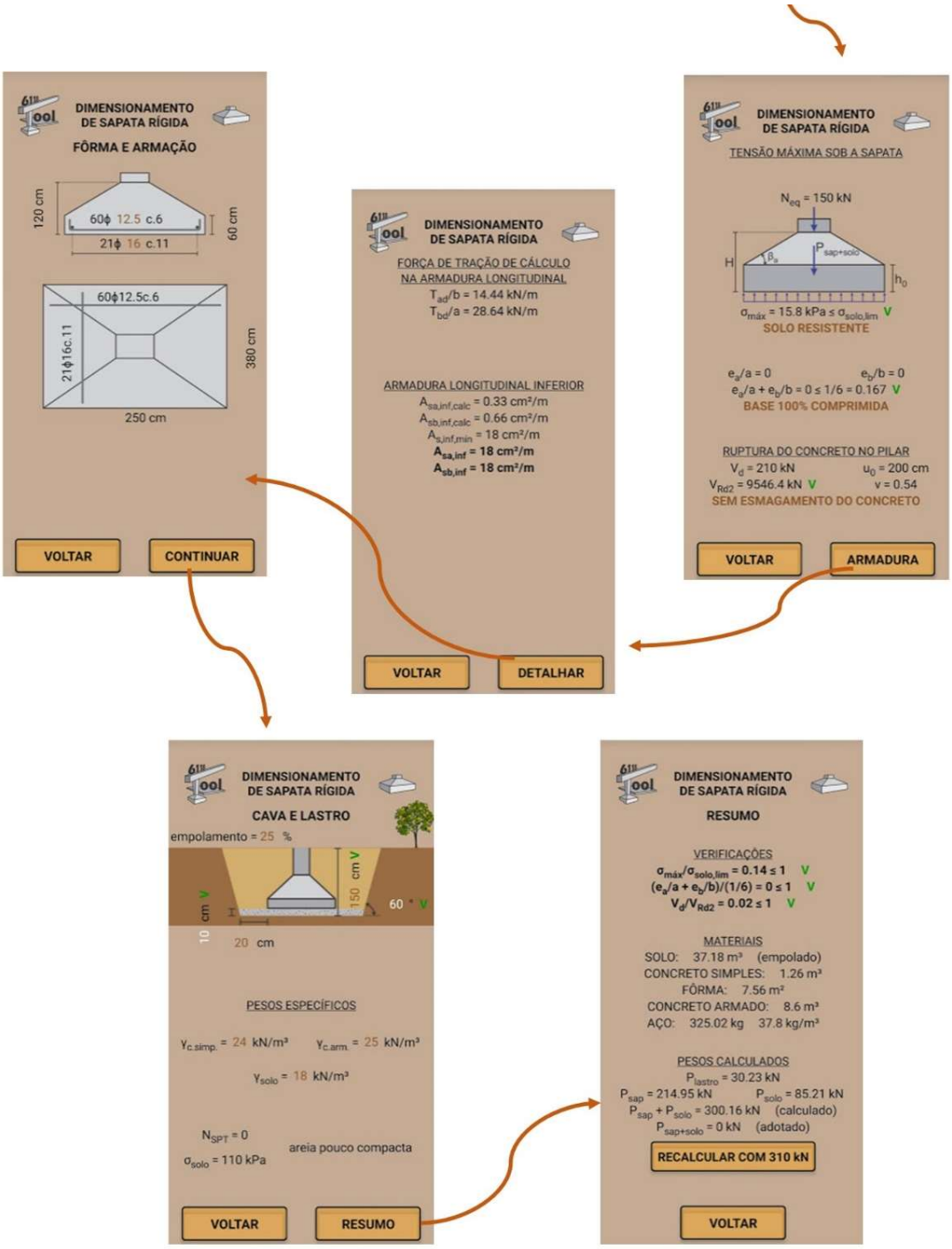
Tem-se, para sapata isolada retangular com altura variável, o seguinte Mapa de Navegação:

Figura 16 – Mapa de navegação: sapata retangular com altura variável (1/2)



Fonte: Autor

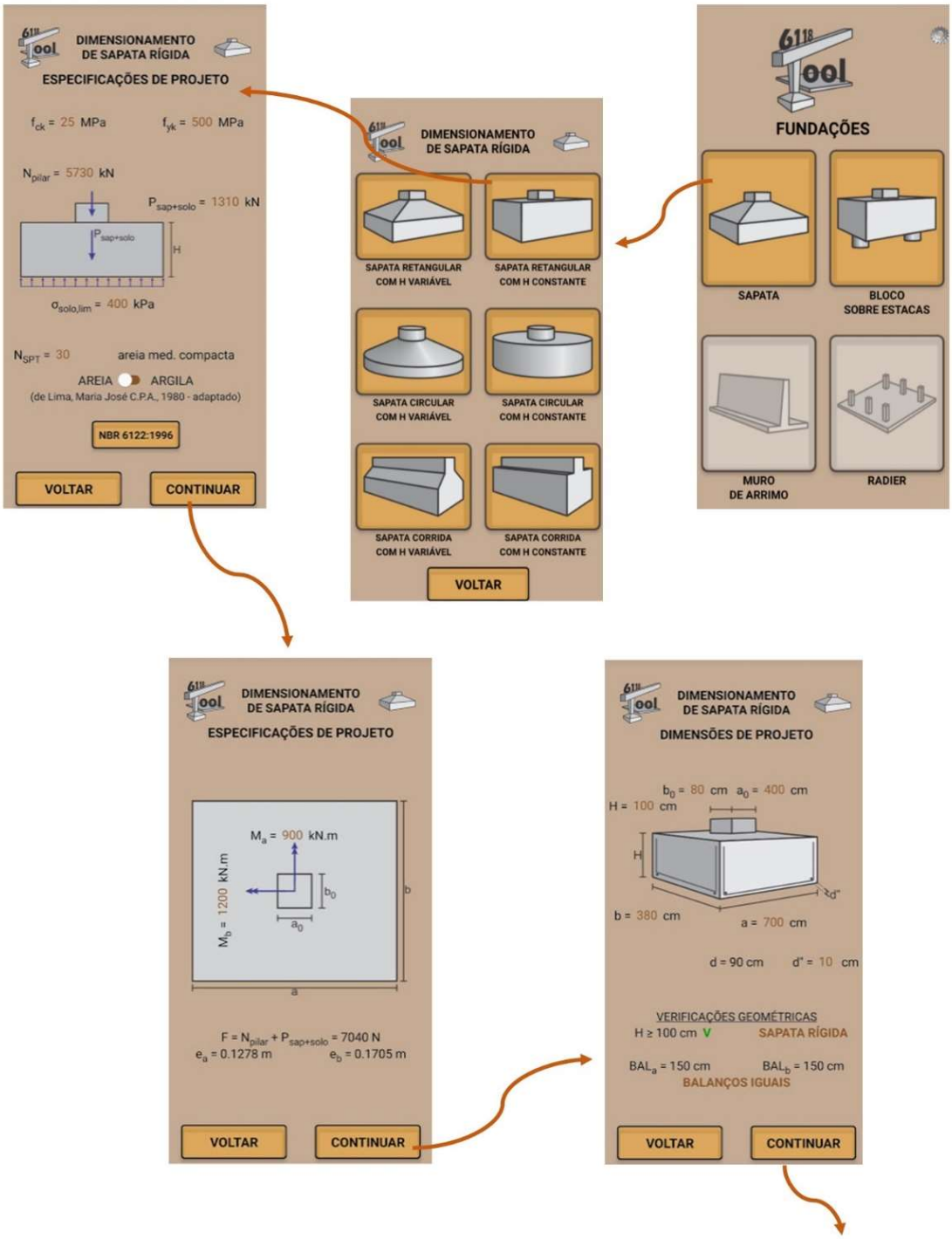
Figura 17 – Mapa de navegação: sapata retangular com altura variável (2/2)



Fonte: Autor

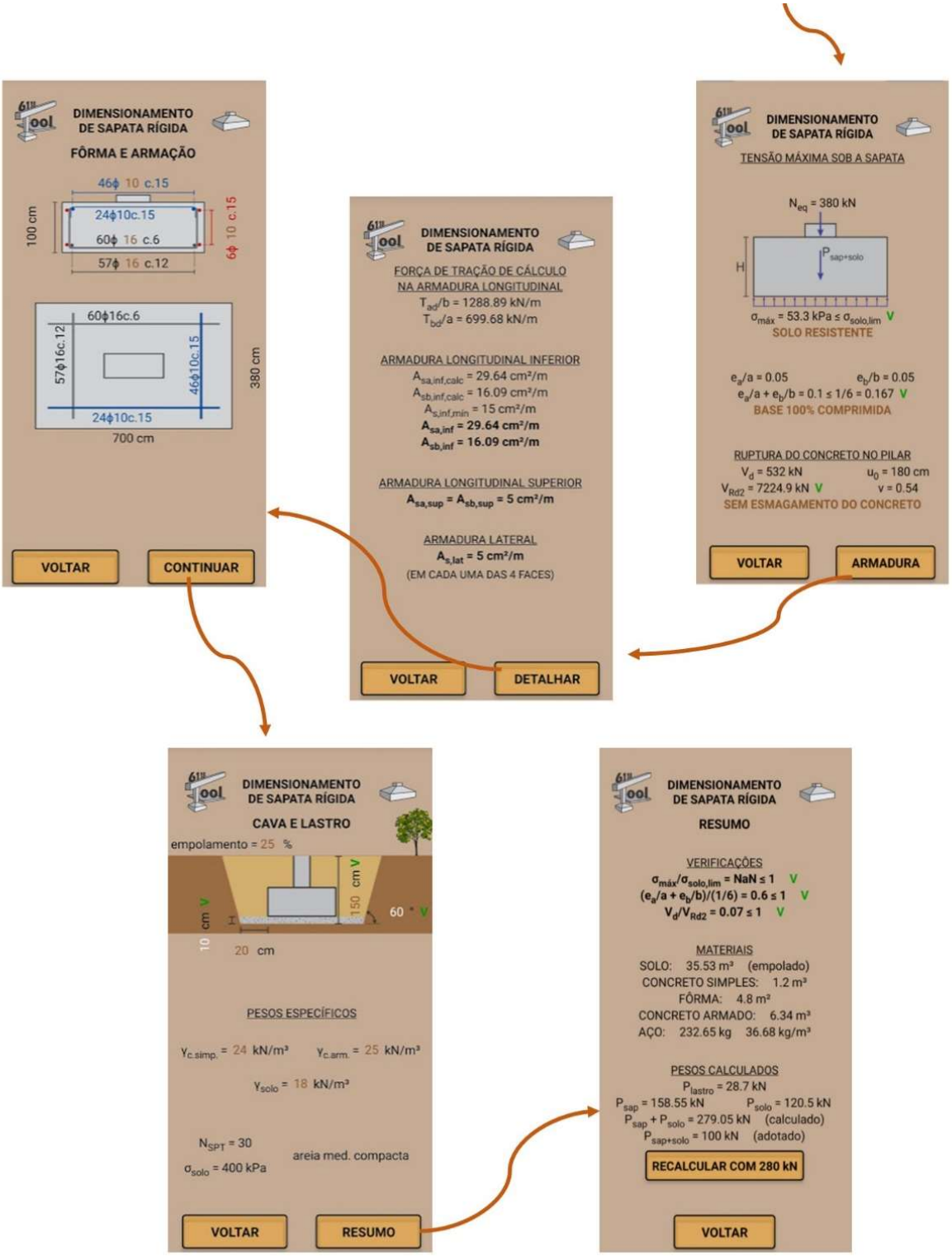
Tem-se, para sapata isolada retangular com altura constante, o seguinte Mapa de Navegação:

Figura 18 – Mapa de navegação: sapata retangular com altura constate (1/2)



Fonte: Autor

Figura 19 – Mapa de navegação: sapata retangular com altura constate (2/2)



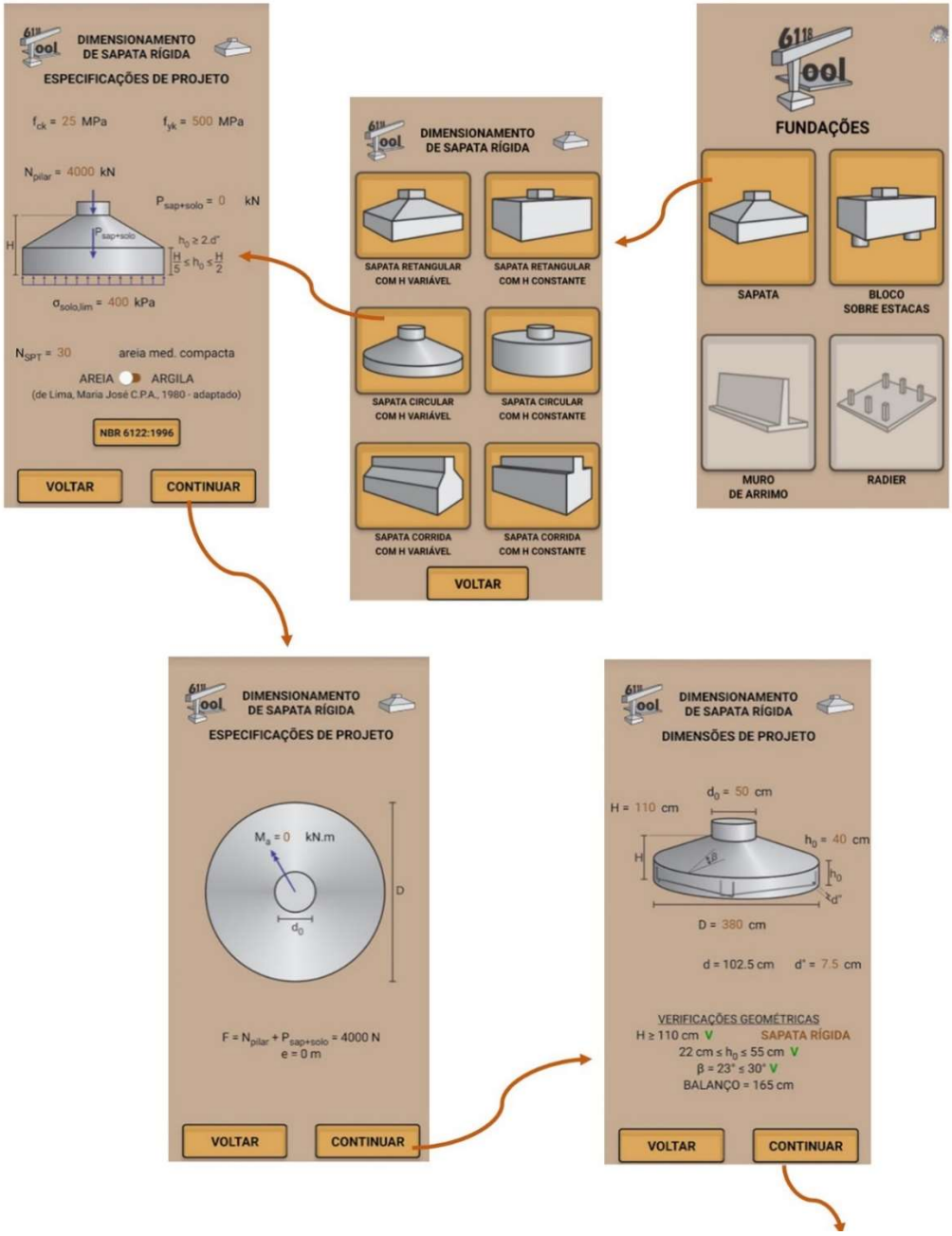
Fonte: Autor

4.1.2 Sapata Isolada Circular

Assim como nas isoladas retangulares, o código das sapatas isoladas circulares também começou a ser desenvolvido por Cosmo (2019). Novamente, o código foi ajustado e refinado conforme julgado necessário.

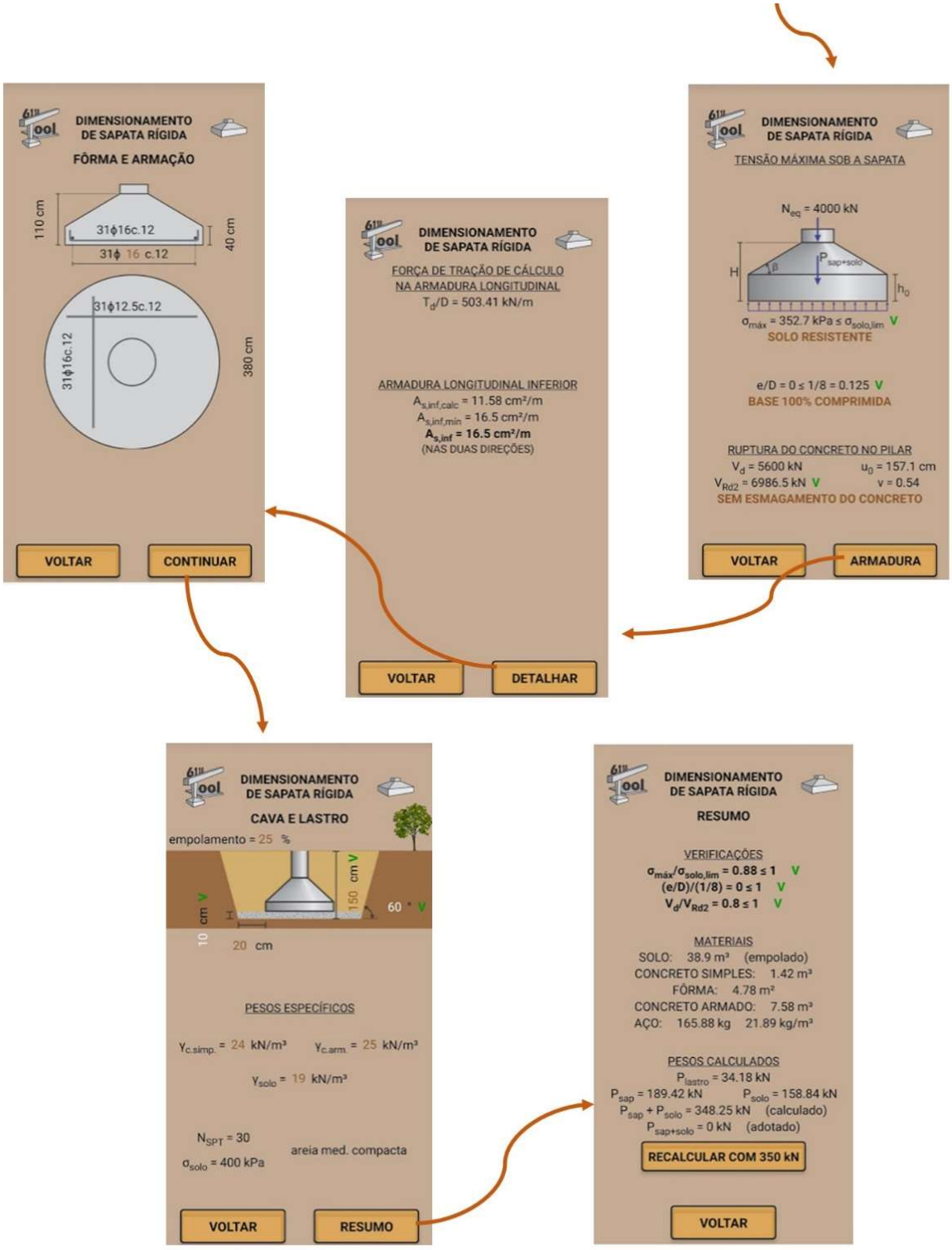
Tem-se, para sapata isolada circular com altura variável, o seguinte Mapa de Navegação:

Figura 20 – Mapa de navegação: sapata circular com altura variável (1/2)



Fonte: Autor

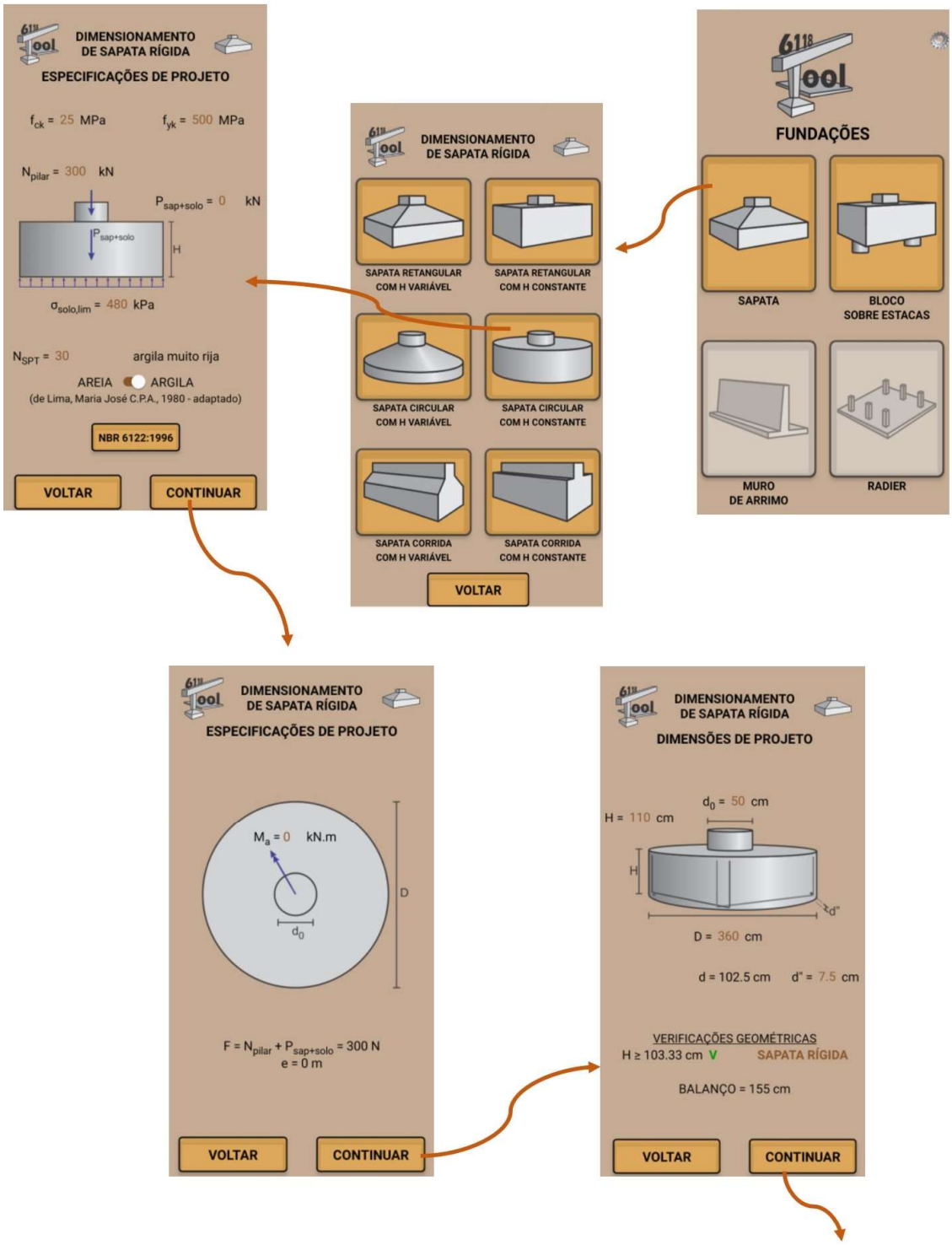
Figura 21 – Mapa de navegação: sapata circular com altura variável (2/2)



Fonte: Autor

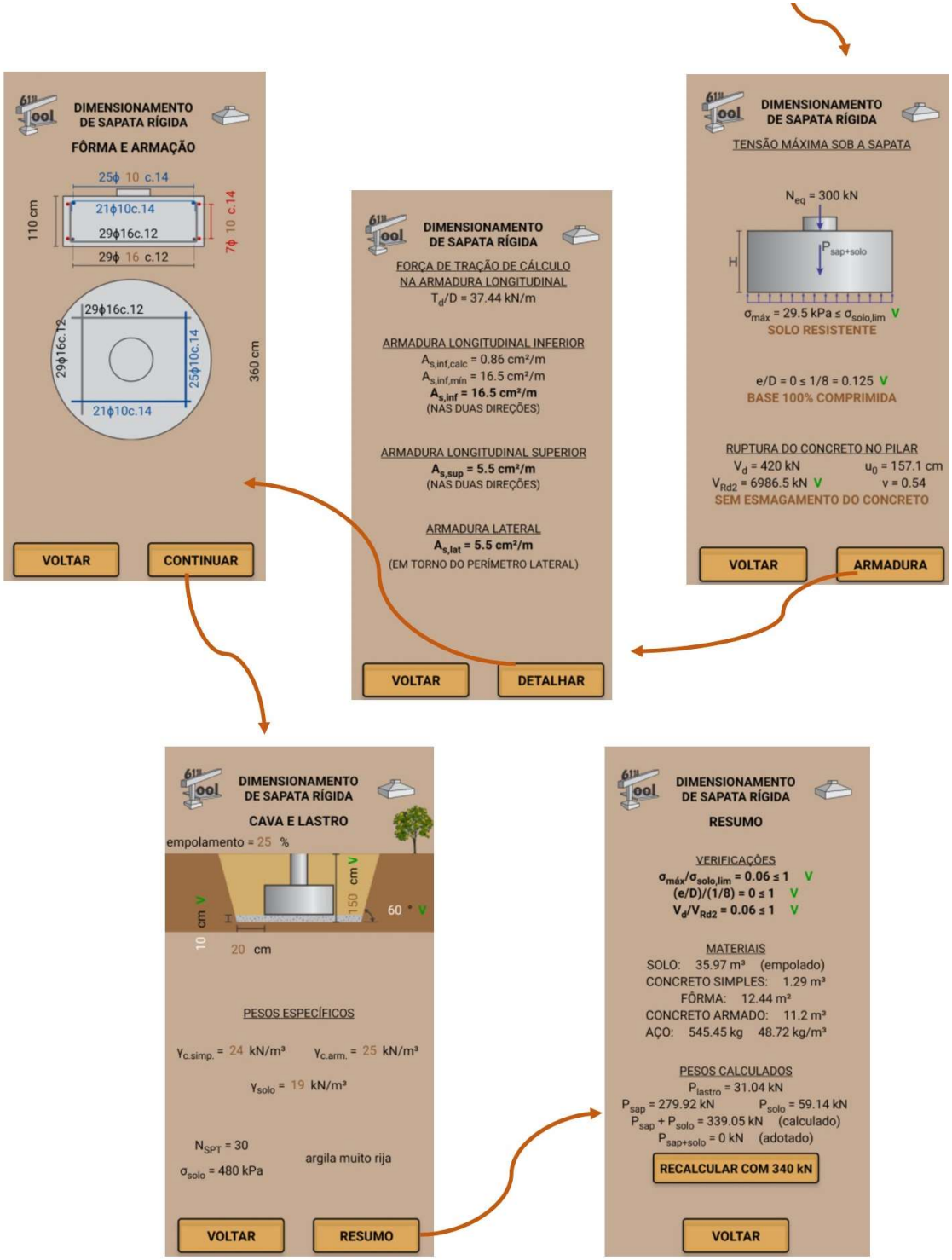
Tem-se, para sapata isolada circular com altura constante, o seguinte Mapa de Navegação:

Figura 22 – Mapa de navegação: sapata circular com altura constante (1/2)



Fonte: Autor

Figura 23 – Mapa de navegação: sapata circular com altura constante (2/2)



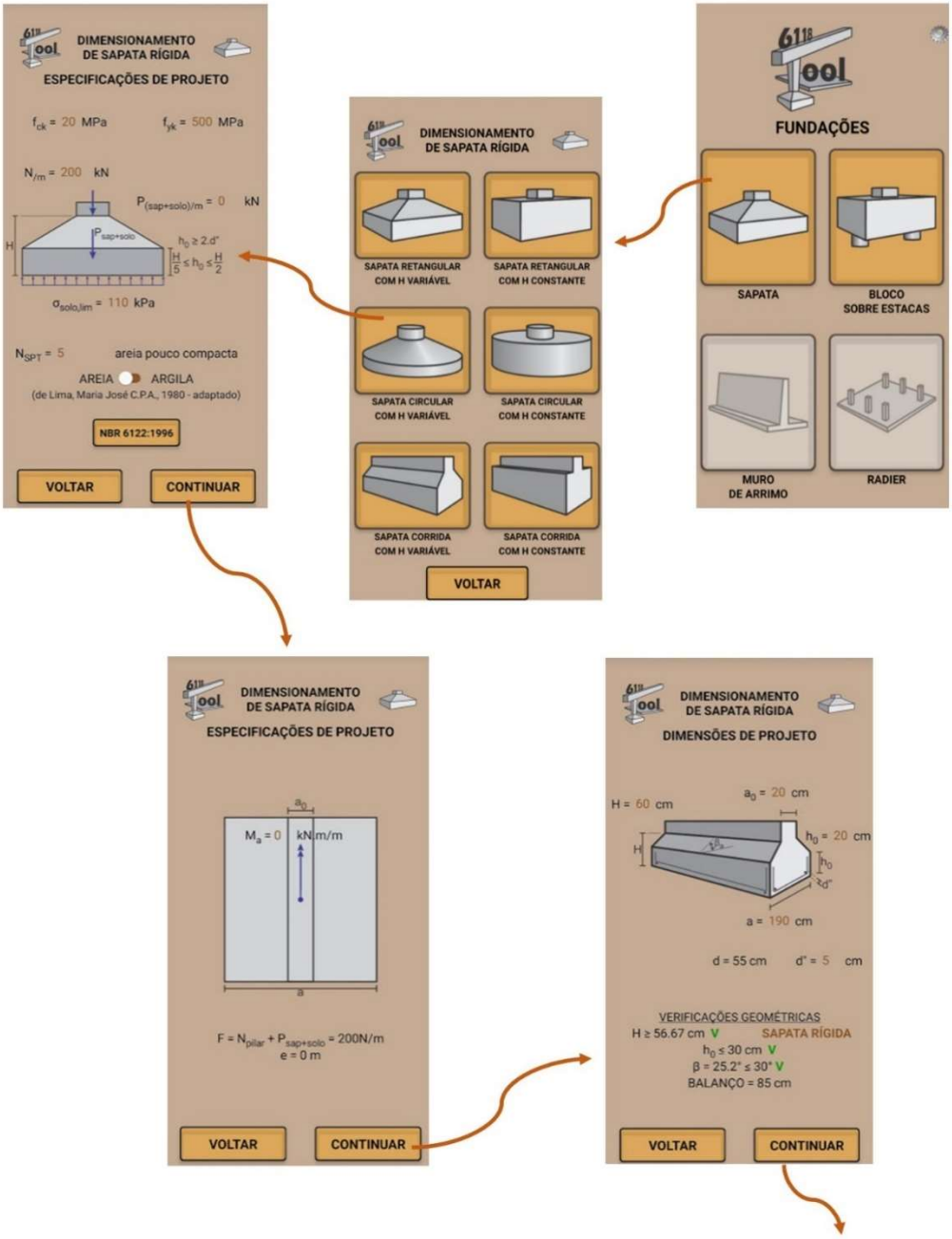
Fonte: Autor

4.1.3 Sapata Corrida

A sapata corrida, por sua vez, não estava prevista no código original. Sendo um elemento comum na construção civil, considerou-se pertinente para o menu de “Sapatas” prever esse tipo de Fundação.

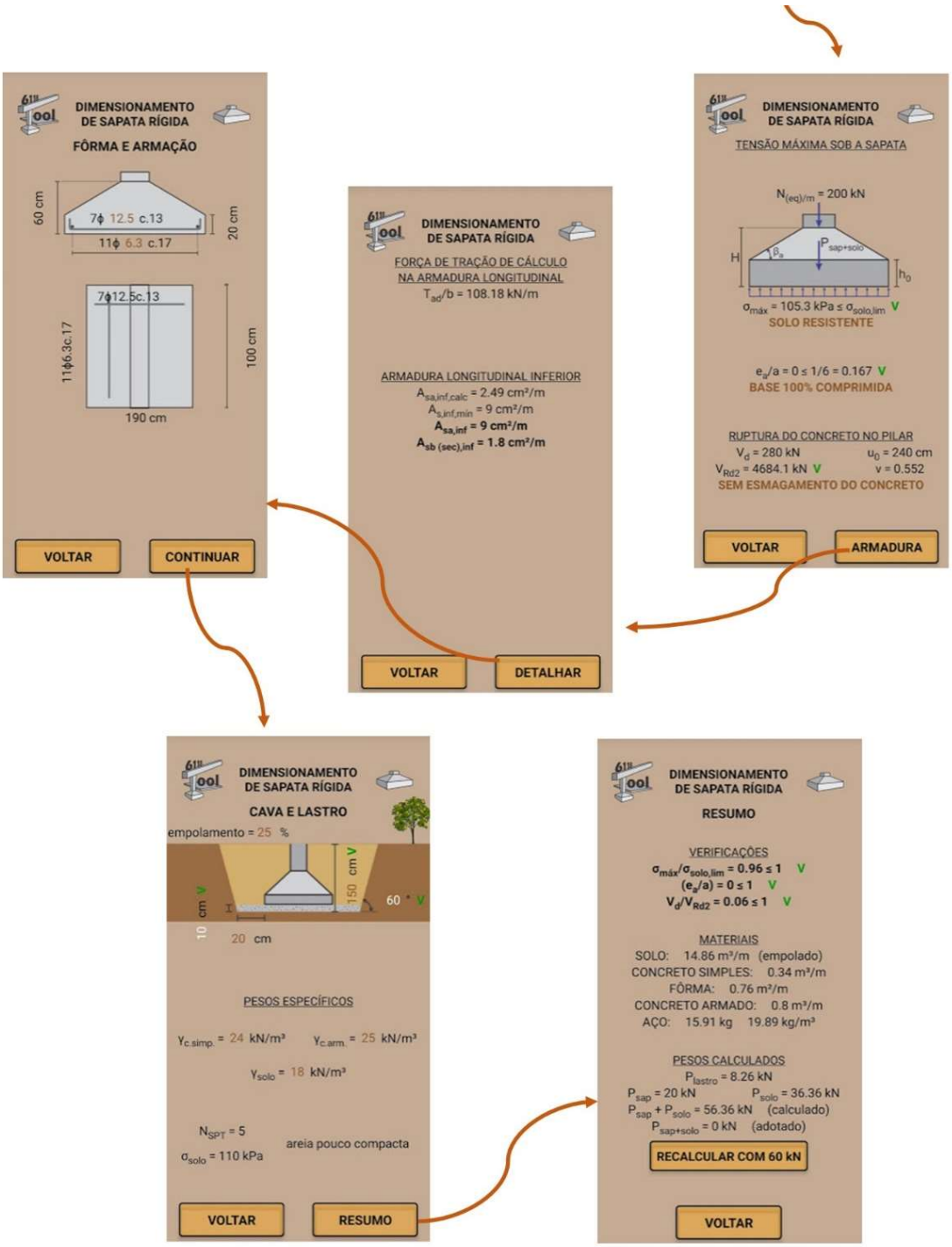
Tem-se, para sapata corrida com altura variável, o seguinte Mapa de Navegação:

Figura 24 – Mapa de navegação: sapata corrida com altura variável (1/2)



Fonte: Autor

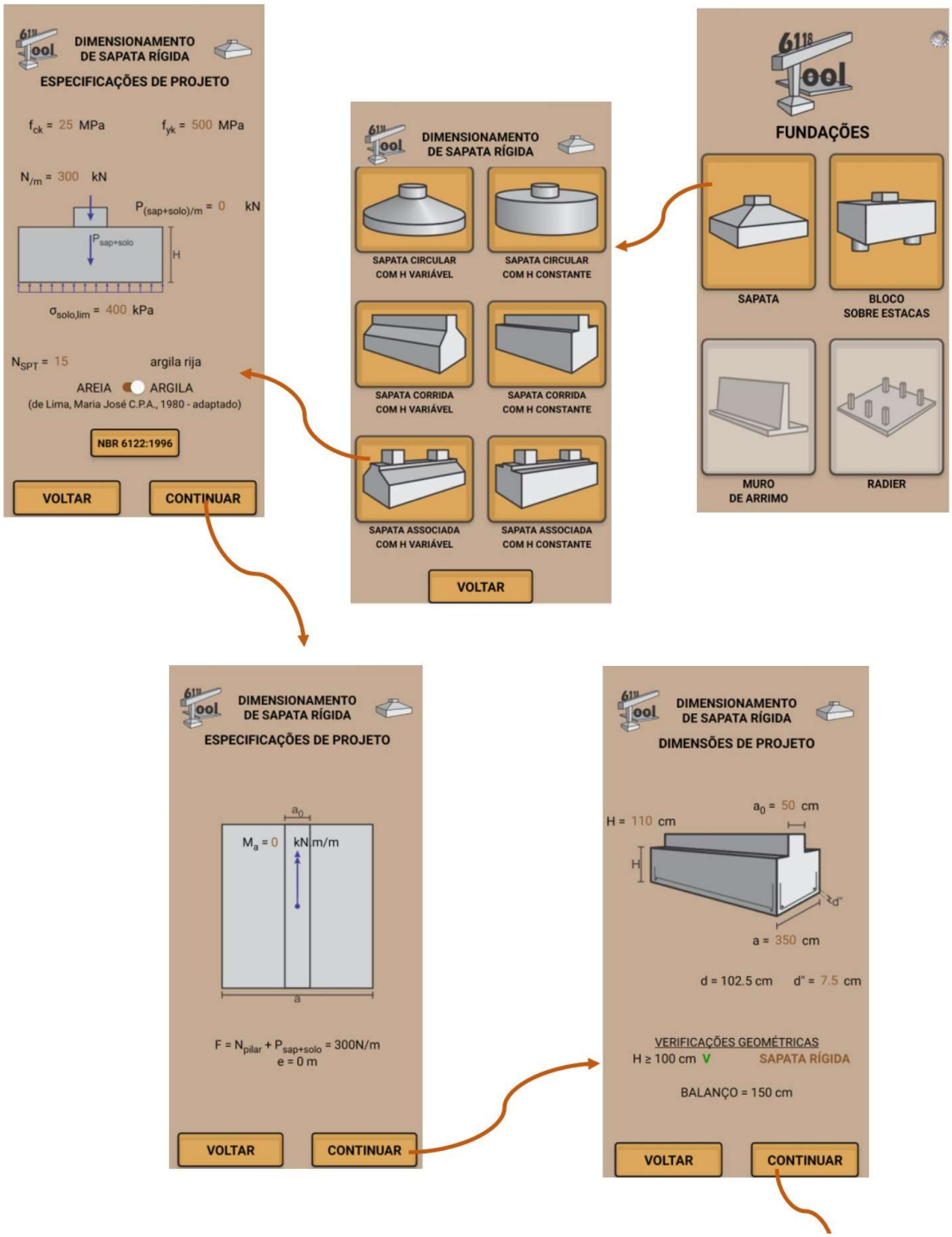
Figura 25 – Mapa de navegação: sapata corrida com altura variável (2/2)



Fonte: Autor

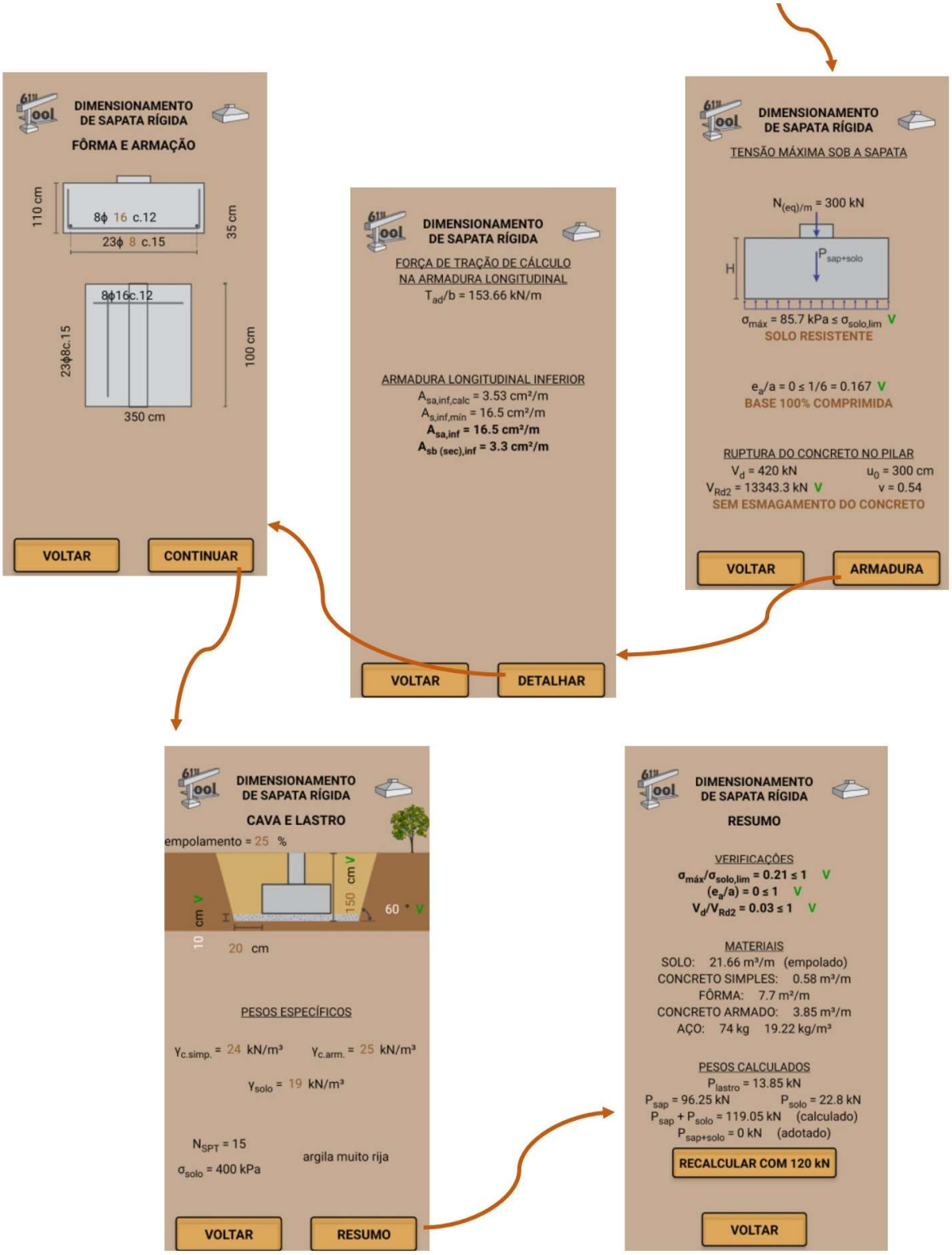
Tem-se, para sapata corrida com altura constante, o seguinte Mapa de Navegação:

Figura 26 – Mapa de navegação: sapata corrida com altura constante (1/2)



Fonte: Autor

Figura 27 – Mapa de navegação: sapata corrida com altura constate (2/2)



Fonte: Autor

4.1.4 Sapata Associada

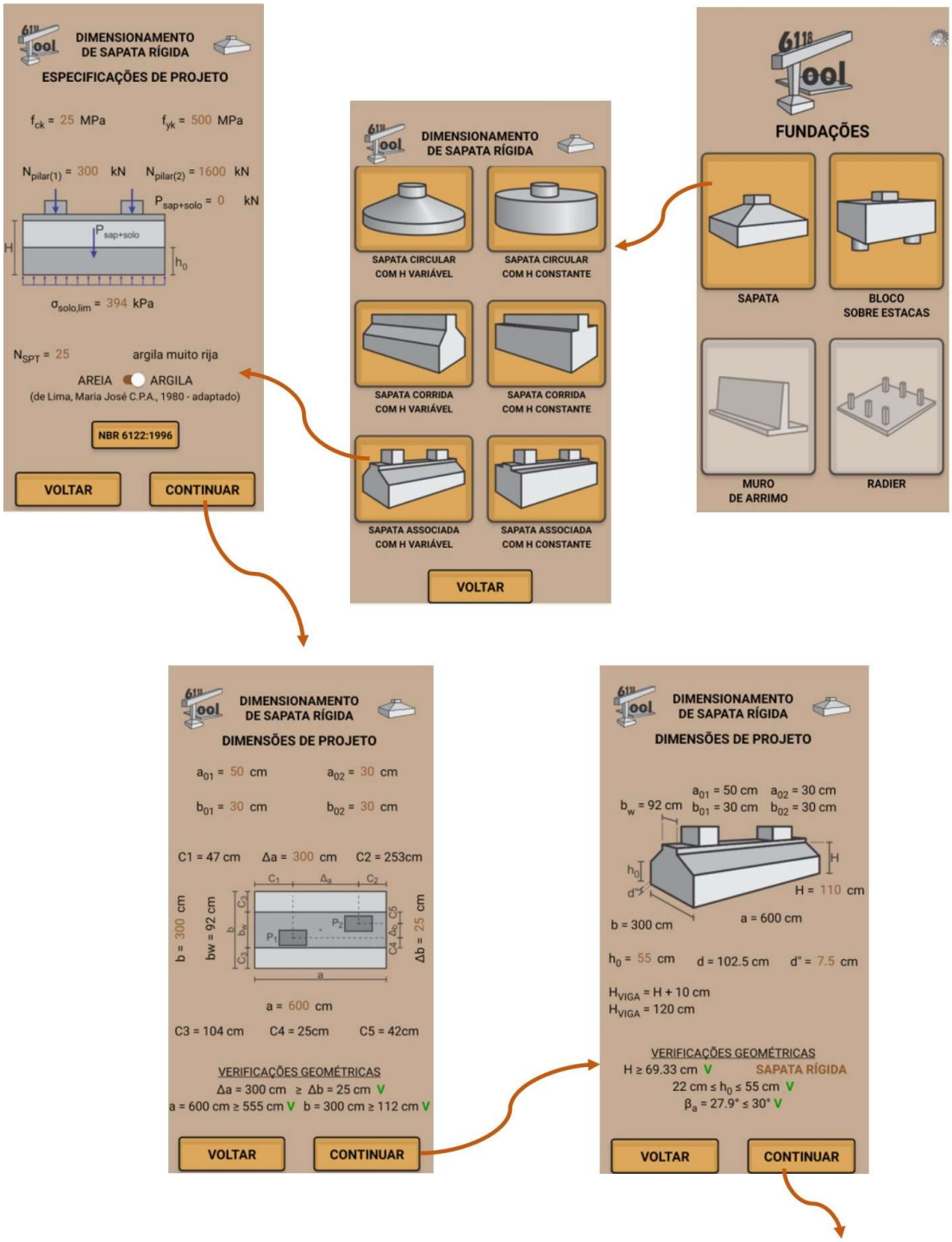
A sapata associada foi também um elemento adicionado durante o desenvolvimento deste trabalho. Esse tipo de sapata necessita de verificações específicas quando comparada às sapatas citadas anteriormente, principalmente quanto à sua geometria, na qual o centroide da sapata deve coincidir com o centro de carga dos pilares que nela descarregam. Além disso, é comum também a previsão de uma viga de rigidez com a finalidade de distribuir as cargas verticais para a sapata. Por isso, julgou-se interessante para o usuário um módulo que fizesse as verificações geométricas necessárias e levasse em consideração a presença da viga de rigidez.

Conforme será abordado posteriormente, nas sapatas associadas não há a *screen* de inserção de momentos fletores. Porém, há uma tela de verificações geométricas em planta que não há nas demais sapatas. Nessa *screen* são feitas as verificações especificas necessárias a esse modelo de sapata, analisando se, com a geometria informada pelo usuário, é possível alocar o centro de carga dos pilares no centro geométrico da sapata e se é possível alocar a viga de rigidez.

Todas essas verificações serão abordadas no item “4.2 FORMULAÇÕES NO MENU DE SAPATAS”.

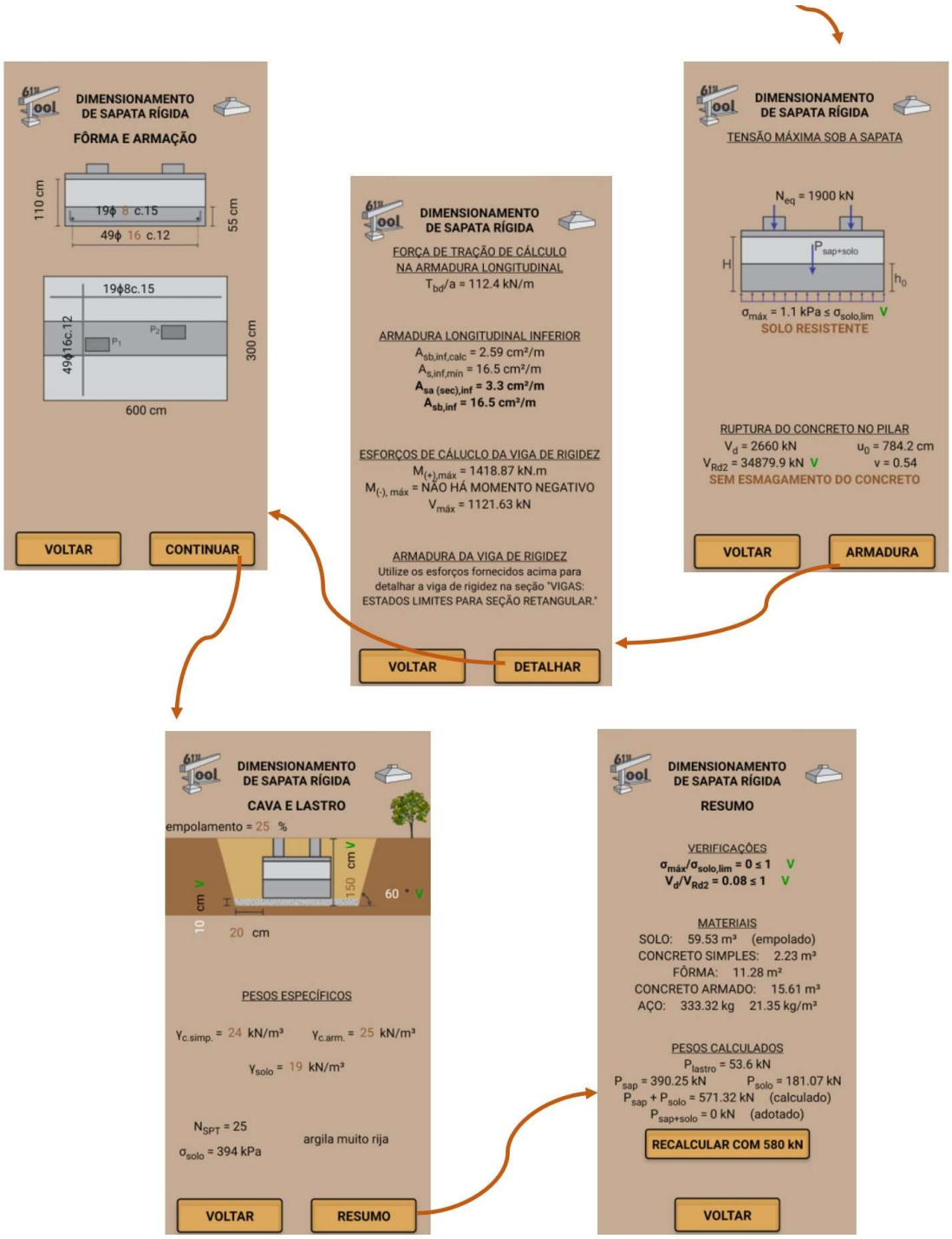
Tem-se, para sapata associada com altura variável, o seguinte Mapa de Navegação:

Figura 28 – Mapa de navegação: sapata associada com altura variável (1/2)



Fonte: Autor

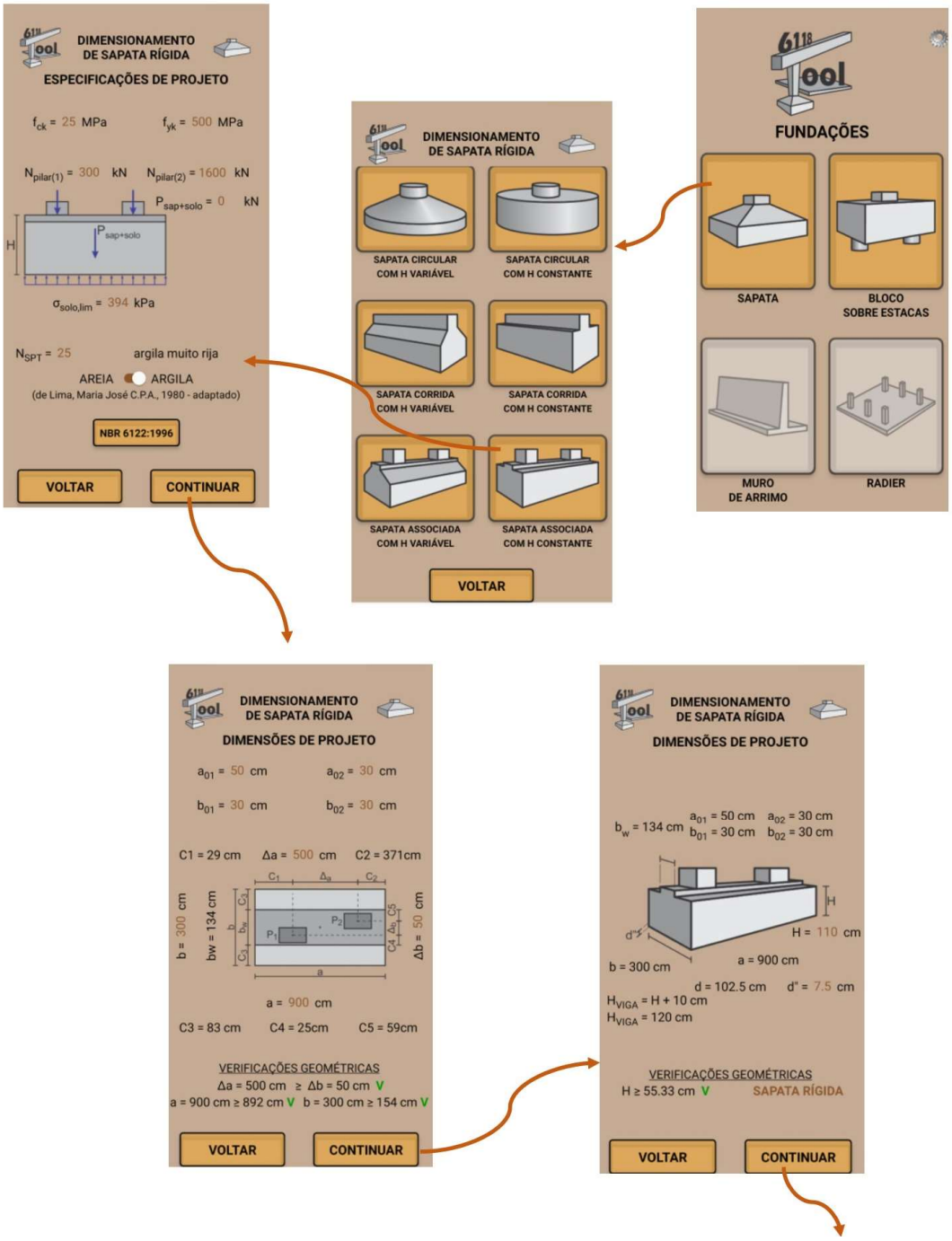
Figura 29 – Mapa de navegação: sapata associada com altura variável (2/2)



Fonte: Autor

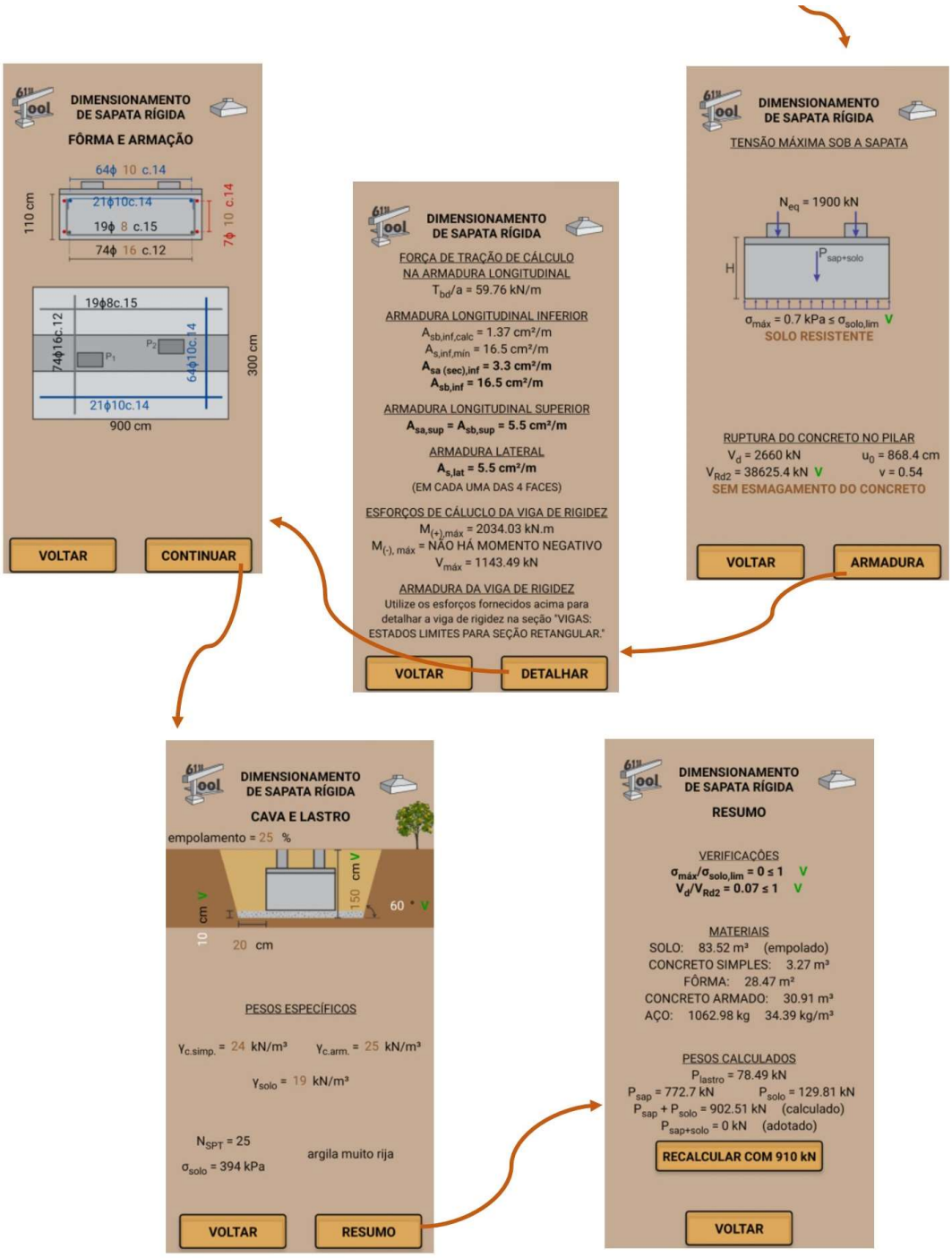
Tem-se, para sapata associada com altura constate, o seguinte Mapa de Navegação:

Figura 30 – Mapa de navegação: sapata associada com altura constante (1/2)



Fonte: Autor

Figura 31 – Mapa de navegação: sapata associada com altura constante (2/2)



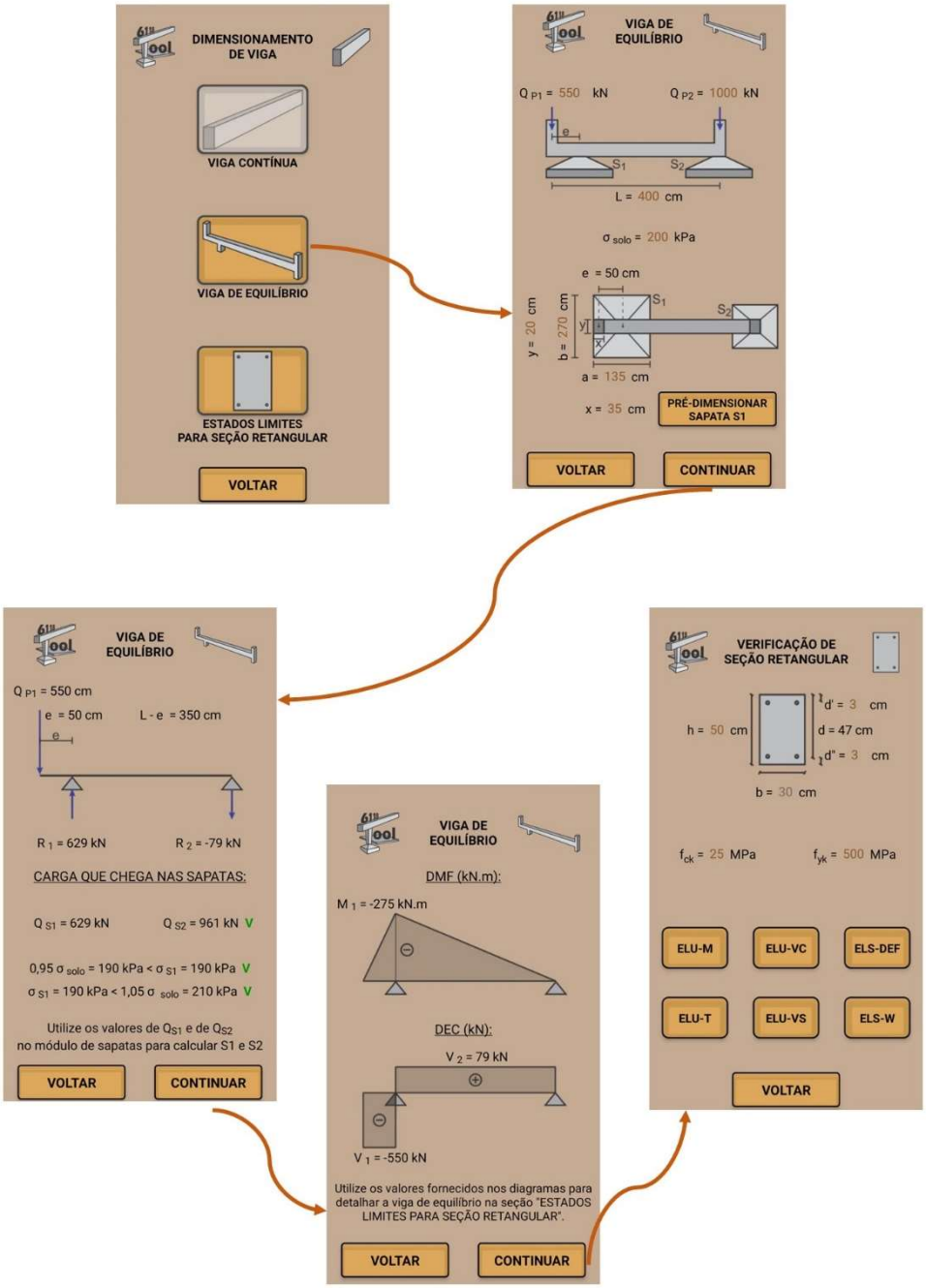
Fonte: Autor

4.1.5 Viga de Equilíbrio

Estando previstas as sapatas isoladas, corridas e associadas, para abordar todas os tipos de sapata que Campos (2015) classifica segundo a carga que transfere ao solo, restava a sapata alavancada com sua respectiva viga alavanca.

Como citado anteriormente, nesse trabalho optou-se por não integrar a viga alavanca à sapata alavancada, de modo que essa última trabalhe como uma sapata isolada com carga centrada.

Figura 32 – Mapa de navegação: viga de equilíbrio



Fonte: Autor

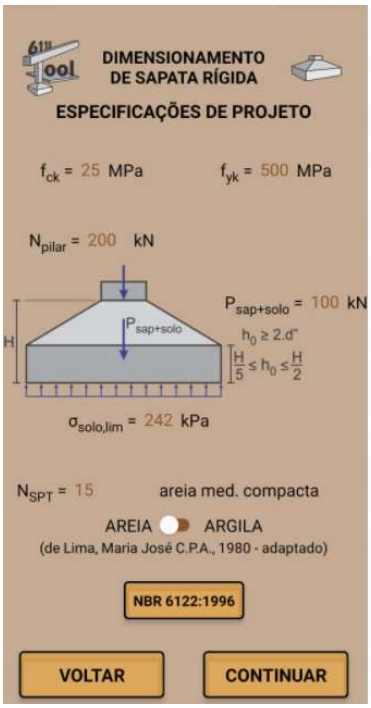
4.2 FORMULAÇÕES NO MENU DE SAPATAS

4.2.1 *Screen* "Especificações de projeto: força normal"

Neste momento inicial, temos os seguintes dados de entrada: f_{ck} do concreto, f_{yk} do aço, força normal transferida à sapata pelo pilar (N), peso próprio da sapata somada ao peso de solo sobre a sapata ($P_{sap+solo}$) estimada pelo usuário, que será verificada ao final do roteiro do aplicativo, N_{SPT} do solo e tipo de solo (areia ou argila).

Um exemplo da tela em questão pode ser analisado na Figura 33 abaixo:

Figura 33 – *Screen* "Especificações de projeto: força normal" para sapata retangular



Fonte: Autor

A diferença na entrada de dados, a depender do modelo de sapata selecionada, se dá apenas no tipo de força normal a ser inserida:

a) Nas sapatas isoladas, é inserida apenas uma carga concentrada.
b) Na sapata corrida, é inserida uma carga linear
c) Na sapata associada, são inseridas duas cargas concentradas.

Essas particularidades podem ser vistas nos "Mapas de Navegação" (4.1)

A partir do N_{SPT} inserido pelo usuário e do tipo de solo informado é feita uma relação empírica com base nas seguintes correlações (MUSSO, 2020; LIMA, 1980; GODOY, 1972) para definir-se a tensão no solo:

Figura 34 – Correlações empíricas entre N_{SPT} e parâmetros do solo

CORRELAÇÕES EMPÍRICAS ENTRE N_{SPT} E PARÂMETROS DO SOLO					
AREIAS E SILTES ARENOSOS					
N_{SPT}[1]	Compacidade[1]	Peso Específico Natural (kN/m^3)[2]	Ângulo de Atrito Interno ϕ[1]	Tensão Admissível (kN/m^2)[1]	Coeficiente de Recalque (kN/m^3)[3]
≤ 4	fofa	≤ 16	≤ 30°	≤ 100	0
5 - 10	pouco compacta	18	30° - 35°	100 - 200	25000 - 50000
11 - 30	median. compacta	19	35° - 40°	200 - 400	50000 - 150000
31 - 50	compacta	20	40° - 45°	400 - 600	150000 - 250000
> 50	muito compacta	> 20	> 45°	> 600	250000
ARGILAS A SILTES ARGILOSOS					
N_{SPT}[1]	Consistência[1]	Peso Específico Natural (kN/m^3)[2]	Coesão C (kN/m^2)[2]	Tensão Admissível (kN/m^2)[1]	Coeficiente de Recalque (kN/m^3)[3]
≤ 2	muito mole	≤ 13	≤ 12	≤ 30	0
3 - 4	mole	15	12 - 25	33 - 60	0
5 - 8	média	17	25 - 50	60 - 120	15000 - 24000
9 -15	rija	18	50 - 100	120 - 240	27000 - 45000
16 - 30	muito rija	19	100 - 150	240 - 480	48000 - 90000
> 30	dura	> 20	> 150	> 480	90000

[1] LIMA, MARIA JOSÉ C. P. A. Prospecção Geotécnica do Subsolo - 1980
[2] GODOY, N. S. Investigações de Subsolo para Fundações - 1972
[3] MUSSO JR, F. Adaptado de José de Miranda Tepedino (Areias - $c_r = 5N_{SPT}$ N/cm^3; Argilas - $c_r = 3N_{SPT}$ N/cm^3)

Fonte: Musso, 2020; Lima, 1980; Godoy, 1972

O aplicativo aceita que o usuário modifique o valor da tensão do solo obtida por essa relação, visto que é possível e, inclusive, mais adequado, que o projetista possua o valor de tensão admissível, não sendo necessário recorrer às relações empíricas, ponto este que será abordado posteriormente.

É possível também para o usuário, ao clicar no botão “NBR 6122:1996” verificar a tabela da NBR 6122:1996 que previa outras relações empíricas entre N_{SPT} e tensões limites, que levava em consideração outros tipos de solo e suas características:

Figura 35 – Pressão admissível de acordo com o tipo de solo

Tabela 4 - Pressões básicas (σ_0)

Classe	Descrição	Valores (MPa)
1	Rocha sã, maciça, sem laminação ou sinal de decomposição	3,0
2	Rochas laminadas, com pequenas fissuras, estratificadas	1,5
3	Rochas alteradas ou em decomposição	ver nota c)
4	Solos granulares concrecionados - conglomerados	1,0
5	Solos pedregulhosos compactos a muito compactos	0,6
6	Solos pedregulhosos fofos	0,3
7	Areias muito compactas	0,5
8	Areias compactas	0,4
9	Areias medianamente compactas	0,2
10	Argilas duras	0,3
11	Argilas rijas	0,2
12	Argilas médias	0,1
13	Siltes duros (muito compactos)	0,3
14	Siltes rijos (compactos)	0,2
15	Siltes médios (medianamente compactos)	0,1

Notas:a) Para a descrição dos diferentes tipos de solo, seguir as definições da NBR 6502.
b) No caso de calcário ou qualquer outra rocha cárstica, devem ser feitos estudos especiais.
c) Para rochas alteradas ou em decomposição, têm que ser levados em conta a natureza da rocha matriz e o grau de decomposição ou alteração.
d) Os valores da Tabela 4, válidos para largura de 2 m, devem ser modificados em função das dimensões e da profundidade das fundações conforme prescrito em 6.2.2.5, 6.2.2.6 e 6.2.2.7.

Fonte: NBR 6122:1996 (DESCONTINUADA)

Porém, esta tabela foi descontinuada nas versões recentes da norma, não havendo mais a possibilidade, segundo essa, de relacionar o tipo de solo ou os valores de N_{SPT} à tensão resistente no solo de forma segura e precisa, devendo-se recorrer a ensaios geotécnicos específicos para determinação desta informação.

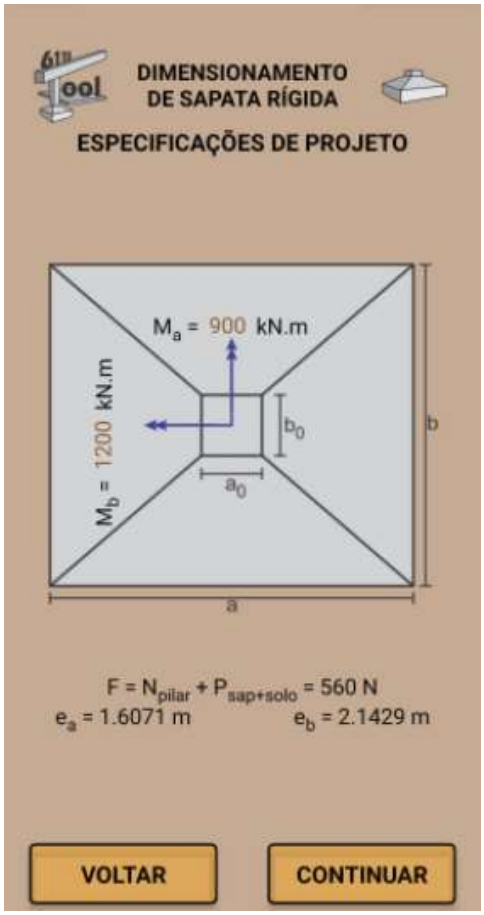
Entretanto, para fins didáticos e entendendo que não é o escopo deste trabalho aprofundar-se nos parâmetros geotécnicos, a relação empírica foi prevista, visto que é comum em exemplos didáticos, e, até mesmo na prática, ter-se como único parâmetro de resistência o valor do N_{SPT}.

4.2.2 *Screen* “Especificações de projeto: momento fletor”

Nessa tela (Figura 36), o usuário informa ao programa quais os momentos fletores, caso existam, a serem transferidos às sapatas, sendo possível:

a) Nas sapatas isoladas retangulares, inserir momento fletor nas duas direções (M_a e M_b)
b) Nas sapatas isoladas circulares, inserir um momento fletor (M_a), sendo que este momento pode ser a combinação de momentos em duas direções, não sendo relevante a direção do momento resultante, em função da geometria circular.
c) Nas sapatas corrida, inserir um momento fletor (M_a) necessariamente em torno da sua direção principal.

Figura 36 – Screen “Especificações de projeto: momentos” para sapata isolada retangular



Fonte: Autor

Essas particularidades podem ser vistas nos “Mapas de Navegação” (4.1)

O aplicativo informa, então, a força vertical total que chega ao solo:

$$F = N_{PILAR} + P_{SAP+SOLO} \tag{2}$$

São fornecidas também a(s) excentricidade(s) equivalentes devido ao(s) momento(s), seguindo a seguinte formulação:

$$e = \frac{M}{F} \tag{3}$$

Essa tela não faz parte do código das sapatas associadas, não sendo possível inserir nelas esforços de momento. Tal decisão foi tomada devido à presença da viga de rigidez, capaz de travar momentos de pequena magnitude. Caso o usuário sinta a necessidade de inserir momentos expressivos, tal consideração deve ser feita no dimensionamento da própria viga de rigidez, não entrando no escopo deste trabalho.

4.2.3 *Screen* “Dimensões de projeto”

Nas sapatas associadas essa tela é dividida em duas, então estas serão abordadas posteriormente.

Para as demais sapatas, o usuário insere os dados de: distância entre eixo da armação e face mais tracionada da seção d’’, altura H (para sapatas com altura constante), altura próxima ao pilar H e altura na extremidade h_0 (para sapatas com altura variável) e as dimensões em planta da sapata e do pilar, sendo, respectivamente:

a) Para sapatas isoladas retangulares: a e b e a_0 e b_0;
b) Para sapatas isoladas circulares: d e d_0 (diâmetros da circunferência);
c) Para sapatas corridas: apenas a e a_0.

É feito, então, o cálculo da altura útil da sapata:

$$d = h - d'' \tag{4}$$

É verificado, posteriormente, se a sapata é rígida, sendo este um pré-requisito para a continuidade das verificações. É utilizada a seguinte formulação para sapatas isoladas:

$$h \geq \frac{máximo\ (a - a_o; b - b_o)}{3} \tag{5}$$

Para sapatas circulares, a formula é adaptada da seguinte maneira:

$$h \geq \frac{d - d_o}{3} \tag{6}$$

Já para sapatas corridas, tem-se simplesmente:

$$h \geq \frac{a - a_o}{3} \tag{7}$$

Caso a verificação não seja verdadeira, ou seja, caso a sapata seja flexível, é emitido um aviso e o botão “CONTINUAR” é desativado, conforme pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 – Impossibilidade de dimensionar sapata flexível na *screen* “dimensões de projeto”

Fonte: Autor

Quanto à altura na extremidade (h_o), parâmetro este existente apenas nas sapatas de altura variável, definiu-se as seguintes limitações devido aspectos construtivos, não havendo limites normativos claros quanto a essas dimensões:

$$\frac{H}{5} \leq h_o \leq \frac{H}{2} \tag{8}$$

$$h_o \geq 2d'' \tag{9}$$

De forma análoga ao que ocorre quando não é respeitada a altura mínima para sapatas rígidas, quando os limites para h_0 não são respeitados o botão “CONTINUAR” é desativado, ficando o usuário impossibilitado de continuar o dimensionamento até que insira um valor de h_0 dentro dos limites aceitos pelo aplicativo.

Outra verificação feita pelo 6118 Tool no caso de sapatas com altura variável é quanto ao ângulo de inclinação da sapata, β, que deve ser igual ou menor que o ângulo natural do concreto fresco, ou seja, 30º, a fim de evitar a necessidade de

fôrmas na construção da sapata (BASTOS, 2019). Novamente, o botão “CONTINUAR” é desabilitado caso essa verificação não seja atendida.

Enfim, o programa calcula, nessa tela, os balanços das sapatas, segundo a seguinte formulação:

$$BAL_a = \frac{a - a_0}{2} \tag{10}$$

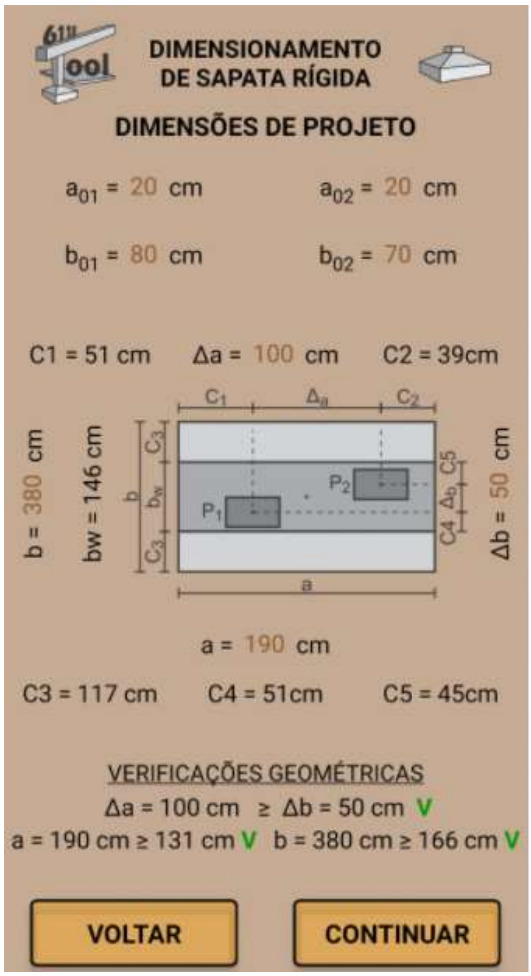
$$BAL_b = \frac{b - b_0}{2} \tag{11}$$

É informado, no caso de dois balanços (sapatas isoladas retangulares), se os balanços são iguais ou diferentes. Porém, sendo os balanços diferentes, a função “CONTINUAR” não é desabilitada. Esse aviso é gerado apenas para que o usuário tenha ciência, visto que, no geral, o dimensionamento com balanços iguais é mais econômico.

Para sapatas associadas, há uma *screen* para verificações em planta e outra para verificações referentes à altura. Isso ocorre pois nesse tipo de sapata é necessário verificar se, com a geometria fornecida pelo usuário, é possível posicionar o centro de carga dos pilares no centro geométrico da sapata, bem como se é possível alocar a viga de rigidez.

Para entrada de dados, o usuário deve inserir as dimensões do primeiro pilar (a_{01} e b_{01}) e do segundo pilar (a_{02} e b_{02}) e as distâncias de eixo a eixo entre esses pilares, na direção a (Δa) e, quando existir, na direção b (Δa), conforme Figura 38.

Figura 38 – *Screen* de dimensões de projeto em planta para sapata associada



Fonte: Autor

O usuário deve seguir o padrão exposto na imagem da tela. Ou seja, $\Delta a > \Delta b$, e o primeiro pilar, da esquerda para direita, localizado abaixo do segundo pilar ou alinhado com este, caso $\Delta b = 0$.

Caso a situação a ser dimensionada seja diferente da especificada, o usuário consegue facilmente adaptar os resultados para sua situação, “girando” as armações geradas em a e em b ou “espelhando”, a depender da situação.

O programa calcula, então, as ordenadas do centro de carga em relação ao primeiro pilar, da esquerda para direita, segundo as seguintes formulações:

$$i = \frac{N_2 \,.\, \Delta a}{N_1 + N_2};\ j = \frac{N_2 \,.\, \Delta b}{N_1 + N_2} \tag{12}$$

Sendo:

i a distância, horizontal, entre o primeiro pilar e o centro de carga dos pilares

j a distância, vertical, entre o primeiro pilar e o centro de carga dos pilares

N_1 a força normal do primeiro pilar

N_2 a força normal do segundo pilar

Δa a distância horizontal entre eixos dos pilares

Δb a distância vertical entre eixos dos pilares

Essas coordenadas, apesar de muito úteis para as verificações seguintes, não são retornadas de forma explicita ao usuário, visto que, construtivamente, é mais interessante a informação de cotas que amarrem essas distâncias com relação à dimensão da sapata. Essas cotas serão calculadas posteriormente.

A dimensão mínima, na direção a, que a sapata deve possuir é calculada a partir da seguinte formulação:

$$a \geq 2 \left[máximo \left(i + \frac{a_{01}}{2};\ \Delta a - i + \frac{a_{02}}{2}\right)\right] \tag{13}$$

É possível perceber que, segundo a formulação da dimensão mínima na direção a, é possível que um dos pilares, ou ambos, caso as cargas sejam iguais, esteja alinhado à extremidade da sapata.

Na direção b isso não é possível devido a presença da viga de rigidez. A largura dessa viga é definida de acordo com a seguinte formulação:

$$b_w = 2 \left[máximo \left(j + \frac{b_{01}}{2};\ \Delta b - j + \frac{b_{02}}{2}\right)\right] + 20 \tag{14}$$

Ou seja, encontrando-se o pilar com a extremidade mais distante do centro geométrico, na direção vertical, duplica-se esta distância, adiciona-se 10cm em cada lado e tem-se a largura da viga de rigidez. Utilizando essa formulação, os balanços obtidos, na direção b, serão sempre iguais. Com isso, é criada uma situação análoga a de uma sapata corrida.

Definiu-se que este balanço, na direção b, deveria ser de, no mínimo, 10cm em cada lado, chegando-se, então, à formula da dimensão mínima da sapata associada na direção b:

$$b \geq 2 \left[máximo \left(j + \frac{b_{01}}{2};\ \Delta b - j + \frac{b_{02}}{2}\right)\right] + 40 \tag{15}$$

Assim, é possível calcular as cotas “C1”, “C2”, “C3”, C4” e “C5”, representadas na Figura 38:

$$C1 = \frac{a}{2} - i \tag{16}$$

$$C2 = \frac{a}{2} - (\Delta a - i) \tag{17}$$

$$C3 = \frac{b - b_w}{2} \tag{18}$$

$$C4 = \frac{b_w}{2} - j \tag{19}$$

$$C5 = \frac{b_w}{2} - (\Delta b - j) \tag{20}$$

Como exposto anteriormente, com estas verificações concluídas, o problema da sapata associada reduz-se basicamente a uma situação de sapata corrida (com exceção da viga de rigidez, que precisa ser dimensionada).

Então, na tela seguinte, que realiza as verificações com relação à altura, todas as formulações são análogas às vistas anteriormente para sapatas corridas, substituindo-se a e a_0, por b e b_w, respectivamente.

A única exceção é a definição da altura da viga de rigidez, feita nesta *screen* a partir da formulação abaixo:

$$H_{viga} = H + 10 \tag{21}$$

4.2.4 *Screen* "Tensão máxima sob a sapata"

Quando se trata de tensão máxima sob a sapata, uma das questões relevantes é a porcentagem da base da sapata que se encontra comprimida. Apesar de ser possível calcular-se sapatas parcialmente tracionadas, desde que se tenha ao menos 2/3 da base comprimida (NBR 6112:2019), a formulação para essa situação é complexa e fugiria, assim, do escopo deste trabalho.

Por isso, uma das verificações do aplicativo é se a base encontra-se 100% comprimida, sendo, para isso, utilizada a seguinte formulação para sapatas retangulares:

$$\frac{6e_a}{a} + \frac{6e_b}{b} \leq 1 \tag{22}$$

E a seguinte formulação para sapatas circulares:

$$\frac{8e}{d} \leq 1 \tag{23}$$

Então, calcula-se a tensão no solo e, caso ela esteja abaixo da tensão limite fornecida na primeira tela, o botão um aviso é gerado e o botão "ARMADURA" é desabilitado, como é possível ver na Figura 39.

Neste caso, o usuário precisaria voltar algumas telas e rever as dimensões da sua sapata, visto que a excentricidade é função do momento e da força normal, dados estes que, a princípio, não podem ser alterados.

Na prática, é possível prever outras alternativas, como, por exemplo, dimensionar um travamento em viga para essa sapata, aliviando assim o momento que a mesma absorve ou, ainda, rever o lançamento estrutural da estrutura, procurando uma configuração que transmita menos momento às sapatas:

Figura 39 – Impossibilidade de dimensionar sapata parcialmente tracionada na *screen* “tensão máxima sob a sapata”

Fonte: Autor

Já o cálculo da tensão máxima sob a sapata é feito segundo a seguinte formulação para sapatas retangulares:

$$\sigma_{max} = 1 + \left(\frac{6e}{a} + \frac{6e}{b}\right)\frac{F}{ab} \tag{24}$$

E a seguinte formulação para sapatas circulares:

$$\sigma_{max} = \left[1 + \left(\frac{2e}{D}\right)\right]\frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}} \tag{25}$$

Se $\sigma_{max} > \sigma_{adm}$, o botão “ARMADURA” também é desabilitado e as dimensões da sapata devem ser revistas.

O 6118 Tool calcula a carga equivalente (N_{eq}), utilizada para verificação de ruptura do concreto por compressão diagonal, a partir da seguinte formulação para sapatas retangulares:

$$N_{eq} = ab\sigma_{max} - P_{SAP+SOLO} \tag{26}$$

E a seguinte formulação para sapatas circulares:

$$N_{eq} = \frac{\pi D^2}{4}\sigma_{max} - P_{SAP+SOLO} \tag{27}$$

E, enfim, quanto a ruptura do concreto na seção crítica, temos:

$$V_d = 1{,}4N_{eq} \tag{28}$$

$$\vartheta = 0{,}6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \tag{29}$$

$$V_{RD2} = 0{,}45\vartheta f_{cd} u_o d \tag{30}$$

Sendo que u_o é o perímetro do pilar. Para sapatas corridas, foi considerado o perímetro por metro e para sapatas associadas foi considerado o perímetro da viga de rigidez.

Novamente, se $V_d > V_{RD2}$, o botão “ARMADURA” é desabilitado e os dados precisam ser revisados. Uma opção é a de aumentar a altura da sapata, resultando assim em um aumento da força resistente V_{RD2}.

4.2.5 *Screen* “Tensões de cálculo e armadura”

Nesta tela (Figura 40), são calculados os esforços e as armações das sapatas e, no caso da sapata associada, os esforços da viga de rigidez.

Figura 40 – *Screen* “tensões de cálculo e armadura” da sapata associada com altura constante

Fonte: Autor

Primeiro, obtém-se a força de tração de cálculo na armadura longitudinal. Para sapatas retangulares, que distribui a carga nas duas direções, tem-se:

$$\frac{T_{ad}}{b} = \frac{N_d}{8bd}(a - a_0); \quad \frac{T_{bd}}{a} = \frac{N_d}{8ad}(b - b_0) \tag{31}$$

Para sapatas corridas aplica-se apenas a primeira fórmula, visto que a carga é distribuída apenas na direção a. Para sapatas associadas, aplica-se apenas a segunda fórmula, já que a carga é distribuída na direção b, com a observação de que a dimensão do pilar b_0 é substituída pela largura da viga de rigidez b_w.

Nas sapatas circulares, a formulação é:

$$\frac{T_d}{D} = \frac{N_d}{3\pi Dd}(D - d_0) \tag{32}$$

Para armação principal, em função da tensão, tem-se:

$$A_{sa} = \left(\frac{T_{ad}/b}{f_{yd}}\right) \; ; \; A_{sb} = \left(\frac{T_{bd}/a}{f_{yd}}\right) \; ; \; A_{sD} = \left(\frac{T_{bd}/D}{f_{yd}}\right) \tag{33}$$

É feita, então, a verificação de área de aço mínima, na direção principal:

$$A_{s,min} = 0{,}15\% \cdot 100 \cdot H \tag{34}$$

A área de aço adotada na direção principal é o maior valor dentre a área de aço calculada e a área de aço mínima.

É feito, então, o cálculo da área de aço secundária, no caso de sapata corrida e sapata associada:

$$A_{s,sec} = máximo\left(0{,}2 \cdot A_{s,principal};\; 0{,}9\frac{cm^2}{m}\right) \tag{35}$$

Para sapatas isoladas, circulares e associadas, quando a altura é constante, é alocada também armadura superior e armadura lateral para combater fissurações, seguindo recomendações de Musso (2020).

Essa armadura segue a seguinte formulação, não havendo um valor mínimo:

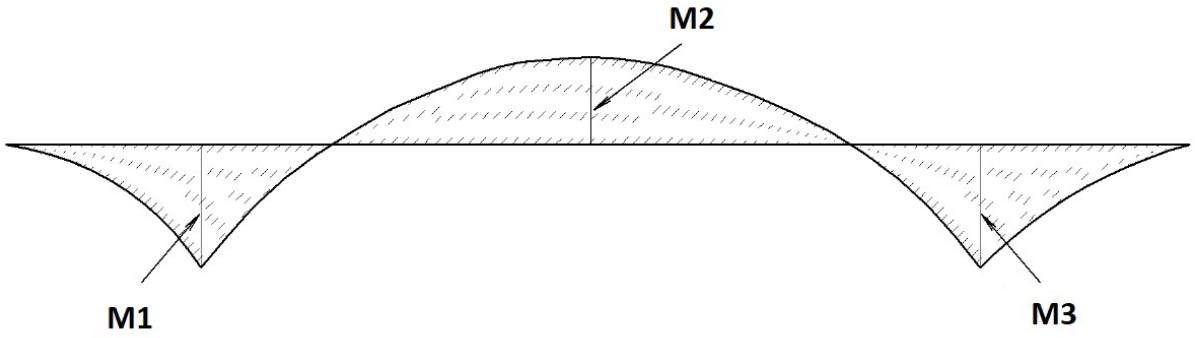
$$A_{s,sup} = A_{s,lat} = 0{,}05\% \cdot 100 \cdot H \tag{36}$$

$$(para\ H\ em\ cm,\ A_s\ em\ \frac{cm^2}{m})$$

Para sapatas associadas, tem-se, ainda, o resultado dos esforços de cálculo máximos na viga de rigidez, para que o usuário dimensione a viga utilizando o módulo “VIGAS: ESTADOS LIMITES PARA SEÇÃO RETANGULAR” desenvolvido por Cosmo (2019).

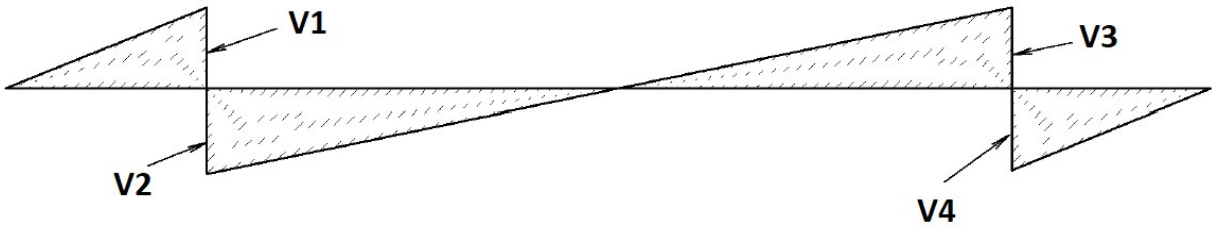
Tem-se, para as vigas de rigidez, as seguintes configurações de diagrama de momento fletor e de força cortante:

Figura 41 – Diagrama de Momento Fletor da viga de rigidez



Fonte: Adaptado Luchi (2021)

Figura 42 – Diagrama de Força Cortante da viga de rigidez



Fonte: Adaptado de Luchi (2021)

As formulações para obter esses esforços de cálculo estão apresentadas abaixo:

$$M1 = 1{,}4 \cdot \frac{N_{eq}}{a} \cdot \frac{C1^2}{2} \tag{37}$$

$$M2 = 1{,}4 \cdot \left[\frac{N_{eq}}{a} \cdot \frac{\Delta a^2}{8} - \left(\frac{M1 + M3}{2}\right)\right] \tag{38}$$

$$M3 = 1{,}4 \cdot \frac{N_{eq}}{a} \cdot \frac{C2^2}{2} \tag{39}$$

$$V1 = 1{,}4 \cdot \frac{N_{eq}}{a} \cdot C1 \tag{40}$$

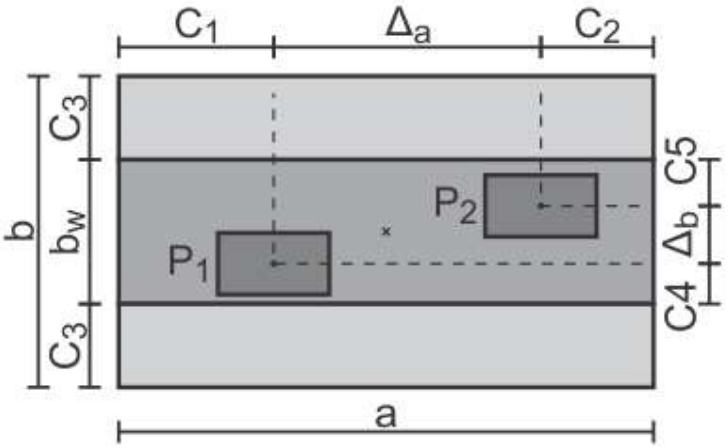
$$V2 = 1{,}4 \cdot (V1 - N_{PILAR}) \tag{41}$$

$$V3 = 1{,}4 \cdot \left(V2 + \frac{N_{eq}}{a} \cdot \Delta a \right) \tag{42}$$

$$V4 = 1{,}4 \cdot (V3 - N_{PILA}) \tag{43}$$

C1 e C2 são as distancias horizontais entre os eixos dos pilares P1 e P2, respectivamente, e as extremidades da sapata, conforme é possível ver na Figura 43:

Figura 43 – Sapata associada em planta



Fonte: Autor

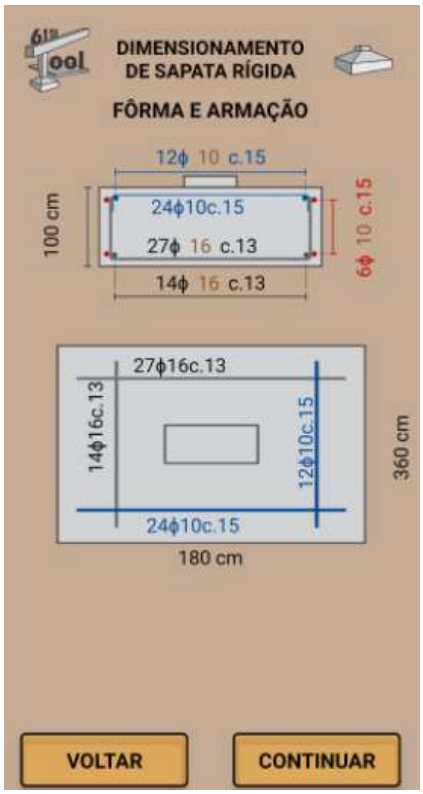
O aplicativo, enfim, informa ao usuário:

a) Momento fletor positivo máximo, dentre os momentos M1 e M2;
b) Momento fletor negativo, em módulo;
c) Cortante máximo, em módulo, dentre os cortantes V1, V2, V3 e V4

4.2.6 *Screen* "Fôrma e armação"

Nessa tela é feito o detalhamento da armadura calculada na anterior, como pode ser observado na Figura 44.

Figura 44 – Detalhamento da armadura na *screen* “Fôrmas e armação”



Fonte: Autor

O usuário define a bitola da armação que deseja utilizar:

a) Na armação inferior, não sendo necessariamente a mesma nas duas direções;
b) Na armação superior;
c) Na armação lateral.

Para definir o espaçamento, é utilizada a formulação

$$e = \frac{100}{\left(\frac{A_s}{A_{s,bitola}}\right)} \tag{44}$$

E, por fim, é definida a quantidade de barras na direção nas quais elas estão distribuídas. Para exemplificar, será utilizada a direção a:

$$q = \frac{a - 2d''}{e} \tag{45}$$

4.2.7 *Screen* “Cava e lastro”

Nessa tela (Figura 45) o usuário define os seguintes parâmetros:

a) Empolamento do solo, emp_{solo}

b) Profundidade de escavação, p_{esc}

c) Espessura do lastro de concreto magro, e_{lastro}

d) Ângulo de escavação, β

e) Distância entre extremidade da sapata e extremidade do fundo da cava, d_{cava}

f) Peso específico do concreto simples, $\gamma_{c.simp}$

g) Peso específico do concreto armado, $\gamma_{c.arm}$

h) Peso específico do solo, γ_{solo}

Figura 45 – *Screen* “cava e lastro”

Fonte: Autor

Quanto às verificações feitas nesta tela: a profundidade de escavação não pode ser menor que a altura da sapata ou menor que 150cm; a espessura do lastro deve ser de, no mínimo, 5cm; e o ângulo de escavação deve estar entre 25º e 90º.

4.2.8 *Screen* "Resumo"

Nessa tela (Figura 46), é apresentado o resumo final, contendo informações como volume de solo escavado, quantitativos de forma, concreto e índices de peso de aço por volume de concreto.

Figura 46 – *Screen* "Resumo"

Fonte: Autor

O volume de solo escavado para as sapatas retangulares é calculado a partir da seguinte formulação (para sapatas corridas, b=100 cm e o valor é obtido por metro de sapata):

$$Vol_{solo} = (1 + emp_{solo}) \cdot \frac{p_{esc}}{2} \cdot [\left(2\frac{p_{esc}}{tan\beta} + a + 2d_{cava}\right) \cdot \left(2\frac{p_{esc}}{tan\beta} + b + 2d_{cava}\right) + (a + 2d_{cava}) \cdot (b + 2d_{cava})] \quad (46)$$

Para as sapatas circulares, tem-se:

$$Vol_{solo} = (1 + emp_{solo}) \cdot \frac{p_{esc}}{2} \cdot \frac{\pi}{4} [\left(2\frac{p_{esc}}{tan\beta} + D + 2d_{cava}\right)^2 + (D + 2d_{cava})^2] \quad (47)$$

O volume de concreto simples (lastro) é calculado da seguinte forma para sapatas retangulares (para sapatas corridas, b=100cm e o valor é obtido por metro de sapata):

$$Vol_{c.simp} = \frac{e_{lastro}}{2} \cdot [\left(2\frac{e_{lastro}}{tan\beta} + a + 2d_{cava}\right) \cdot \left(2\frac{e_{lastro}}{tan\beta} + b + 2d_{cava}\right) + (a + 2d_{cava}) \cdot (b + 2d_{cava})] \quad (48)$$

Para as sapatas circulares, tem-se:

$$Vol_{c.simp} = \frac{e_{lastro}}{2} \cdot \frac{\pi}{4} [\left(2\frac{e_{lastro}}{tan\beta} + D + 2d_{cava}\right)^2 + (D + 2d_{cava})^2] \quad (49)$$

Há diferença no cálculo da área de forma para sapata isolada, sapata circular, sapata corrida e sapata associada. Além de haver diferença caso a altura seja constante ou variável. Seguem todas as formulações:

Área de forma para sapata isolada retangular com altura constante:

$$A_{forma} = 2 \cdot (a + b) \cdot H \quad (50)$$

Área de forma para sapata isolada retangular com altura variável:

$$A_{forma} = 2 \cdot (a + b) \cdot h_0 \quad (51)$$

Área de forma para sapata circular com altura constante:

$$A_{forma} = \pi DH \quad (52)$$

Área de forma para sapata circular com altura constante:

$$A_{forma} = \pi D h_0 \tag{53}$$

Área de forma para sapata corrida com altura constante, por metro de sapata:

$$A_{forma} = 2aH \tag{54}$$

Área de forma para sapata corrida com altura variável, por metro de sapata:

$$A_{forma} = 2ah_0 \tag{55}$$

Área de forma para sapata associada com altura constante:

$$A_{forma} = 2 \cdot (a + b) \cdot H + \ 2 \cdot (a + b_w) \cdot 0{,}1 \tag{56}$$

Área de forma para sapata associada com altura variável:

$$A_{forma} = 2 \cdot (a + b) \cdot h_0 + \ 2 \cdot (a + b_w) \cdot 0{,}1 \tag{57}$$

Há também diferença no cálculo do volume de concreto a depender do modelo se sapata selecionada. Seguem todas as formulações:

Volume de concreto para sapatas isoladas retangulares e sapata corrida com altura constante (para sapata corrida, b=100 e o resultado será obtido por metro de sapata):

$$V_{conc} = abH \tag{58}$$

Volume de concreto para sapatas isoladas retangulares e sapata corrida com altura variável (para sapata corrida, b e b_0=100 e o resultado será obtido por metro de sapata):

$$V_{conc} = abh_0 + \frac{H - h_0}{2}\,(a_0 b_0 + ab) \tag{59}$$

Volume de concreto para sapata circular com altura constante:

$$V_{conc} = \frac{\pi D^2}{4} H \tag{60}$$

Volume de concreto para sapata circular com altura variável:

$$V_{conc} = \frac{\pi D^2}{4} h_0 + \left[\frac{\pi(h - h_0)}{3} \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4} + \frac{D}{2} \cdot \frac{d_0}{2} + \frac{\pi {d_0}^2}{4}\right)\right] \quad (61)$$

Volume de concreto para sapata associada com altura constante:

$$V_{conc} = abH + ab_w \cdot 0{,}1 \quad (62)$$

Volume de concreto para sapata associada com altura variável:

$$V_{conc} = abh_0 + \frac{H - h_0}{2} (a_0 b_0 + ab) + ab_w \cdot 0{,}1 \quad (63)$$

Para o volume de solo sobre a sapata, tem-se:

$$Vol_{solo} = (p_{esc} - e_{lastro}) \cdot A_{sap} - V_{conc} - [(p_{esc} - e_{lastro} - h) \cdot A_{pilar}] \quad (64)$$

O quantitativo do consumo de aço é obtido a partir da tela de detalhamento, pegando-se a quantidade de armação e sabendo-se que o peso específico do aço é de 7850kg/m³.

Os pesos calculados são obtidos a partir dos volumes obtidos acima, utilizando-se os pesos específicos fornecidos pelo usuário na *screen* de “Cava e lastro”.

É dada, por fim, a opção ao usuário de recalcular a tensão no solo, possuindo agora informações mais precisas sobre o peso da sapata e o peso do solo sobre a sapata.

4.3 FORMULAÇÕES NO MENU DE VIGA DE EQUILÍBRIO

4.3.1 *Screen* “Viga de equilíbrio”

Na primeira tela de viga de equilíbrio, tem-se os seguintes dados de entrada, como demonstrado na Figura 47:

a) carga dos pilares P1 e P2 (Q_{P1} e Q_{P2}, respectivamente);

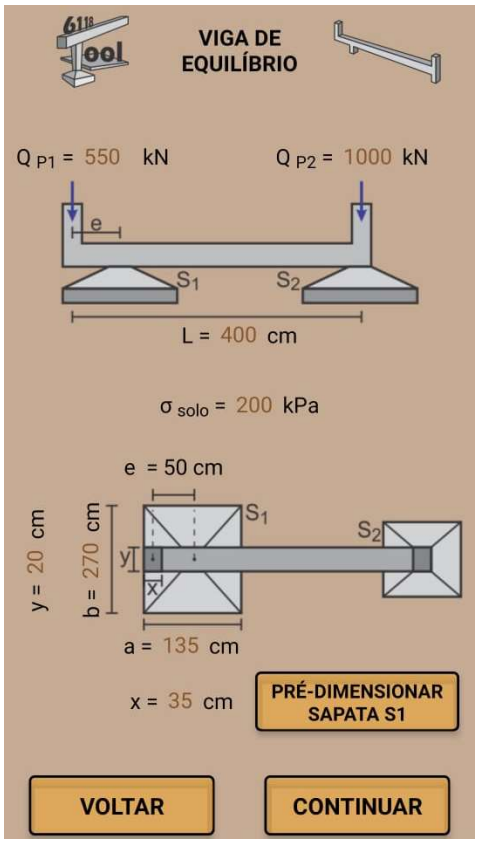
b) distância L entre o eixo do pilar de divisa (P_1) e o eixo do pilar interno (P_2);

c) tensão admissível do solo (σ_{solo});

d) dimensão em x e em y do pilar de divisa;

e) dimensão em a e b da sapata alavancada, S1;

Figura 47 – *Screen* “Dados da viga de equilíbrio”



Fonte: Autor

Nessa tela, o usuário pode inserir os dados da sapata S1 manualmente, caso tenha alguma estimativa prévia de sua dimensão, ou clicar no botão “PRÉ-DIMENSIONAR SAPATA S1”, que irá calcular as dimensões a e b de acordo com o seguinte roteiro de cálculo adaptado de Bastos (2019):

a) Estimar um valor para a carga que efetivamente chega na sapata S1:

$$Q_{S1} = 1{,}2 * Q_{P1} \tag{65}$$

b) Calcular área de apoio da sapata S1:

$$A = \frac{1{,}1 * Q_{S1}}{\sigma_{solo}} \tag{66}$$

Sendo 1,1 um coeficiente majorador para considerar o peso da sapata e do solo sobre a sapata;

c) Calcular as dimensões da sapata S1, sendo a e b valores inteiros e múltiplos de 5 cm:

I. Para y ≥ x:

$$b = 2 * a \tag{67}$$

$$a = \sqrt{A/2} \tag{68}$$

$$b = A/a \tag{69}$$

II. Para y < x:

$$a = 2 * b \tag{70}$$

$$b = \sqrt{A/2} \tag{71}$$

$$a = A/b \tag{72}$$

Tendo o usuário pré-dimensionado S1 ou inserido suas dimensões manualmente, a excentricidade e da carga do P1 em relação à sapata é calculada pelo próprio aplicativo e seu valor é exibido na tela. O valor de e é calculado segundo a equação abaixo:

$$e = \frac{a}{2} - \frac{x}{2} \tag{73}$$

4.3.2 *Screen* “Reações na viga de equilíbrio”

Ao seguir para a próxima tela, o usuário encontra um diagrama unifilar da viga de equilíbrio considerando apenas a carga Q_{P1} e as reações nos apoios 1 e 2 causadas pela sua aplicação (R_1 e R_2, respectivamente) calculadas aplicando as condições de equilíbrio de análise estrutural apresentadas abaixo:

$$\sum M_z = 0 \tag{74}$$

$$\sum F_y = 0 \tag{75}$$

Sendo a direção y paralela ao eixo dos pilares e a direção z perpendicular ao eixo da viga e à direção y.

Figura 48 – *Screen* “Reações na viga de equilíbrio”

Fonte: Autor

Abaixo do diagrama unifilar, são apresentadas as cargas Q_{S1} e Q_{S2}. Essas chegam, respectivamente, nas sapatas S1 e S2 e são calculadas segundo as seguintes expressões:

$$Q_{S1} = R_1 \tag{76}$$

$$Q_{S2} = Q_{P2} + 0{,}5 * R_2 \tag{77}$$

Segundo a NBR 6122:2019 (p. 15):

> "Quando ocorre uma redução de carga devido à utilização de viga alavanca, a fundação deve ser dimensionada considerando-se apenas 50% desta redução. Quando a soma dos alívios totais puder resultar em tração na fundação do pilar aliviado, sua fundação deve ser dimensionada para suportar a tração total e pelo menos 50% da carga de compressão deste pilar (sem o alívio)."

A partir dos dizeres da NBR 6122:2019, foi definida a equação para cálculo de Q_{S2} mostrada anteriormente.

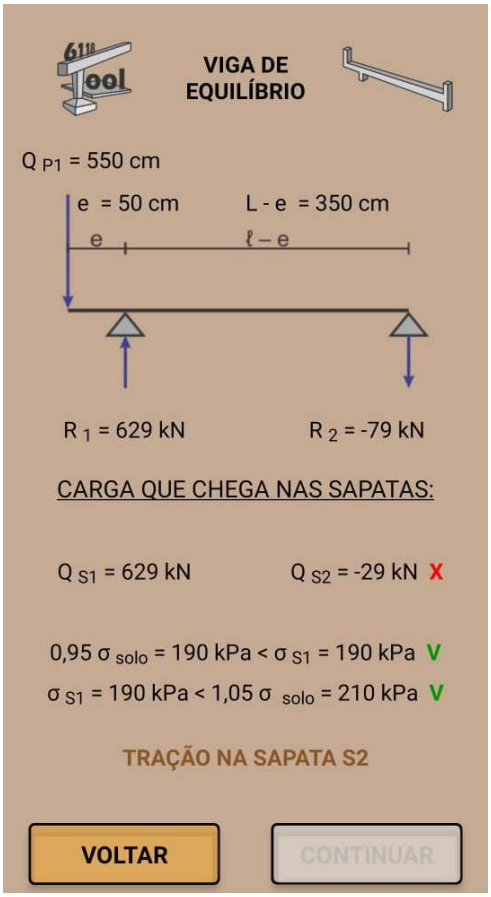
Também foi estabelecido que não será permitido que o alívio resulte em tração, ou seja, que o valor de R_1 seja maior que o de Q_{P1}. Caso isso ocorra, será emitido um aviso e o botão "CONTINUAR" será desabilitado, como na Figura 49.

Caso o solo não suporte a carga que efetivamente chega em S1, também é emitido um aviso e o botão "CONTINUAR" é desabilitado, como na Figura 50, e é necessário que o usuário retorne para redimensionar a sapata. Tal verificação é feita pela expressão:

$$0{,}95 * \sigma_{solo} < \frac{1{,}1 * Q_{S1}}{A} < 1{,}05 * \sigma_{solo} \tag{78}$$

Os limites de $0{,}95 * \sigma_{solo}$ e $1{,}05 * \sigma_{solo}$ são inspirados em Bastos (2019).

Figura 49 – Tração na sapata S2



Fonte: Autor

Por fim, aparece o texto “Utilize os valores de Q_{S1} e de Q_{S2} no módulo de sapatas para calcular S_1 e S_2”. Como foi necessária a separação do aplicativo em diferentes módulos, o usuário precisará gravar de maneira autônoma esses valores para inseri-los manualmente no módulo de fundações. Esse texto é ocultado caso apareça o aviso de erro.

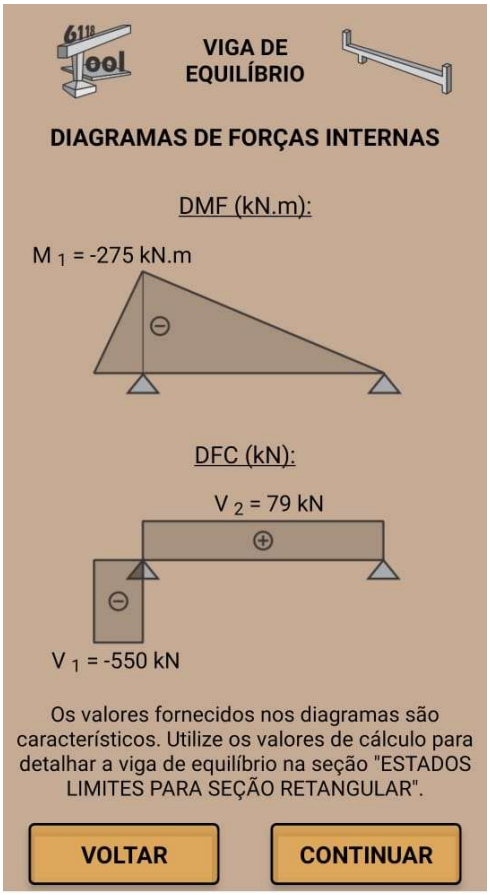
Figura 50 – Valor de Q_{S1} fora dos limites estabelecidos

Fonte: Autor

4.3.3 *Screen* "Forças internos na viga de equilíbrio"

Nessa última tela do menu de viga de equilíbrio, consta um diagrama de momento fletor e um diagrama de força cortante da viga com os valores de momento máximo (M_1) e força cortante máximo (V_2) e mínimo (V_1) obtidos através do Método das Seções dos estudos de resistência dos materiais.

Figura 51 – *Screen* “Forças internas na viga de equilíbrio”



Fonte: Autor

As equações para obter os valores de M_1, V_1 e V_2 estão descritas em sequência:

$$M_1 = Q_{P1} * e \tag{79}$$

$$V_1 = Q_{P1} \tag{80}$$

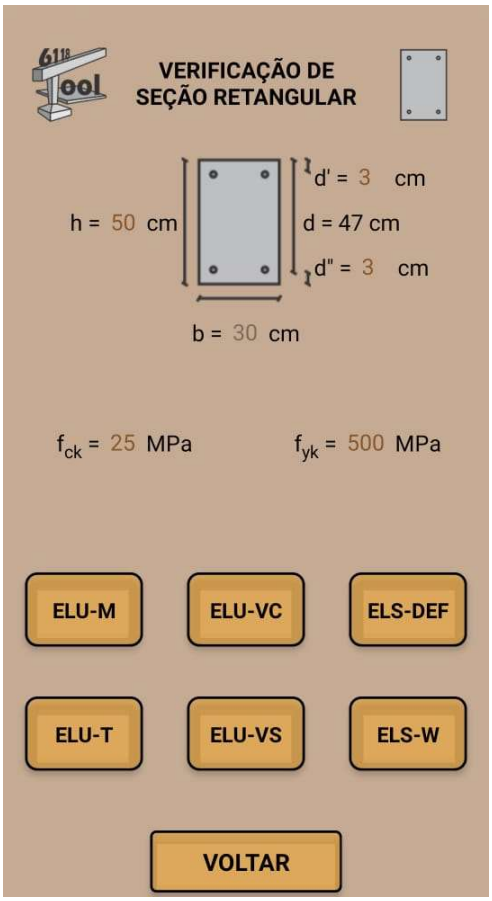
$$V_2 = V_1 + R_1 \tag{81}$$

O sinal de cada termo é definido de acordo com a convenção de sinais para esforços internos em vigas.

Na parte inferior da tela existe o texto “Os valores fornecidos nos diagramas são característicos. Utilize os valores de cálculo para detalhar a viga de equilíbrio na seção ‘ESTADOS LIMITES PARA SEÇÃO RETANGULAR’."

Ao clicar no botão “CONTINUAR”, o usuário é direcionado para seção “ESTADOS LIMITES PARA SEÇÃO RETANGULAR”, desenvolvida por Cosmo (2019), onde pode dimensionar e detalhar a viga de equilíbrio verificando os esforços nas seções críticas, ou seja, para os valores de M_1, V_1 e V_2 que deverão ser convertidos em valores de cálculo e inseridos manualmente.

Figura 52 – Screen “Verificação de seção retangular”



Fonte: Autor

Ao entrar nessa tela vindo da tela “Esforços internos na viga de equilíbrio”, o programa já atribui à largura b da viga a largura y do pilar P1 informada na tela “Viga de equilíbrio”. A dimensão b pode ser alterada livremente pelo usuário desde que não seja menor que a dimensão y do pilar.

5 VALIDAÇÃO

Algumas validações serão realizadas com base em exemplos encontrados na literatura e outras desenvolvidos manualmente.

5.1 SAPATA ISOLADA RETANGULAR

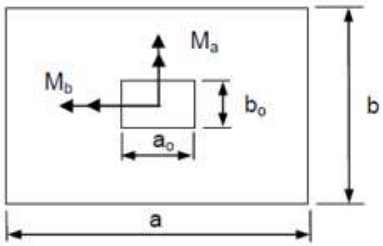
A validação da sapata isolada retangular foi realizada com base em Musso (2020, p. 73). Os dados fornecidos são:

Figura 53 – Exemplo resolvido de sapata isolada retangular com momento fletor

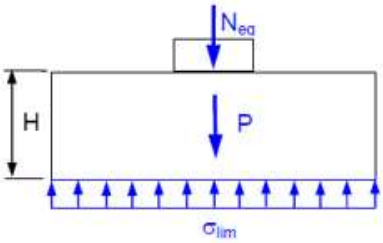
CONCRETO		AÇO		ESFORÇOS		SAPATA E PILAR		SOLO	
fck Mpa	25	fyk Mpa	500	Nk kN	5730	a cm	700	Areia compactada	
γc	1,4	γs	1,15	Psap kN	670	b cm	380	σlim kPa	400
fcd Mpa	17,86	fyd Mpa	435	Psol kN	640	H cm	100	γsolo kN/m³	18
Ecs Gpa	24	Es Gpa	210	Ma kNm	900	ao cm	40		
γconc kN/m³	25	d'' cm	10	Mb kNm	1200	bo cm	80		

GEOMETRIA DA SAPATA

Planta da Sapata



Elevação da Sapata



Fonte: Adaptado de Musso (2020).

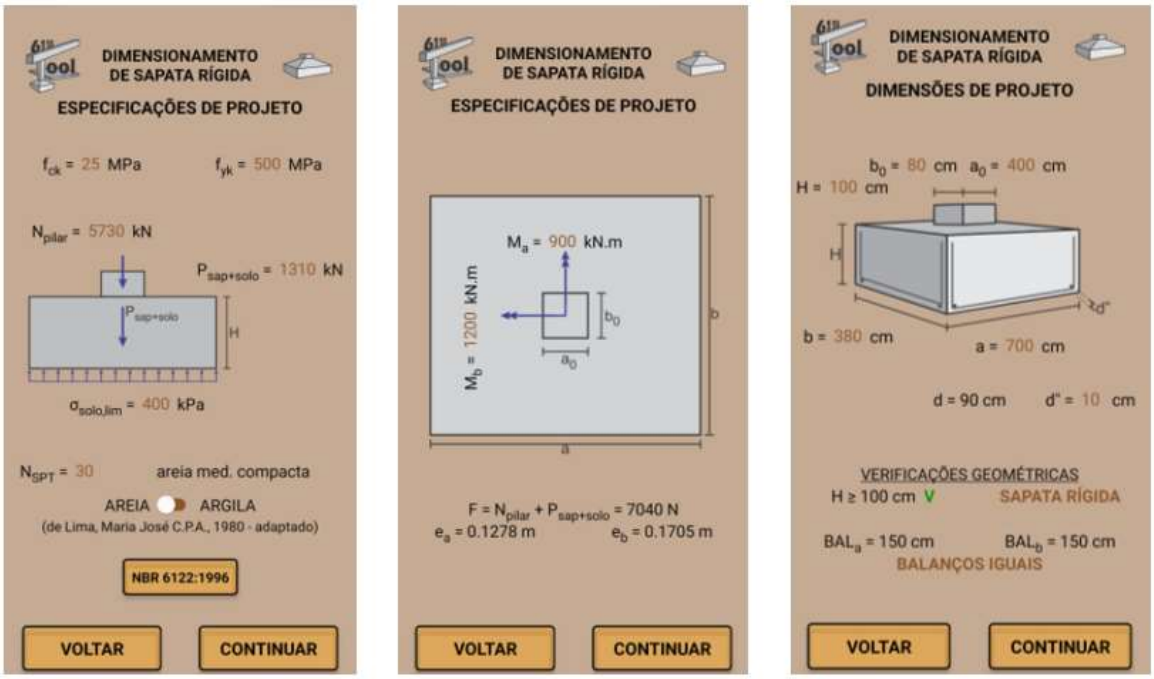
Para o exemplo citado, a sapata a ser verificada será a “Sapata Retangular com H constante”

Durante a entrada de dados, é necessário entrar com a informação do peso da sapata somado ao peso do solo, dados estes que foram informados de maneira individual por Musso (2020). Para tal, realizou-se a soma:

$$P_{sap+solo} = P_{sap} + P_{solo} = 670 + 640 = 1310\ kN \tag{82}$$

A Figura 54 mostra a entrada de dados e os resultados obtidos com relação as verificações geométricas no 6118 Tool, enquanto a comparação dos resultados obtidos será apresentada na sequência.

Figura 54 – Primeira validação da sapata isolada retangular



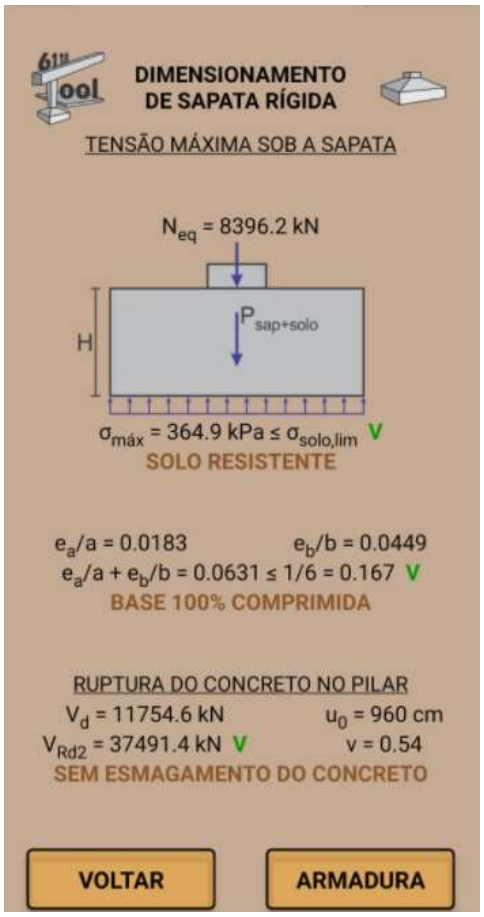
Fonte: Autor

Quanto às excentricidades relativas à força normal (e_a e e_b), calculadas em função dos momentos, os valores foram coincidentes, 0,1278m e 0,1075m nas direções a e b, respectivamente.

A verificação da rigidez da sapata também foi coincidente, apresentando, em ambos os casos, o valor de 100cm como limite inferior para que a sapata seja considerada rígida. Sendo, segundo o enunciado do exemplo, a altura da sapata em questão exatamente 100cm, ela pôde ser considerada rígida.

Seguindo com as verificações, a Figura 55 mostra os resultados relativos à tensão no solo e verificações de ruptura do concreto por compressão diagonal no 6118 Tool, enquanto a comparação dos resultados obtidos será apresentada na sequência.

Figura 55 – Segunda validação da sapata isolada retangular



Fonte: autor

Quanto a tensão máxima no solo (σ_{max}), o valor obtido no programa foi de 364,9 kPa, enquanto Musso (2020) optou por arredondar o valor para 365 kPa. Com isso, foi gerada também uma pequena diferença no Neq, tendo sido fornecido o valor de 8396,2 kN pelo programa e o valor de 8399 kN por Musso (2020).

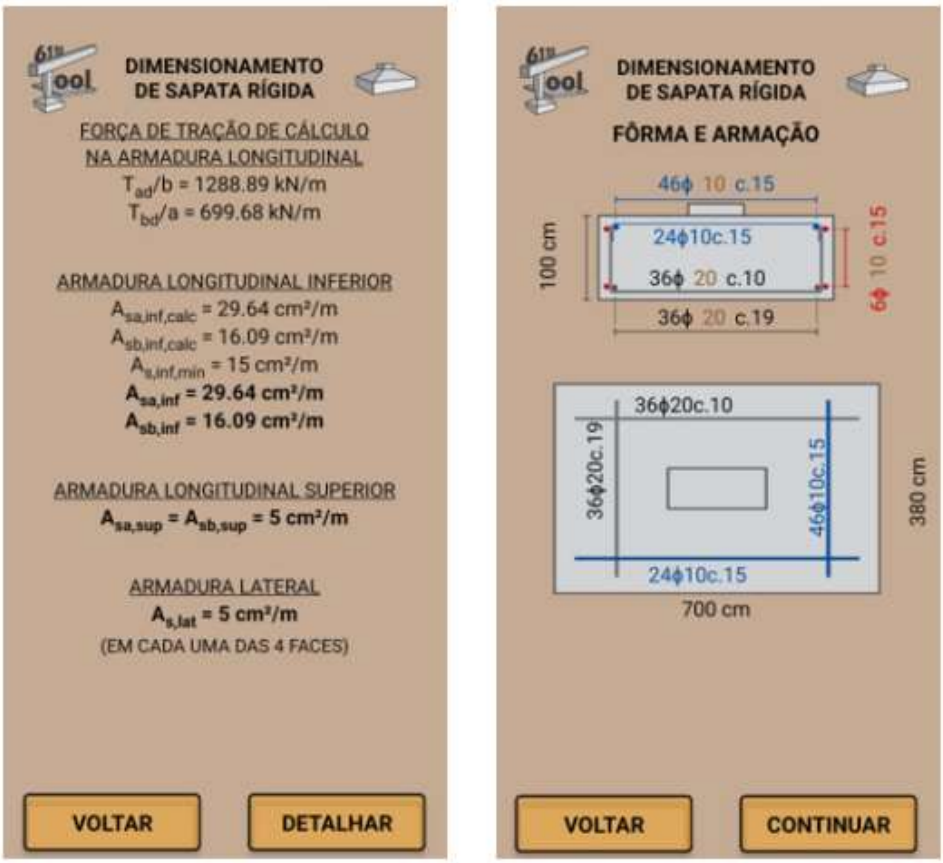
Os valores de e_a/a e e_b/b foram coincidentes, sendo 0,0183 e 0,0449, respectivamente. Com isso, em ambas as verificações, chegou-se à conclusão de que a base se encontra 100% comprimida.

Quanto a ruptura do concreto no pilar, todos os valores foram ou coincidentes ou muito próximos, sendo a diferença devido a arredondamentos: a força cortante de cálculo (Vd) apresentou o valor de 11754,6 kN no 6118 Tool e de 11758 kN no exemplo resolvido, enquanto a força cortante resistente de cálculo (V_{RD2})

apresentou o valor de 37491,4 kN no programa e foi arredondada para 37491 kN por Musso (2020).

Enfim, a Figura 56 mostra os resultados relativos à força de tração de cálculo e consequente armadura longitudinal no 6118 Tool, enquanto a comparação dos resultados obtidos será apresentada na sequência.

Figura 56 – Terceira validação da sapata isolada retangular



Fonte: Autor

A tensão em a e em b, por unidade de comprimento, foram coincidentes, tendo sido apresentadas no programa como 1288,89 kN/m e 699,68 kN/m, respectivamente e por Musso (2020), arredondadas para 1289 kN/m e 700 kN/m, também respectivamente.

Tais tensões resultaram em uma armadura, na direção a, de 29,64 cm²/m e na direção b de 16,09 cm²/m. Esses resultados foram coincidentes e maiores que a armadura mínima de 15 cm²/m.

Na parte superior e lateral, a armadura é calcula com base nas dimensões da sapata, tendo como o resultado o valor de 5 cm²/m, valor este que também foi coincidente.

Na figura com detalhamento, é possível ver uma das possíveis formas de se dispor essa armadura, tendo sido utilizada Ø 20mm para armação positiva e Ø10mm para armação negativa e armação lateral.

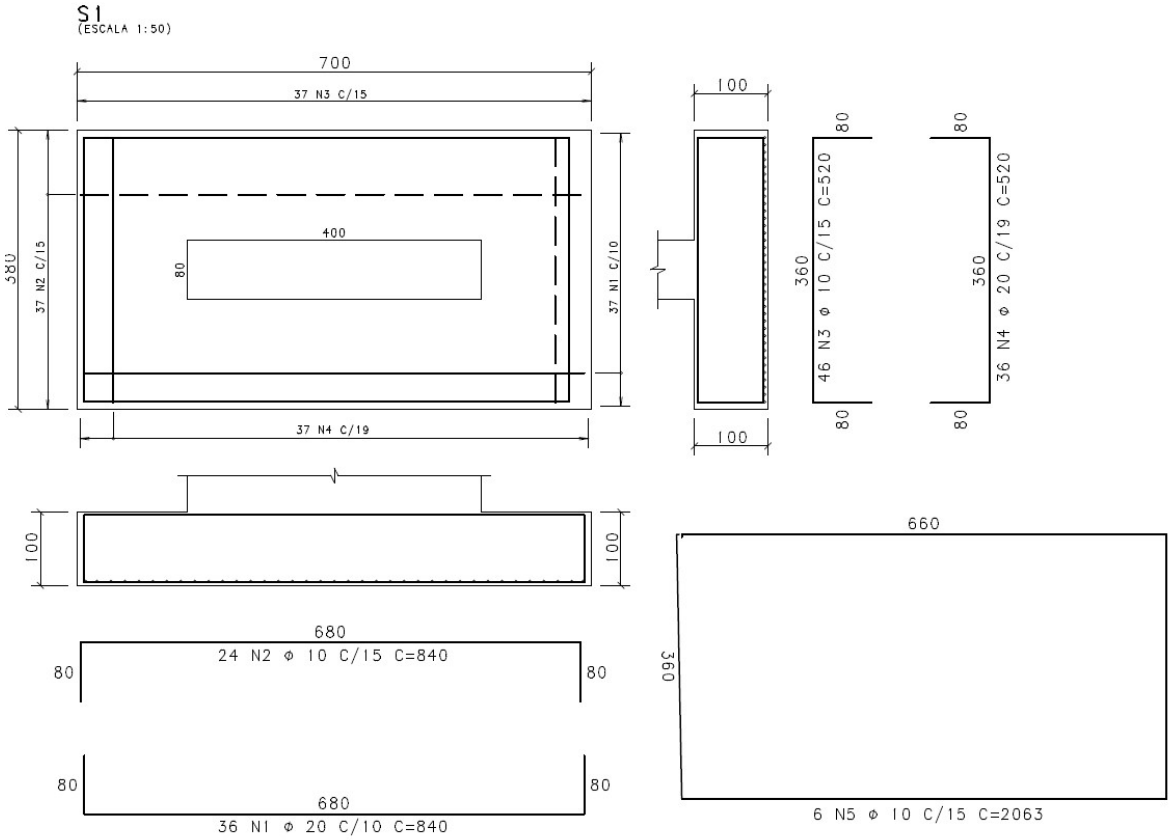
O programa calcula ainda o volume de solo escavado, volume de concreto simples (lastro) e concreto armado, área de forma e massa de aço por volume de concreto, conforme Figura 57. Essa parte será verificada, a seguir, utilizando-se de programas computacionais.

Figura 57 – Quarta validação da sapata isolada retangular

Fonte: Autor

O volume de concreto, a área de forma e o peso de aço serão validados utilizando-se o software CAD/TQS, um programa computacional para projetos de concreto armado, protendido e alvenaria estrutural.

Figura 58 – Sapata modelada no CAD/TQS



Fonte: CAD/TQS (adaptado)

Figura 59 – Volume de concreto e área de formas da sapata isolada retangular

```
Sapata: S1                          Número     =    1   Repetições:   1

GEOMETRIA:
Pilar:
  Xpil:  400.00  Ypil:   80.00  ColarX:  0.00  ColarY:  0.00
Sapata (Dimensões fixas, cm):
  Xsap:  700.00  Ysap:  380.00  Altura:  100.00
  H0x:   100.00   H0y:  100.00    ExcX:    0.00    ExcY:    0.00
  Altura (Carga horiz. da fundação):    0.00
  Volume:           26.60 m3
  Área de Formas:   21.60 m2
  Peso próprio:     66.50 tf.
  Método de cálculo: Sapata Rígida
```

Fonte: CAD/TQS (adaptado)

É possível observar que os valores gerados pelo CAD/TQS e pelo aplicativo são equivalentes.

Ao extrair a tabela de ferros no programa CAD/TQS, tem-se o seguinte resultado:

Figura 60 – Peso de aço da sapata isolada retangular

```
Tabela de Ferros
================

BR BARROS ENGENHARIA LTDA
AV. CHAMPAGNAT,620 SALA 110

 Planta TABFER  09/05/21  22:00:34
--------------------------------------------------
ELEM    AÇO   POS   BIT     QUANT     COMPRIMENTO
                    (mm)              UNIT     TOTAL
                                      (cm)      (cm)
--------------------------------------------------
S1
        50A    1     20       36       840     30240
        50A    2     10       24       840     20160
        50A    3     10       46       520     23920
        50A    4     20       36       520     18720
        50A    5     10        6      2063     12378


--------------------------------------------------
                 RESUMO AÇO CA 50-60
        ACO     BIT       COMPR      PESO
                (mm)        (m)      (kg)
--------------------------------------------------
        50A       10       565       348
        50A       20       490      1207

          Peso Total        50A =      1556 kg

------------------------------------------------------------
             Resumo de aço por elemento
 ELEM                                          PESO    PESO
                                               (kg)  (kg+10%)
------------------------------------------------------------
 S1                                            1556    1711
```

Fonte: CAD/TQS (adaptado)

O aplicativo gerou um total de 1556.14 kg de aço para essa sapata, valor este coincidente com o gerado pelo CAD/TQS, como pôde ser observado.

Por fim, para validação do volume de solo escavado, será utilizada uma calculadora de volumes *online*, do site Engiobra, para encontrar o volume do tronco de pirâmide. Para entrada de dados, é solicitado os lados da base menor e os lados da base maior. Para obter os lados da base maior, é necessário utilizar-se de trigonometria:

$$a_{maior} = 7{,}0 + 2 \cdot 0{,}2 + 2 \cdot \frac{1{,}5}{tan60º} = 9{,}132m \tag{83}$$

$$b_{maior} = 3{,}8 + 2 \cdot 0{,}2 + 2 \cdot \frac{1{,}5}{tan60º} = 5{,}932\ m \tag{84}$$

$$a_{menor} = 7{,}0 + 2 \cdot 0{,}2 = 7{,}4m \tag{85}$$

$$b_{menor} = 3{,}8 + 2 \cdot 0{,}2 = 4{,}2m \tag{86}$$

Figura 61 – Volume do tronco de cone

Fonte: Adaptado de Engiobra (2021)

O aplicativo 6118 Tool fornece o volume de solo empolado. É necessário, então, multiplicador o volume do tronco de pirâmide pelo empolamento:

$$Vol_{solo} = 1{,}25 \cdot 63{,}2 = 79m^3 \tag{87}$$

Novamente, o valor é muito próximo ao fornecido pelo aplicativo, estando a diferença relacionada a arredondamentos ao longo do cálculo.

A validação do volume de solo escavado será feita apenas nesse módulo, visto que, independentemente da geometria da sapata, a formulação é exatamente a mesma.

Comparando-se todas as etapas de cálculo e seus respectivos resultados, conclui-se que o aplicativo é capaz de fornecer resultados satisfatórios para o módulo de

sapata isolada retangular. Ressalta-se que, caso o usuário tivesse escolhido utilizar-se de uma sapata com altura variável, não haveria alteração na formulação da armadura de flexão principal. Haveriam as seguintes divergências:

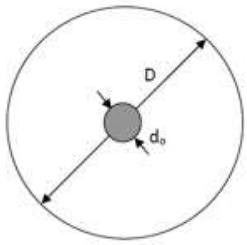
a) Não seria prevista armação superior nem armação lateral, seguindo as recomendações de Musso (2020).
b) Diferença nos quantitativos de forma, concreto armado e na massa de aço por volume de concreto.

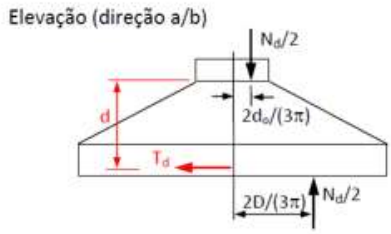
5.2 SAPATA ISOLADA CIRCULAR

A validação para a sapata circular será feita através do gabarito da primeira prova da matéria de Estrutura de Fundações aplicada pelo prof. Fernando Musso Júnior em 2018/01, disponível na apostila de Estruturas de Fundações de 2020/2. O gabarito foi recebido por e-mail, conforme pode ser visto no Anexo. Os dados fornecidos são (MUSSO, 2021):

Figura 62 – Exemplo resolvido de sapata isolada circular

CONCRETO		AÇO		ESFORÇOS		SAPATA E PILAR		SOLO	
fck Mpa	25	fyk Mpa	500	Nk kN	4000	D cm	380	Areia compactada	
γc	1,4	γs	1,15			do cm	50	σlim kPa	400
		d'' cm	7,5			H cm	110		
						ho	40		
GEOMETRIA DA SAPATA									
Planta da Sapata						Elevação da Sapata			

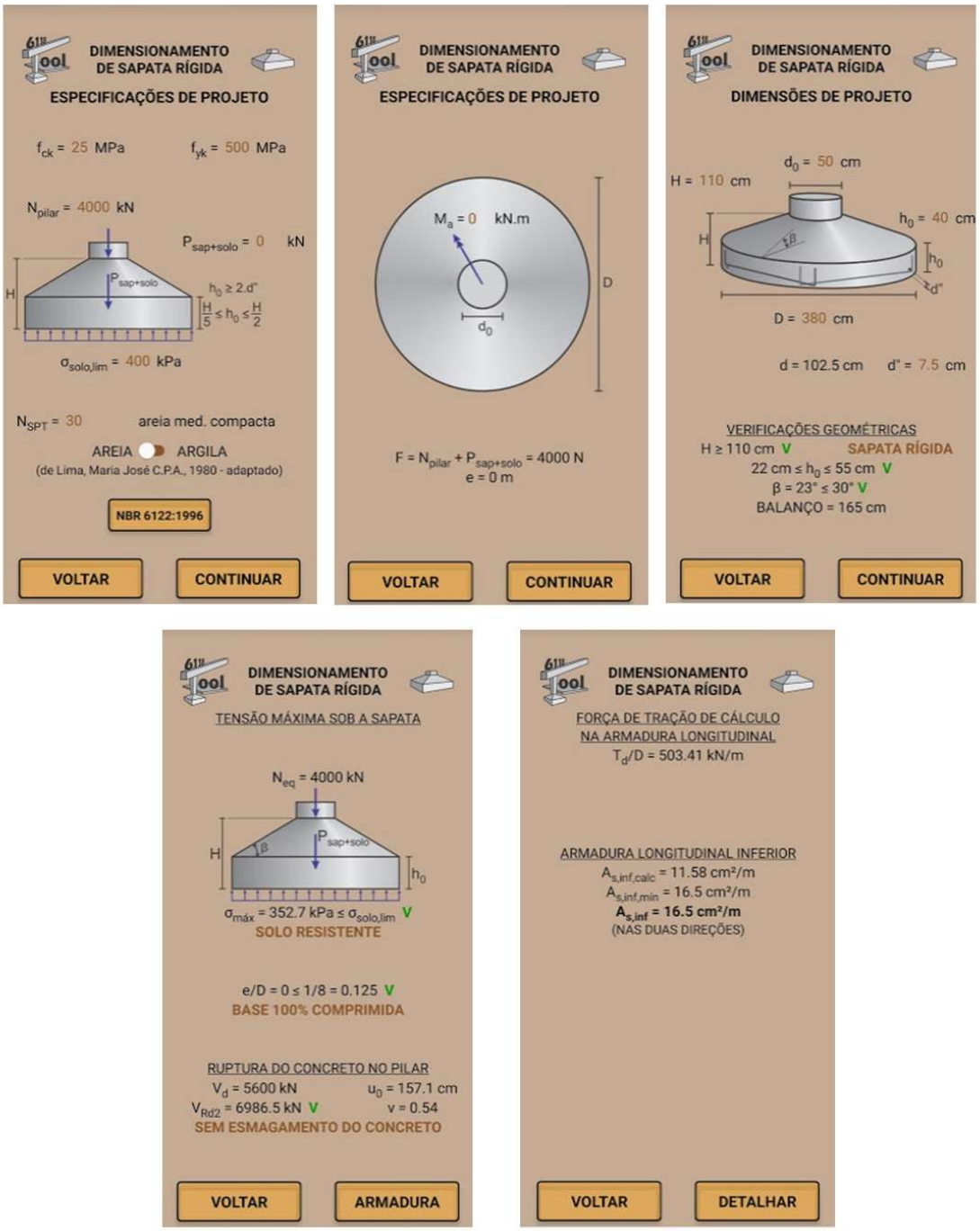




Fonte: Adaptada de Musso (2020)

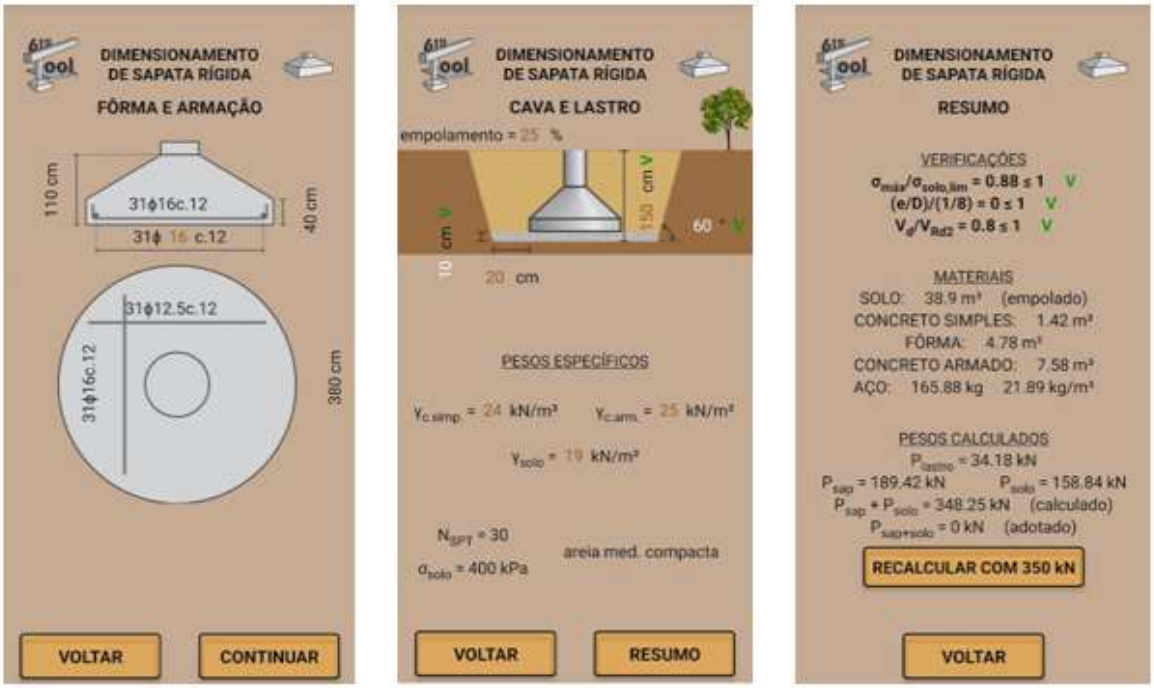
Na Figura 63, serão mostrados os resultados obtidos no aplicativo, ao entrarmos com esses dados:

Figura 63 – Validação da sapata circular (1/2)



Fonte: Autor

Figura 64 – Validação da sapata circular (2/2)



Fonte: Autor

Na tabela abaixo serão expostos os valores do gabarito da prova, disponibilizado pelo autor (MUSSO, 2020), em comparação aos resultados obtidos no aplicativo 6118 Tool.

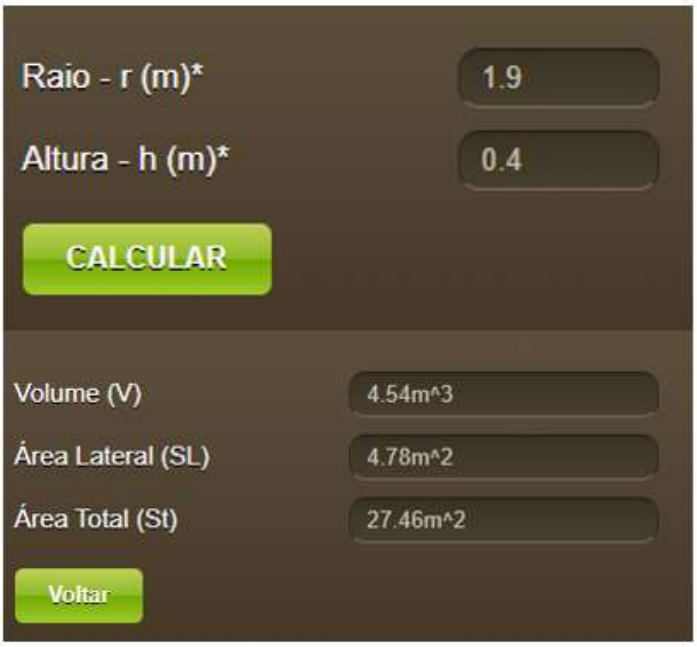
Tabela 3 – Comparação dos resultados do gabarito da prova e do aplicativo

	6118 Tool	**Gabarito da prova**
σ_{max}	352,7 kN	353 kPa
V_d	5600 kN	5600 kN
V_{RD2}	6986,5 kN	6987 kN
T_d/D	503,41 kN/m	503,4 kN/m
$A_{s,\ calc}$	11,58 cm²/m	11,58 cm²/m
$A_{s,\ min}$	16,5 cm²/m	16,5 cm²/m
$A_{s,\ adotado}$	16,5 cm²/m	16,5 cm²/m
Ø e esp	Ø 16 c. 12	Ø 16 c. 12

Fonte: Autor

Quanto ao cálculo do quantitativo de concreto, será utilizado novamente a calculadora de volumes do site Engiobra para obter o volume de um cilindro de raio 1,9 m e altura 0,4 m somado ao volume de um tronco de cone de raio da base maior 1,9 m , raio da base menor 0,25 m e altura de 1,1 m – 0,4 m = 0,7 m. Percebe-se, na Figura 65 e na Figura 66, que as somas dos volumes obtidos é de 7,58m³, sendo coerente com o valor obtido no aplicativo.

Figura 65 – Cálculo de volume de um cindindo



Fonte: Adaptado de Engiobra (2021)

Figura 66 – Cálculo de volume de um tronco de cone

Fonte: Adaptado de Engiobra (2021)

A área de forma é validada pela área de um cilindro com raio de 1,9 m e 0,4 m de altura, visto que o ângulo de inclinação < 30º garante que não seja necessário utilização de forma na parte inclinada. Essa área encontra-se na Figura 65, como

“área lateral” e é de 4,78m², assim como informado pelo 6118 Tool, finalizando assim a validação da sapata circular.

Comparando todas as etapas de cálculo e seus respectivos resultados, conclui-se que o aplicativo é capaz de fornecer resultados satisfatórios para o módulo de sapata circular. Ressalta-se que, caso o usuário tivesse escolhido utilizar-se de uma sapata corrida com altura constante, não haveria alteração na formulação da armadura de flexão principal. Haveria a seguinte divergência:

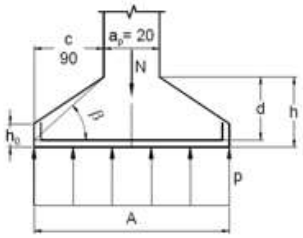
a) Seria prevista armação superior e armação lateral, seguindo as recomendações de Musso (2020).
b) Diferença nos quantitativos de forma, concreto armado e na massa de aço por volume de concreto.

5.3 SAPATA CORRIDA

A validação foi realizada com base no exemplo encontrado em Bastos (2019, p. 69). Os dados fornecidos são:

Figura 67 – Exemplo resolvido de sapata corrida

CONCRETO		AÇO		ESFORÇOS		SAPATA E PILAR		SOLO	
f_{ck} Mpa	20	f_{yk} Mpa	500	N_k kN/m	5730	a cm	190	Areia compactada	
γ_c	1,4	γ_s	1,15			a_o cm	20	σ_{lim} kPa	110
		d'' cm	5			H cm	60		
						h_o cm	20		
GEOMETRIA DA SAPATA									

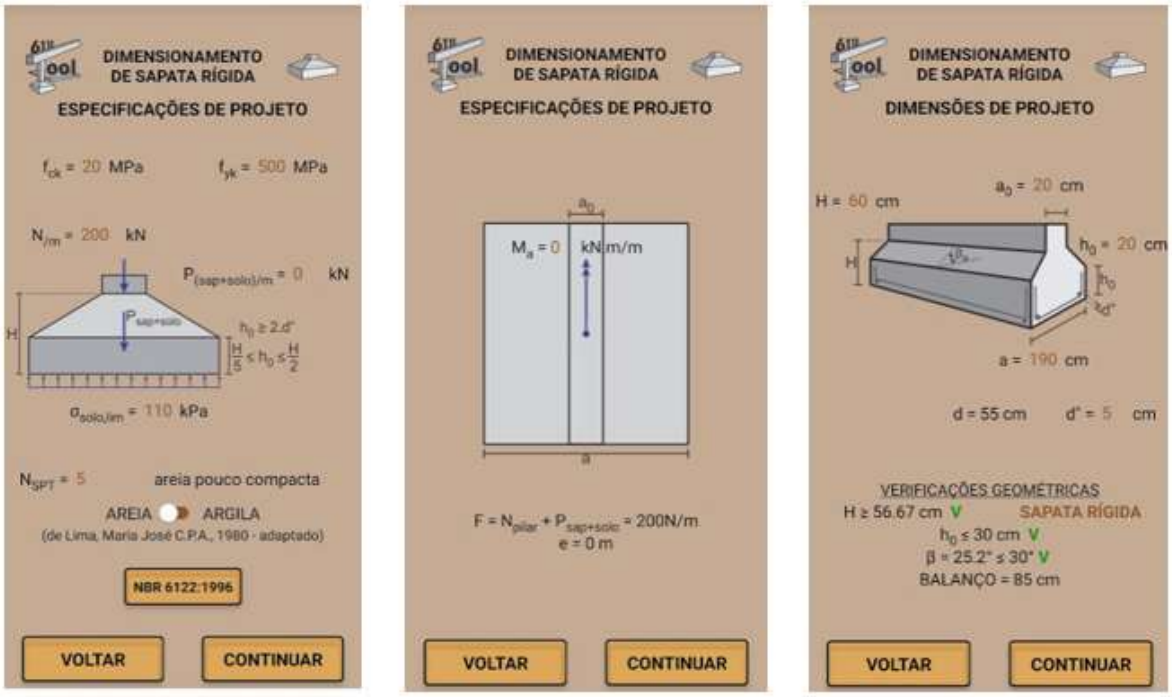


Fonte: Adaptado de Bastos (2019)

Para o exemplo citado, a sapata a ser verificada será a “Sapata Corrida com H variável”. A Figura 68 mostra a entrada de dados e os resultados obtidos com

relação as verificações geométricas no 6118 Tool, enquanto a comparação dos resultados obtidos será apresentada na sequência.

Figura 68 – Primeira validação da sapata corrida



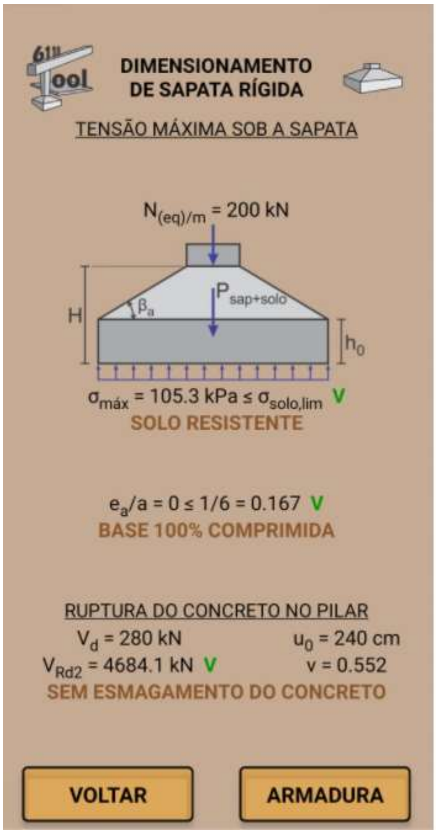
Fonte: Autor

As excentricidades relativas à força normal (e_a e e_b) são nulas, visto que no exemplo não há momento.

A verificação da rigidez da sapata foi coincidente, apresentando, em ambos os casos, o valor de 56,7 cm como limite inferior para que a sapata seja considerada rígida. O exercício de exemplo define então a altura h = 60 cm pra sapata e altura h_0 = 20 cm. Essas dimensões também foram adotadas no 6118 Tool.

Seguindo com as verificações, a Figura 69 mostra os resultados relativos à tensão no solo e verificações de ruptura do concreto por compressão diagonal no 6118 Tool. Essas verificações não foram feitas de forma direta por Bastos (2019). Tais pontos serão debatidos a seguir.

Figura 69 – Segunda validação da sapata corrida



Fonte: Autor

Quanto a tensão máxima no solo (σ_{max}) obteve-se no programa 6118 Tool o valor de 105,3 kPa, enquanto Bastos (2019) não fez essa verificação por ter, no início no exemplo, definido a largura da sapata de forma a respeitar a tensão limite do solo, considerando para isso um majorador de 1,05 na carga. Pode-se, no entanto, notar que o resultado está coerente pois, fazendo uma contraprova e multiplicando por 1,05 a tensão máxima do solo obtida no 6118 Ftool seria obtido:

$$105{,}3 \cdot 1{,}05 = 110{,}565\ kN/m^2 \tag{88}$$

Resultado este muito próximo da tensão limite do solo utilizada para definir as dimensões da sapata.

Quanto a ruptura do concreto no pilar, o exercício de Bastos (2019) orienta a fazer essa verificação de maneira análoga ao feito em exemplos anteriores, relativos a sapata isolada. O código seguiu essa premissa, fazendo a verificação a cada metro de sapata corrida. Então, pode-se considerar que essa parte do código encontra-se verificada.

Enfim, a Figura 70 mostra os resultados relativos à força de tração de cálculo e consequente armadura longitudinal no 6118 Tool, enquanto a comparação dos resultados obtidos será apresentada na sequência.

Figura 70 – Terceira validação da sapata corrida

Fonte: Autor

A tensão de cálculo em a, por unidade de comprimento, no aplicativo, apresentou o resultado de 108,18 kN/m. Já no exercício, Bastos (2019) escolheu apresentar como resultado a tensão característica de 77,3 kN/m.

Calculando-se a tensão característica obtida no aplicativo, a partir da tensão de cálculo, tem-se:

$$\frac{108{,}18}{1{,}4} = 77{,}3\ kN/m \tag{89}$$

Os valores são, portanto, coincidentes.

Tal tensão resultou em uma armadura, na direção a, de 2,49 cm²/m. Esse valor foi coincidente. Porém, o exercício não realizou a verificação de armadura mínima,

realizada pelo aplicativo 6118 Tool. A armadura mínima resultou em 9,0 cm²/m, sendo este valor maior que o calculado e, portanto, adotado pelo programa.

Isso resultou em uma diferença também na armadura secundária. Pelo aplicativo foi considerado 20% da armadura principal, ou seja, 20% de 9,0 cm²/m. Porém, no exercício foi considerado 20% de 2,49 cm/m², valor este menor que 0,9 cm²/m. Portanto, no aplicativo obteve-se uma armadura secundária de 1,8 cm²/m e no exercício de 0,9 cm²/m.

Na figura com detalhamento, é possível ver uma das possíveis formas de se dispor essa armadura, tendo sido utilizada Ø 12,5mm para armação principal e Ø6,3mm para a armação secundária.

O programa calcula ainda o volume de solo escavado, volume de concreto simples (lastro) e concreto armado, área de forma e massa de aço por volume de concreto. Como já foi feita a verificação, anteriormente, do volume de concreto e área de formas de uma sapata retangular com altura constante e de uma sapata circular com altura variável, considera-se essa questão validada de forma análoga.

Figura 71 – Quarta validação da sapata corrida

Fonte: Autor

Comparando todas as etapas de cálculo e seus respectivos resultados, conclui-se que o aplicativo é capaz de fornecer resultados satisfatórios para o módulo de sapata corrida. Ressalta-se que, caso o usuário tivesse escolhido utilizar-se de uma sapata corrida com altura constante, não haveria alteração na formulação da armadura de flexão principal. Haveria divergência nos quantitativos de forma, de concreto armado e no consumo de aço por volume de concreto.

5.4 SAPATA ASSOCIADA

A validação para sapata associada será realizada apenas nas situações que não são análogas às situações encontradas nas validações anteriores.

Após a verificação de que o centro de carga dos pilares e o centro geométrico da sapata são coincidentes e havendo a viga de rigidez para unificar e distribuir os esforços, locando-a de forma a obter-se balanços iguais, a sapata associada foi calculada de forma análoga a uma sapata corrida de largura b e largura de pilar b_w.

Por isso, somente as seguintes verificações serão feitas neste momento:

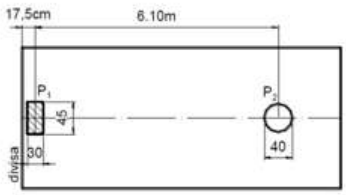
a) Se o centro de carga dos pilares está sendo calculados corretamente
b) Se os esforços na viga estão sendo calculados corretamente

A primeira verificação será feita através de exemplo encontrado em Bastos (2019, p.98):

Figura 72 – Exemplo resolvido de sapata isolada

CONCRETO		AÇO		ESFORÇOS		SAPATA E PILAR		SOLO	
f_{ck} Mpa	20	f_{yk} MPa	500	N_1 kN	900	a cm	810	Areia compactada	
γ_c	1,4	γ_s	1,15	N_2 kN	1560	b cm	210	σ_{lim} kPa	110
		d'' cm	4			H cm	60	γ_{solo} kN/m³	19,25
						h_o cm	20		
						Δa cm	610		

GEOMETRIA DA SAPATA

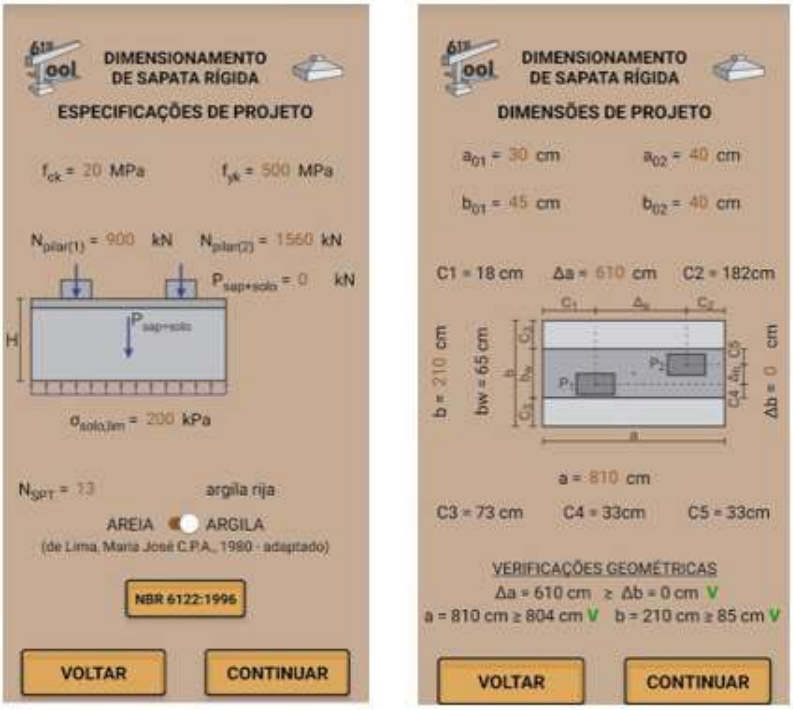


Fonte: Adaptado de Bastos (2019)

Durante a resolução do exercício, calculou-se que, a partir do eixo do pilar retangular, o centro de carga ficava na coordenada 3,87m.

Foram inseridas, no aplicativo, as cargas dos pilares e o Δa de 6,10m conforme pode ser verificado na Figura 73.

Figura 73 – Validação do centro de carga da sapata associada



Fonte: Autor

Apesar de o programa não apresentar a coordenada do centro de cargas de forma explicita, ele é facilmente encontrado fazendo-se:

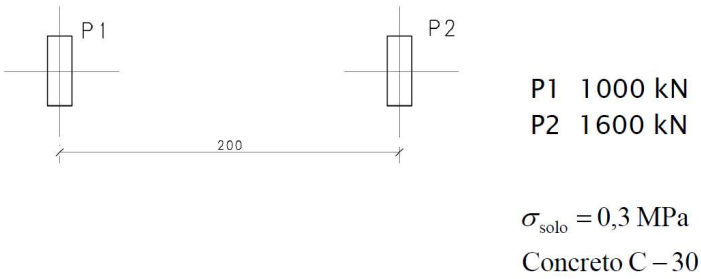
$$c_g = \frac{810}{2} - 18 = 387cm \tag{90}$$

Sendo esse exatamente o valor encontrado no exemplo resolvido.

Outra validação é a de que, colocando a dimensão “a” calculada no exercício e a distância Δa, a cota “C1” foi coincidente com os 17,5 cm expostos no enunciado do exemplo.

Para a verificação dos esforços na viga de rigidez, será utilizado exercício resolvido por Luchi (2021, p. 105). Os dados fornecidos, são:

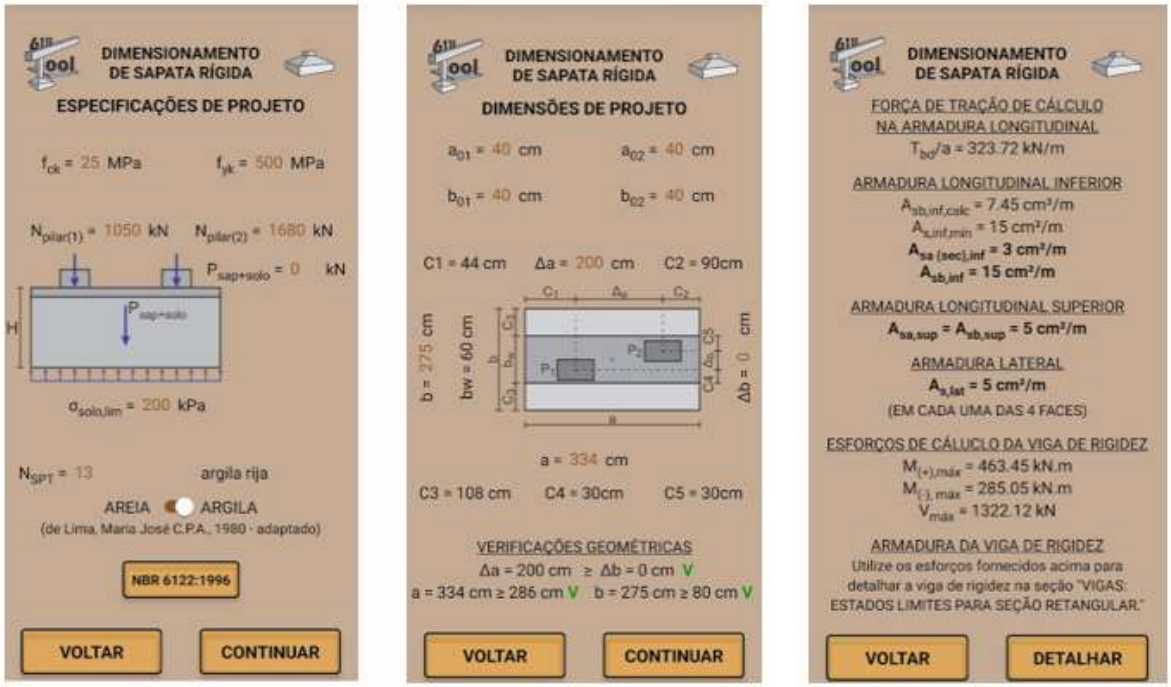
Figura 74 – Exemplo para validação da viga de rigidez



Fonte: Luchi (2021)

Durante a resolução do exercício, é definido que: a = 334 cm e b = 275 cm. Além disso, para a obtenção dos esforços da viga de equilíbrio, Luchi (2021) aplica um majorador de 1,05. Visto que esse majorador não é aplicado no 6118 Tool, as cargas do P1 e do P2 serão inseridas majoradas em 1,05, sendo, respectivamente, 1050kN e 1680kN.

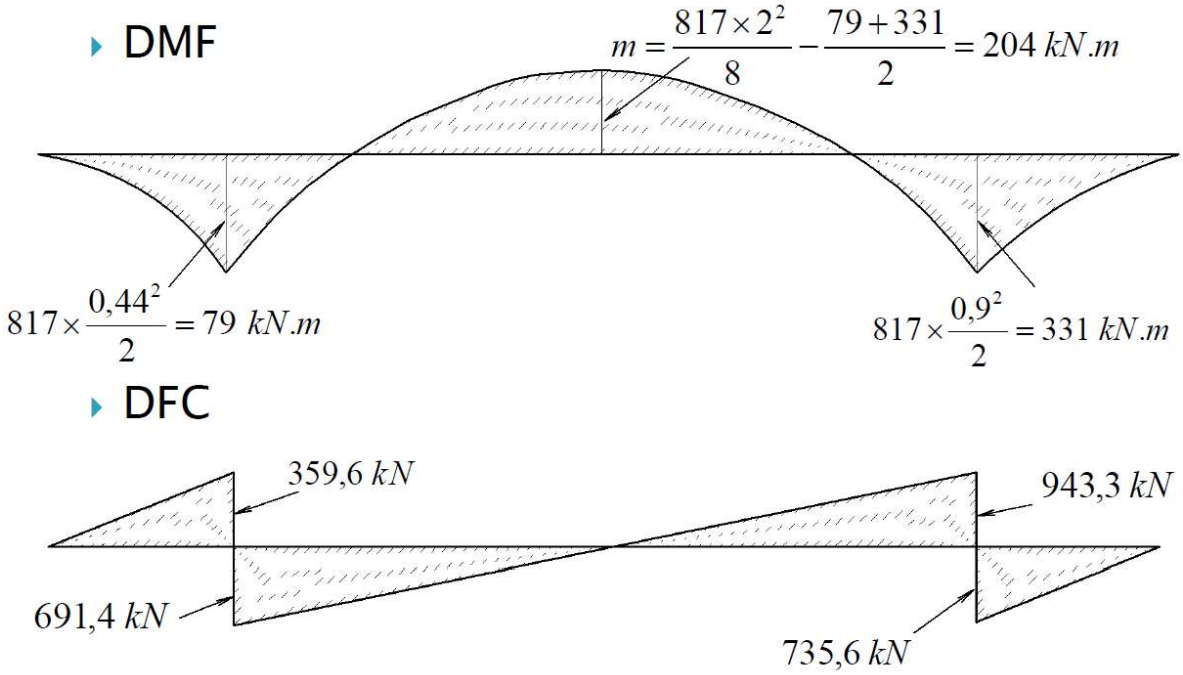
Figura 75 – Validação da viga de rigidez



Fonte: Autor

Os resultados obtidos por Luchi (2021) foram:

Figura 76 – Diagramas da viga de rigidez



Fonte: Luchi (2021)

Veja que a diferença entre os resultados se deve ao fato de que Luchi (2021) deu como o resultado os valores característicos dos esforços, enquanto o aplicativo apresenta os valores de cálculo.

Para obter os valores de cálculo dos esforços máximos no exercício resolvido, multiplica-se esse valor pelo coeficiente de segurança γ_c=1,4. Os esforços de cálculo obtidos tanto pelo aplicativo quanto no exercício são indicados na tabela abaixo:

Tabela 4 – Comparação dos resultados do exercício resolvido e do aplicativo para viga de rigidez

	6118 Tool	Exercício resolvido
$M_{(+), max}$	463,45 kN.m	331x1,4 = 463,4 kN.m
$M_{(-), max}$	285,05 kN.m	204x1,4 = 285,6 kN.m
$V_{, max}$	1322,12 kN	943,3x1,4 = 1320,62 kN

Fonte: Autor

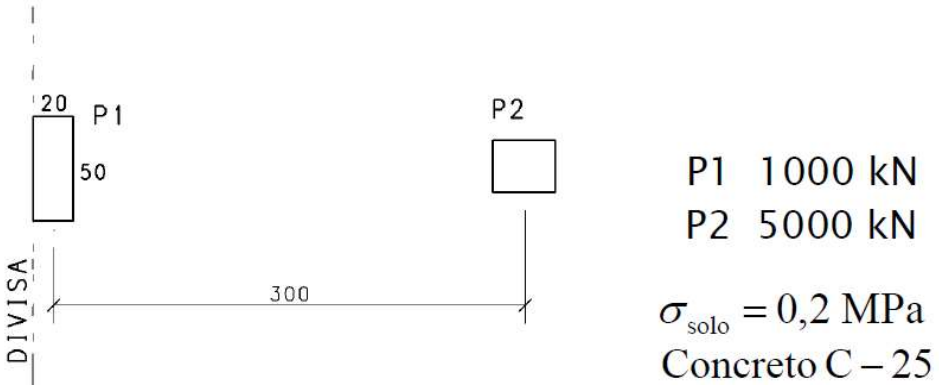
Percebe-se que os valores são semelhantes, diferenciando-se devido a arredondamentos.

Comparando-se todas as etapas de cálculo e seus respectivos resultados, conclui-se que o aplicativo é capaz de fornecer resultados satisfatórios para o módulo de sapata associada, calculando corretamente o centro de carga, os esforços da viga de rigidez e resolvendo o resto do problema de modo análogo a uma sapata corrida, validada anteriormente.

5.5 VIGA DE EQUILÍBRIO

A validação foi realizada com base em um exercício resolvido por Luchi (2021, p. 69). Os dados fornecidos são:

Figura 77 – Exemplo de cálculo de viga de equilíbrio



Fonte: Luchi (2021)

Para o pré-dimensionamento da sapata no exemplo, a carga o pilar é majorada em 5%, diferente do considerado no aplicativo (20% para considerar a carga que chega na sapata e mais 10% considerando seu peso próprio somado à massa de solo acima dela). Para que o dimensionamento da sapata em ambos os casos fosse semelhante, uma carga equivalente foi inserida no aplicativo, calculada segundo a expressão abaixo:

$$Carga_{6118Tool} = \frac{1{,}05 * Carga_{exemplo}}{1{,}2 * 1{,}1} \tag{91}$$

Substituindo os valores:

$$Carga_{6118Tool} = \frac{1{,}05 * 1000}{1{,}2 * 1{,}1} = 795{,}45\ kN \tag{92}$$

As dimensões calculadas tanto pelo aplicativo quanto no exercício são indicadas na tabela abaixo:

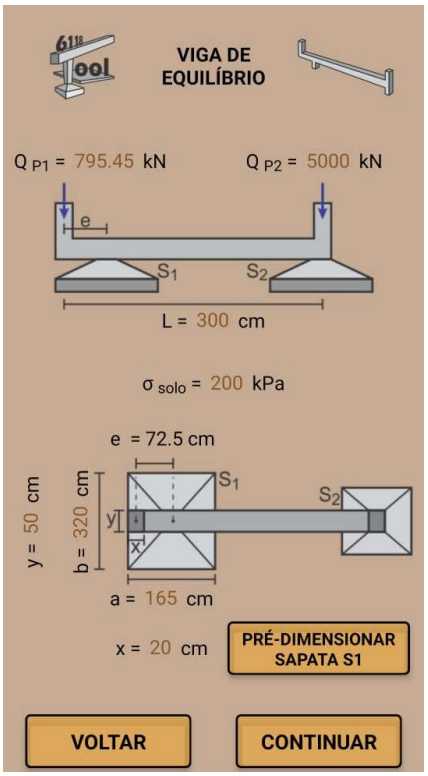
Tabela 5 – Comparação dos resultados do exercício resolvido e do aplicativo para viga de equilíbrio

	6118 Tool	Exercício resolvido
Menor dimensão	165 cm	170 cm
Maior dimensão	320 cm	310 cm
Área da sapata	52800 cm²	52700 cm²

Fonte: Autor

Essa diferença se dá pois, enquanto o 6118 Tool considera dimensões múltiplas de 5 cm, o exercício resolvido considera múltiplas de 10 cm, porém, como se pode observar, a área da sapata é similar em ambos os casos. Esta primeira parte da verificação no aplicativo é exibida na Figura 78.

Figura 78 – Primeira parte da validação do módulo de viga de equilíbrio

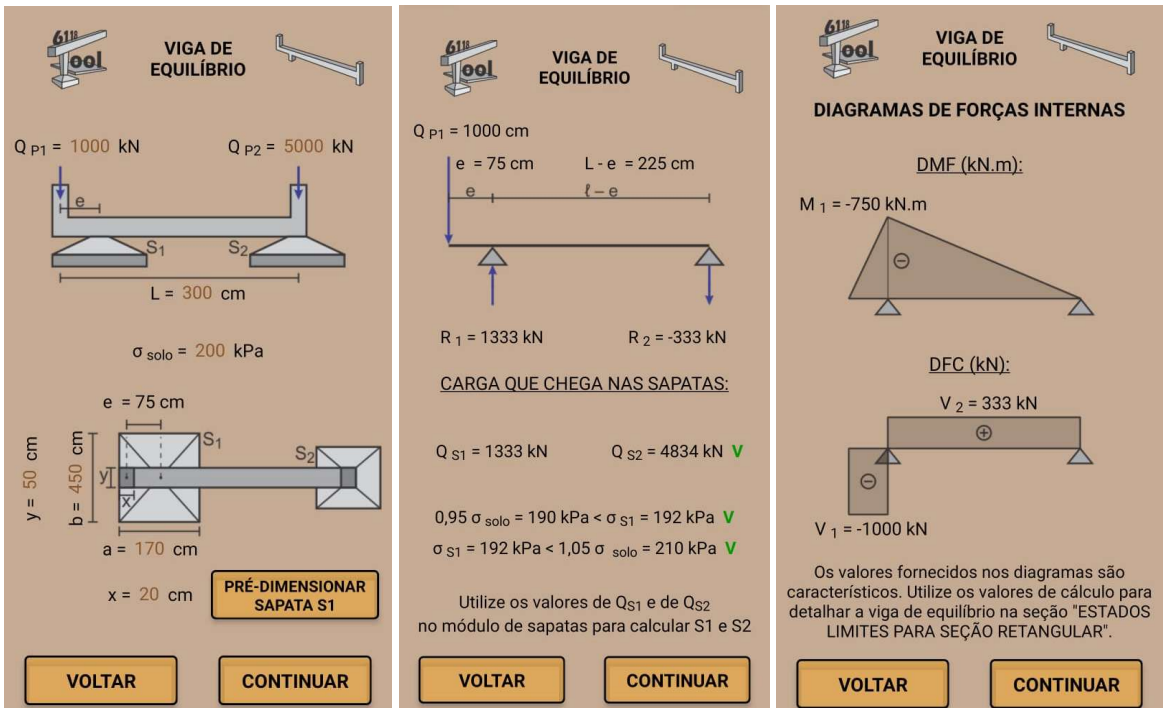


Fonte: Autor

Para que os resultados seguintes sejam coerentes com o exercício, carga do pilar P1 será modificada para que seja igual à do enunciado e as dimensões da sapata serão ajustadas manualmente de modo que a menor delas seja igual à do exercício

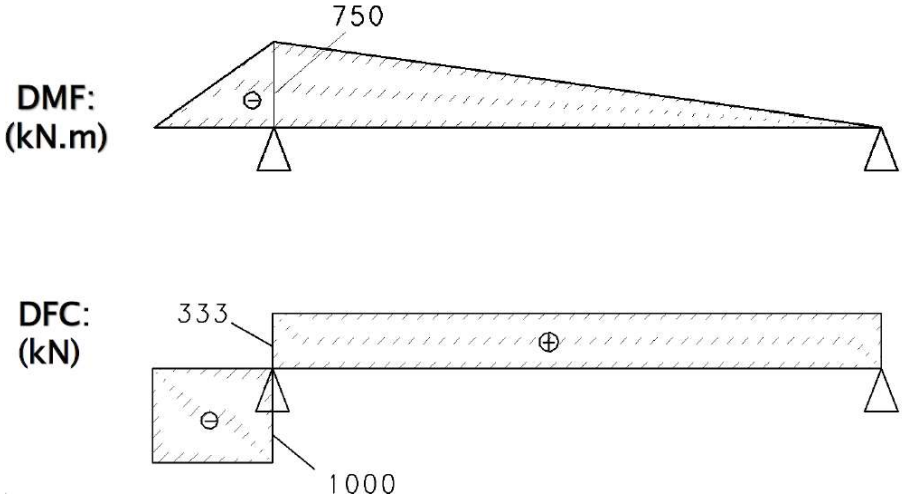
e a maior seja tal que a área da sapata seja suficiente para que a carga Q_{S1} não gere uma tensão no solo maior que a admissível.

Figura 79 – Sequência de resultados da validação da viga de equilíbrio



Fonte: Autor

Figura 80 – Resultados apresentados por Luchi (2021)



Fonte: Luchi (2021)

Os valores de R_1, M_1, V_1 e V_2 são iguais aos apresentados no exercício resolvido. Desse modo, a validação da seção de vigas de equilíbrio foi concluída com êxito.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho abrangeu todas as sapatas classificadas de acordo com o tipo de carga que transferem ao solo segundo Campos (2015): sapata isolada, sapata corrida, sapata associada e sapata alavancada. Também compreende diferentes geometrias para essas estruturas: base retangular ou circular, de altura constante ou variável. Já para a sapata alavancada, foi considerado que essa funcionará como uma sapata isolada ligada a uma viga de equilíbrio.

As depurações, as otimizações e a atualização para novos recursos presentes na plataforma Thunkable foram feitos ao longo de todo o trabalho, à medida que foram implementados os novos modelos de sapatas.

Nas validações ocorridas ao longo do desenvolvimento, alguns ajustes foram feitos, visto que se identificaram erros pontuais. Porém, nas validações finais foram obtidos resultados satisfatórios.

6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos possíveis trabalhos, sugere-se continuar o desenvolvimento dos módulos de cálculo do aplicativo, como muros de arrimo, radiers, pilares, lajes nervuradas e protendidas.

Outra sugestão importante é fazer com que os diferentes módulos criados – que, na prática, se tornam diferentes aplicativos a serem baixados – trabalhem de forma integrada. Isso é possível utilizando recursos de armazenamento em nuvem, como o Firebase e similares, disponíveis no Thunkable.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6118:2014. **Projeto de estruturas de concreto** – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT NBR 6122:2010. **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT NBR 6122:2019. **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.

ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. Rio Grande: Dunas, 2014, v.4, 4.ed.

BASTOS, P. S. S. **Sapatas de Fundação.** 2019. 116f. Apostila Didática – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Campus Bauru/SP, 2019.

BRAGA, P. H. A.; MENEZES FILHO, F. C. M.; FREIRE, G. M. **Desenvolvimento de um aplicativo Android para a hidráulica de canais**. REEC –Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 13, n. 1, 2017.

BRUZZI, D. M. **Uso da tecnologia na educação, da história à realidade atual**. Polyphonía, v. 27/1, jan./ jun. 2016.

CAMPOS, J. C. **Elementos de Fundações em Concreto.** 2015**.** 506f. Oficina de Textos: São Paulo, 2015.

CINTRA, J. C. A. **Apostila de Notas de Aulas.** Disciplina Mecânica dos Solos e Fundações, Universidade de São Paulo, Campus São Carlos, 2015.

COSMO, R. P. **Desenvolvimento de aplicativo para projeto de estruturas de concreto**. 2019. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, 2019.

ENGIOBRA. **Calculadora de Volumes de Sólidos Geométricos.** <https://engiobra.com/calculadoras/solidos-geometricos/volumes/>. Acesso em: 08 mai. 2021

FERREIRA, A. S.; ASSUMPÇÃO, G. A.; de PAULA, M. M.; de CARVALHO, M. B.; CARVALHO, C. V. A. **AUTOARRIMOS**: um aplicativo para dispositivos móveis para dimensionamento de muro de arrimo por gravidade. Revista Teccen, v. 13, n. 2, p. 18-31, 2020.

LIMA, M. J. C. P. A. **Prospecção Geotécnica do Subsolo.** 1980. LTC: Rio de Janeiro, 1980.

LONGO, L. F. **Desenvolvimento de um aplicativo de análise de estruturas reticuladas planas em plataforma Android**. 2015. 258 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2015.

LOPES, F. R.; VELLOSO, D. A. **Fundações**: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

LUCHI, L. A. R. **Fundações Diretas.** 2021. 125f. Notas de Aula – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espirito Santo, Campus Vitória/ES, 2021.

MUSSO, F. M. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado de acordo com a NBR 6118:2014.** Apostila Didática – Departamento de Engenharia Civil – CIV07875 – Estruturas de Fundações, Universidade Federal do Espírito Santo, Campus Vitória/ES, 2020/2.

MUSSO, F. M. **Gabarito da Questão 01 da P1 de Fundações aplicada em 2018/01.** Mensagem recebida por <fernando.musso-junior@ufes.br> em 07 de maio de 2021. Disponível em: ANEXO A.

OLIVEIRA, D. P.; VAZ, L. R. **Desenvolvimento de aplicativo para smartphone destinado ao projeto geométrico de estradas**. XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência. São José dos Campos, SP, 2016.

OLIVEIRA, T. T. A. **Desenvolvimento de um aplicativo Android para o dimensionamento de vigas em concreto armado**. 2014. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campo Mourão, 2014.

QUEIROZ, L. R. **IPhone, Android, e a consolidação da cultura do smartphone**: o papel do IPhone e do Sistema Operacional Android como catalisadores da consolidação no mercado de smartphones em escala global. Revista Tecnologia e Sociedade, v. 14, n. 30, p. 47-70, jan./abr. 2018.

REBELO, K. M. W. **Módulo 4: Introdução a Fundações**. 2020. 7f. Apostila Didática: Notas da Disciplina – Departamento de Engenharia Civil – Tecnologia das Construções II: Mecânica dos Solos e Fundações para arquitetos, Universidade Federal do Espírito Santo, Campus Vitória/ES, 2020.

RENZETI. **Diferentes tipos de Fundações e suas aplicações.** Disponível em: <https://www.renzeti.com.br/blog/diferentes-tipos-de-fundacoes-e-suas-aplicacoes-7>. Acesso em: 08 mai. 2021.

SCHNEIDER, N. **Fundação Radier.** 2020. Disponível em: <https://nelsoschneider.com.br/fundacao-radier/>. Acesso em: 08 mai. 2021.

SILVA, R. D. R; TRAJANO, I. R. L; LIMA, I. C. R. S. **O uso da tecnologia digital smarthphone no processo educativo**. CONEDU (Congresso Nacional de Educação), 5ª Edição, Olinda, 2018.

STATCOUNTER. **Mobile Operating System Market Share in Brazil - April 2021**. Disponível em: <gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/brazil>. Acesso em: 05 mai. 2021.

THUNKABLE. **Thunkable docs**. Disponível em: <docs.thunkable.com/>. Acesso em: 04 abr. 2021.

ANEXO – *E-MAIL* COM GABARITO DA QUESTÃO 01 DA PROVA DE 2018/01 ENVIADO PELO PROF. FERNANDO MUSSO JUNIOR

Sara Maria Nunes Rosa Há 6 dias
para fernando.musso-junior

Boa tarde, professor! Tudo bom?

Venho pedir novamente ajuda para o desenvolvimento do 6118 Tool para meu trabalho de conclusão de curso.

Gostaria de saber se você tem e poderia disponibilizar a resolução/gabarito da 1ª Prova de Fundações de 2018/1, na qual havia uma questão sobre a sapata circular.

Peço isso pois preciso validar o código com base em algum exemplo, porém não encontrei exemplos na internet

Desde já agradeço!

Fernando Musso Junior Há 4 dias
para mim

Sara, bom dia!
Segue o gabarito da questão de sapata circular da P1 de 2018/1.
Att., Musso

Mostrar texto das mensagens anteriores

IMG-9571.JPG

TEMA 6 - Revisão de conc

1ª AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE

Nome: Assi

1 - A sapata rígida circular de concreto armado com altura variável tem dimensões D/H/d/h_{ca} = 380/110/102,5/40 cm e pilar de seção circular d_o = 50 cm com força normal N_k = 4000 kN. Utilizar concreto com f_{ck} = 25 MPa e aço com f_{yk} = 500 MPa. Considerar a tensão limite do solo σ_{lim} = 400 kPa.

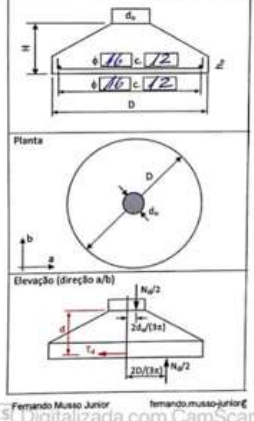
a) calcular a tensão máxima sob a sapata $\sigma_{máx}$, considerando a carga total F = 1,10 N_k (1,0)
$\sigma_{máx}$ = 353 kPa < σ_{lim} = 400 kPa

b) verificar a compressão diagonal (1,0)
V_d = 5600 kN < V_{Rd2} = 0,45$\nu f_{cd} u_0 d$ 6987 kN

c) obter as forças de tração de cálculo (kN/m), nas direções ortogonais a e b (1,0)
T_d/D = 503,4 kN/m

d) dimensionar as áreas de aço das armaduras longitudinais (cm²/m), nas direções a e b (1,0)
$A_{s,cal}$ = 11,58 cm²/m $A_{s,min}$ = 16,50 cm²/m

e) detalhar abaixo: A_s = máximo($A_{s,cal}$; $A_{s,min}$) (1,0)



Fernando Musso Junior fernando.musso-junior@

Digitalizada com CamScanner