

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção
Programa de Especialização em Construção Civil

Rodrigo Oliveira de Aguiar

**Análise Financeira do uso do vergalhão de aço inoxidável e vergalhão
polimérico revestido de fibra de vidro em substituição ao vergalhão de aço
carbono nas estruturas de concreto armado**

Belo Horizonte
2015

Rodrigo Oliveira de Aguiar

**Análise Financeira do uso do vergalhão de aço inoxidável e vergalhão
polimérico revestido de fibra de vidro em substituição ao vergalhão de aço
carbono nas estruturas de concreto armado**

Monografia de especialização
apresentada ao Curso de Especialização
em Construção Civil da Escola de
Engenharia da Universidade Federal de
Minas Gerais, como requisito parcial à
obtenção do título de Especialista em
Construção Civil.

Orientador (a): Profa. Maria Teresa
Paulino Aguiar

Belo Horizonte

2015

A282a

Aguiar, Rodrigo Oliveira de.

Análise financeira do uso do vergalhão de aço inoxidável e vergalhão polimerico revestido de fibra de vidro em substituição ao vergalhão de aço carbono nas estruturas de concreto armado[recurso eletrônico] / Rodrigo Oliveira de Aguiar. – 2015.

1 recurso online (36 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia UFMG.

Anexos: f. 33-35.

Bibliografia: f. 32.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil. 2. Materiais de construção. 3. Concreto armado. 4. Durabilidade (Engenharia). 5. Aço - Corrosão. I. Aguiar, Maria Teresa Paulino. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção
Curso de Especialização em Construção Civil



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

ALUNO: RODRIGO OLIVEIRA DE AGUIAR

MATRÍCULA: 2014667785

RESULTADO

Aos 21 dias do mês de agosto de 2015 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:

"ANÁLISE FINANCEIRA DO USO DO VERGALHÃO DE AÇO INOXIDÁVEL E VERGALHÃO POLIMÉRICO REVESTIDO DE FIBRA DE VIDRO EM SUBSTITUIÇÃO AO VERGALHÃO DE AÇO CARBONO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO"

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

☒ APROVADO

☐ APROVADO COM CORREÇÕES

☐ REPROVADO

NOTA: 9,5

CONCEITO: A

BANCA EXAMINADORA:

Nome

Assinatura

Profª. Drª. Maria Teresa Paulino Aguiar

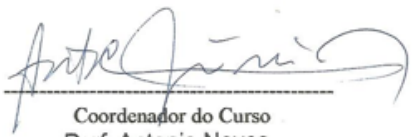
Nome

Assinatura

Profª. Drª. Danielle Meireles de Oliveira

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA EM CONSTRUÇÃO CIVIL: "GESTÃO E TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL"

Belo Horizonte, 21 de agosto de 2015


Coordenador do Curso
Prof. Antonio Neves
de Carvalho Júnior
Coordenador do Curso

Dedico este trabalho a Deus e a minha família que sempre me apoiou e incentivou na busca pelo conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Rogério e Elisabeth, aos meus amigos e familiares, por sempre terem acreditado em mim.

Agradeço a Profa. Maria Teresa, orientadora deste trabalho, pelo interesse, direcionamento e dedicação durante todo o curso. Pelos conhecimentos transmitidos, por incentivar na busca pelo conhecimento e por mostrar aos alunos o verdadeiro sentido da palavra educar.

Agradeço a ArcelorMittal, pela oportunidade de fazer este curso.

Agradeço a Escola de Engenharia da UFMG, pela organização do curso e pelos conhecimentos adquiridos.

Agradeço a PI Engenharia e Consultoria, especialmente aos Engenheiros Leonardo Braga e Igor Carvalho, por transmitir os conhecimentos técnicos de engenharia, bem como pela disponibilidade para fazer os cálculos estruturais e análise de resultados.

Agradeço aos colegas de trabalho da ArcelorMittal, Pereira e Sperandio, pelo conhecimento adquirido nesses anos de convivência. Pessoas pelas quais tenho muita admiração.

Agradeço aos colegas de turma, pela troca de experiências dentro e fora da sala de aula.

RESUMO

Com o advento da norma de desempenho no Brasil, a preocupação com a durabilidade das estruturas é cada vez maior. As características estruturais do concreto e o início do processo de corrosão de armaduras no concreto armado estão diretamente ligados à durabilidade da estrutura. Novos materiais estão sendo desenvolvidos para substituição do vergalhão convencional de aço carbono com objetivo de melhorar o desempenho das estruturas e prolongar o início de um processo de corrosão das armaduras, porém ainda existe um desconhecimento sobre os efeitos da utilização desses novos materiais sobre a durabilidade da estrutura. Nesse sentido faz-se necessário conhecer as características de cada material, bem como as vantagens e desvantagens na utilização destes na estrutura e seu possível efeito na durabilidade. Uma análise do ponto de vista financeiro do uso do aço inoxidável e vergalhão polimérico reforçado com fibras de vidro comparado ao vergalhão de aço carbono em uma estrutura demonstram singularidades de cada uma das soluções.

Palavras chave: concreto armado; materiais; vergalhão; durabilidade; corrosão.

ABSTRACT

With the advent of the performance standard in Brazil, there is increasing concern about the durability of structures. The structural characteristics of concrete and the beginning of the corrosion process of reinforcement in reinforced concrete are directly linked to the durability of the structure. New materials are being developed to replace conventional carbon steel rebar with the aim of improving the performance of structures and prolonging the onset of the reinforcement corrosion process, but there is still a lack of knowledge about the effects of using these new materials on the durability of the structure. In this sense, it is necessary to know the detailed characteristics of each material, as well as the advantages and disadvantages of using them in the structure and their possible effect on durability. An analysis from a financial point of view of the use of stainless steel and polymeric rebar reinforced with glass fibers compared to carbon steel rebar in a structure demonstrates the uniqueness of each of the solutions.

Keywords: steel reinforced concrete; materials; rebar; durability; corrosion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Vergalhão aço carbono oxidado	17
Figura 2 - Vergalhão de aço carbono com corrosão	18
Figura 3 - Vergalhão aço inoxidável	21
Figura 4 - Vergalhão polimérico revestido de vidro	23
Figura 5 - Planta de fôrma da estrutura.	29
Figura 6 - Deformações da estrutura com vergalhão aço carbono (mm)	32
Figura 7 - Deformações da estrutura com vergalhão inoxidável (mm).	35
Figura 8 - Deformações da estrutura com vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro (mm).	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Preço dos materiais por diâmetro	27
Tabela 2 - Mapa de Cargas da Estrutura	30
Tabela 3 - Resumo do consumo dos principais materiais e índices da estrutura com reforço de vergalhão aço carbono	30
Tabela 4 - Resumo dos principais consumos e taxas da estrutura com reforço de vergalhão aço carbono	31
Tabela 5 - Projeção de custos da solução em aço carbono considerando a vida útil	32
Tabela 6 - Resumo do consumo dos principais materiais e índices da estrutura com reforço de vergalhão inoxidável	33
Tabela 7 - Resumo dos principais consumos e taxas da estrutura com reforço de vergalhão inoxidável	33
Tabela 8 - Projeção de custos da solução em aço inoxidável considerando a vida útil	34
Tabela 9 - Resumo do consumo dos principais materiais e índices da estrutura com vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro	35
Tabela 10 - Resumo dos principais consumos e taxas da estrutura com vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro	36
Tabela 11 - Projeção de custos da solução em vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro considerando a vida útil.	36
Tabela 12 - Peso global da estrutura por solução	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Eci	Módulo de elasticidade inicial
Ecs	Módulo de elasticidade
Fck	Resistência característica do concreto
Fyk	Resistência característica ao escoamento do aço
Fz	Carga vertical
NBR	Norma Brasileira
TVU	Tempo de vida útil

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 Vergalhão aço carbono e corrosão das armaduras	16
3.2 Novos materiais	19
4. ESTUDO DE CASO	24
4.1 Descrição do Estudo.....	24
4.2 Parâmetros considerados	25
4.2.1 Normas.....	25
4.2.2 Software	25
4.2.3 Materiais.....	25
4.2.4 Classe de agressividade	26
4.2.5 Modelo Estrutural	26
4.2.6 Peso global da estrutura	26
4.2.7 Carregamento Considerado	26
4.2.8 Preços dos materiais.....	27
4.2.9 Vida útil da estrutura	27
5. RESULTADOS.....	29
5.1 Vergalhão aço carbono.....	30
5.2 Vergalhão inoxidável.....	33
5.3 Vergalhão polimérico reforçado com fibras de vidro	35
5.4 Cálculo do peso global.....	37
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	39
6.1 Consumo de materiais	39
6.2 Peso da Estrutura	39
6.3 Custos de construção	40
6.4 Custos ao longo do tempo	40
6.5 Deformações	41
7. CONCLUSÕES	42
BIBLIOGRAFIA	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
ANEXOS	46

APENDICE.....50

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas ocorreram mudanças significativas no projeto estrutural das edificações, parte devido às novas tecnologias e materiais mais eficientes e parte motivada pelas novas metodologias e softwares disponíveis para o cálculo estrutural. Este processo tornou possível a construção de estruturas mais esbeltas, chegando ao limite dos fatores de segurança da edificação e contribuindo para a redução de custos.

Os processos construtivos não acompanharam da mesma forma a evolução da maneira de projetar as estruturas, o que provocou um aumento na quantidade de patologias em estruturas. Com o projeto de estruturas com menores seções, exige-se um controle muito mais rigoroso nos métodos construtivos para garantir que o concreto armado consiga ter um desempenho adequado.

Fatores como a reação água-cimento, classe de agressividade da estrutura, recobrimento adequado se tornaram importantes para determinar a vida útil e o desempenho da estrutura ao longo do tempo. Uma falha executiva pode comprometer o aparecimento de patologias prematuras em uma edificação.

Em uma estrutura de concreto armado, o aço tem papel fundamental para suportar os esforços de tração, cisalhamento e torção. O correto funcionamento estrutural deste aço está diretamente ligado a sua integridade, sendo necessário garantir que não ocorram ataques prematuros causados pela porosidade do concreto e por agentes externos que iniciam o processo de corrosão na armadura. Este processo provoca danos ao concreto e conseqüentemente a integridade da estrutura.

A oxidação é uma reação natural do material que se dá pelo contato com o oxigênio do ar em contato com água e/ou humidade. A primeira etapa do contato com o oxigênio é a formação de uma camada cinza denominada “carepa”. À medida que o material perde esta camada (através do processo de dobramento, endireitamento, exposição a intempéries, etc.), ocorre uma nova reação que forma uma camada marrom avermelhada, denominada “oxidação” ou “ferrugem”. A ferrugem formada na superfície do aço provoca um aumento de volume, gerando tensões na superfície do concreto que envolve o aço. À medida que se inicia o processo de corrosão, este vai gradativamente se intensificando. Deste modo, a

escolha de um sistema construtivo e os materiais a serem utilizados, devem levar em consideração o tempo de vida útil sem manutenção, bem como a simplicidade de acesso para futuros reparos.

A decisão dos construtores de escolher um sistema com menores custos e menos duráveis, transfere diretamente o ônus desta escolha para o uso futuro da edificação. Estima-se que em 2013 os custos relacionados ao combate a corrosão nos EUA excederam a um trilhão de dólares (Koch *et al.*, 2011).

2. OBJETIVO

O objetivo desta monografia é realizar uma análise financeira do uso do vergalhão de aço inoxidável e o vergalhão polimérico revestido de fibra de vidro em substituição ao vergalhão de aço carbono nas estruturas de concreto armado, bem como descrever sobre os principais materiais que estão sendo utilizados em substituição ao vergalhão de aço carbono utilizado como armadura passiva no concreto armado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Vergalhão aço carbono e corrosão das armaduras

O vergalhão de aço carbono utilizado na construção civil, possui propriedades mecânicas que conferem alta resistência mecânica a tração, ductilidade e alto módulo de elasticidade. Por outro lado a determinação da vida útil de uma estrutura de concreto armado está muitas vezes relacionada ao início do processo de corrosão deste aço. Segundo a norma de desempenho Norma Brasileira (NBR) 15575 (2013, p.27): “A durabilidade de um produto se extingue quando ele deixa de cumprir funções que lhe forem atribuídas, quer seja pela degradação que o conduz a um estado insatisfatório de desempenho, quer seja por obsolescência funcional”.

Segundo Dong (2011), a oxidação da superfície do vergalhão pode causar uma expansão de volume que provoca tensões de tração no concreto que o envolve. Essa tensão provoca fissuras e descascamento do revestimento de concreto, podendo acarretar em falha estrutural. Na medida em que a corrosão do vergalhão se inicia, sua capacidade de resistência ao processo de corrosão é afetada gradualmente.

Mehta & Monteiro (1994) afirmam que os danos causados no concreto pela corrosão da armadura manifestam-se sob a forma de expansão, fissuração e lascamento do cobrimento. Isto ocorre, pois a transformação do aço metálico em ferrugem é acompanhada por um aumento no volume, que dependendo do estado de oxidação pode ser de até 600% do metal original.

Conforme Bourgin *et al.* (2006), a corrosão do vergalhão de aço no concreto não elimina somente a força de ligação entre aço e concreto, mas provoca fissuras no concreto devido à expansão de volume gerada pelos produtos da corrosão. As fissuras adicionalmente aceleram o transporte dos produtos da corrosão e um estado de corrosão acelerado pode afetar a segurança das estruturas de concreto.

De acordo com Cochrane *et al.* (1995), vergalhões convencionais de aço pra reforço têm suas limitações quando o concreto é submetido a ataques de agentes agressivos que provocam corrosão no vergalhão e ocasionam a falha estrutural. A corrosão será iniciada quando o valor do pH do concreto se reduz. Esse fenômeno é

causado pela carbonatação (evolução ao longo do tempo causada pela difusão do dióxido de carbono no concreto) e/ou pela penetração de cloretos, sobretudo em ambientes marinhos ou presença de sais em rodovias submetidas a ciclos de gelo e degelo.

A Norma Brasileira NBR 7480 (2007) admite uma oxidação no vergalhão de aço carbono quando esta for superficial, sem comprometimento de sua conformação geométrica. A figura 1 mostra um vergalhão aço carbono com início do processo de oxidação.



Figura 1 - Vergalhão aço carbono oxidado

Fonte: Acervo pessoal

A figura 2 mostra um vergalhão com processo avançado de corrosão, com aplicação comprometida.



Figura 2 - Vergalhão de aço carbono com corrosão

Fonte: Acervo pessoal

Segundo Vaysburd *et al.* (2000), diversas práticas usuais vem sendo adotadas para eliminar o processo de corrosão no concreto, incluindo concretos de alta qualidade, baixa relação água-cimento, aumento na espessura de cobrimento do concreto, normas de construção específicas, etc. Além disso, medidas adicionais podem também reduzir a chance de corrosão, por exemplo, aditivos para o concreto, inibidor de corrosão, remoção eletroquímica de cloretos, proteção catódica, aços de alta resistência à corrosão e diversos tipos de vergalhões revestidos.

De acordo com Erdogdu (1992), a corrosão do aço é determinante para a deterioração das estruturas de concreto. Os principais agentes responsáveis pela corrosão são o ataque de cloretos, dióxido de carbono (CO_2) e tipos de gases ácidos. Quando os cloretos penetram no concreto e alcançam o aço, o estado termodinâmico da armadura se modifica imediatamente devido a existência de diferença de potencial no aço. Como resultado, uma corrente inicia o fluxo de uma área com potencial negativo mais alto para uma área de potencial negativo mais baixo. Esse fato é essencial para o início do processo de corrosão. Oxigênio livre e humidade são pré-requisitos para a propagação da corrosão. O nível de deterioração depende basicamente da localização da estrutura, a quantidade e a presença de agentes externos, variação de temperatura e humidade. Existem basicamente três formas de prevenir a corrosão do aço em estruturas de concreto armado:

- redução da permeabilidade do concreto utilizando revestimentos protetivos na superfície do concreto, melhorando sua qualidade;
- proteger o vergalhão na interface aço-concreto utilizando revestimentos na superfície do aço como uma barreira;
- contenção do processo eletroquímico no concreto armado introduzindo a proteção catódica.

De acordo com Erdogdu (1992), uma das soluções mais recentes encontradas para melhorar as estruturas de concreto armado sujeitas a ambientes corrosivos é de isolar a barra de aço da agressividade do meio em que se encontra. Com o uso de revestimentos do aço usando compostos orgânicos como o epóxi. Esse tipo de revestimento vem sendo utilizado desde 1970 em diversos países incluindo Estados Unidos, Canada e Inglaterra para prevenção da corrosão prematura em ambientes expostos a cloretos. Um revestimento adequado do aço deveria ser livre de corrosão levando em consideração que o revestimento é uma barreira física entre o aço e o ambiente, além de possuir alta resistência a forças dielétricas. Por outro lado, pequenos defeitos no revestimento ou danos causados durante a construção levanta um questionamento sobre a real eficácia deste sistema de proteção.

A utilização de vergalhões de aço revestidos é uma solução para combater ou prolongar o início do processo de corrosão. Neste caso um fator de extrema importância é a correta adesão do revestimento ao aço. Segundo Benmokrane et al. (1996), o mecanismo de ligação entre o revestimento depende basicamente de três fatores: adesão, atrito e a ligação mecânica. Para barras de aço, a ligação mecânica é a principal fonte da união entre os materiais.

3.2 Novos materiais

Dentre os materiais e revestimentos que estão sendo pesquisados em substituição ao vergalhão de aço convencional, destacam-se os seguintes: vergalhão de aço galvanizado, vergalhão de aço inoxidável, vergalhão de aço revestido de epóxi, vergalhão de aço esmaltado, vergalhão de aço duplamente revestido, vergalhão de fibra de vidro e vergalhão de fibra de carbono.

Vergalhões inoxidáveis foram selecionados como materiais para reforço de concreto em pontes projetadas a mais de 100 anos. Naquele momento nenhum outro material foi considerado em fase de projeto devido a não existir outro material com comprovada vida útil.

Segundo Bourgin *et al.* (2006), as propriedades melhoradas do aço inoxidável provam que este é uma solução viável quando o ciclo de vida da estrutura é levado em consideração. Aços austeníticos e duplex são usados como vergalhões por apresentar uma excelente combinação de resistência à corrosão, alta resistência à tração e boa ductilidade. Reforços com aços inoxidáveis são comparados com os vergalhões convencionais para destacar as especificidades e vantagens da solução em aço inoxidável. A influência do método de fabricação (laminação a quente ou a frio) na microestrutura, a resistência à tração e a ductilidade também são discutidos. A resistência à corrosão de vários tipos de aços inoxidáveis foi avaliada em laboratório por ensaios eletroquímicos. Isso contribuiu para selecionar o grau mais adequado dependendo do ambiente e os riscos a exposição em atmosferas agressivas. Aços inoxidáveis austeníticos são frequentemente recomendados porque contribuem para uma excelente combinação de resistência a corrosão, resistência à tração e ductilidade. Graus de aço duplex podem gerar economia e vantagens técnicas, estes são similares ou melhores que os graus austeníticos no quesito resistência a corrosão, porém muito superiores em relação à resistência à tração e módulo de elasticidade.

Segundo Bourgin *et al.* (2006), aços inoxidáveis austeníticos mantêm altas propriedades mecânicas a altas temperaturas. A resistência à tração e módulo de elasticidade diminuem gradativamente quando a temperatura na superfície do aço atinge os 500°C. Por outro lado, também são menos sensíveis a formação de esboroamento do concreto devido à mínima formação de óxido na superfície do aço em altas temperaturas. Ambos os aspectos levam a demonstrar um melhor desempenho estrutural do aço durante um incêndio. A principal desvantagem aparente do aço inoxidável é o custo inicial. O preço do aço inoxidável é aproximadamente de seis a dez vezes maiores comparadas ao vergalhão convencional. Porém o custo do aço é somente uma pequena porcentagem do custo

total de um projeto. Considerando a vida útil de uma edificação as diferenças são mínimas devido:

- durante reparos, raramente é necessário à substituição de todas as barras de aço; somente algumas barras são necessárias de ser substituídas;
- a diferença está somente no custo do material, pois os outros custos se mantêm (transporte, manipulação e instalação);
- a utilização do aço inoxidável reduz a quantidade de aço da estrutura, pois permite a redução das seções de aço devido suas melhores características mecânicas.

A figura 3 mostra um vergalhão de aço inoxidável para aplicação em construção civil.



Figura 3 - Vergalhão aço inoxidável

Fonte: Fabricante Outokumpu

Revestimentos de epóxi, aplicados no aço carbono por imersão ou spray, tiveram duração máxima de 20 anos em ambientes com leve ataque corrosivo. Por outro lado, o revestimento deve aderir perfeitamente à superfície do vergalhão e permanecer livre de riscos de danos durante a aplicação. Similar ao revestimento, o menor ponto que não esteja aderido ou que tenha sofrido um dano superficial irá expor a base do metal ao ataque corrosivo. Levando em consideração que o defeito dificilmente pode ser observado no concreto, o vergalhão pode iniciar uma grave deterioração, reduzindo a vida útil da estrutura. Mesmo sem um defeito superficial,

revestimentos tem sido conhecidos por deterioração prematura devido a vários problemas no cobrimento e espessura de revestimento (Bourgin *et al.*, 2006).

Segundo Benmokrane *et al.* (1996), os vergalhões feitos de polímero de fibra reforçado são materiais anisotrópicos. Fatores como tipo e volume de fibra/ resina, orientação das fibras e controle de qualidade durante a fabricação tem um papel fundamental nas características mecânicas do material. Somado a isso, o fato da ausência de padrões corretamente estabelecidos, uma grande variedade de produtos de polímero e fibra reforçados é comercializada, desde barras simples até barras tratadas para melhorar as características de aderência. Portanto, um melhor entendimento das propriedades mecânicas é necessário para obter um entendimento racional do projeto de estruturas utilizando polímero de fibra reforçado.

Segundo Lee *et al.* (2014), polímeros reforçados com fibra de vidro possuem alta resistência à tração com moderado modulo de elasticidade e comportamento elástico até a ruptura. No entanto esta solução não deve comparada diretamente com a solução de vergalhão convencional devido à força de adesão interfacial do polímero em relação ao concreto é esperada uma variação de vários parâmetros de influência na performance. Os polímeros reforçados com fibra de vidro são feitos por um processo longitudinal e continuo de fibra de vidro colados juntamente através de uma resina com cura térmica. A superfície do polímero reforçado com fibra de vidro pode ser tratada para melhorar a força de adesão através de revestimento de areia e envoltório helicoidal com revestimento de areia.

Segundo Tighiouart, *et al.* (1998), vergalhões poliméricos revestidos de fibra de vidro apresentam menores valores de força de adesão do que vergalhão de aço. Neste tipo de vergalhões a adesão e a fricção que controlam a força de adesão com o concreto e a força de adesão diminui com o aumento do diâmetro do vergalhão.

Segundo Xue *et al.* (2014) polímeros reforçados com fibras (FRPs) são feitos de fibras embebidas por resinas poliméricas. As fibras mais comuns são aramida, carbono e vidro. Vergalhões de FRP são caracterizados por alta resistência a tração, baixo modulo de elasticidade, alta durabilidade, peso leve, e permeabilidade eletromagnética.

Diversos estudos experimentais vem demonstrando que FRP é um tipo ideal de material que pode controlar o problema da corrosão.

A figura 4 mostra um vergalhão polimérico revestido de fibra de vidro.

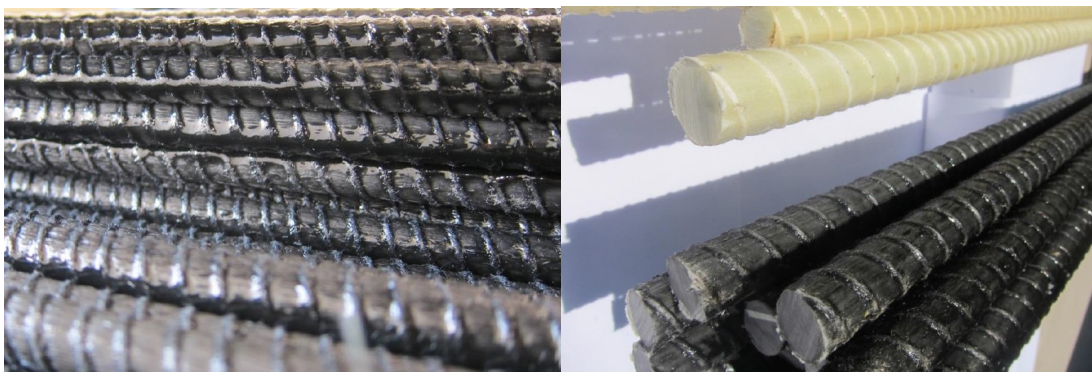


Figura 4 - Vergalhão polimérico revestido de vidro

Fonte: Internet

O vergalhão polimérico apresenta grandes vantagens em relação ao similar metálico tais como: resistência à corrosão, coeficiente de dilatação térmica semelhante ao concreto, baixo peso, grande resistência à tração, não condutividade elétrica dentre outras e isso por um custo competitivo em relação ao aço.

4. ESTUDO DE CASO

Com o intuito de atingir o objetivo desta pesquisa e verificar os custos de construção de uma estrutura utilizando diferentes materiais para o dimensionamento da estrutura, foi elaborado um estudo de caso. Neste capítulo serão apresentados os procedimentos, assim como os métodos e premissas adotadas.

4.1 Descrição do Estudo

Para realização do estudo de caso foi feito um dimensionamento estrutural utilizando o software CAD/TQS considerando uma estrutura de concreto armado convencional. Foi avaliado o comportamento de uma estrutura de um pavimento em concreto armado reticular com dimensões de 8,20m de comprimento por 4,20m de largura, totalizando uma área construída de 34,45m². Para este estudo não foi considerado o dimensionamento da fundação.

O dimensionamento da estrutura foi feito considerando três soluções diferentes para o reforço do concreto:

- vergalhão aço carbono;
- vergalhão inoxidável;
- vergalhão polimérico.

Para avaliar o impacto dos principais custos da construção de uma estrutura, a metodologia estabelecida para estabelecer um parâmetro de comparação foi através de índices, por onde se compara o consumo de cada material sobre a área total construída. Foram considerados os seguintes itens como de maior importância e maior impacto no custo final de uma estrutura: concreto, aço e fôrmas.

Índices:

- para concreto, o índice utilizado foi m³ de concreto por m² de área construída (m³/m²);
- para aço, o índice utilizado foi kg de aço por m² de área construída (kg/m²);
- para fôrma, o índice utilizado foi m² de forma por m² de área construída (m²/m²).

4.2 Parâmetros considerados

4.2.1 Normas

- NBR 6118/2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos;
- NBR 7480/2007 - Barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado.

4.2.2 Software

- CAD/TQS V18.10.19.

4.2.3 Materiais

- Concreto Resistência característica do concreto (F_{ck}) = 25 Mpa:
 - Módulo de Elasticidade Inicial (E_{ci}) = 2800000 tf/m²;
 - Módulo de Elasticidade (E_{cs}) = 2380000 tf/m²;
 - relação água/cimento em massa: 0,55;
 - cobrimento nominal: 30mm.
- Vergalhão aço carbono CA-50 (limite de escoamento 50kgf/mm²) e CA-60 (limite de escoamento 60kgf/mm²):
- Dados utilizados segundo o catálogo técnico do fabricante ArcelorMittal, segundo a NBR 7480 (Para ficha técnica, ver Anexo A).
 - E_{cs} = 210 GPa;
 - Resistência característica ao escoamento do aço (F_{yk}) = 500 MPa;
 - F_{yk} = 600 Mpa.
- Vergalhão inoxidável duplex 2205:

Dados utilizados segundo o catálogo técnico do fabricante FLOWSERVE (Para ficha técnica, ver Anexo A).

 - E_{cs} = 200 GPa;
 - F_{yk} = 450 MPa.

- Vergalhão polimérico com reforço de fibra de vidro:

Dados utilizados segundo o catálogo técnico do fabricante EBC (Para ficha técnica, ver Anexo A).

Como o limite de escoamento do vergalhão polimérico varia de acordo com o diâmetro, adotou-se um valor médio considerando as bitolas utilizadas no projeto:

- $E_{cs} = 46 \text{ GPa}$;
- $F_{yk} = 724 \text{ MPa}$.

4.2.4 Classe de agressividade

- II – Moderada (segundo NBR 6118/2014)

4.2.5 Modelo Estrutural

- Modelo de grelha.

4.2.6 Peso global da estrutura

- concreto simples: peso específico 2.400 kg/m^3 ;
- vergalhão de aço carbono/ inoxidável/ polimérico: conforme tabela de resumo do projeto de armação;
- fôrma: peso específico 600 kg/m^3 (considerando fôrma para laje com espessura de 9mm e fôrma para vigas madeira pinus espessura 20mm).

4.2.7 Carregamento Considerado

- carga permanente: $0,10 \text{ tf/m}^2$;
- carga Acidental: $0,20 \text{ tf/m}^2$.

4.2.8 Preços dos materiais

- concreto bombeado: R\$ 280,00/m³;
- madeira para fôrma de vigas e pilares: R\$ 36,20/m³;
- madeirite para fôrma de lajes tipo “madeirite”: R\$ 15,20/m²;
- tipos de vergalhão: Para determinação do preço do aço carbono e vergalhão polimérico, utilizou-se como base a tabela de preços fornecida pelo fabricante EBC (Anexo A). Em relação ao preço do aço inoxidável, utilizou-se preço 6 (seis) vezes superior ao vergalhão de aço carbono, conforme literatura existente.

O resumo do preço dos diferentes tipos de reforços, separados pelo diâmetro pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1 - Preço dos materiais por diâmetro

Fonte: Próprio autor

Bitola (mm)	Preço (R\$/kg)		
	Aço carbono	Inoxidável	Polimérico
Ø 5,0	2,73	-	-
Ø 6,0	-	21,45	21,31
Ø 6,3	3,35	-	-
Ø 8,0	3,19	19,29	15,45
Ø 10,0	2,88	17,45	11,24
Ø 12,0	-	18,05	-
Ø 12,5	2,90	-	-
Ø 12,7	-	-	10,38
Ø 16,0	-	17,36	-

4.2.9 Vida útil da estrutura

Para avaliar os custos da edificação ao longo prazo foram estabelecidos os critérios de tempo de vida útil conforme o tipo de solução utilizada:

- aço carbono: 40 anos
- aço inoxidável: 120 anos
- vergalhão polimérico: 80 anos

Foi considerado que ao chegar o final da vida útil, 5% da estrutura estaria em fase acentuada de corrosão, necessitando uma intervenção para promover a recuperação estrutural com uma substituição integral dos materiais. Ao final da vida útil de cada solução, será realizada uma estimativa dos custos considerando uma correção nos preços através de uma inflação projetada de 4% ao ano.

Os materiais considerados serão: concreto, aço e fôrma. Desta forma não estão sendo estimados os gastos de mão de obra, locação de andaimes, produtos para pintura de passivação do aço, etc.

Quando se analisam os custos de uma reforma, também devem ser contemplados os custos de perdas de produtividade, para de instalação e outros custos indiretos que da mesma forma não foram contemplados nesta pesquisa.

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados através do cálculo estrutural considerando as três soluções adotadas nessa pesquisa.

Considerando os parâmetros de entrada para o dimensionamento, uma mesma estrutura foi projetada para as três soluções de reforço para o concreto armado, de maneira geral o projeto de fôrmas se manteve o mesmo.

Na figura 5, é possível verificar os detalhes da planta de fôrma da estrutura composta por duas lajes com espessura de 12cm, cinco vigas com dimensões de 20x40cm e seis pilares com dimensões 20x20cm.

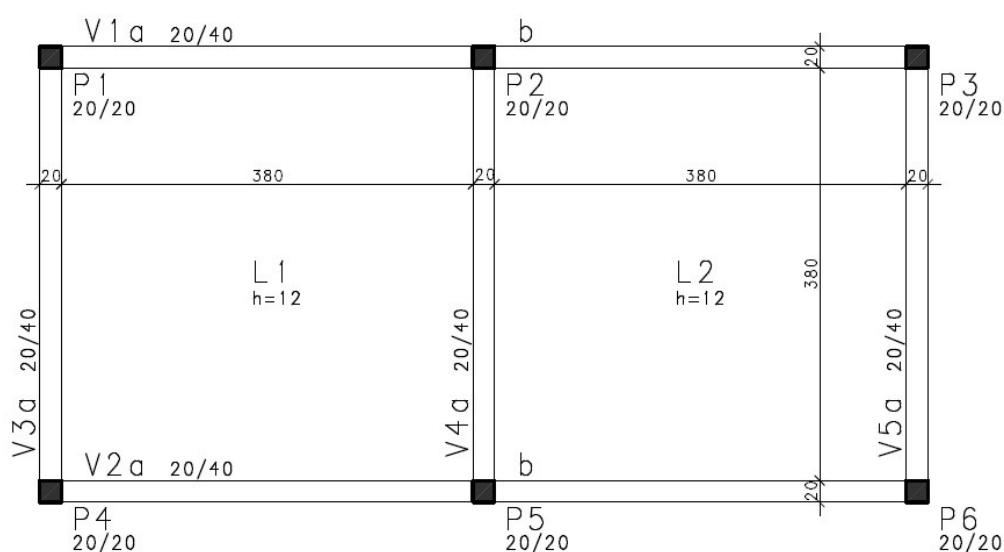


Figura 5 - Planta de fôrma da estrutura.

Fonte: Próprio autor

As cargas da estrutura estão distribuídas conforme o mapa de cargas apresentado na tabela 2.

Tabela 2 - Mapa de Cargas da Estrutura

Fonte: Próprio autor

MAPA DE CARGAS	
Elemento	Carga Vertical (Fz) (tf)
P1	2,7
P2	7,4
P3	2,7
P4	2,8
P5	7,7
P6	2,8

5.1 Vergalhão aço carbono

O cálculo estrutural utilizando os parâmetros considerados para o vergalhão aço carbono pode ser observado no Apêndice A. O resumo do consumo dos principais materiais e o cálculo dos índices é apresentado na tabela 3. O cálculo para determinação do preço global da estrutura é apresentado na tabela 4.

Tabela 3 - Resumo do consumo dos principais materiais e índices da estrutura com reforço de vergalhão aço carbono

Fonte: Próprio autor

Pavimento	Concreto		Fôrmas		Aço	
	Consumo (m³)	Taxa (m³/m²)	Consumo (m²)	Taxa (m²/m²)	Consumo (kg)	Taxa (kg/m²)
1 pavimento	6,3	0,18	66,2	1,9	361,9	10,5

Tabela 4 - Resumo dos principais consumos e taxas da estrutura com reforço de vergalhão
aço carbono

Fonte: Próprio autor

Concreto			
Consumo (m³)	Preço (R\$/m³)		Preço Total (R\$)
6,30	280,00		1.764,00
TOTAL	-		1.764,00
Vergalhão aço carbono			
Bitola (mm)	Peso (kg)	Preço (R\$/kg)	Preço Total (R\$)
Ø 5,0	48	2,73	131,04
Ø 6,3	167	3,35	559,24
Ø 8,0	3	3,19	10,08
Ø 10,0	131	2,88	377,36
Ø 12,5	13	2,90	39,06
TOTAL	361,90	-	1.116,78
TOTAL (+10%)			1.228,46
Fôrmas			
Aplicação	Consumo (m²)	Preço (R\$/m²)	Preço Total (R\$)
Laje	28,88	15,20	438,98
Fôrma	37,32	36,20	1.201,97
TOTAL	66,20	-	1.640,68
TOTAL			4.633,14

A tabela 5 apresenta os custos ao longo do tempo considerando as recuperações necessárias após o fim da vida útil estimada para a solução em aço carbono.

Tabela 5 - Projeção de custos da solução em aço carbono considerando a vida útil

Fonte: Próprio autor

Tempo (anos)	Custo construção (R\$)	Custo recuperação (R\$)	Custo recuperação considerando inflação 4% a.a. (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	4.633,14	-	-	4.633,14
40 anos	-	231,66	1.112,19	5.745,33
80 anos	-	231,66	5.339,64	11.084,97
120 anos	-	231,66	25.635,75	36.720,72
160 anos	-	231,66	123.077,74	159.798,46

A figura 6 mostra o perfil de iso-deformações (não linear) da estrutura de concreto armado com vergalhão aço carbono.

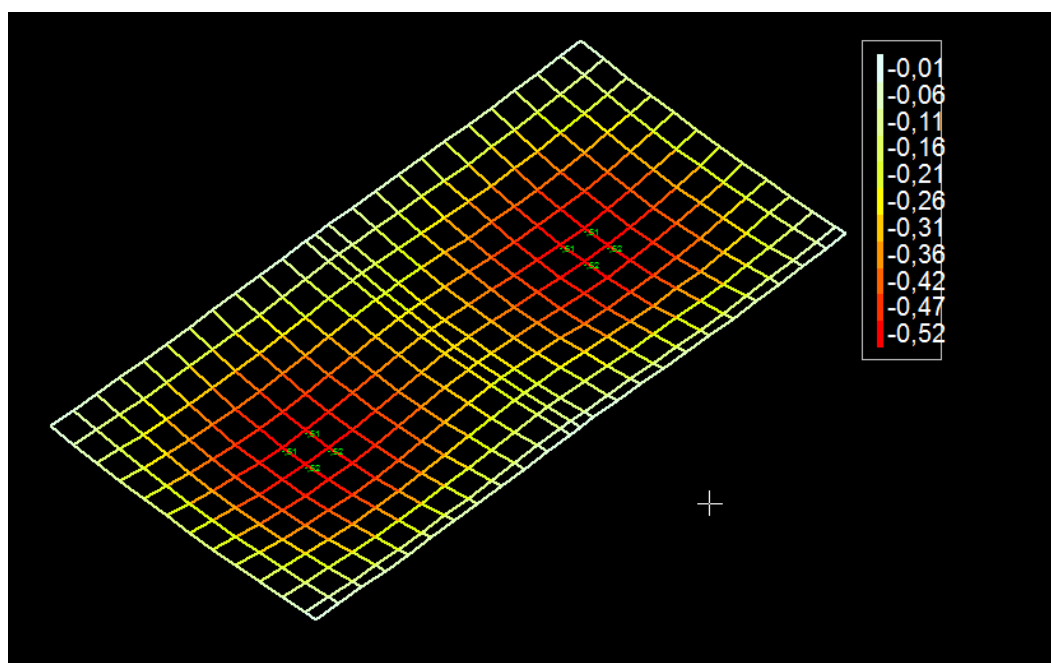


Figura 6 - Deformações da estrutura com vergalhão aço carbono (mm)

Fonte: Próprio autor

5.2 Vergalhão inoxidável

O cálculo estrutural utilizando os parâmetros considerados para o vergalhão de aço inoxidável pode ser observado no Apêndice B. O resumo do consumo dos principais materiais e o cálculo dos índices é apresentado na tabela 6. O cálculo para determinação do preço global da estrutura é apresentado na tabela 7.

Tabela 6 - Resumo dos consumo dos principais materiais e índices da estrutura com reforço de vergalhão inoxidável

Fonte: Próprio autor

Pavimento	Concreto		Fôrmas		Aço	
	Consumo (m³)	Taxa (m³/m²)	Consumo (m²)	Taxa (m²/m²)	Consumo (kg)	Taxa (kg/m²)
1 pavimento	6,3	0,18	66,2	1,9	382,2	11,1

Tabela 7 - Resumo dos principais consumos e taxas da estrutura com reforço de vergalhão inoxidável

Fonte: Próprio autor

Concreto			
Consumo (m³)	Preço (R\$/m³)		Preço Total (R\$)
6,30	280,00		1.764,00
TOTAL	-		1.764,00
Vergalhão inoxidável			
Bitola (mm)	Peso (kg)	Preço (R\$/kg)	Preço Total (R\$)
Ø 6,0	227	21,45	4.870,47
Ø 8,0	4	19,29	83,16
Ø 10,0	76	17,45	1.331,09
Ø 12,0	60	18,05	1.082,56
Ø 16,0	15	17,36	262,52
TOTAL	382,20	-	7.629,80
TOTAL (+10%)			8.392,78
Fôrmas			

Aplicação	Consumo (m ²)	Preço (R\$/m ²)	Preço Total (R\$)
Laje	28,88	15,20	438,98
Fôrma	37,32	36,20	1.201,97
TOTAL	66,20	-	1.640,68
TOTAL			11.797,46

A tabela 8 apresenta os custos ao longo do tempo considerando as recuperações necessárias após o fim da vida útil estimada para a solução em aço inoxidável.

Tabela 8 - Projeção de custos da solução em aço inoxidável considerando a vida útil

Fonte: Próprio autor

Tempo (anos)	Custo construção (R\$)	Custo recuperação (R\$)	Custo recuperação considerando inflação 4% a.a. (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	11.797,46	-	-	11.797,46
40 anos	-	-	-	11.797,46
80 anos	-	-	-	11.797,46
120 anos	-	589,97	65.276,86	77.074,32
160 anos	-	-	-	77.074,32

A figura 7 mostra o perfil de iso-deformações (não linear) da estrutura de concreto armado com vergalhão inoxidável.

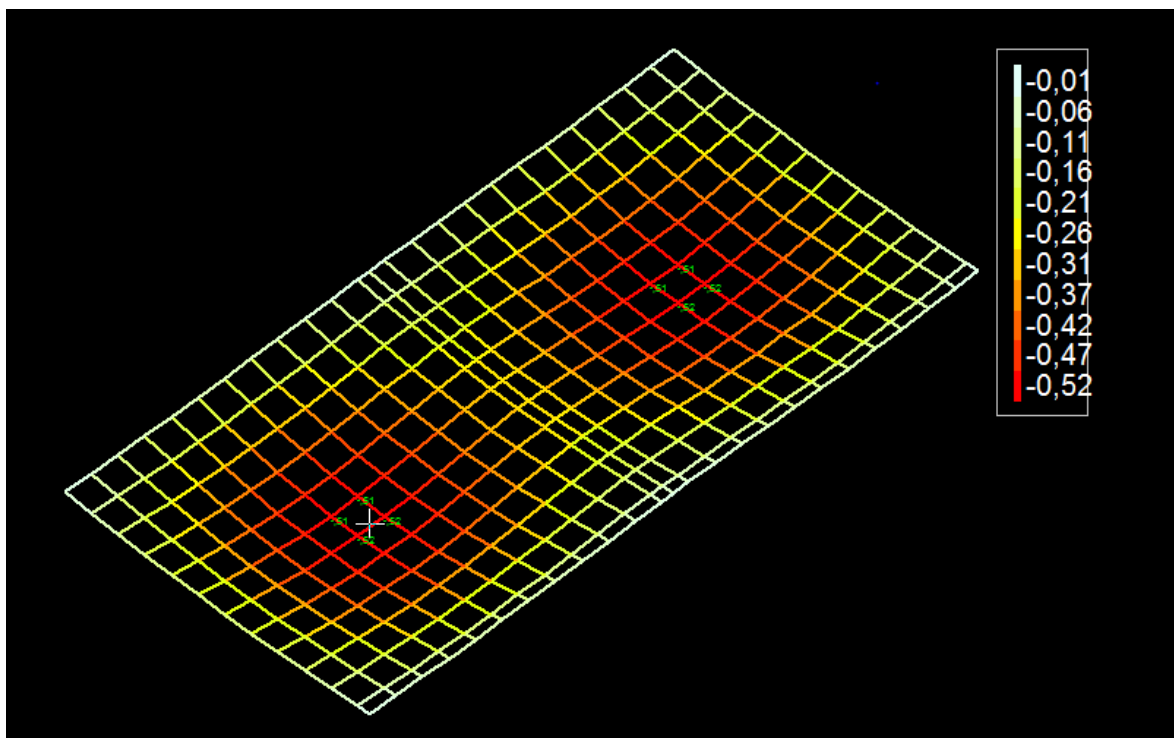


Figura 7 - Deformações da estrutura com vergalhão inoxidável (mm).

Fonte: Próprio autor

5.3 Vergalhão polimérico reforçado com fibras de vidro

O cálculo estrutural utilizando os parâmetros considerados para o vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro determinou os consumos conforme a tabela 9. O cálculo para determinação do preço global da estrutura é apresentado na tabela 10.

Tabela 9 - Resumo dos consumo dos principais materiais e índices da estrutura com vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro

Fonte: Próprio autor

Pavimento	Concreto		Fôrmas		Aço	
	Consumo (m³)	Taxa (m³/m²)	Consumo (m²)	Taxa (m²/m²)	Consumo (kg)	Taxa (kg/m²)
1 pavimento	6,3	0,18	66,2	1,9	123	3,6

Tabela 10 - Resumo dos principais consumos e taxas da estrutura com vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro

Fonte: Próprio autor

Concreto			
Consumo (m³)	Preço (R\$/m³)		Preço Total (R\$)
6,30	280,00		1.764,00
TOTAL	-		1.764,00
Vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro			
Bitola (mm)	Peso (kg)	Preço (R\$/kg)	Preço Total (R\$)
Ø 6,0	79,2	21,31	1687,45
Ø 8,0	1,3	15,45	20,35
Ø 10,0	19,7	11,24	221,66
Ø 12,7	23,1	10,38	239,49
TOTAL	123,28	-	2.168,94
TOTAL (+10%)			2.385,84
Fôrmas			
Aplicação	Consumo (m²)	Preço (R\$/m²)	Preço Total (R\$)
Laje	28,88	15,20	438,98
Fôrma	37,32	36,20	1.201,97
TOTAL	66,20	-	1.640,68
TOTAL			5.790,52

A tabela 11 apresenta os custos ao longo do tempo considerando as recuperações necessárias após o fim da vida útil estimada para a solução em vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro.

Tabela 11 - Projeção de custos da solução em vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro considerando a vida útil.

Fonte: Próprio autor

Tempo (anos)	Custo construção (R\$)	Custo recuperação (R\$)	Custo recuperação considerando inflação 4% a.a. (R\$)	Custo acumulado (R\$)
0	5.790,52	-	-	5.790,52

40 anos	-	-	-	5,790,52
80 anos	-	289,53	6.673,51	12.464,03
120 anos	-	-	-	12.464,03
160 anos	-	289,53	153.823,17	166.287,21

A figura 8 mostra o perfil de iso-deformações (não linear) da estrutura de concreto armado com vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro.

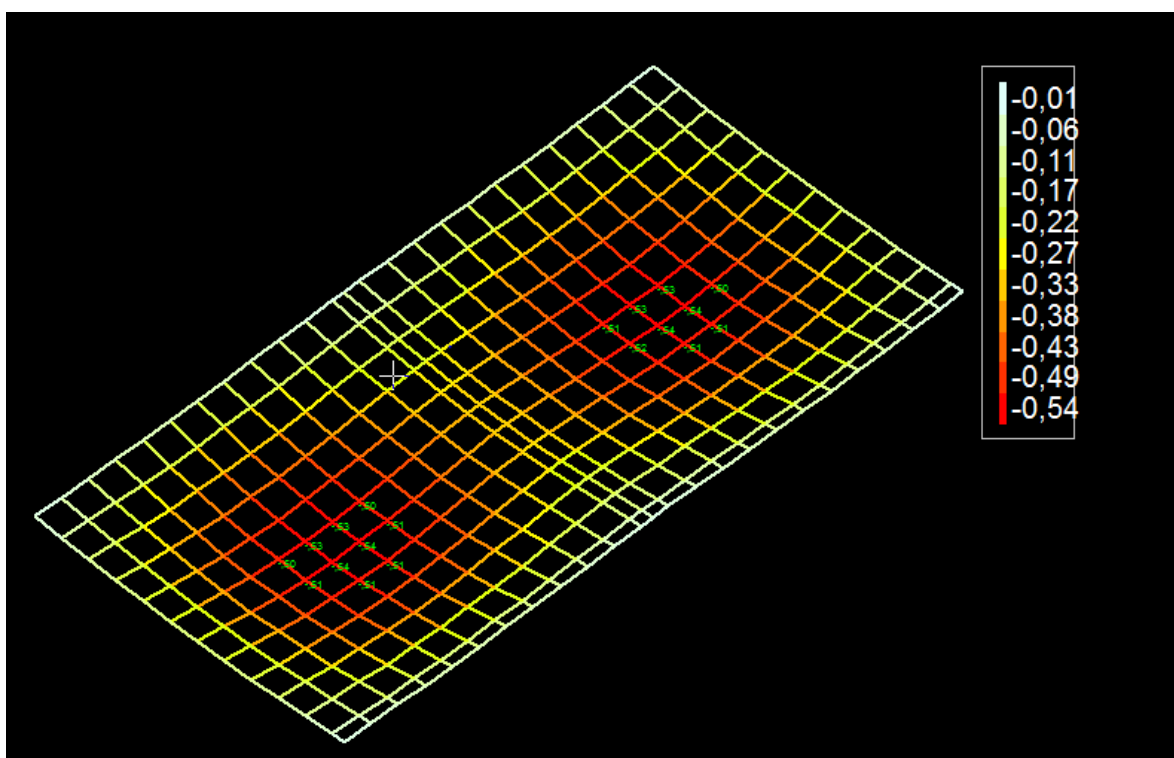


Figura 8 - Deformações da estrutura com vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro (mm).

Fonte: Próprio autor

5.4 Cálculo do peso global

Com o objetivo de avaliar a influência dos diferentes materiais no peso da estrutura, foi calculado para cada solução de reforço a contribuição dos índices no peso global, ver tabela 12.

Tabela 12 - Peso global da estrutura por solução

Fonte: Próprio autor

Material	Solução 1 Aço carbono	Solução 2 Aço inoxidável	Solução 3 Polimérico reforçado
Reforço (kg)	362	382	123
Concreto (kg)	15.120	15.120	15.120
Fôrma (kg)	604	604	604
TOTAL (kg)	16.086	16.106	15.847

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados através do cálculo estrutural considerando as três soluções adotadas nessa pesquisa.

6.1 Consumo de materiais

O projeto de fôrmas se apresentou igual nas três soluções, desta forma o consumo de concreto e fôrmas se manteve o mesmo independente do tipo de reforço utilizado.

Como o aço inoxidável e o vergalhão polimérico tem características muito superiores de resistência à corrosão em relação ao vergalhão aço carbono, uma redução de cobrimento das armaduras poderia ter sido considerado, o que poderia impactar na redução dos índices de concreto e fôrmas.

Como a redução de cobrimento para materiais alternativos ao vergalhão aço carbono ainda não foi exaustivamente pesquisado na literatura, não existe um consenso sobre qual recobrimento poderia ser utilizado, desta forma preferiu-se adotar o mesmo recobrimento utilizado convencionalmente no concreto armado para a classe de agressividade determinada.

6.2 Peso da Estrutura

Em relação ao peso das estruturas, devido às propriedades mecânicas de cada material, o projeto de armação foi um diferencial entre as soluções. A solução em aço inoxidável apresentou um consumo de aço 382,20kg. Peso 6% superior em relação à solução em concreto armado com vergalhão aço carbono.

A solução em vergalhão polimérico reforçado com fibras conseguiu apresentar um consumo de apenas 123,28kg, uma redução de peso de aproximadamente 66%, comparado ao vergalhão aço carbono.

Uma redução expressiva de peso já era esperada por se tratar de um material polimérico com peso específico inferior ao aço. Esta redução poderia impactar no peso total da estrutura e consequentemente na redução de cargas na fundação, porém o peso global da estrutura com a solução em vergalhão polimérico

apresentou uma redução de somente 1,6% no peso global. Isso se deve ao fato do concreto representar uma grande parcela no peso da estrutura, neste caso aproximadamente 93%.

Como não houve redução de consumo de concreto nesta solução, o possível ganho de alívio do peso da estrutura não foi considerável. Da mesma forma, como esta pesquisa se limita em estimar os custos da superestrutura, o impacto do alívio na fundação não foi determinado.

6.3 Custos de construção

A solução em aço carbono apresentou menor custo de construção, com R\$ 4.633,14, considerando aço, concreto e fôrmas. Da mesma forma que o item anterior, só houve diferença no custo do vergalhão para considerar o custo global das soluções.

A solução em aço inoxidável apresentou um custo de R\$ 11.797,46, representando um aumento de 155% em relação à solução em aço carbono.

Por outro lado, a solução em vergalhão de polímero reforçado com fibra de vidro apresentou um custo de R\$ 5.790,52, representando um aumento de 25% em relação à solução em aço carbono.

6.4 Custos ao longo do tempo

Uma análise mais generalizada dos custos, observando o final da vida útil de cada estrutura mostra que a estrutura reforçada com vergalhão inoxidável se apresentou a mais econômica. As intervenções devido a reparo durante os 160 anos da análise, contemplaram somente uma reforma aos 120 anos. Desta forma a solução em aço inoxidável representa um custo aos 160 anos de idade da estrutura de aproximadamente R\$ 77.074,32.

Apesar da solução em vergalhão polimérico ao longo dos 160 anos, haver apenas 2 intervenções para reparo (comparada a 4 intervenções do vergalhão aço carbono), esta solução se mostrou a menos econômica, com um custo ao longo do tempo de R\$ 166.287,21 comparado a R\$159.798,46 da solução em vergalhão aço carbono.

6.5 Deformações

O perfil de iso-deformações (não linear) das três soluções mostra que a solução em polímero reforçado apresentou maiores deformações, aproximadamente 4% superiores as soluções anteriores. Isso fato pode ser percebido devido ao menor módulo de elasticidade desse material, na ordem de 40GPa, comparado ao aço de aproximadamente 200GPa.

Maiores deformações estão diretamente ligadas a maiores espessuras de trincas que podem abrir espaço para entrada de agentes externos e ao mesmo tempo o início do processo de corrosão das armaduras. De uma maneira geral deformações maiores tem efeito da durabilidade da estrutura.

7. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi avaliado o desempenho de três materiais utilizados como vergalhão para reforço do concreto armado, analisando a influência destes no desempenho da estrutura. Para tanto, foi determinada uma estrutura reticulada e foram desenvolvidos os cálculos estruturais para cada uma das soluções e comparados os resultados.

O vergalhão em aço carbono se apresentou como a solução mais econômica quando se trata do custo de implantação de uma estrutura com pelo menos 25% de economia quando comparado às outras soluções.

No que diz respeito à deformação das estruturas, a solução de vergalhão polimérico reforçado com fibras de vidro apresentou maiores valores, indicando que o módulo de elasticidade do material tem influência direta na deformação da estrutura e consequentemente na abertura de fissuras que podem induzir a penetração de ataques de agentes externos, iniciando um processo de deterioração dos vergalhões.

O uso do aço inoxidável apresentou-se como a solução com maiores custos de construção, porém devido a sua alta resistência a corrosão, este requer um menor número de intervenções para reparo da estrutura ao longo das décadas. Desta forma o aço inoxidável se mostrou o material mais econômico quando se analisa a estrutura de maneira global em longo prazo, apresentando uma economia de aproximadamente 53%.

O uso do aço inoxidável em substituição ao vergalhão de aço carbono pode ser recomendado em instalações onde se deseja uma vida útil maior, bem como estruturas com difícil acesso e altos custos para manutenção e reparos.

No que diz respeito ao peso da estrutura, conforme esperado a solução do vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro se mostrou a mais leve, entretanto no cômputo geral, esta redução de peso para a estrutura foi praticamente inexpressível quando se analisa globalmente a estrutura considerando a influência do peso do concreto. A utilização desta solução seria recomendável em instalações onde exista a possibilidade de contato com o sal, indústrias químicas bem como em ambientes onde a presença do aço poderia gerar alguma interferência eletromagnética.

A utilização de materiais com propriedades mecânicas diferentes ao vergalhão de aço carbono, não alterou os índices de consumo de concreto e fôrmas ao manter-se os cobrimento inicial.

Este trabalho poderia ser complementado com a realização de ensaios de laboratório utilizando corpos de prova para todas as umas das soluções. Para simulação da corrosão ao longo do tempo sugere-se utilizar o processo de corrosão acelerada.

BIBLIOGRAFIA

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575: **Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

B. Tighiouart, B. Benmokrane U, D. Gao. **Construction and Building Materials** 12 (1998) 453-462.

Benmokrane B, Tighiouart B, Chaallal O. **Bond strength and load distribution of composite GFRP reinforcing bars in concrete**. ACI Mater J. 1996;93:246-253.

C. Bourgin, E. Chauveau, B. Demelin. **Stainless steel rebar: the choice of service life**. La Revue de Métallurgie-CIT Février 2006.

D. Cochrane, S. Von Martérn, **Nordic Steel Construction Conf.** 95, 161 (1995).

Erdogdu, Sakir. **Determination of the State os Corrosion of Epoxi-Coated Rebar in Concrete**. The University of New Brunswick. 1992.

Koch, G.H., M.P.H., Brongers, N.G. Thompson, Y.P. Virmani, J.H. Payer, **Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States**, FHWA-RD-01-156, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 2011.

J.H. Dong, W. Ke and J. Wei. **Construction and Building Materials** 25 (2011) 1243–1247.

J.Y. Lee, K. H. Kim, S. W. KiM, M. Changc. **Strenght degradation of glass fiber reinforced polymer bars subjected to reversed cyclid load**. Strength of Materials, Vol. 46, No. 2, March, 2014.

Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, IBRACON, 2008.

Vaysburd AM, Emmons PH. **How to make today's repairs durable for tomorrow – corrosion protection in concrete repair**. Constr Build Mater 2000;14:189–97.

Weichen Xue, Qiaowen Zheng, Yu Yang and Zhiqing Fang. **Bond behavior of sand-coated deformed glass fiber reinforced polymer rebars**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, Vol. 33(10) 895–910.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for testing and materials **ASTM A276** – Standard specification for Stainless Steel Bars and Shapes.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7480**: Barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado. Rio de Janeiro, 2007.

Barbucci A, Delucchi M, Cerisola G. **Organic coatings for concrete protection: liquid water and water vapour permeabilities**. Prog Org Coat 1997;30:293–7.

Bertolini L, Bolzoni F, Cigada A, Pastore T, Pedferri P. **Cathodic protection of new and old reinforced concrete structures**. Corros Sci 1993;35:1633–9.

Drew, **Fibre reinforced polymer and steel rebar comparative performance**. Structural Survey, Vol. 29 Iss 1 pp. 63 – 74. 2011.

Fedrizzi L, Azzolini F, Bonora PL. **The use of migrating corrosion inhibitors to repair motorways' concrete structures contaminated by chlorides**. Cem Concr Res 2005;35:551–61.

Hong DH. **Corrosion and protection of steel in concrete**. Beijing: China railway publishing house, 1998.

Mota, J. M. F (1); Barbosa, F. R (2); Costa e Silva, A. J (3); Franco, A. P. G (4); Carvalho, J.R (5). **Corrosão de Armadura em Estruturas de Concreto Armado devido ao Ataque de Íons Cloreto**. Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012. Outubro/ 2012.

Nmai CK. **Multi-functional organic corrosion inhibitor**. Cem Concr Compos 2004;26:199–207.

Pedferri P. **Cathodic protection and cathodic prevention**. Constr Build Mater 1996;10:391–402.

Vaysburd AM, Emmons PH. **Corrosion inhibitors and other protective systems in concrete repair: concepts or misconcepts**. Cem Concr Compos 2004;26:255–63.

Venkatesan P, Palaniswamy N, Rajagopal K. **Corrosion performance of coated reinforcing bars embedded in concrete and exposed to natural marine environment**. Prog Org Coat 2006;56:8–12.

Webb NC. **Cathodic protection of reinforced concrete**. Constr Build Mater 1992;6:179–83.

ANEXOS

ANEXO A – Catálogo técnico Vergalhão aço carbono

Fabricante: ARCELORMITTAL

ArcelorMittal 50 S - Soldável



Certificado pela ABNT e registrado pelo Inmetro, o ArcelorMittal 50 S - Soldável tem um processo de fabricação diferente do CA 50 convencional. Sua composição química obedece aos limites especificados para soldabilidade. Na laminação, a barra é resfriada com água. Esse resfriamento reduz a temperatura superficial, gerando uma camada endurecida. O núcleo, permanecendo quente, reaquece essa camada, promovendo o revenimento e tornando a barra mais dúctil. O produto final tem alta resistência ao escoamento e alta ductilidade.



Comercializado em rolos de 2 t, em bitolas de 6,3 a 16 mm e em feixes de barras retas de 1 ou 2,5 t com comprimento de 12 m em todas as bitolas. Comprimentos especiais: sob consulta. Outros acondicionamentos destinados ao varejo podem ser fornecidos pelas unidades da ArcelorMittal Distribuição. O ArcelorMittal 50 S - Soldável ainda pode ser fornecido cortado e dobrado pelo Belgo Pronto ou em armaduras pré-montadas pela solução Armadura Pronta Soldada.

Suas características diferenciadas atendem às normas ABNT NBR 7480, ABNT NBR 6118 e ABNT NBR 14931 quanto à soldabilidade. A ArcelorMittal deverá ser consultada sobre as melhores práticas de soldagem. Produto certificado com o Rótulo ABNT, que atesta o compromisso da ArcelorMittal com a sustentabilidade.



Bitola (mm)	Massa nominal (kg/m)	Tolerância (%)
6,3	0,245	± 7
8,0	0,395	± 7
10,0	0,617	± 6
12,5	0,963	± 6
16,0	1,578	± 5
20,0	2,466	± 5
25,0	3,853	± 4
32,0	6,313	± 4
40,0	9,865	± 4



A letra S gravada após a marca ArcelorMittal 50 sinaliza soldabilidade.

Dobramento do aço

Categoria do aço	Uso no laboratório (NBR 7480)		Uso na obra (NBR 6118)	
	Diâmetro do pino		Diâmetro do pino	
	Bitola < 20 mm	Bitola ≥ 20 mm	Bitola < 20 mm	Bitola ≥ 20 mm
CA 50	3 x ϕ	6 x ϕ	5 x ϕ	8 x ϕ

Obs.: 1) ϕ = bitola.

2) Para estribos de bitolas ≤ 10 mm, o diâmetro do pino para uso na obra poderá ser de 3 x ϕ .



ANEXO B – Catálogo técnico Vergalhão Inoxidável Duplex 2205

Fabricante: FLOWSERVE

2205 Duplex Stainless Steel



Description The 2205 S.S. (UNS S31803) alloy is probably the most recognized and widely used of the many duplex stainless steels. As the name duplex implies, it has a dual phase microstructure of both austenite and ferrite. In other words, duplex alloys have the strength of ferritic (400 series) S.S. while retaining the corrosion resistance of the austenitic (300 series) S.S.

Corrosion Resistance The duplex stainless steels have general corrosion resistance comparable to 316 S.S. and even exceed it in many applications. In addition, their particular combination of higher chromium, molybdenum and nitrogen gives the duplexes more resistance to localized forms of corrosion such as pitting, crevice and stress corrosion cracking. Since 2205 lacks the copper addition of CD4MCuN, it would not be expected to do as well as CD4MCuN in sulfuric acid.

Mechanical Properties Like all duplex stainless steels, 2205 has approximately twice the yield strength of 316 stainless and it is also about 50% harder. In addition, it has a slightly higher modulus of elasticity than 316 S.S. which means it is stiffer, thus less deflection can be expected.

Specifications The 2205 alloy is available in various product forms:

Bar	ASTM A276 or A479 grade S31803
Castings	ASTM A890 grade 4A
Tube	ASTM A789
Pipe	ASTM A790
Plate	ASTM A240
Werkstoff-Nr.	1.4462 DIN X 2 CrNiMoN 22 5 3

Chemical Composition		2205	316	CD4MCuN
	Chromium	21-23	16-18	24.5-26.5
	Nickel	4.5-6.5	10-14	4.7-6.0
	Molybdenum	2.5-3.5	2.0-3.0	1.7-2.3
	Copper	---	---	2.7-3.3
	Silicon	1.0	1.0	1.0
	Manganese	2.0	2.0	1.0
	Carbon	.03	.08	.04
	Nitrogen	.08-.20	---	.1-.25
	Iron	Bal	Bal	Bal

Mechanical Properties (Annealed)		2205	316	CD4MCuN
	Yield Strength, ksi (Mpa)	65 (450)	30 (205)	70 (485)
	Tensile Strength, ksi (Mpa)	90 (620)	75 (215)	100 (690)
	% Elongation	25	30	16

Flowserve Corporation, 2200 East Monument Avenue, Dayton, Ohio 45402, (937) 226-4000

©Flowserve Corporation, 1999

ANEXO C – Informações técnicas do vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro

Fabricante: EBC

Especificação Técnica - Peso

Barra Ø (mm)	Peso (kg/ m)	Peso (kg/ 12 m)
4	0,028	0,342
5	0,038	0,456
6	0,061	0,732
8	0,110	1,320
9	0,134	1,604
10	0,169	2,035
12	0,243	2,925
16	0,423	5,077

Tolerância de peso: $\pm 5\%$

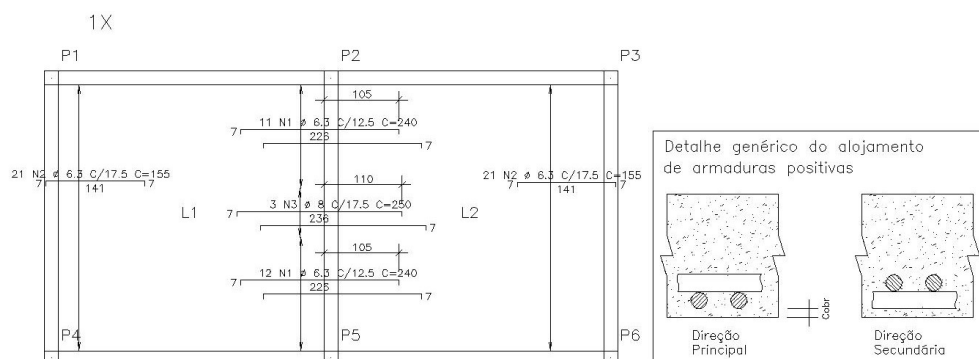
Especificação Técnica – Propriedades Mecânicas

Barra Ø (mm)	Resistência à Tração (MPa)	Força de Tração Última (kN)	Módulo de Elasticidade (GPa)
6	825	26.2	40.8
10	760	54	40.8
12.7	690	87.3	40.8
16	655	130	40.8
19	620	177	40.8
22	586	227	40.8
25	550	279	40.8
29	517	332	40.8
32	480	382	40.8

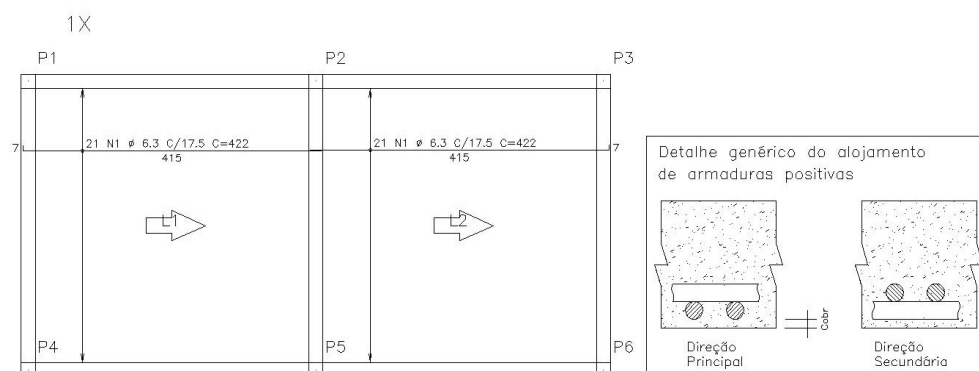
APENDICE

APENDICE A – Detalhes do projeto de armação - solução em vergalhão aço carbono

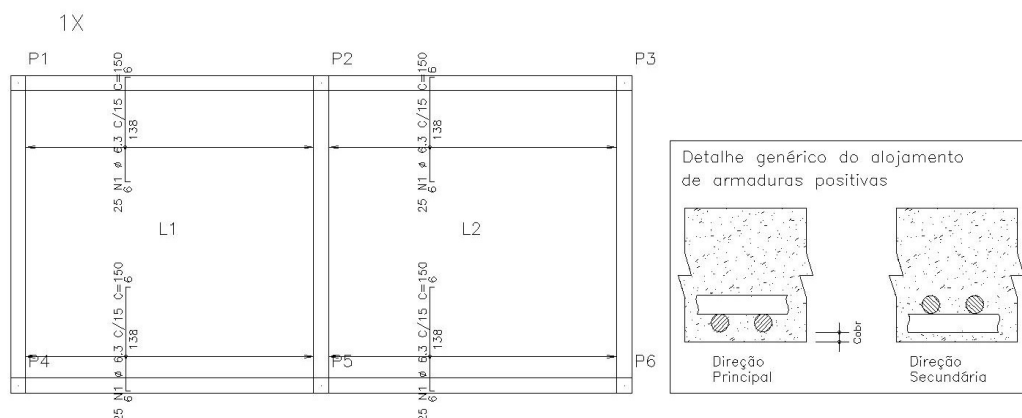
1 PAVIMENTO – ARMADURA NEGATIVA HORIZONTAL



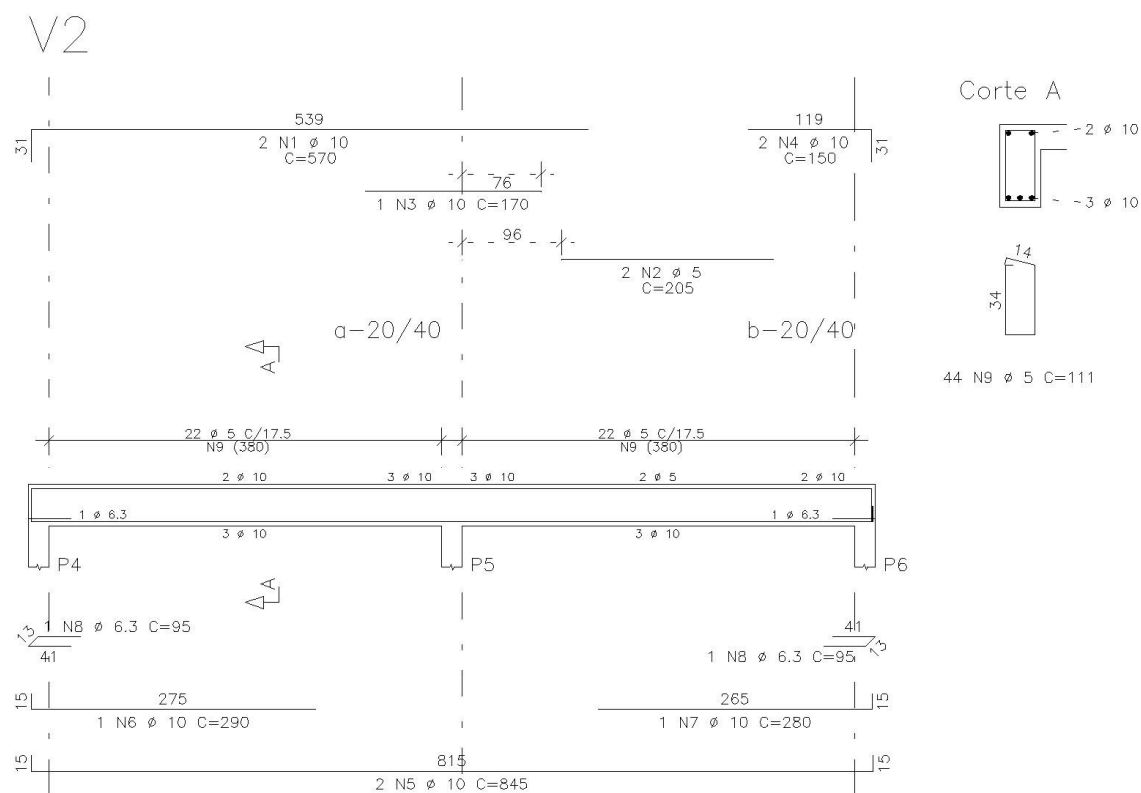
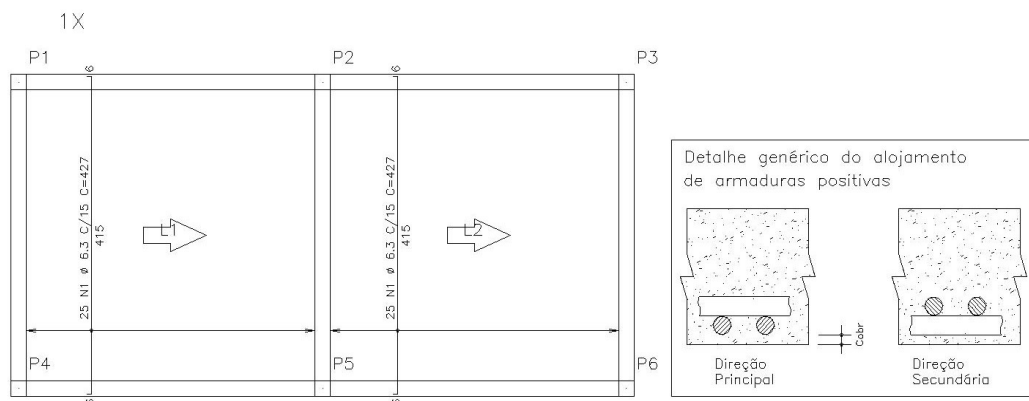
1 PAVIMENTO – ARMADURA POSITIVA HORIZONTAL

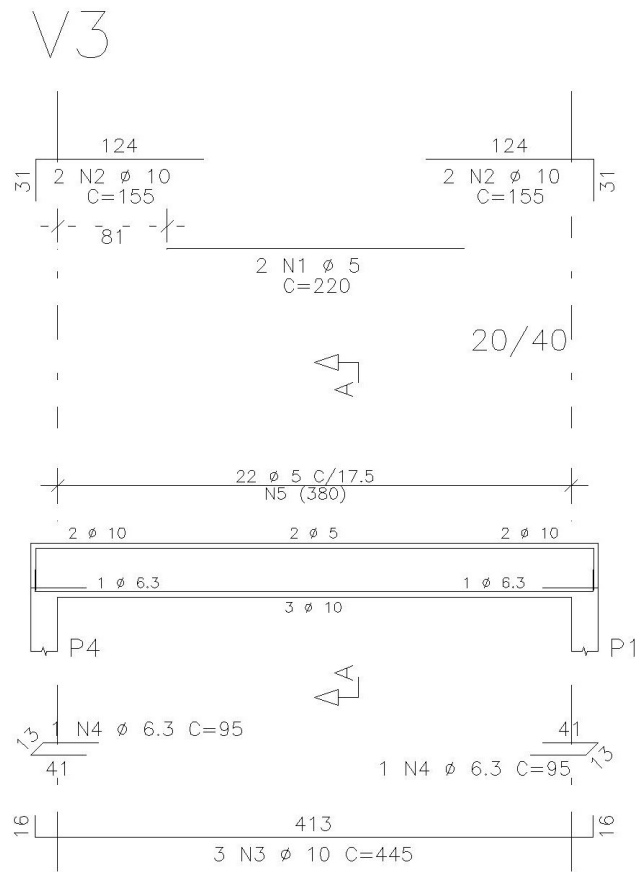


1 PAVIMENTO – ARMADURA NEGATIVA VERTICAL

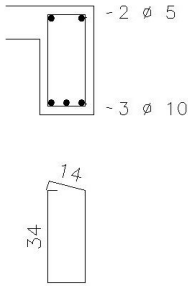


1 PAVIMENTO — ARMADURA POSITIVA VERTICAL



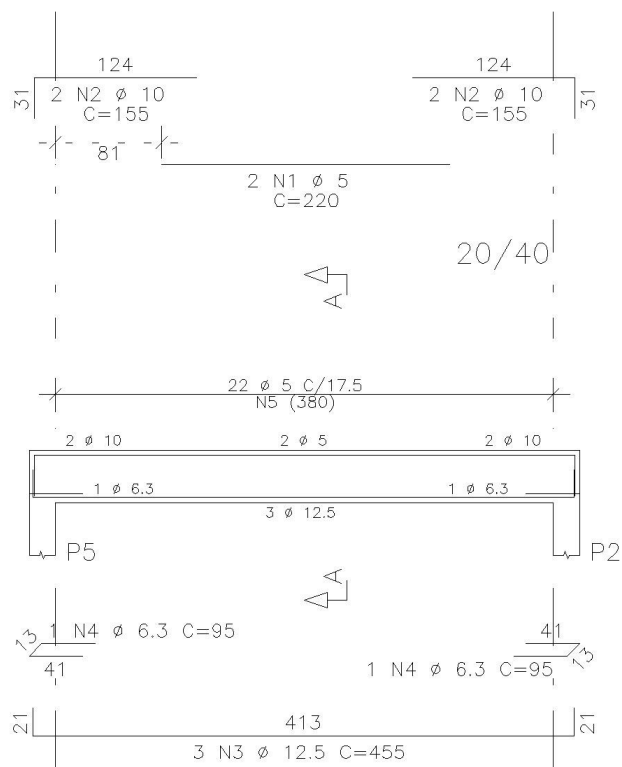


Corte A

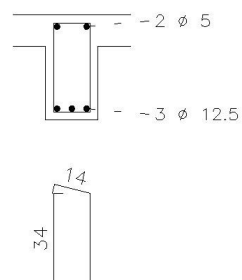


22 N5 $\varnothing$ 5 C=111

V4

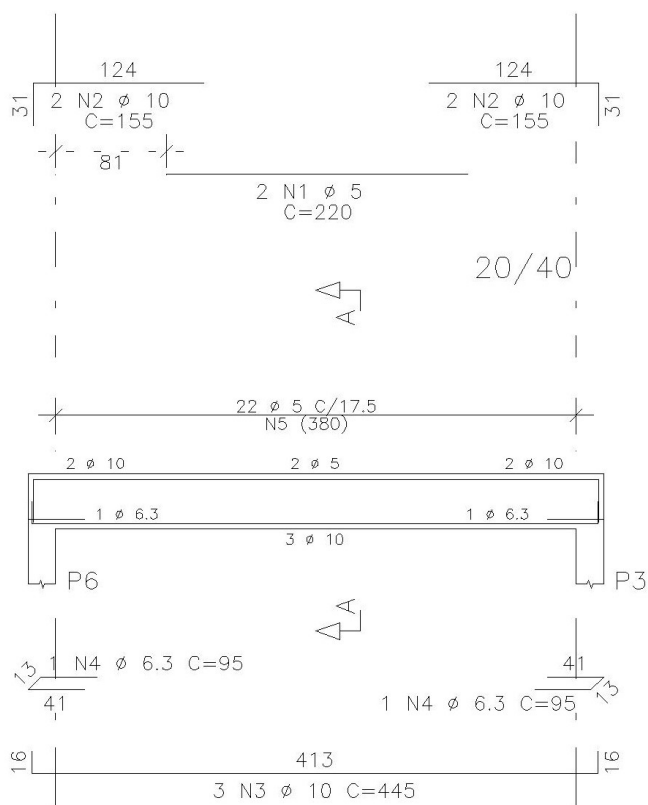


Corte A

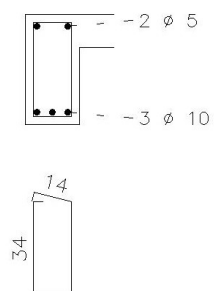


22 N5 Ø 5 C=111

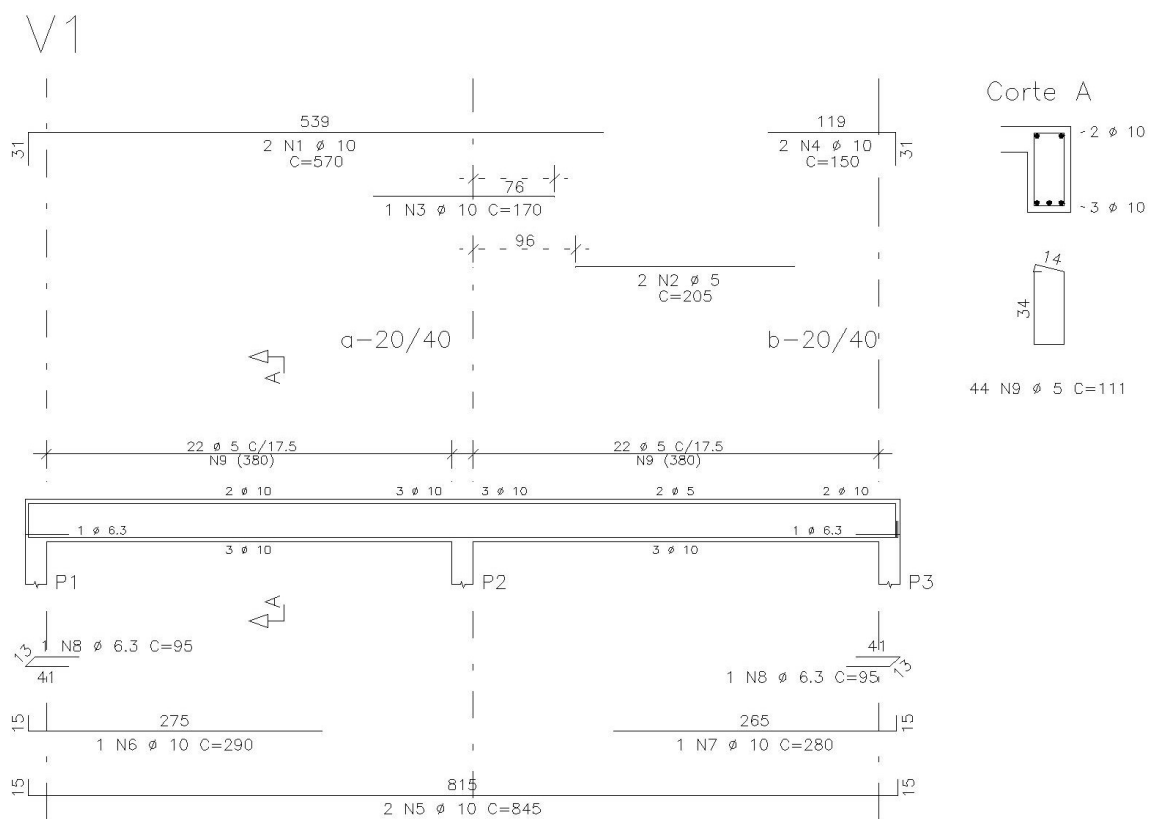
V5



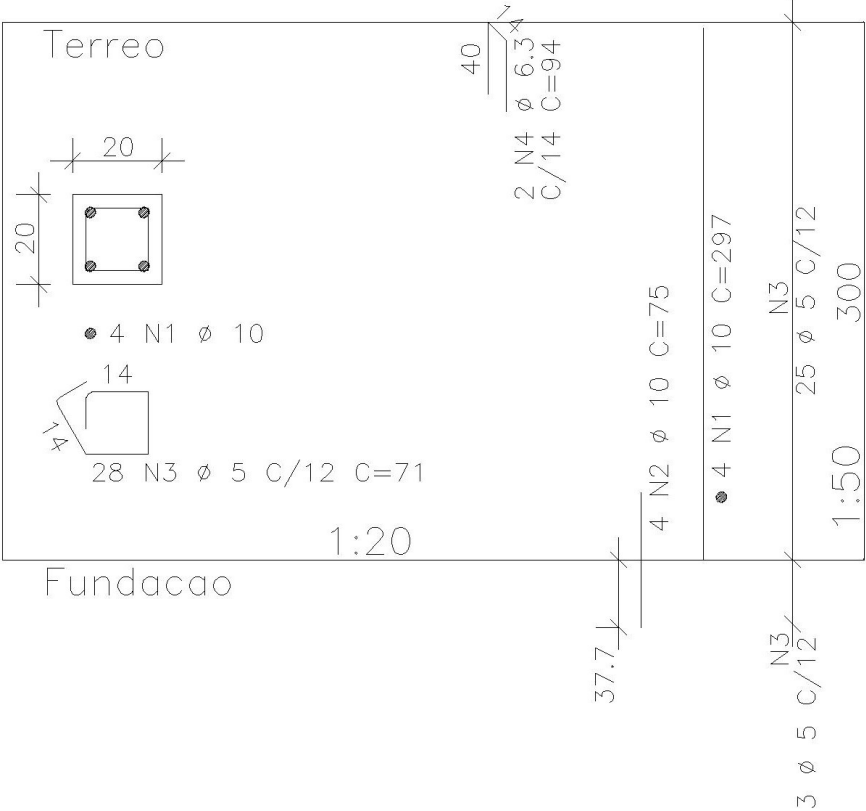
Corte A



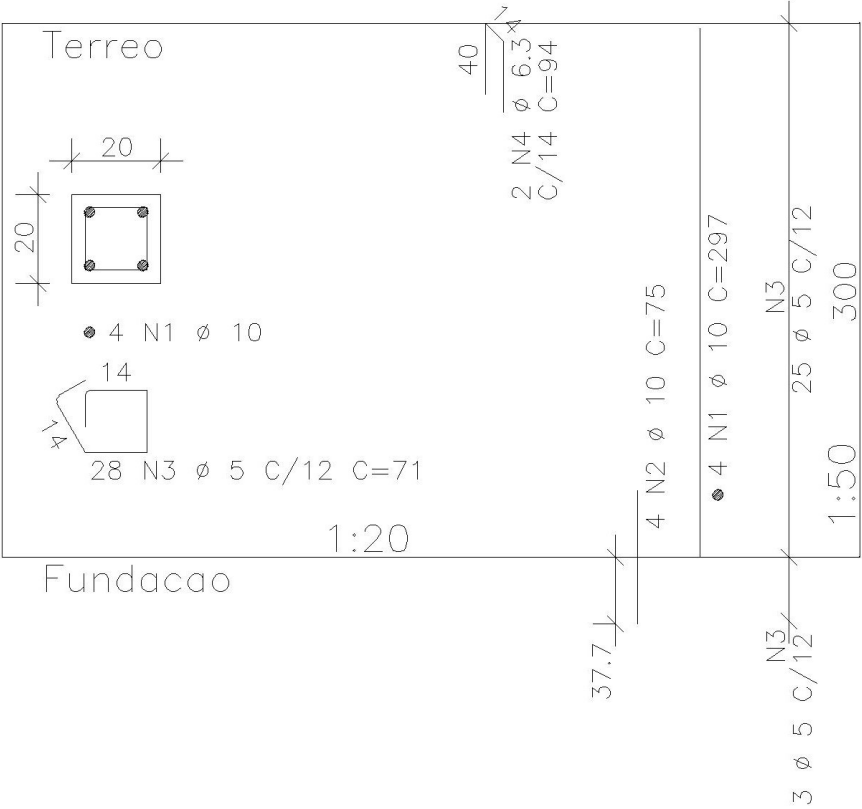
22 N5 Ø 5 C=111



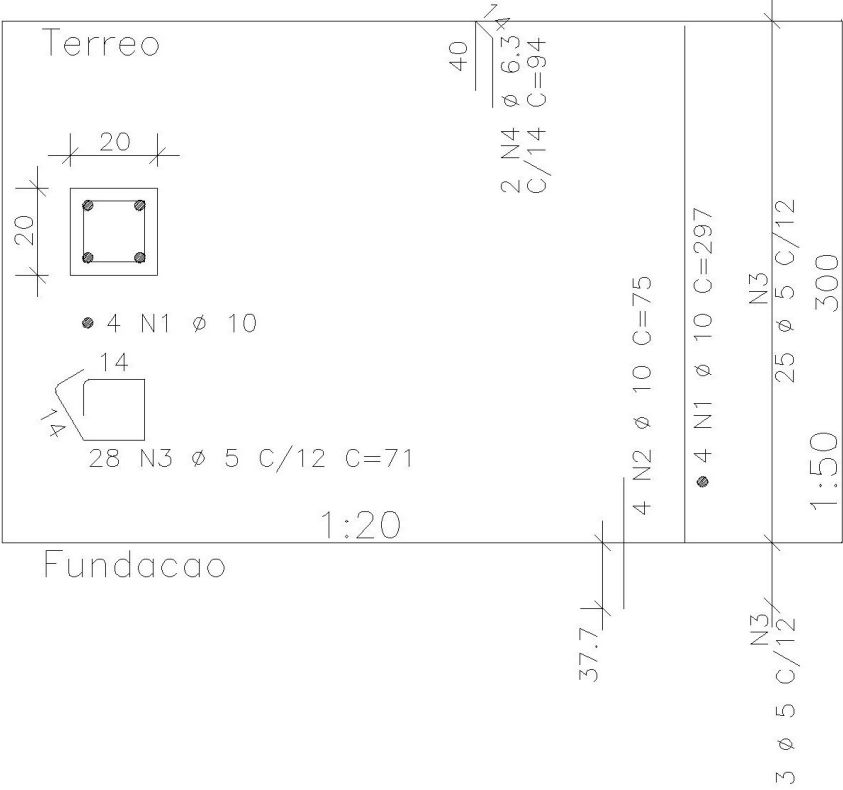
P4 Lance 1



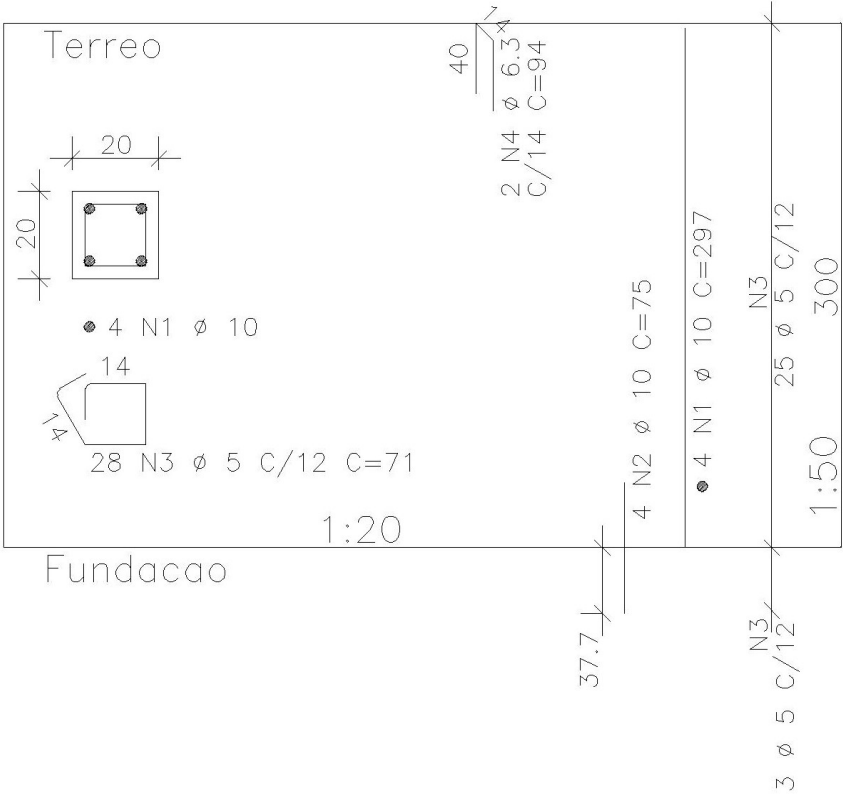
P5 Lance 1



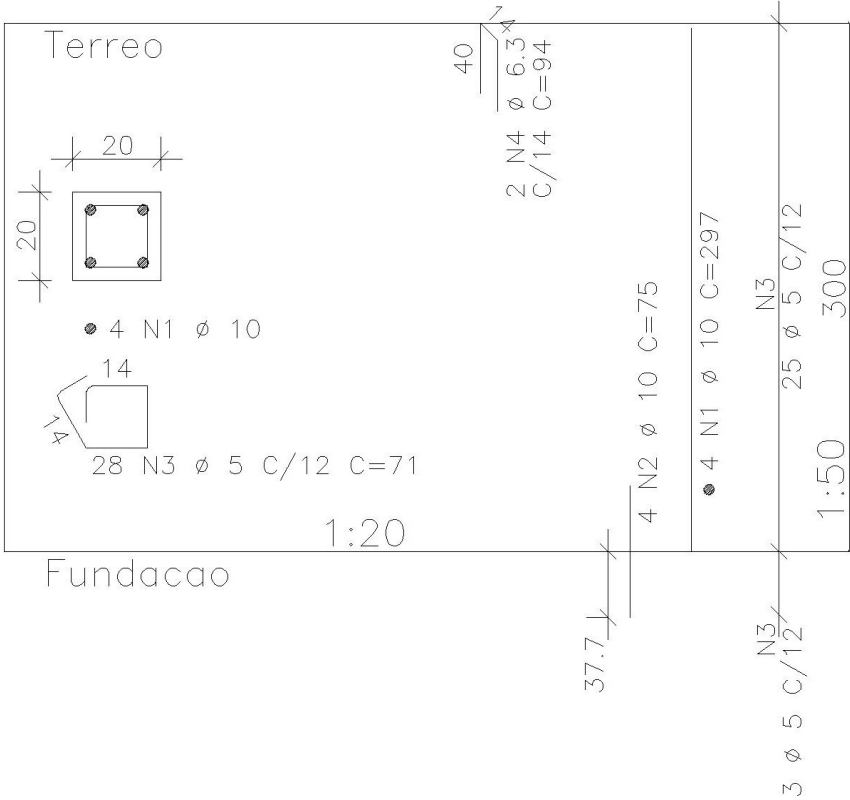
P6 Lance 1



P2 Lance 1



P3 Lance 1

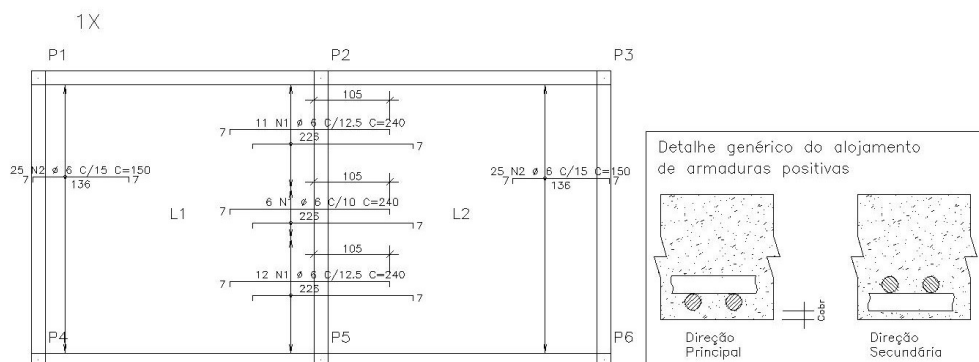


AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO		
				UNIT (cm)	TOTAL (cm)	
P1 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
60	3	5	28	71	1988	
50	4	6.3	2	94	188	
P2 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
60	3	5	28	71	1988	
50	4	6.3	2	94	188	
P3 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
60	3	5	28	71	1988	
50	4	6.3	2	94	188	
P4 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
60	3	5	28	71	1988	
50	4	6.3	2	94	188	
P5 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
60	3	5	28	71	1988	
50	4	6.3	2	94	188	
P6 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
60	3	5	28	71	1988	
50	4	6.3	2	94	188	
V1						
50	1	10	2	570	1140	
60	2	5	2	205	410	
50	3	10	1	170	170	
50	4	10	2	150	300	
50	5	10	2	845	1690	
50	6	10	1	290	290	
50	7	10	1	280	280	
50	8	6.3	2	95	190	
60	9	5	44	111	4884	
V2						
50	1	10	2	570	1140	
60	2	5	2	205	410	
50	3	10	1	170	170	
50	4	10	2	150	300	
50	5	10	2	845	1690	
50	6	10	1	290	290	
50	7	10	1	280	280	
50	8	6.3	2	95	190	
60	9	5	44	111	4884	
V3						
60	1	5	2	220	440	
50	2	10	4	155	620	
50	3	10	3	445	1335	
50	4	6.3	2	95	190	
60	5	5	22	111	2442	
V4						
60	1	5	2	220	440	
50	2	10	4	155	620	
50	3	12.5	3	455	1365	
50	4	6.3	2	95	190	
60	5	5	22	111	2442	
V5						
60	1	5	2	220	440	
50	2	10	4	155	620	
50	3	10	3	445	1335	
50	4	6.3	2	95	190	
60	5	5	22	111	2442	
1 PAVIMENTO — ARMADURA NEGATIVA HORIZONTAL						
50	1	6.3	23	240	5520	
50	2	6.3	42	155	6510	
50	3	8	3	250	750	
1 PAVIMENTO — ARMADURA NEGATIVA VERTICAL						
50	1	6.3	100	150	15000	
1 PAVIMENTO — ARMADURA POSITIVA HORIZONTAL						
50	1	6.3	42	422	17724	
1 PAVIMENTO — ARMADURA POSITIVA VERTICAL						
50	1	6.3	50	427	21350	

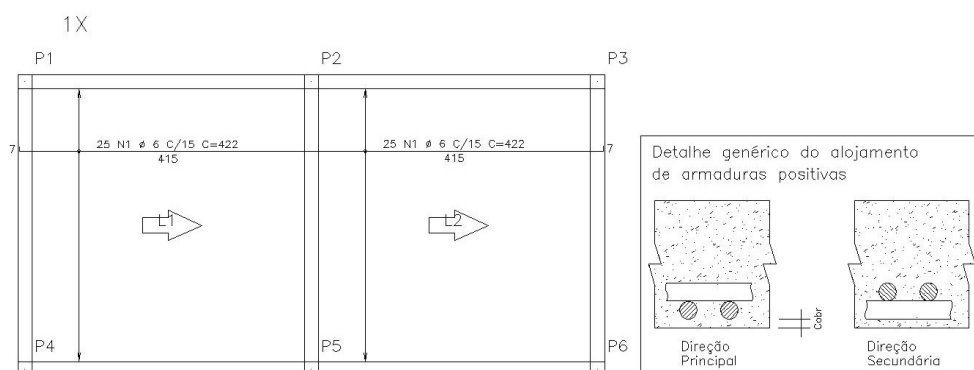
RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
60	5	312	48
50	6.3	682	167
50	8	8	3
50	10	212	131
50	12.5	14	13
Peso Total	60	=	48 kg
Peso Total	50	=	314 kg

APENDICE B – Detalhes do projeto de armação - solução em vergalhão inoxidável

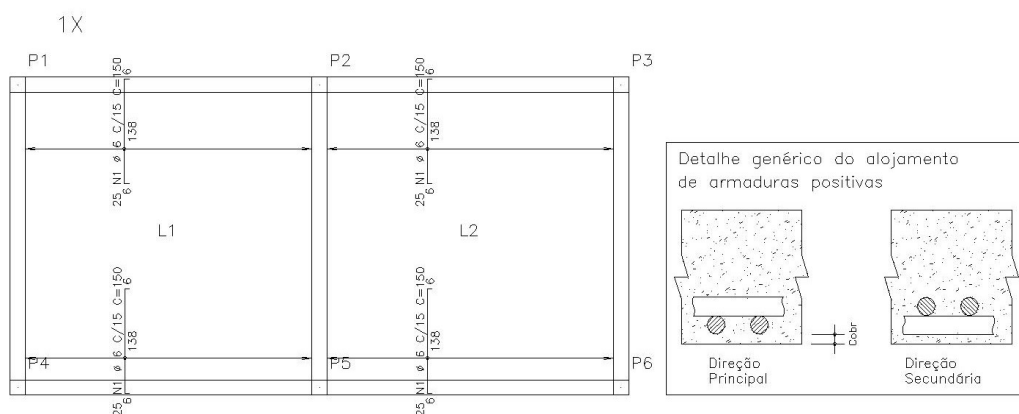
1 PAVIMENTO – ARMADURA NEGATIVA HORIZONTAL



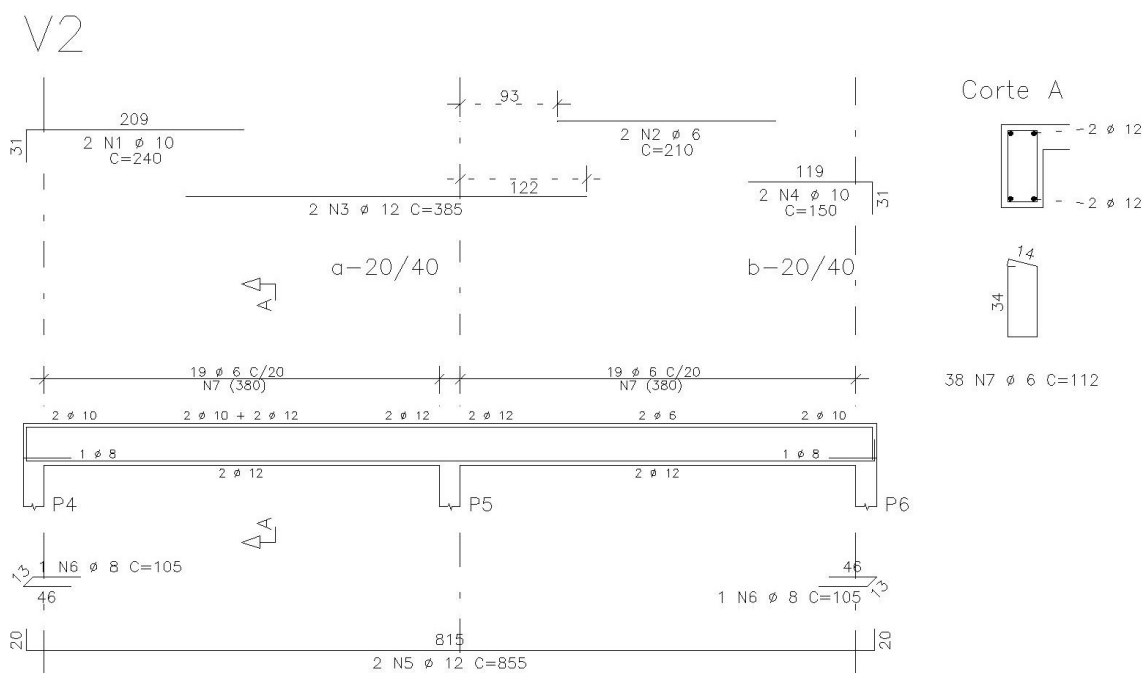
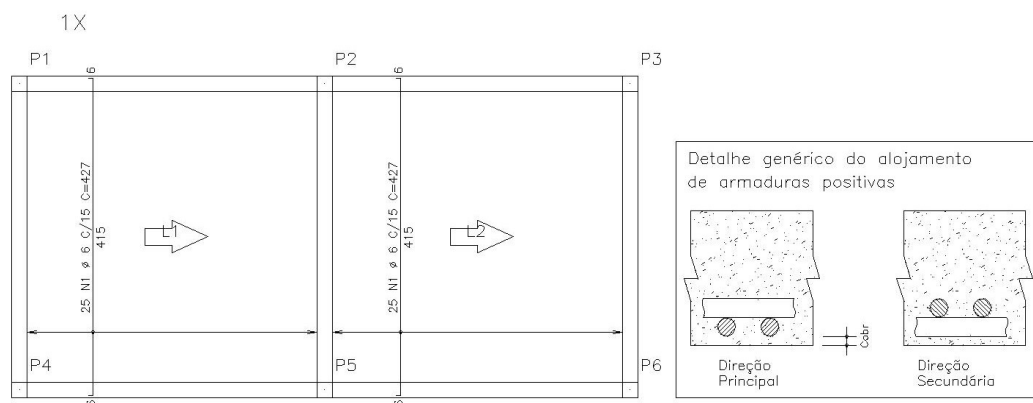
1 PAVIMENTO – ARMADURA POSITIVA HORIZONTAL



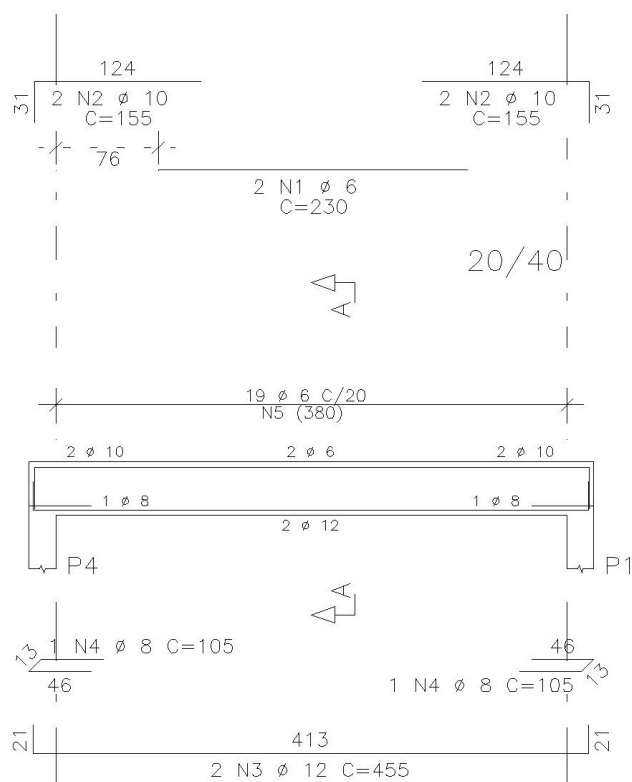
1 PAVIMENTO – ARMADURA NEGATIVA VERTICAL



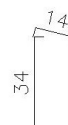
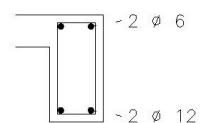
1 PAVIMENTO — ARMADURA POSITIVA VERTICAL



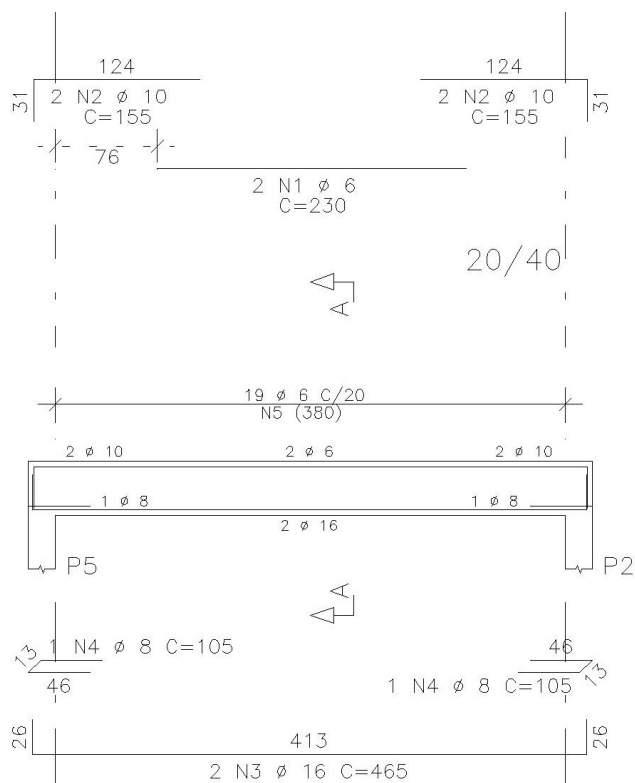
V3



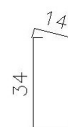
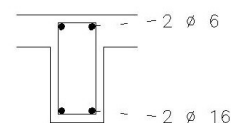
Corte A

19 N5 ϕ 6 C=112

V4

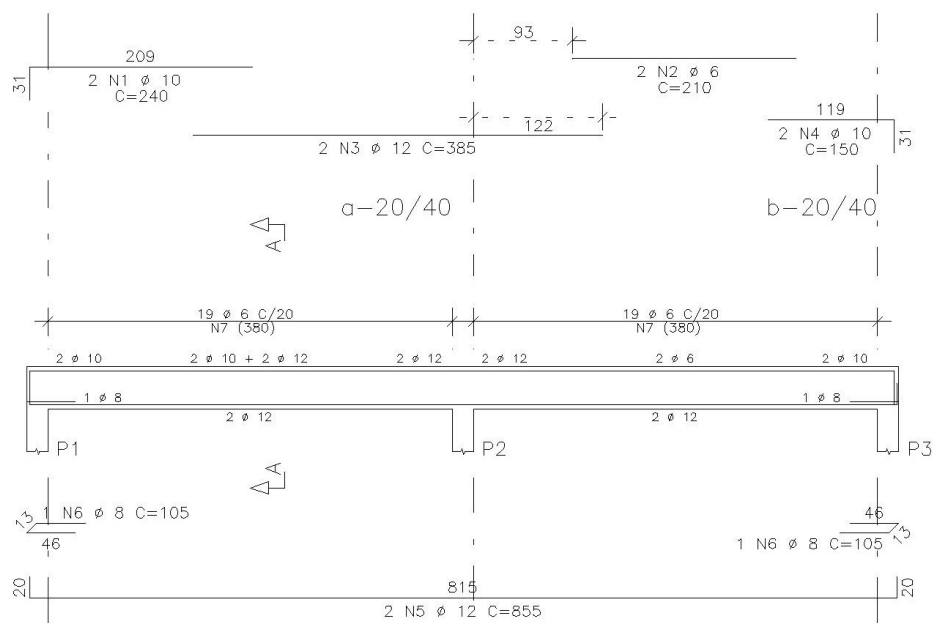


Corte A

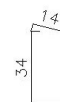
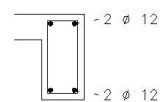


19 N5 Ø 6 C=112

V1

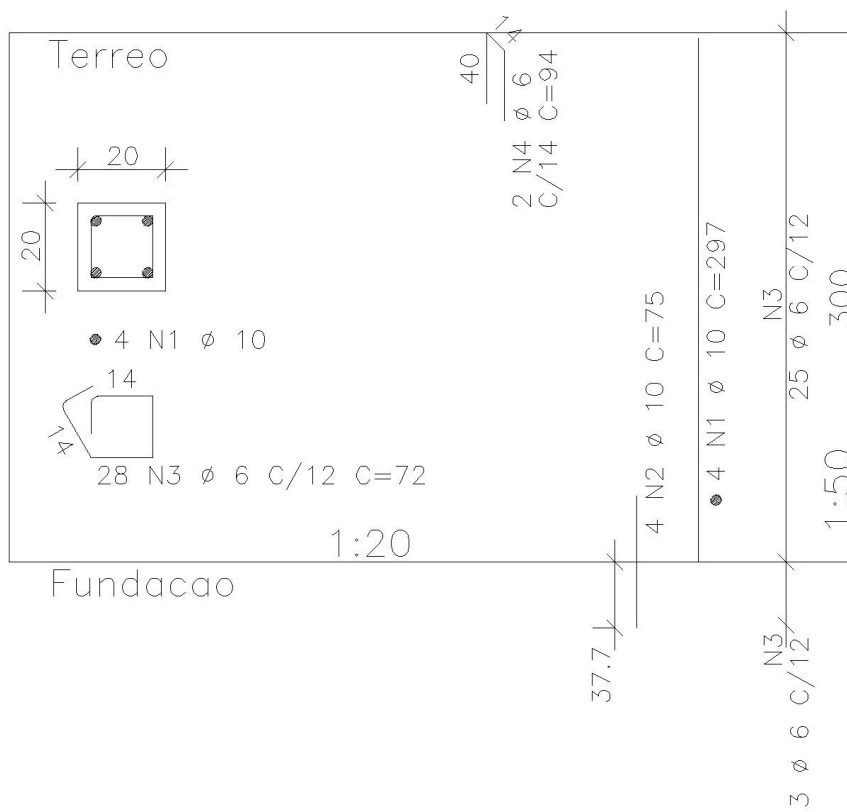


Corte A

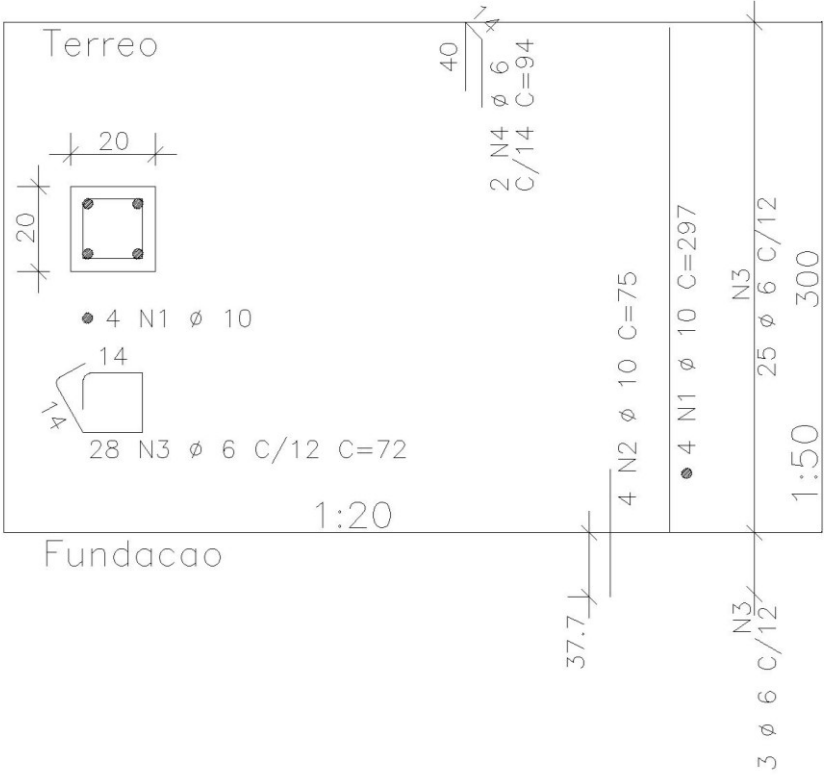


38 N7 Ø 6 C=112

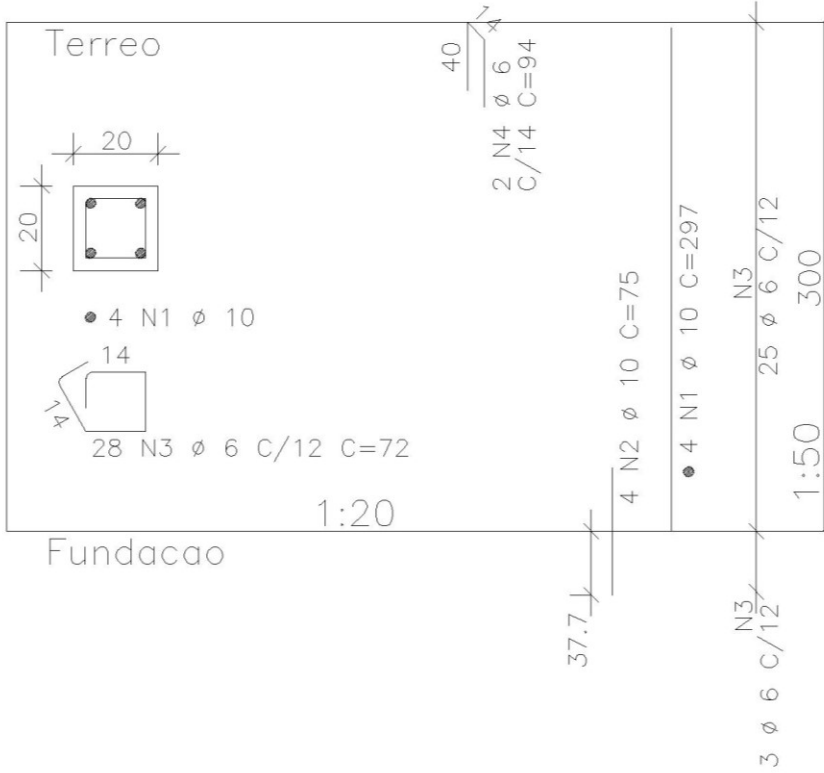
P5 Lance 1



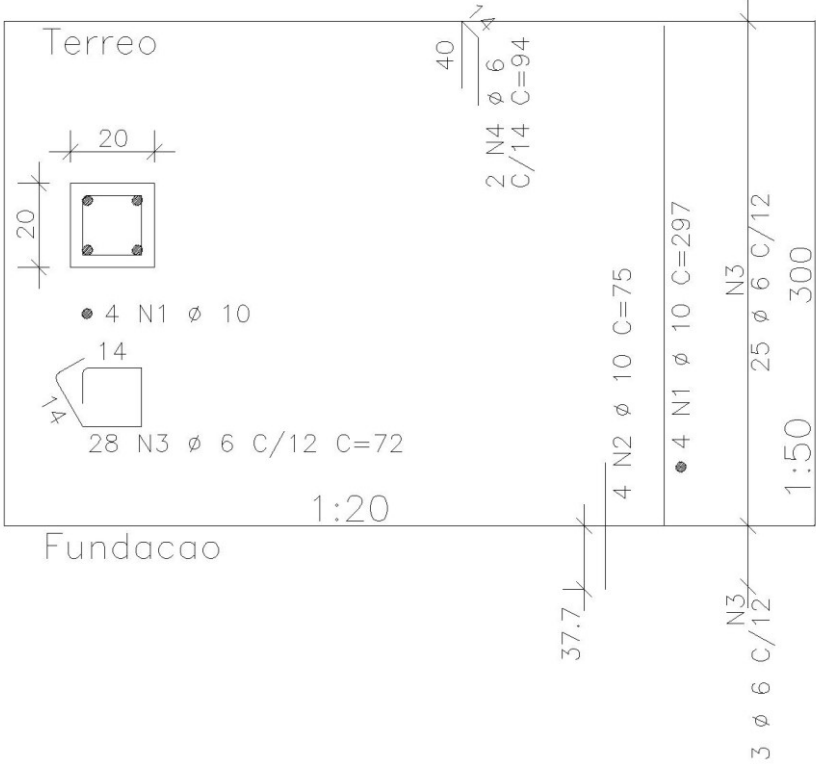
P6 Lance 1



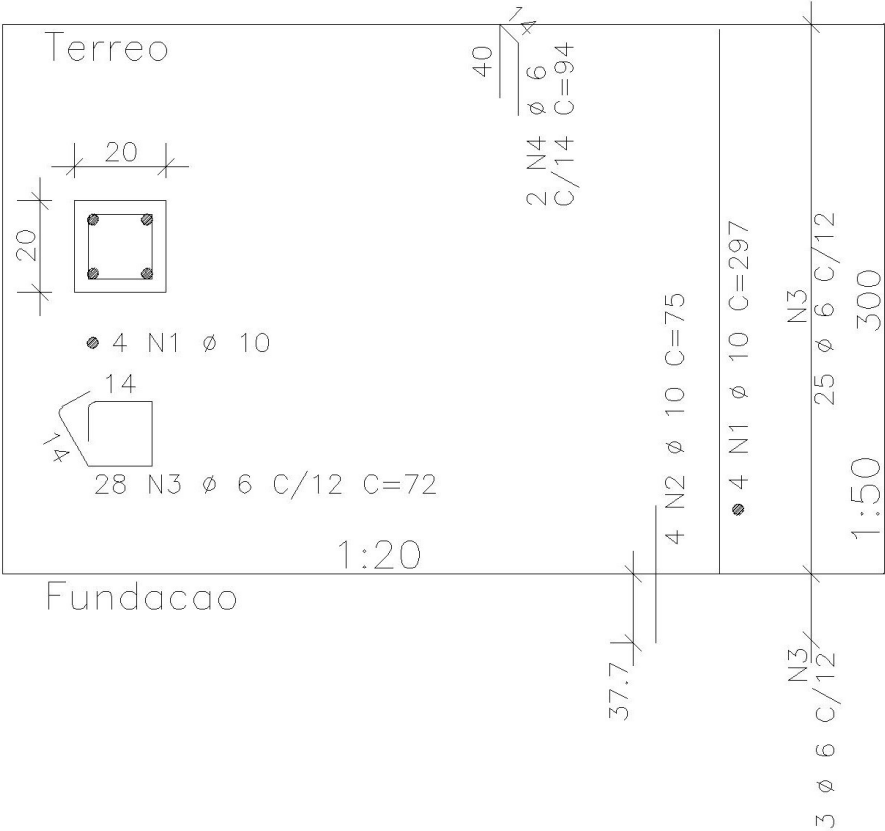
P1 Lance 1



P2 Lance 1



P3 Lance 1

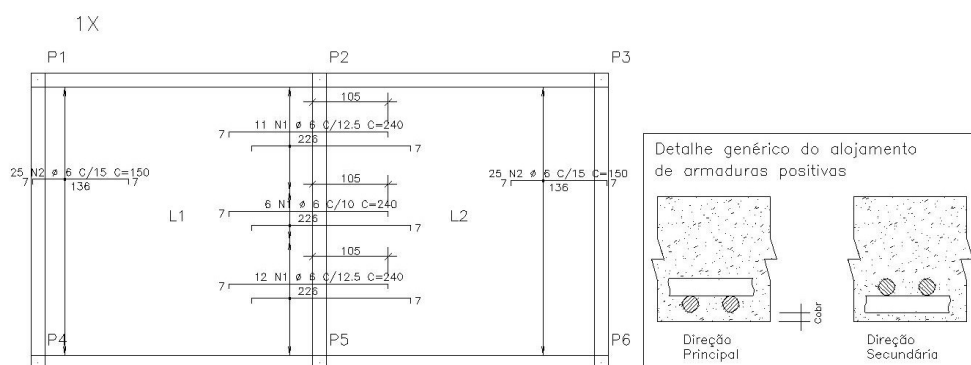


AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO		
				UNIT (cm)	TOTAL (cm)	
P1 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
50	3	6	28	72	2016	
50	4	6	2	94	188	
P2 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
50	3	6	28	72	2016	
50	4	6	2	94	188	
P3 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
50	3	6	28	72	2016	
50	4	6	2	94	188	
P4 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
50	3	6	28	72	2016	
50	4	6	2	94	188	
P5 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
50	3	6	28	72	2016	
50	4	6	2	94	188	
P6 Lance 1						
50	1	10	4	297	1188	
50	2	10	4	75	300	
50	3	6	28	72	2016	
50	4	6	2	94	188	
V1						
50	1	10	2	240	480	
50	2	6	2	210	420	
50	3	12	2	385	770	
50	4	10	2	150	300	
50	5	12	2	855	1710	
50	6	8	2	105	210	
50	7	6	38	112	4256	
V2						
50	1	10	2	240	480	
50	2	6	2	210	420	
50	3	12	2	385	770	
50	4	10	2	150	300	
50	5	12	2	855	1710	
50	6	8	2	105	210	
50	7	6	38	112	4256	
V3						
50	1	6	2	230	460	
50	2	10	4	155	620	
50	3	12	2	455	910	
50	4	8	2	105	210	
50	5	6	19	112	2128	
V4						
50	1	6	2	230	460	
50	2	10	4	155	620	
50	3	16	2	465	930	
50	4	8	2	105	210	
50	5	6	19	112	2128	
V5						
50	1	6	2	230	460	
50	2	10	4	155	620	
50	3	12	2	455	910	
50	4	8	2	105	210	
50	5	6	19	112	2128	
1 PAVIMENTO — ARMADURA NEGATIVA HORIZONTAL						
50	1	6	29	240	6960	
50	2	6	50	150	7500	
1 PAVIMENTO — ARMADURA NEGATIVA VERTICAL						
50	1	6	100	150	15000	
1 PAVIMENTO — ARMADURA POSITIVA HORIZONTAL						
50	1	6	50	422	21100	
1 PAVIMENTO — ARMADURA POSITIVA VERTICAL						
50	1	6	50	427	21350	

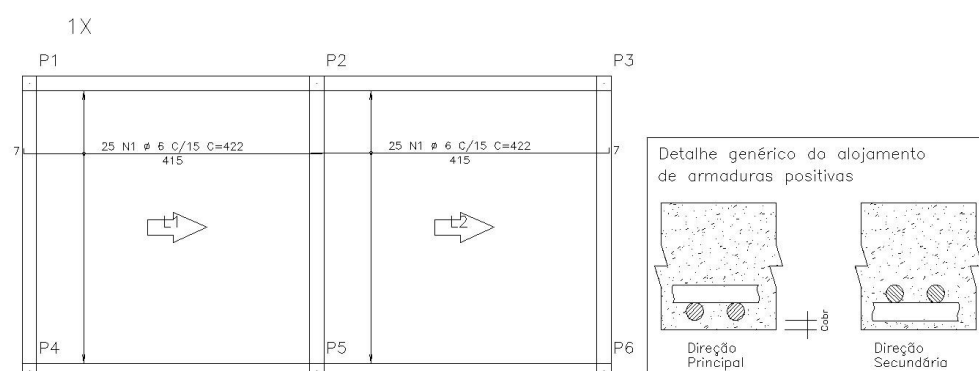
RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
50	6	1023	227
50	8	11	4
50	10	123	76
50	12	68	60
50	16	9	15
Peso Total		50 =	382 kg

APENDICE C – Detalhes do projeto de armação - solução em vergalhão polimérico reforçado com fibra de vidro

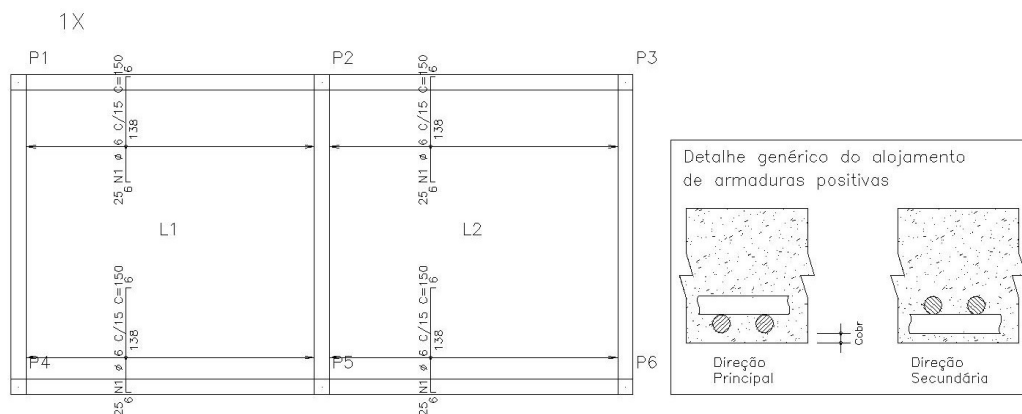
1 PAVIMENTO — ARMADURA NEGATIVA HORIZONTAL



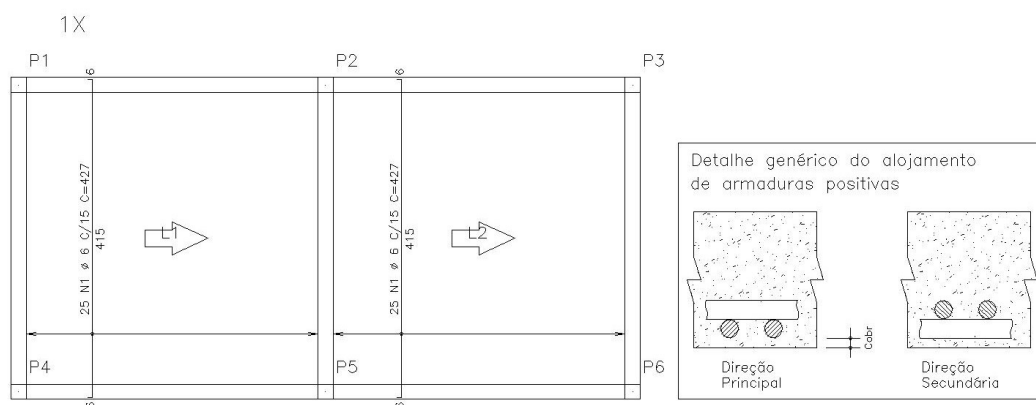
1 PAVIMENTO — ARMADURA POSITIVA HORIZONTAL



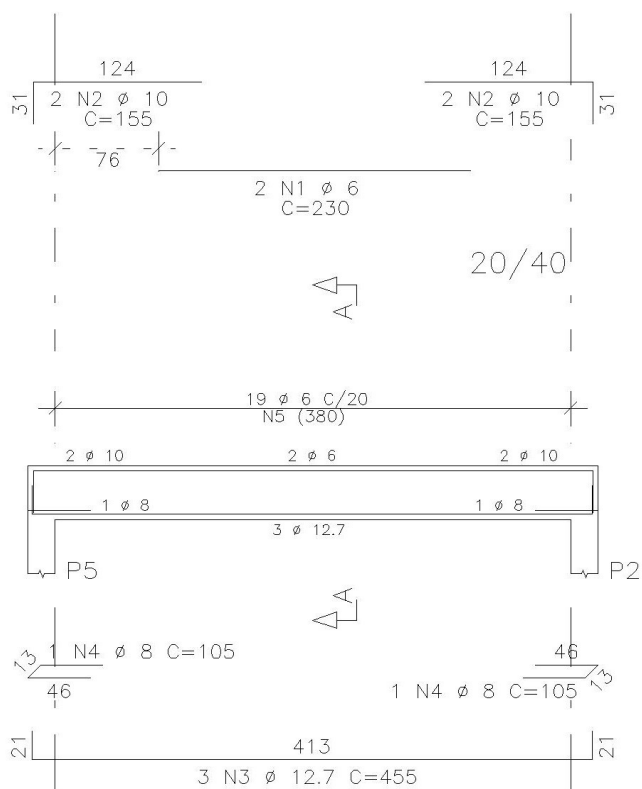
1 PAVIMENTO – ARMADURA NEGATIVA VERTICAL



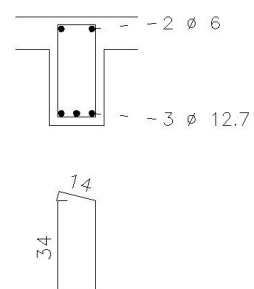
1 PAVIMENTO – ARMADURA POSITIVA VERTICAL



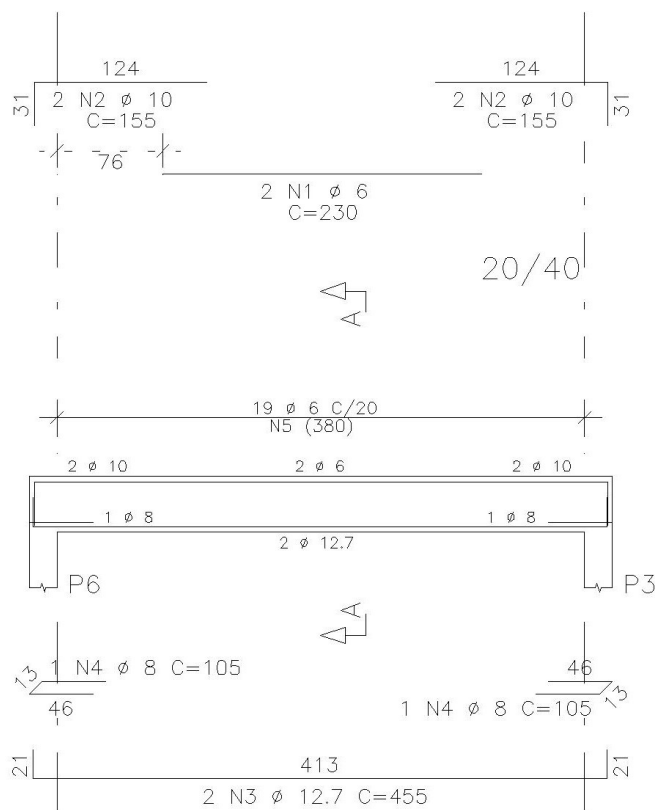
V4



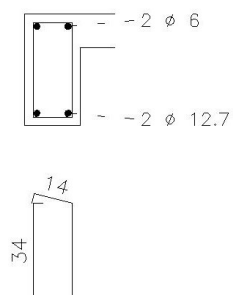
Corte A

19 N5 ϕ 6 C=112

V5

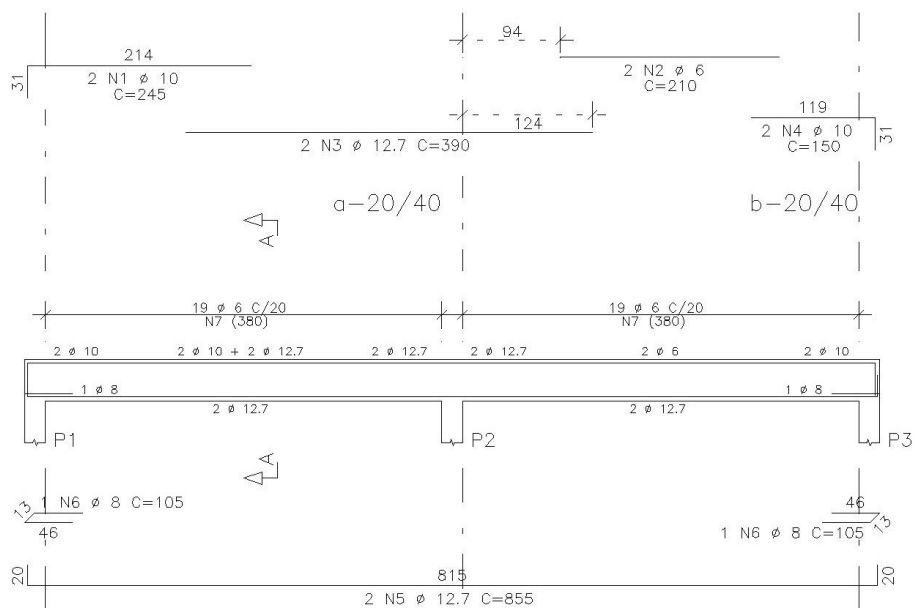


Corte A

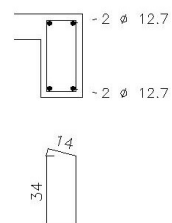


19 N5 Ø 6 C=112

V1

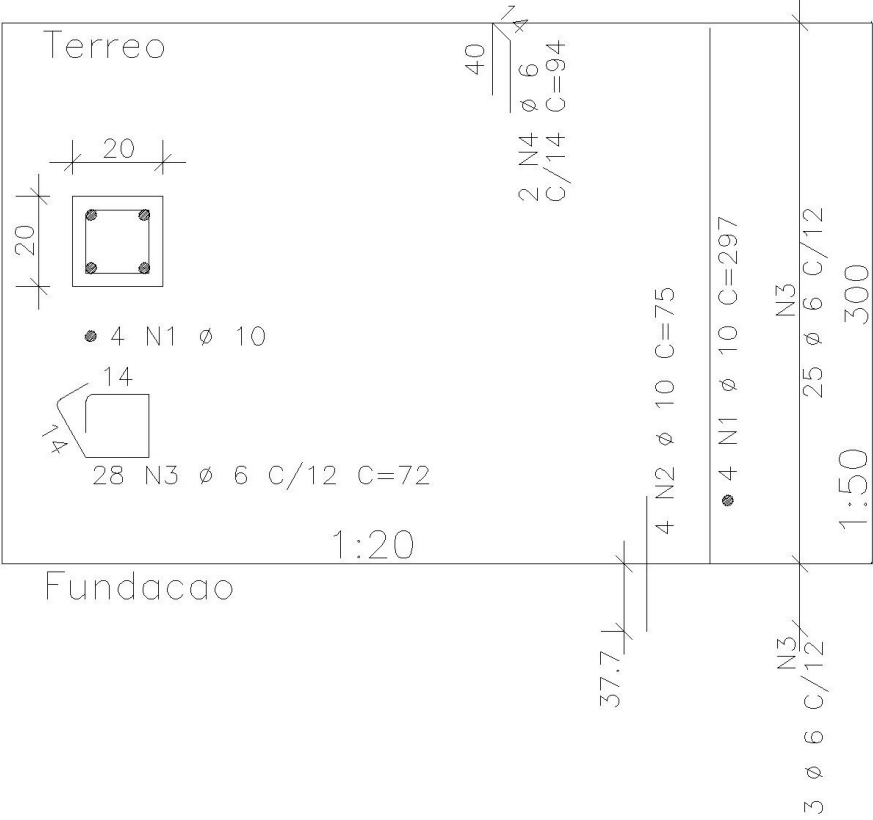


Corte A

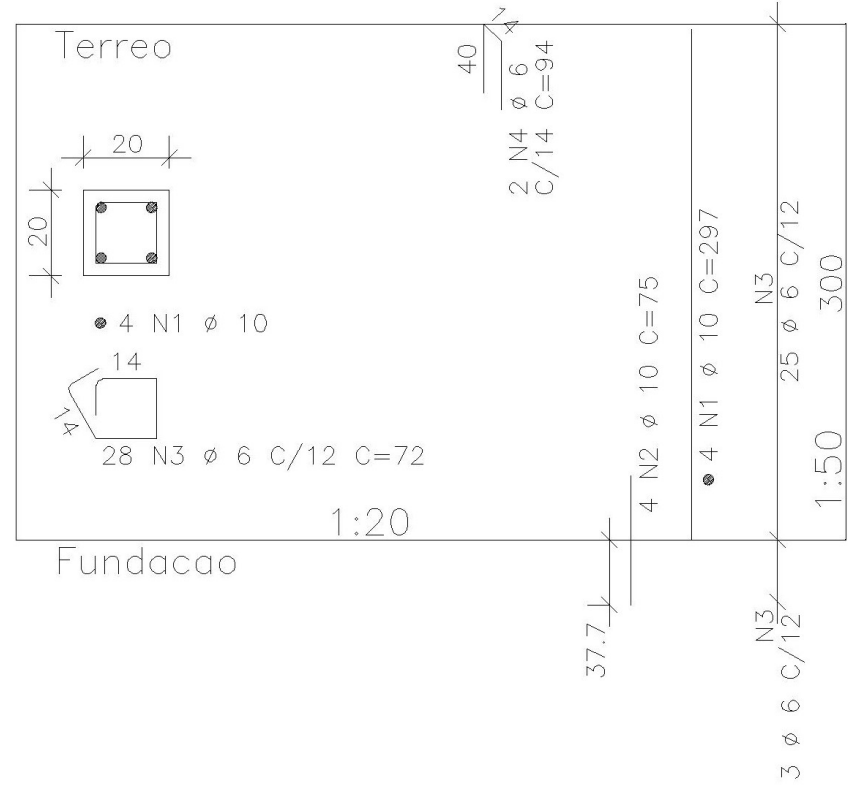


38 N7 Ø 6 C=112

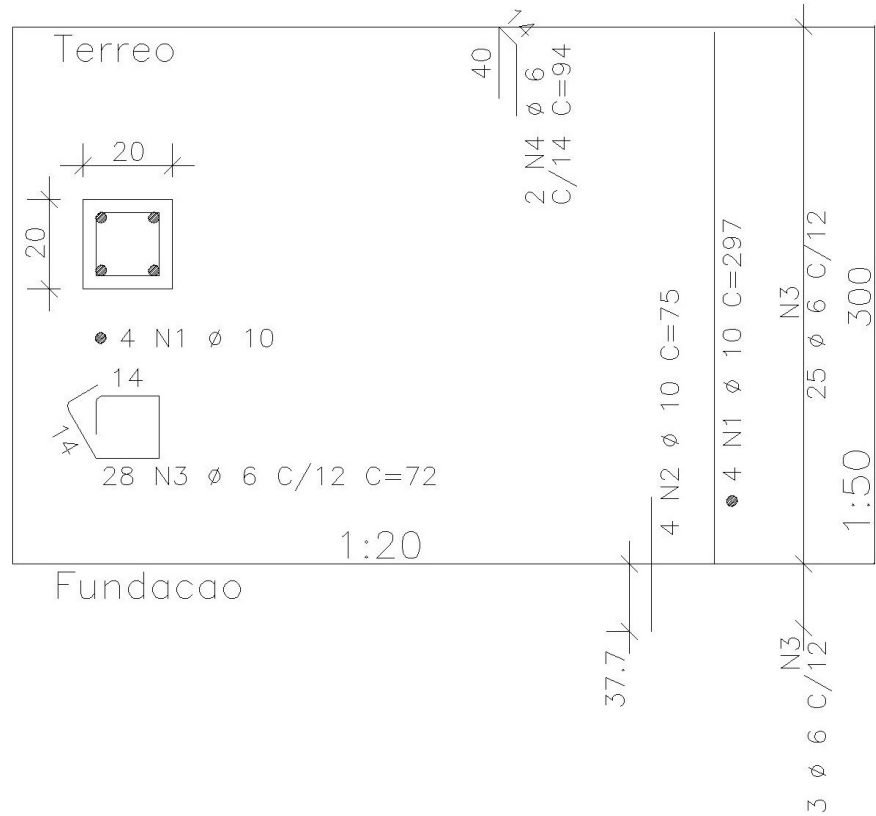
P5 Lance 1



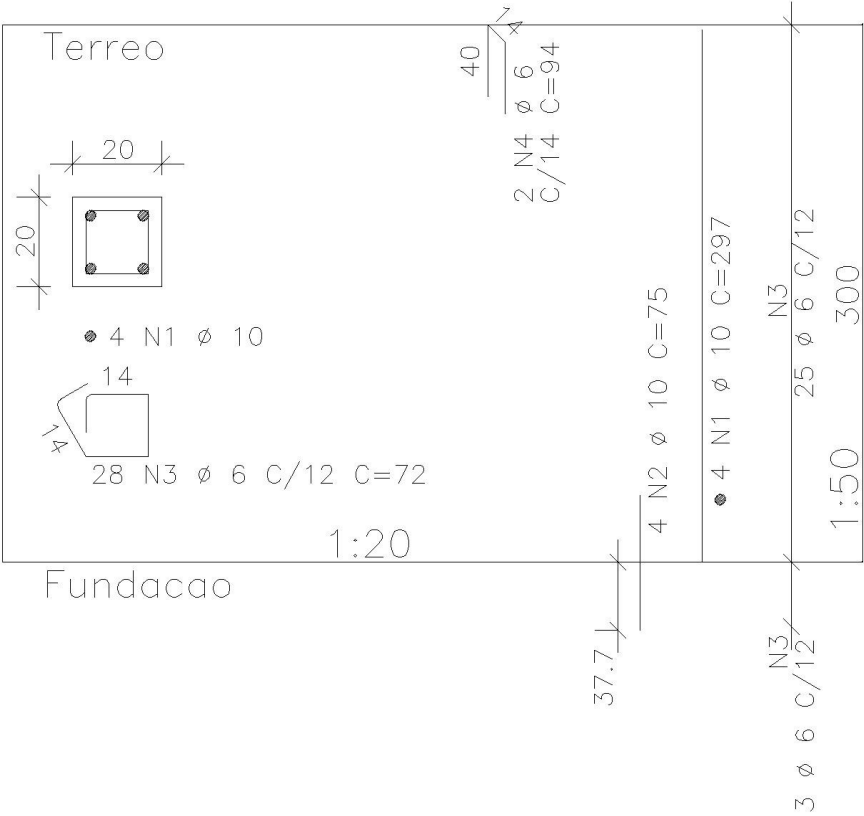
P1 Lance 1



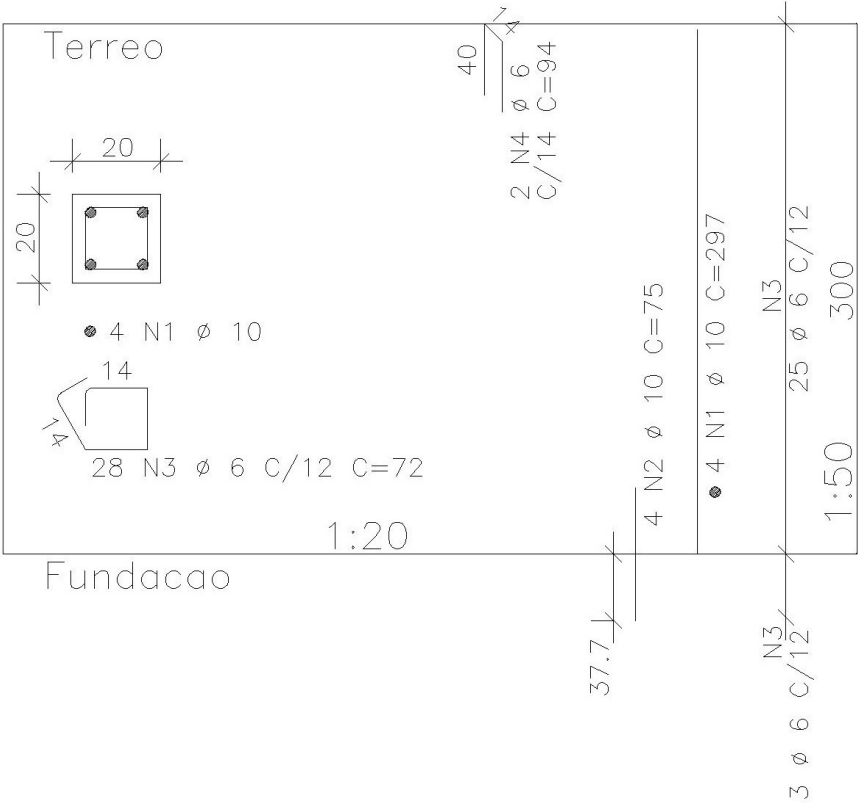
P2 Lance 1



P3 Lance 1



P4 Lance 1



AÇO	POS	BIT (mm)	QUANT	COMPRIMENTO		
				UNIT (cm)	TOTAL (cm)	
P1 Lance 1						
	50	1	10	4	297	1188
	50	2	10	4	75	300
	50	3	6	28	72	2016
	50	4	6	2	94	188
P2 Lance 1						
	50	1	10	4	297	1188
	50	2	10	4	75	300
	50	3	6	28	72	2016
	50	4	6	2	94	188
P3 Lance 1						
	50	1	10	4	297	1188
	50	2	10	4	75	300
	50	3	6	28	72	2016
	50	4	6	2	94	188
P4 Lance 1						
	50	1	10	4	297	1188
	50	2	10	4	75	300
	50	3	6	28	72	2016
	50	4	6	2	94	188
P5 Lance 1						
	50	1	10	4	297	1188
	50	2	10	4	75	300
	50	3	6	28	72	2016
	50	4	6	2	94	188
P6 Lance 1						
	50	1	10	4	297	1188
	50	2	10	4	75	300
	50	3	6	28	72	2016
	50	4	6	2	94	188
V1						
	50	1	10	2	245	490
	50	2	6	2	210	420
	50	3	12.7	2	390	780
	50	4	10	2	150	300
	50	5	12.7	2	855	1710
	50	6	8	2	105	210
	50	7	6	38	112	4256
V2						
	50	1	10	2	245	490
	50	2	6	2	210	420
	50	3	12.7	2	390	780
	50	4	10	2	150	300
	50	5	12.7	2	855	1710
	50	6	8	2	105	210
	50	7	6	38	112	4256
V3						
	50	1	6	2	230	460
	50	2	10	4	155	620
	50	3	12.7	2	455	910
	50	4	8	2	105	210
	50	5	6	19	112	2128
V4						
	50	1	6	2	230	460
	50	2	10	4	155	620
	50	3	12.7	3	455	1365
	50	4	8	2	105	210
	50	5	6	19	112	2128
V5						
	50	1	6	2	230	460
	50	2	10	4	155	620
	50	3	12.7	2	455	910
	50	4	8	2	105	210
	50	5	6	19	112	2128
1 PAVIMENTO — ARMADURA NEGATIVA HORIZONTAL						
	50	1	6	29	240	6960
	50	2	6	50	150	7500
1 PAVIMENTO — ARMADURA NEGATIVA VERTICAL						
	50	1	6	100	150	15000
1 PAVIMENTO — ARMADURA POSITIVA HORIZONTAL						
	50	1	6	50	422	21100
1 PAVIMENTO — ARMADURA POSITIVA VERTICAL						
	50	1	6	50	427	21350

RESUMO AÇO CA 50-60			
AÇO	BIT (mm)	COMPR (m)	PESO (kg)
50	6	1023	227
50	8	11	4
50	10	124	76
50	12.7	82	81
Peso Total		50 =	389 kg