

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

NICOLE HANSEN

**UTILIZAÇÃO DE CAVACOS METÁLICOS EM SUBSTITUIÇÃO A FIBRA DE AÇO
PARA O DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO APLICADO A PISOS
INDUSTRIAIS**

GUARAPUAVA

2022

NICOLE HANSEN

**UTILIZAÇÃO DE CAVACOS METÁLICOS EM SUBSTITUIÇÃO A FIBRA DE AÇO
PARA O DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO DESTINADO A PISOS
INDUSTRIAIS**

**Use of metal chips in the replacement of steel fiber for the development of
concrete for industrial floors**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Msc. Dyorgge Alves Silva

GUARAPUAVA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

NICOLE HANSEN

**UTILIZAÇÃO DE CAVACOS METÁLICOS EM SUBSTITUIÇÃO A FIBRA DE AÇO
PARA O DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO DESTINADO A PISOS
INDUSTRIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15/dezembro/2022

Dyorgge Alves Silva
Mestrado em Estruturas e Construção Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gustavo De Miranda Saleme Gidrão
Doutorado em Engenharia de Estruturas
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Wallison Carlos de Sousa Barbosa
Doutorado em Estrutura e Construção Civil
Universidade Federal do Piauí

GUARAPUAVA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais, que me prestaram suporte e me incentivaram durante todos esses anos.

Agradeço aos meus amigos, sobretudo ao Gabriel e o Alex, que estiveram comigo durante toda a faculdade, por todo o incentivo e ajuda prestados. E agradeço também todas as pessoas que mesmo por algum momento estiveram presentes neste processo.

Agradeço ao meu orientador Prof. Msc. Dyorgge Alves Silva por toda a ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a empresa Belgo Bekaert pela doação das fibras de aço utilizadas, sem esta ajuda não seria possível o desenvolvimento desta pesquisa.

You can't stop progress even you go the wrong
way
(KHAZANOVICH, 1994).

RESUMO

O concreto é um material que dispõem de uma ampla utilização, em vista disso, a utilização de materiais alternativos na sua composição é uma oportunidade de aprimoramento das propriedades do concreto e, em alguns casos, a destinação de materiais que seriam descartados, um exemplo é o cavaco metálico que é um material com alto poder de poluição ao meio ambiente e a sua possível utilização no concreto diminui os efeitos causados do mesmo no meio ambiente. A partir disto, este trabalho teve como premissa a comparação do dimensionamento de um piso industrial com a adição de cavaco metálico em arco e cavaco metálico tubular em substituição a fibra de aço, com base nas propriedades físicas e mecânicas obtidas por meio de ensaio laboratoriais, e avaliar também a viabilidade da utilização deste material no concreto e assim investigar uma nova destinação visando a sustentabilidade pela redução da agressão do mesmo ao meio ambiente. A análise das propriedades físicas e mecânicas do concreto foi efetuada a partir dos ensaios de abatimento do tronco de cone, da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão, obtendo a redução da trabalhabilidade do concreto com a utilização do cavaco tubular, enquanto o cavaco em arco obteve trabalhabilidade significativamente maior comparado com a fibra de aço. Em relação à resistência à compressão, obteve o aumento desta resistência com a utilização de ambos os tipos de cavaco em confronto com a fibra de aço, enquanto que para a resistência à tração na flexão, o cavaco em arco não apresentou comportamento como material fibroso no concreto, não apresentando resistência residual a partir deste ensaio, em contrapartida, o cavaco tubular atuou como material fibroso no concreto e dispôs de resistência residual, porém esta resistência foi relativamente inferior ao concreto com adição de fibras de aço. A partir destes resultados foi dimensionado um piso industrial com a utilização do concreto reforçado com fibras de aço e com o cavaco tubular, obtendo assim, que a utilização do cavaco tubular diminuiu a espessura do piso industrial, e o aumento do espaçamento entre as juntas de dilatação em comparação com o dimensionamento utilizando concreto com fibra de aço.

Palavras-chave: concreto; fibra de aço; cavaco; piso industrial.

ABSTRACT

Concrete is a material that has a wide use, in view of this, the use of alternative materials in its composition is an opportunity to improve the properties of concrete and, in some cases, the destination of materials that would be discarded, an example is the steel chip, which is a material with a high power of pollution to the environment and its possible use in concrete, reduces the effects caused by it in the environment. From this, this work had as a premise the comparison of the dimensioning of an industrial floor with the addition of steel chip in arc and steel chip in tubular replacing steel fiber, based on the physical and mechanical properties obtained through laboratory tests, and also evaluate the feasibility of using this material in concrete and thus investigate a new destination aimed at sustainability by reducing its aggression to the environment. The analysis of the physical and mechanical properties of the concrete was carried out based on the slump test, the compressive strength and the tensile strength in bending, obtaining a reduction in the workability of the concrete with the use of tubular steel chips, while the arched steel chips obtained significantly higher workability compared to steel fiber. Regarding the compressive strength, it obtained an increase in this resistance with the use of both types of steel chips in comparison with the steel fiber, while for the tensile strength in bending, the arched steel chip did not behave as a fibrous material in the concrete not presenting residual resistance from this test, on the other hand, the tubular steel chip acted as a fibrous material in the concrete and had residual resistance, but this resistance was relatively lower than the concrete with the addition of steel fibers. From these results, an industrial floor was designed with the use of concrete reinforced with steel fibers and tubular steel chips, thus obtaining that the use of tubular steel chips reduced the thickness of the industrial floor, and increased the spacing between the expansion joints compared to design using steel fiber concrete.

Keywords: concrete; steel fiber; steel chip; industrial floor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação das fibras de aço	17
Figura 2 – Componentes principais de pisos industriais	31
Figura 3 - Relação espessura do piso x espaçamento das juntas.....	46
Figura 4 - Disposição do ensaio	53
Figura 5 - Diagrama típico de carga x CMOD para concreto com fibras de aço	65
Fotografia 1 - Fibra de aço.....	48
Fotografia 2 - Cavaco tubular	49
Fotografia 3 - Cavaco em arco	49
Fotografia 4 - Entalhe do corpo de prova prismático	53
Fotografia 5 - Máquina universal de ensaio EMIC	54
Fotografia 6 - Formação de ouriço no concreto com cavaco tubular	58
Fotografia 7 - Dispersão do cavaco tubular.....	58
Fotografia 8 - Dispersão das fibras de aço	59
Fotografia 9 - Dispersão do cavaco em arco	59
Fotografia 10 - Abatimento do tronco de cone com a fibra de aço.....	61
Fotografia 11 - Abatimento do tronco de cone com o cavaco em arco.....	61
Fotografia 12 - Abatimento do tronco de cone com o cavaco tubular	61
Fotografia 13 - Ruptura do concreto com fibra de aço	71
Fotografia 14 - Ruptura do concreto com cavaco tubular	71
Fotografia 15 - Ruptura do cavaco em arco.....	72
Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo	56
Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo	57
Gráfico 3 - Comparação da resistência à compressão do concreto com fibras de aço, cavaco em arco e cavaco tubular	63
Gráfico 4 - Curvas carga x deslocamento vertical do concreto com fibras de aço	64
Gráfico 5 - Curvas carga x CMOD do concreto com fibras de aço	64
Gráfico 6 - Curvas carga x deslocamento vertical do concreto com cavaco em arco.....	66
Gráfico 7 - Curvas carga x CMOD do concreto com cavaco em arco	66
Gráfico 8 - Curvas carga x deslocamento vertical do concreto com cavaco tubular	68
Gráfico 9 - Curvas carga x CMOD do concreto com cavaco tubular	68
Gráfico 10 - Comparativo curvas carga x deslocamento vertical do concreto com fibras de aço, cavaco em arco e cavaco tubular	69
Gráfico 11 - Comparativo curvas carga x CMOD do concreto com fibras de aço, cavaco em arco e cavaco tubular	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tolerâncias para comprimento e diâmetro das fibras	18
Tabela 2 - Consumo de materiais	50
Tabela 3 - Caracterização dos materiais	57
Tabela 4 - Comparação da redução do abatimento com a adição de fibra de aço, cavaco em arco e cavaco tubular	60
Tabela 5 - Comparação da resistência à compressão por idade	62
Tabela 6 – Limite de proporcionalidade e resistência residual à tração na flexão do concreto com fibra de aço	65
Tabela 7 - Limite de proporcionalidade do concreto com cavaco em arco	67
Tabela 8 – Limite de proporcionalidade e resistência residual à tração na flexão do concreto com cavaco tubular	69
Tabela 9 - Fatores de redução das forças e fatores de segurança parciais para as cargas em conformidade com a ACI 318-08 (2008)	72
Tabela 10 - Cargas aplicadas no piso industrial dimensionado	73
Tabela 11 - Determinação do fator de resistência residual do concreto com fibra de aço	73
Tabela 12 - Determinação do fator de resistência residual do concreto com cavaco tubular	73
Tabela 13 - Dados adotados do solo e do concreto	74
Tabela 14 – Pré-dimensionamento do piso industrial com fibra de aço à flexão e a punção	75
Tabela 15 - Pré-dimensionamento do piso industrial com fibra de aço para cargas uniformemente e linearmente distribuídas	75
Tabela 16 – Pré-dimensionamento do piso industrial com cavaco tubular à flexão e a punção	75
Tabela 17 – Pré-dimensionamento do piso industrial com cavaco tubular para cargas uniformemente e linearmente distribuídas	76
Tabela 18 – Dimensionamento do piso industrial com fibra de aço à flexão e a punção	76
Tabela 19 – Dimensionamento do piso industrial com fibra de aço para cargas uniformemente e linearmente distribuídas	77
Tabela 20 – Dimensionamento do piso industrial com cavaco tubular à flexão e a punção	77
Tabela 21 – Dimensionamento do piso industrial com cavaco tubular para cargas uniformemente e linearmente distribuídas	77
Tabela 22 - Espaçamento recomendado entre as juntas	77

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_{fibra}	Fator de forma
l_f	Comprimento da fibra
d_f	Diâmetro da fibra
$R_{e,3}$	Fator de resistência residual
T_{150}^D	Área abaixo da curva carga versus deformação de 0 até L/150
L	Comprimento do vão do ensaio de resistência à tração na flexão
f_1	Carga máxima do primeiro pico
b	Largura do corpo de prova prismático
d	Altura do corpo de prova prismático
M_p	Capacidade do momento positivo do piso
f_r	Módulo de ruptura do concreto
h	Espessura do piso
M_n	Capacidade de momento negativo do piso
f'_c	Resistência característica à compressão do concreto
P_{ult}	Carga última necessária
ϕ	Fator de redução da resistência
P_0	Capacidade de carga última do piso
γ_F	Fator de segurança parcial para a carga
P	Valor da carga atuante
α	Porcentagem de transferência de carga no canto do piso
a	Raio equivalente da área de contato da carga
L	Raio de rigidez relativo
A_p	Área da base da carga
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
μ	Coefficiente de Poisson
k	Módulo de reação do subleito
P_p	Capacidade de carga do piso em puncionamento
V_n	Resistência ao cisalhamento nominal
V_f	Aumento da resistência ao cisalhamento fornecido pelas fibras
V_c	Resistência nominal ao cisalhamento fornecido pelo concreto
V_s	Resistência ao cisalhamento nominal fornecido pela armadura de cisalhamento
β	Razão entre o maior e menor lado da área de aplicação da carga atuante
b_0	Comprimento do perímetro a uma distância $d/2$ da área carregada
d_{piso}	Altura efetiva do piso
α_s	Constante para calcular a resistência nominal ao cisalhamento fornecido pelo concreto
v_f	Aumento da tensão ao cisalhamento fornecido pelas fibras
x	Dimensão da aplicação da carga no eixo x
y	Dimensão da aplicação da carga no eixo y
$P_{d,lin}$	Carga linear última a ser resistida pelo piso por unidade de comprimento
$P_{u,lin}$	Capacidade do piso sob a ação de uma carga linear por unidade de comprimento
P_{lin}	Carga linear por unidade de comprimento atuante
d_e	Distância de aplicação da carga até a borda ou a junta

λ	Característica do sistema
q_d	Carga uniformemente distribuída última a ser resistida pelo piso
q_u	Capacidade de carga do piso por unidade de área
q	Carga uniformemente distribuída aplicada
q_{u1}	Primeiro caso para a capacidade de carga do piso por unidade de área
q_{u2}	Segundo caso para a capacidade de carga do piso por unidade de área
δ	Deslocamento vertical
CMOD	Medida linear da abertura do entalhe do corpo de prova prismático
f_L	Limite de proporcionalidade
F_L	Carga correspondente ao limite de proporcionalidade
l	Comprimento do vão do ensaio de resistência à tração na flexão
h_{sp}	Distância entre o topo do corpo de prova prismático e o topo do entalhe
$f_{R,i}$	Resistência residual à tração na flexão correspondente ao CMOD = CMOD _{<i>i</i>}
F_i	Carga correspondente ao CMOD = CMOD _{<i>i</i>}

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo geral.....	14
1.2	Objetivos específicos.....	14
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Concreto reforçado com fibras de aço	15
2.1.1	Classificação das fibras de aço	15
2.1.2	Interação fibra-matriz.....	18
2.1.3	Módulo de elasticidade.....	19
2.1.4	Tenacidade.....	20
2.1.5	Resistência do concreto reforçado com fibras.....	20
2.1.6	Fadiga	21
2.1.7	Trabalhabilidade	22
2.1.8	Fator de forma e comprimento crítico.....	23
2.1.9	Distribuição das fibras e formação de ouriços	25
2.1.10	Oxidação das fibras de aço	26
2.1.11	Aplicações do concreto reforçado com fibras	27
2.2	Concreto reforçado com materiais alternativos	28
2.2.1	Concreto reforçado com cavaco.....	29
2.3	Piso industrial.....	30
2.3.1	Composição estrutural.....	31
2.3.2	Piso industrial com adição de fibras de aço	33
2.3.3	Juntas e barras de transferência de carga	34
2.3.4	Especificações da dosagem do concreto reforçado com fibras para pisos industriais	36
2.3.5	Cargas atuantes em pisos industriais.....	36
2.4	Dimensionamento de piso industrial reforçado com fibras	37
2.4.1	Capacidade do momento positivo e negativo do piso	37
2.4.2	Verificação quanto à flexão	38
2.4.3	Verificação quanto ao puncionamento	40
2.4.4	Verificação quanto a carga linear	43
2.4.5	Verificação quanto a carga uniformemente distribuída.....	44
2.4.6	Espaçamento entre as juntas	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47

3.1	Caracterização dos materiais	47
3.1.1	Cimento	47
3.1.2	Agregado miúdo	47
3.1.3	Agregado graúdo.....	47
3.1.4	Fibras de aço.....	47
3.1.5	Cavacos metálicos	48
3.1.6	Comparação geométrica das fibras de aço com os cavacos metálicos	49
3.2	Dosagem do concreto.....	50
3.3	Processo de mistura	50
3.4	Ensaio laboratoriais	51
3.4.1	Consistência pelo abatimento do tronco de cone	51
3.4.2	Resistência à compressão	51
3.4.3	Resistência à tração na flexão.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1	Caracterização dos materiais	56
4.2	Dispersão do material fibroso no concreto	58
4.3	Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone	59
4.4	Ensaio de resistência à compressão.....	62
4.5	Ensaio de resistência à tração na flexão.....	63
4.6	Dimensionamento de piso industrial com fibra de aço e cavaco	
tubular	72	
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
	REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

O concreto é considerado como um material frágil mesmo ainda que possua uma pequena plasticidade aparente. A presença de microfissuras na interface entre a pasta de cimento e o agregado graúdo podem ocorrer em decorrência da desigual variação de volume do agregado e da pasta de cimento que decorre da retração, essas fissuras não alteram de tamanho e se mantêm estáveis com tensões de até cerca de 30% da resistência última do concreto, a partir desta tensão ocorre a propagação das microfissuras, aumentando o seu tamanho. A presença de fissuras também pode ser causada por variações de temperaturas e pela aplicação de tensões, devendo ser evitadas, pois as mesmas prejudicam a durabilidade (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Em decorrência da fragilidade do concreto é realizado o emprego de fibras. As fibras reforçando concreto podem ser definidas como descontínuas e são distribuídas de forma aleatória em toda a matriz de concreto, sendo que, as principais fibras disponíveis para uso comercial são as fibras de aço, vidro, sintéticas e naturais (ACI COMMITTEE, 1996 apud SARZALEJO *et al.*, 2008). Neste sentido, uma vez que o concreto possui baixa resistência à tração, a combinação de fibras de aço e concreto pode proporcionar uma saída econômica e útil para determinadas estruturas em substituição às barras de aço usualmente utilizadas em concreto armado convencionalmente, sobretudo para aquelas estruturas submetidas a esforços de tração, como, por exemplo, em pavimentos, visto que a aplicação de fibras proporciona melhorias na capacidade de absorver energia após fissuras, na resistência ao impacto e na resistência à fadiga na flexão (ACI COMMITTEE, 1996).

Embora o concreto seja um material frágil o seu consumo é da ordem de 11 bilhões de toneladas métricas por ano, sua ampla utilização é em decorrência da sua resistência à água, em comparação com outros materiais da construção civil como a madeira e o aço comum, em que a resistência à água do concreto é consideravelmente superior, além disso, a sua utilização ocorre pela sua facilidade de conseguir realizar estruturas com diferentes tamanhos e formas, ademais, o seu custo geralmente é mais barato em comparação com os outros materiais e dispõem de uma grande disponibilidade de utilização (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Além disso, a busca por materiais alternativos como adição no concreto vem se fazendo presente, alguns exemplos de adições são os resíduos cerâmicos moídos,

borracha de pneu usado e resíduos de construção e demolição. Deste modo, no que tange as fibras um possível material alternativo é a utilização do cavaco metálico, sua possível utilização como material fibroso é em decorrência das suas possíveis características geométricas de acordo com a sua classificação. Estes podem ser classificados como contínuos, descontínuos ou segmentados. Sendo este, um resíduo decorrente da usinagem, em que conforme é gerado uma nova superfície em uma peça em decorrência da retirada de material, este material retirado é denominado de cavaco (MACHADO *et al.*, 2009).

Além das aplicações técnicas a utilização do cavaco também possui relevância ambiental, pois utilizaria resíduos da indústria metalmeccânica que possuem um alto nível de contaminação do meio ambiente, encontrando uma aplicação que possibilite uma destinação final deste resíduo, reduzindo os impactos ambientais causados por esse rejeito e diminuindo o custo de fabricação de obras que utilizam o concreto reforçado com fibras de aço.

1.1 Objetivo geral

Este trabalho possui como o seu objetivo, comparar o dimensionamento de um pavimento industrial de concreto com adição de cavaco metálico do tipo em arco e tubular em substituição a fibra de aço, a partir de resultados obtidos mediante ensaios laboratoriais.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão citados abaixo, sendo eles:

- Comparar as propriedades física e mecânicas do concreto com adição de dois tipos diferentes de resíduos de usinagem do tipo cavaco em confronto com a adição de fibra metálica;
- Avaliar a viabilidade da utilização de cavaco metálico em arco e tubular em pavimentos industriais baseado no seu comportamento como material fibroso no concreto;
- Analisar uma nova destinação do resíduo de usinagem do tipo cavaco visando a sustentabilidade e a redução da agressão do mesmo ao meio ambiente.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Concreto reforçado com fibras de aço

O concreto reforçado com fibras de aço é definido como sendo um concreto produzido com cimento hidráulico, agregado miúdo (ou agregado miúdo e graúdo), e fibras de aço contínuas e discretas (ACI 544.1R, 2002). Ainda, segundo Rai e Joshi (2014), o concreto reforçado com fibras de aço pode ser definido como um concreto produzido com cimento em que é incorporado fibras de aço, que se distribuem de forma uniforme na matriz cimentícia. Em que a melhoria provocada pelas fibras decorre de diversos fatores, como, por exemplo, a geometria e o fator de forma da fibra, a mistura do concreto e o teor de adição das fibras. Contudo, conforme a ACI 544.1R (2002), as propriedades no estado fresco do concreto com adição de fibras são alteradas devido ao fator de forma e da geometria da fibra, da sua porcentagem de adição e da ligação fibra-matriz. Entretanto, segundo Leite (2018), as principais propriedades alteradas pela incorporação de fibras é a melhoria na resistência mecânica e no seu módulo de elasticidade. Conforme Villares (2001), no estado fresco o concreto reforçado com fibras se difere do concreto normal, pela diminuição de episódios de exsudação, aumento da resistência interna e da coesão da matriz, em oposição, no estado endurecido, aperfeiçoam as propriedades relacionadas as fissuras.

Além disso, de acordo com a ABNT NBR 15530:2019, a utilização das fibras de aço como reforço do concreto é em virtude de estes possuírem um semelhante coeficiente de dilatação térmica, e do módulo de Young das fibras de aço serem no mínimo 5 vezes maior que o do concreto, e, além disso, as fibras de aço-carbono regulares apresentam deformações somente com temperaturas acima de 370° C. Além do mais, a adição de fibras no concreto, podem melhorar significativamente na realização de manutenção da estrutura, em que, a utilização das fibras aumenta a sua integridade ao longo da sua vida útil. Porém, a sua utilização implica em um maior teor de cimento e agregado miúdo, e a sua trabalhabilidade diminui conforme o teor de fibras aumenta (ACI 544.1R, 2002).

2.1.1 Classificação das fibras de aço

As fibras são caracterizadas por serem elementos descontínuos, e possuem comprimento bem maior que as dimensões da sua seção transversal, de forma que o

seu comprimento pode variar de 25mm até 60mm, consideradas fibras curtas e fibras longas respectivamente (FIGUEIREDO, 2005). E também são pequenas o suficiente para serem dispersas aleatoriamente no concreto não endurecido por meio de métodos de mistura usuais (ACI 544.1R, 2002).

A ABNT NBR 15530:2019 nomeada “Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio” dispõe sobre a classificação e especificações das fibras de aço. Estas podem ser classificadas em cinco grupos conforme o material utilizado para a sua produção:

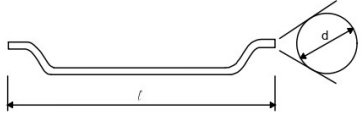
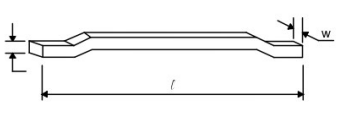
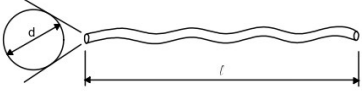
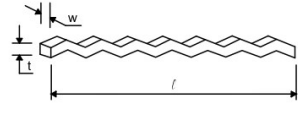
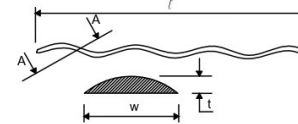
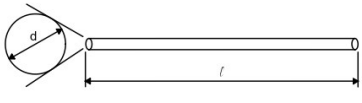
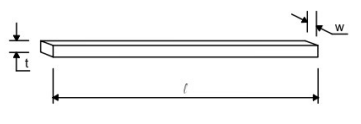
- Grupo I: arames trefilados a frio
- Grupo II: chapas cortadas
- Grupo III: arames trefilados e escarificados (*shaved*)
- Grupo IV: fibras produzidas por fusão (*melt extracted*)
- Grupo V: usinadas a partir de blocos de aço

Ademais, podem, juntamente com base no material utilizado na sua fabricação, ser classificadas de acordo com o perfil da fibra, sendo três tipos:

- Tipo A: com ancoragem nas extremidades
- Tipo C: com ondulações no corpo (corrugada)
- Tipo R: reta sem ancoragens

Esta classificação também pode ser verificada de acordo com a Figura 1.

Figura 1 - Classificação das fibras de aço

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: Adaptação ABNT NBR 15530 (2019)

As fibras de aço podem, também, ser classificadas de acordo com a forma geométrica (retas ou deformadas) e a existência de revestimento e sua especificação se houver. E também com base no teor de carbono do aço que compõe a fibra:

- Baixo teor de carbono (no máximo 0,30% de carbono);
- Médio teor de carbono (0,30% a 0,60% de carbono);
- Alto teor de carbono (0,60% a 1,00% de carbono).

Existe, também, a classificação de acordo com as tolerâncias de comprimento e diâmetro da fibra apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Tolerâncias para comprimento e diâmetro das fibras

Propriedade	Intervalo	Desvio do valor individual em relação ao valor declarado			Desvio da média em relação ao valor declarado		
		Classe A	Classe B	Classe C	Classe A	Classe B	Classe C
Comprimento e comprimento desenvolvido / (ou l_d)	>30 mm	±3 mm	±3 mm	±10 %	±5 %		
	≤30 mm	±10 %	±10 %		±1,5 mm		
Diâmetro (equivalente) d	>0,30 mm	±0,02 mm	±5 %	±10 %	±0,015 mm	±5 %	±5 %
	≤0,30 mm					±0,015 mm	±0,015 mm
Comprimento / diâmetro λ	-	±15 %			±7,5 %		

Fonte: Adaptação ABNT NBR 15530 (2019)

2.1.2 Interação fibra-matriz

Como dito anteriormente, o concreto é um material frágil, portanto, com a adição de fibras que apresentam resistência e módulo de elasticidade apropriado e em teores adequados, essa característica frágil do concreto é alterada, pois as fibras atuam como ponte de transferência das tensões entre as fissuras, o que ocasiona uma redução na velocidade de propagação das mesmas e alterando o comportamento frágil do concreto para um comportamento pseudo-dúctil, além de resultar na menor fissuração do concreto (FIGUEIREDO, 2005). Além de que, com a diminuição da propagação das fissuras e também pelo aumento da tenacidade devido a transmissão das tensões pelas fissuras, a resistência à tração do concreto aumenta (NEVILLE; BROOKS, 2013).

As fibras realizam reforço em nível macro, pois reduzem a propagação de fissuras, aumentando assim, a absorção de energia do concreto, além disso, realizam o reforço em nível micro, uma vez que, impedem a propagação de microfissuras, aumentando assim a resistência a compressão. Além do mais, o desenvolvimento de microfissuras pode ser impedido pela alta rigidez da fibra e fixação da fibra na matriz, em que com uma maior adição de fibras a probabilidade de uma microfissura ser interceptada por uma fibra aumenta. (NEVES; ALMEIDA, 2005).

A ligação da fibra com a matriz, ou seja, a resistência ao arrancamento das fibras na matriz advém do formato da fibra, no qual fibras com perfil ondulado, que possuem ancoragem ou que apresentam deformações, possuem uma maior resistência ao arrancamento, e, por conseguinte, a quantidade de adição dessas fibras é menor se comparado com fibras retas para que resultem na mesma melhoria de resistência e ductilidade (ACI 544.1R, 2002). Outro fator que modifica a aderência da

fibra-matriz é o comprimento da fibra, de forma que, com o aumento da fibra a área superficial do contato fibra-matriz também aumenta, sendo necessário maior força para o seu arrancamento decorrente da maior superfície de ancoragem (VILLARES, 2001).

Ademais, a ruptura do concreto reforçado com fibras pode ocorrer pelo arrancamento das fibras, que possui a característica de ser uma falha gradual, ou pela ruptura das fibras por tração, resultando em falhas rápidas e catastróficas (MALETESTA; CONTERAS, 2009). Em vista disso, o concreto reforçado com fibras deve ser projetado e executado com o propósito de que, caso ocorra a falha da estrutura, a ruptura seja por arrancamento das fibras.

2.1.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é definido como a razão entre a tensão e a deformação reversível. Em que, quanto menor o módulo de elasticidade, a tensão de tração elástica induzida para uma determinada retração também será menor. Sendo que, este parâmetro do concreto é alterado devido a porosidade, módulo de elasticidade e volume de adição dos agregados utilizados, da porosidade e do módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento, da porosidade e composição da zona de transição e os parâmetros de ensaios utilizados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O módulo de elasticidade e a resistência mecânica da fibra advém do seu material constituinte, influenciando assim, na sua capacidade de reforço ao concreto. As fibras podem ser classificadas como fibras de alto ou baixo módulo de elasticidade, em que, fibras com módulo de elasticidade superior ao do concreto endurecido são classificadas como fibras de alto módulo, e fibras com módulo de elasticidade inferior são classificadas como fibras de baixo módulo (FIGUEIREDO, 2005). Ademais, as fibras de aço são classificadas como fibras de alto módulo de elasticidade, portanto, elas realizam o reforço primário do concreto e não concedem o simples controle de fissuração (FIGUEIREDO, 2000). Além do mais, se a fibra é classificada como uma fibra de baixo módulo de elasticidade e possui uma baixa resistência, essa só será eficaz nas ocasiões em que o concreto também possui baixa resistência e módulo de elasticidade, sendo assim, eficaz somente quando o concreto está no estado fresco e no início do estado endurecido (FUGUEIREDO, 2005).

Contudo, de acordo com a ACI 544.1R (2002), no caso de adições de fibras com porcentagem, em volume, inferior a 2%, o módulo de elasticidade do concreto

reforçado com fibras é considerado igual a um concreto semelhante sem a adição de fibras.

2.1.4 Tenacidade

A tenacidade em concretos reforçados com fibras é definida como a área sob a curva carga por deslocamento do corpo de prova, sendo assim, o trabalho dissipado no material de acordo com um determinado deslocamento (FIGUEIREDO, 2005). Contudo, segundo Balbo (2009), a tenacidade é a energia necessária para o rompimento do material, isto significa o produto da força aplicada pelo deslocamento até o ponto de ruptura. Sendo essa característica, uma das que mais se diferenciava de um concreto com a adição de fibras de aço de um concreto sem a adição (ACI 544.1R, 2002). Essa diferenciação, é devido as fibras atuarem como pontes de transferência de tensões nas fissuras, ou seja, para que a fissura continue se propagando a fibra deverá ser rompida ou arrancada da matriz, o que emprega mais energia para a fissura se propague (VILLARES, 2001).

Existem diversas técnicas para se determinar a tenacidade do concreto, sendo a principal, para concretos reforçados com fibras, o carregamento por flexão, devido a sua similaridade com as tensões atuantes na maior parte das suas aplicações. No entanto, pode-se utilizar os valores obtidos a partir da flexão lenta, em que estes são valores de limite inferior, sendo seguro para a utilização em projetos (ACI 544.1R, 2002).

Para que as fibras consigam aperfeiçoar a tenacidade do concreto, o seu comprimento deve ser 2,5 vezes maior que o diâmetro máximo do agregado, uma vez que a fibra será capaz de assegurar a ancoragem entre dois agregados (BALBO, 2009).

2.1.5 Resistência do concreto reforçado com fibras

Segundo Figueiredo (2005), a adição de fibras ao concreto aumenta a resistência à tração, e não possui o intuito de aumentar a resistência à compressão, contudo a sua aplicação melhora a tenacidade na compressão do concreto, em consequência da transferência de tensões nas fissuras provocadas pelas fibras. No entanto, de acordo com a ACI 544.1R (2002), a resistência a compressão do concreto apresenta aumento de 0 a 15% em adições de até 1,5% do volume de fibras. Em

contrapartida, de acordo com Rai e Joshi (2014), para teores inferiores que 1% em volume seus efeitos sobre a resistência à compressão e à tração são desprezíveis. Idem, conforme Sarzalejo *et al.* (2008), para incrementos menores que 1,5% em volume, a resistência à compressão não é modificada consideravelmente. Além do mais, para adições de fibras menores que 2% em volume o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade não apresentam modificações significantes (SARZALEJO *et al.*, 2008).

Enquanto, segundo a ACI 544.1R (2002), em relação a resistência à tração direta, o concreto reforçado com fibras de aço, apresenta um aumento de 30 a 40% em adições de até 1,5% do volume de fibras. Esse acréscimo da resistência à tração é em função da propagação das fissuras serem tardadas e pelo incremento da tenacidade do compósito aumentando a deformação depois da tensão de piso (NEVILLE; BROOKS, 2013). No estudo de Rai e Joshi (2014), comparando o concreto reforçado com fibras de aço com o concreto convencional, além de melhorar a resistência à compressão e à tração, a incorporação de fibras melhora a resistência à flexão em até 3 vezes, melhora também a resistência à fadiga, ao impacto, desgaste, permeabilidade e a fissuração.

Outra propriedade que merece atenção é a resistência à abrasão, principalmente, quando se trata de estruturas na qual a superfície está submetida a movimentação de cargas (BAUER, 2008). Conforme Bauer (2008), usualmente a resistência à abrasão aumenta de acordo com o aumento da resistência à compressão. No entanto, De acordo com Sarzalejo *et al.* (2008), a melhoria obtida na resistência à abrasão pela adição de fibras no concreto não é de fácil demonstração.

2.1.6 Fadiga

A fadiga é a ruptura de um material em decorrência de esforços cíclicos. A ruptura ocorre, pois, a cada carregamento as fissuras tendem a se propagar, diminuindo a área de transferência de tensões (FIGUEIREDO, 2005). Além disso, o material pode falhar por fadiga resultante de tensão aplicada por tração direta, compressão, flexão, torção ou pela associação destas (RAI; JOSHI, 2014).

A quantidade de ciclos necessários para que ocorra a ruptura do material depende da tensão do esforço cíclico, no qual, quanto maior o esforço cíclico estiver próximo da tensão de rompimento do material, menor será a quantidade de ciclos até a sua falha. Em oposição, a utilização de fibras aumenta a quantidade de ciclos

necessários para a falha do material, ou seja, a adição de fibras no concreto resulta na melhoria da resistência à fadiga, sendo este uma das principais diferenças em comparação com o concreto convencional. Essa melhoria advém da capacidade das fibras de reduzir a propagação de fissuras no concreto, portanto, aumentam a quantidade de ciclos necessários para a ruptura do concreto por fadiga (FIGUEIREDO, 2005). Ademais, a melhoria da resistência à fadiga em relação à sua resistência à flexão, pode depender do tipo de fibra e da sua porcentagem de adição (ACI 544.1R, 2002). Além disso, essa propriedade também depende da resistência à compressão do concreto, no qual, quanto menor a resistência à compressão menor será a resistência à fadiga (BALBO, 2009).

2.1.7 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a quantidade necessária de energia que é exigida para que o atrito interno entre as partículas do concreto seja vencido, e assim, alcance o adensamento total do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013). Isto é, a resistência interna da matriz ao movimento por ação da gravidade (BALBO, 2009). Para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço, deve-se garantir a sua trabalhabilidade, de modo que seja possível a sua colocação, consolidação e acabamento, de maneira a assegurar uma distribuição uniforme das fibras e sem a ocorrência de segregação do compósito (ACI 544.1R, 2002). Porém a trabalhabilidade do concreto é afetada pela adição de fibras, que alteram a consistência e a mobilidade da mistura. As fibras no concreto restringem a mobilidade principalmente dos agregados graúdos, dificultando a fluidez da mistura e diminuindo a trabalhabilidade. Os fatores que interferem nessa propriedade é a geometria da fibra, o teor de adição, e o material que compõem a fibra (FIGUEIREDO, 2005).

A trabalhabilidade é uma propriedade que é composta principalmente pela consistência e coesão do concreto, no qual a consistência refere-se à facilidade do fluxo do concreto, e a coesão refere-se à estabilidade do mesmo, sem sofrer segregação e exsudação. Esta é uma característica importante a ser considerada na dosagem do concreto, e é definida dependendo da aplicação do concreto, do seu método de colocação, compactação e do acabamento. No qual, concretos com consistência muito altas possuem a tendência de sofrer segregação e exsudação, e dificultam a execução de acabamento do mesmo, em oposição, o concreto com baixa

consistência são mais difíceis de serem colocados e compactados, além do agregado gráudo sofrer segregação no momento da execução (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No entanto, como a trabalhabilidade é usualmente dada pela medida da consistência do concreto no seu estado fresco, é necessário considerar que o seu valor sofre alterações, alguns exemplos são no processo de transporte do concreto, na elevada temperatura climática no dia de execução, e na utilização de aditivos e adições no concreto, como o emprego de fibras no mesmo (BALBO, 2009). Nas condições de concretos com baixa relação de água/cimento, a utilização de aditivos possui o papel de preservar a trabalhabilidade e garantir um acabamento apropriado. O mesmo pode ser utilizado em concretos com fibras, moderando assim a sua trabalhabilidade, em que as especificações para sua utilização são as mesmas que para um concreto comum (SARZALEJO *et al.*, 2008).

2.1.8 Fator de forma e comprimento crítico

O fator de forma (λ_{fibra}), é um parâmetro obtido pela divisão do comprimento da fibra pelo seu diâmetro para fibras com seção transversal circular, ou pelo diâmetro correspondente a área da seção transversal da fibra, conforme a Equação 1.

$$\lambda_{fibra} = \frac{l_f}{d_f} \quad (1)$$

Onde:

λ_{fibra} é o fator de forma;

l_f é o comprimento da fibra;

d_f é o diâmetro da fibra.

Portanto, com o aumento do comprimento da fibra ou com a redução da seção transversal, o valor do fator de forma consequentemente será maior. Este parâmetro é utilizado pois a geometria da fibra altera o desempenho do concreto após a sua fissuração, no qual, fibras com um maior fator de forma possuem uma maior capacidade resistente após a fissuração do concreto (FIGUEIREDO, 2005). Além disso, o fator de forma é a principal característica geométrica da fibra que altera o comportamento do concreto reforçado com fibras, uma vez que influi na ductilidade e na tenacidade do concreto (SARZALEJO *et al.*, 2008).

Ademais, as fibras podem ser classificadas de acordo com o seu tamanho, sendo fibras longas ou curtas, e o seu comprimento geralmente varia de 10mm até 60mm (THE CONCRETE SOCIETY, 2007). Entretanto, segundo a ACI 544.1R (2002), normalmente o comprimento das fibras ultrapassam 3in (76mm). De acordo com Balbo (2009), as fibras podem ser classificadas conforme o seu fator de forma, no qual, fibras com fator de forma inferior a 50 são especificadas como baixo fator de forma, enquanto com fator de forma maior do que 70 é especificado como alto, para fibras com fator de forma que não se enquadram são consideradas como intermediário.

Para a utilização das fibras no concreto, deve ser analisado o seu comprimento, verificando a sua compatibilidade dimensional, de modo que as fibras desempenhem o reforço de toda a matriz do concreto, e não somente o reforço da argamassa deste concreto. Efetuando assim o reforço do concreto em relação as fraturas, que se propagam preferencialmente na interface do agregado graúdo e da pasta de concreto (FIGUEIREDO, 2005). Apesar disso, segundo Neville e Brooks (2013), para o melhor desempenho do concreto, as fibras devem possuir comprimento maior que a dimensão máxima dos agregados utilizados. Contudo, Maidl (1991), recomenda que as fibras a serem utilizadas apresentem comprimento igual ou superior a dimensão máxima característica dos agregados utilizados na fabricação do concreto. Ainda assim, segundo Figueiredo (2005), para a aplicação do concreto reforçado com fibras em pavimentos, é possível a utilização de fibras com maiores comprimentos, de até 60 mm, em decorrência da utilização de agregados com maiores dimensões.

Além disso, as fibras possuem um comprimento crítico para a sua utilização no concreto. Este valor está relacionado com a tensão entre a matriz e fibra, no qual essa tensão é máxima no momento em que a fibra está sujeita a uma tensão de mesma grandeza que a tensão de cisalhamento existente entre essa e a matriz (FIGUEIREDO, 2005). Onde, se o comprimento da fibra for menor que o comprimento crítico, a fibra será arrancada da matriz em decorrência da falha de aderência, entretanto, se o comprimento for superior ao comprimento crítico, a fibra será rompida por tração (NEVILLE; BROOKS, 2013). Sendo assim, a utilização de fibras com excessivo comprimento não beneficiará o aumento da resistência pós fissuração, pois seu comprimento será maior que o comprimento crítico (FIGUEIREDO, 2005).

2.1.9 Distribuição das fibras e formação de ouriços

Em oposição ao concreto armado convencional que possui sua armadura concentrada em uma localização específica, as fibras se distribuem de maneira aleatória e em toda a matriz, realizando o reforço de todo o concreto e conseguindo redistribuir os esforços que não são aplicados em uma área específica (FIGUEIREDO, 2005).

A orientação em que as fibras estão no concreto influencia o seu desempenho, no qual o desempenho máximo é desenvolvido quando as fibras estão orientadas unidirecionalmente e paralelamente à tensão de tração que é aplicada, sendo assim, o desempenho não é máximo quando as fibras estão distribuídas com direções aleatórias nas três dimensões (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A mistura do concreto reforçado com fibra deve ser elaborada, de tal forma, que garanta a distribuição uniforme das fibras em toda a matriz, sem a ocorrência de empelotamento ou segregação, sendo assim, pode ser utilizado métodos convencionais de mistura, entretanto, a sua ordem de execução deve levar em consideração a utilização das fibras e as suas propriedades (NEVILLE; BROOKS, 2013). Este empelotamento das fibras são os chamados ouriços, ou seja, são bolas formadas pelo agrupamento das fibras, este problema causa no concreto uma diminuição do teor de fibras que está distribuída no restante do concreto, além de que, na região em que se localiza o ouriço se torna um local frágil em decorrência da grande porosidade existente (FIGUEIREDO, 2005). Contudo, a formação de ouriços não é dada apenas em formato de bola, podendo ser também no formado de tapete. E o seu desenvolvimento decorre do emprego de fibras longas e finas, que possuem um fator de forma maior do que 100 (ACI 544.1R, 2002).

Segundo Figueiredo (2005), a formação dos ouriços está correlacionada com a dificuldade que a fibra apresenta na sua dispersão na matriz quando a sua mistura é realizada de maneira inadequada. No entanto, alguns fatores intensificam a ocorrência dessa patologia, entre elas, podemos citar o lançamento da fibra no concreto, em que, deve ser adicionada gradativamente e em conjunto com os agregados antes da incorporação do cimento, além disso, a utilização de fibras de aço que são disponibilizadas coladas em pentes diminuem o aparecimento de ouriços. As fibras podem, também, ser adicionadas no caminhão betoneira com a mistura devidamente pronta, devendo neste caso realizar o controle do abatimento antes e

após a adição das fibras (SARZALEJO *et al.*, 2008). Uma maneira de reduzir a manifestação de ouriços é o emprego de fibras coladas que são dispersas gradativamente na matriz, a partir da diluição da cola em água, à vista disso, esse mecanismo é dificultado em concretos que apresentam baixa relação água/cimento (SARZALEJO *et al.* 2008).

De acordo com a ACI 544.1R (2002), os principais fatores que influenciam a formação de ouriços das fibras são a sua forma de adição no concreto, seu fator de forma, a porcentagem em volume de adição de fibras e as características do agregado utilizado. Outro fator que influencia é o tempo de mistura do concreto, quanto maior o tempo de mistura maior a tendência de formação de ouriços, além disso, as fibras devem ser adicionadas gradativamente na mistura não sendo adicionadas rapidamente e em um mesmo ponto da mistura, pois, pode ocasionar a formação de ouriços, em que, neste caso, são difíceis de se desfazerem (VILLARES, 2001).

Além da importância da correta adição das fibras no concreto para evitar a formação de ouriços, deve-se assegurar que neste processo que as fibras não sejam danificadas e assim afetem negativamente o seu reforço no concreto. Este cuidado com a adição das fibras é influenciado pela fragilidade da fibra a ser adicionada, devendo ser avaliado o melhor método de produção para que se obtenha o melhor resultado de reforço (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.1.10 Oxidação das fibras de aço

Não é possível assegurar um recobrimento mínimo para as fibras de aço em reforço ao concreto, verificando-se assim, a existência de fibras na superfície do concreto (FIGUIREDO, 2005). Sendo capaz de se verificar a corrosão das fibras de aço que estão próximas a superfície, como é o caso da aplicação de concreto reforçado com fibras de aço em pavimentos de concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

O emprego das fibras de aço no concreto resulta em uma proteção dessas fibras em decorrência do ambiente alcalino da matriz de cimento (ACI 544.1R, 2002). Entretanto, a oxidação das fibras está relacionada com a perda desta alcalinidade do concreto na superfície, por diversos fatores, como, por exemplo, chuvas ácidas, cloretos e carbonatação superficial do material. Apesar disso, o reduzido diâmetro das fibras não ocasiona rupturas no concreto pela baixa liberação de óxidos com a sua oxidação, garantindo a integridade do concreto sem a formação de fissuras, e conseqüentemente, protegendo as fibras no seu interior. Ademais, a propagação da

oxidação das fibras é condicionada pela dificuldade da existência de diferenças de potencial nas fibras em consequência das suas reduzidas dimensões (FIGUEIREDO, 2005). Essa limitação da corrosão superficial das fibras, aparentemente ocorre mesmo em situações na qual o concreto está altamente saturado com íons de cloreto. Além disso, a propagação também é dificultada pois as fibras são dispersas de forma aleatória no concreto, e em consequência do seu pequeno comprimento, as fibras esporadicamente se tocam, não formando assim, caminhos condutores dentro do concreto. Além do mais, essa propagação não parece ocorrer com profundidade maior do que 0,10 pol (2,5mm) abaixo da superfície do concreto (ACI 544.1R, 2002).

Além disso, o concreto é um elemento poroso e é preciso que o seu grau de permeabilidade seja conhecido, no qual este fator pode afetar a durabilidade do concreto em virtude de agentes agressivos, visto que os vazios são comumente interligados possibilitando a entrada de líquidos e gases, no qual quanto menor a permeabilidade do concreto menor será a ação desses agentes (BAUER, 2008).

Para os casos em que há a existência de fissuras no concreto, testes de laboratório mostram que em fissuras com largura inferiores à 0,1mm não ocorre a corrosão das fibras que atravessam a fissura. Enquanto que, em aberturas com mais de 0,1mm e que possuem uma profundidade limitada, a corrosão decorrida pode não ser significativa para a estrutura. Para aplicações em que se deseja obter menor oxidação das fibras e manchas na superfície do concreto, pode se realizar o emprego de outras fibras, como, por exemplo, fibras de aço inoxidável ou fibras de aço carbono galvanizado (ACI 544.1R, 2002). Ademais, para evitar um episódio de oxidação das fibras, as mesmas podem receber um revestimento superficial de zinco que prolongará a durabilidade em meios agressivos (SARZALEJO *et al.*, 2008).

2.1.11 Aplicações do concreto reforçado com fibras

Segundo Figueiredo (2011), o mercado brasileiro de fibras, atualmente, possui sua maior aplicação de fibras na fabricação de pisos industriais, em segundo lugar no concreto projetado, e em terceiro lugar nos pré-fabricados, sendo estas aplicações quase a totalidade da utilização das fibras. Além disso, a utilização das fibras se dá em baixo consumo e em estruturas contínuas. Entretanto, esse panorama brasileiro das fibras deve sofrer alterações no futuro, em decorrência da sua utilização em obras de saneamento e de sistemas de transporte de massa, porém, para que isso ocorra, necessitará de um avanço tecnológico. No entanto, de acordo com Rai e Joshi (2014),

a maior aplicação de concreto reforçado com fibras de aço é na execução de lajes, porém sua aplicação em outras estruturas está aumentando. Sendo que, as principais fibras empregues são a fibras metálicas, uma vez que, estas são as mais econômicas e eficazes, além da sua facilidade de incorporação no concreto (VILLARES, 2001).

Em virtude de o concreto reforçado com fibras de aço dispor de alta ductilidade, algumas das suas possíveis aplicações são em estruturas que precisam de resistência à terremotos, resistência à altas temperaturas, resistência à fadiga por impacto, resistência à tração e para controle da retração do concreto (RAI; JOSHI 2014). Ademais, segundo Sarzalejo *et al.* (2008) o concreto reforçado com fibras é recomendado para estruturas hiperestáticas, sendo capaz de aumentar a ductilidade e a capacidade total da estrutura.

Como tratado anteriormente, as fibras se distribuem de forma aleatória dentro do concreto realizando o reforço de toda a estrutura, sendo assim, uma ótima alternativa para estruturas contínuas, como pavimentos e revestimento de tuneis. Aliás, o seu emprego em pavimentos rígidos de concretos é em função da melhora da resistência à fadiga do concreto com a adição de fibras, uma vez que, os mesmos estão sujeitos a esforços cíclicos (FIGUEIREDO, 2005). Também podem ser empregados em pavimentos de aeroportos, pavimentos rodoviários, leito de pontes, dormentes e pisos industriais, em virtude de estes serem considerados placas apoiadas no solo que são submetidos a diversas cargas, na qual resistem à flexão, temperatura e retração (SAZALEJO *et al.*, 2009).

2.2 Concreto reforçado com materiais alternativos

O consumo de concreto é da ordem de 11 bilhões de toneladas métricas por ano (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Portanto, o emprego de qualquer tipo de concreto não deve ser descartado sem um estudo breve, especialmente na atualidade, que é imprescindível a evolução da reutilização de materiais reciclados, havendo abertura para a utilização de novos materiais reciclados no concreto (BALBO, 2009). Além disso, outra premissa para o emprego de materiais alternativos é o concreto ter um alto poder de encapsulamento de substâncias nocivas, possuir uma satisfatória resistência a agentes químicos e físicos, além de poder apresentar uma boa durabilidade (BANTHIA; CHAN, 2000).

2.2.1 Concreto reforçado com cavaco

O cavaco é produzido a partir da usinagem, que é o processo que possui a finalidade de dar forma à peça, nas dimensões e acabamento desejado, com base na retirada de excesso de material da peça. No qual, este material retirado é denominado cavaco (FERRARESI, 1977). Sendo que, cerca de 10% de toda produção de metais é transformado em cavaco (TRENT; WRIGHT, 2000).

O cavaco é produzido com altíssimas velocidades de deformação sucedido pela ruptura do material, onde, o processo para a sua formação é periódico, sendo composto por um ciclo de quatro etapas, sendo elas, a fase de recalque, de ruptura, de deslizamento e de saída do cavaco (MACHADO *et al.*, 2009).

Os cavacos podem ser considerados como contínuos, descontínuos ou segmentados, no qual a sua forma e tipo dependem do material da peça a ser usinada, de forma que, os cavacos contínuos são formados pela usinagem de materiais dúcteis, como, por exemplo, aços de baixa liga, alumínio e cobre, enquanto que os cavacos descontínuos são formados a partir de materiais frágeis, como bronze e ferros fundidos, em contrapartida, os cavacos segmentados são compostos por materiais que apresentam pobres propriedades térmicas (MACHADO *et al.*, 2009).

Além do mais, usualmente no processo de usinagem são empregues fluidos de corte, sendo que, o primeiro fluido a ser utilizado foi a água, porém este apresenta baixo poder lubrificante além de propiciar a oxidação, em razão disso, decorreu o uso de óleos, que dispõem de melhor ação lubrificante e reduz a geração de calor produzido no processo de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000).

Os fluidos de corte são utilizados na usinagem afim de lubrificar em baixar velocidades de cortes, refrigerar em altas velocidades de corte, remover os cavacos da zona de corte e proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a oxidação (MACHADO, *et al.*, 2009). No entanto, apesar de dispor de outras funções, os fluidos são empregues sobretudo na lubrificação e/ou refrigeração (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000). Estes fluidos são em sua maioria na forma líquida, que podem ser classificados como óleos, emulsões ou soluções (MACHADO *et al.*, 2009).

Embora isso, é muito difícil a não utilização dos fluidos de corte na usinagem (MACHADO *et al.*, 2009), devido a necessidade da sua utilização na maior parte dos processos (DIAS, 2000). Dessa maneira, estes fluidos são encontrados tanto na peça quanto nos cavacos após o processo de usinagem, além disso, o cavaco juntamente

com o fluido de corte são os principais agentes nocivos da indústria metalmeccânica, possuindo alto poder de poluição no meio ambiente (DIAS, 2000).

Em vista disto, alguns trabalhos foram realizados afim de avaliar as propriedades da adição deste material ao concreto, com o objetivo de diminuir a sua agressão ao mesmo ambiente, como, por exemplo, Dias *et al.* (2021), que avaliou a adição, de 1% em volume, de cavaco de aço e de alumínio em relação ao concreto convencional, a partir do ensaio de tração na compressão diametral, no qual, a adição de cavaco de aço aumentou em 19% a resistência à tração por compressão diametral, no entanto, com a adição de cavaco de alumínio não apresentou aumento de resistência.

Em relação a trabalhabilidade e a resistência à compressão, Freitas, Violin e Silva (2013), obtiveram, a partir da substituição parcial em diferentes teores do agregado miúdo por cavaco metálico, que o abatimento do tronco de cone diminuiu de acordo o aumento do teor de substituição, ao passo que, a resistência à compressão apresentou aumento com a adição do cavaco. Enquanto, Tezin e Silva (2017), efetuaram a análise entre o concreto convencional, concreto com adição, em relação a massa de agregado graúdo, de 5% de fibras de aço e adição de 1,5% de cavaco, que mostrou que o cavaco não afetou a trabalhabilidade do concreto, no entanto, diminuiu a resistência à compressão axial em comparação com a adição de fibras de aço e com o concreto convencional, além disso, quanto à tração por compressão diametral, apresentou resultado superior ao concreto convencional e inferior para o concreto com fibras de aço.

Outro trabalho que merece destaque é de Mello (2021), que elaborou a substituição total, em massa, das fibras de aço por cavaco metálico, resultando no aumento da resistência à compressão do concreto. Apesar disso, no ensaio de resistência à tração na flexão, foi observado que a adição de cavaco o concreto rompeu facilmente, diferente do concreto com fibras que apresentou maior resistência pós fissuração, além de maior capacidade de momento final.

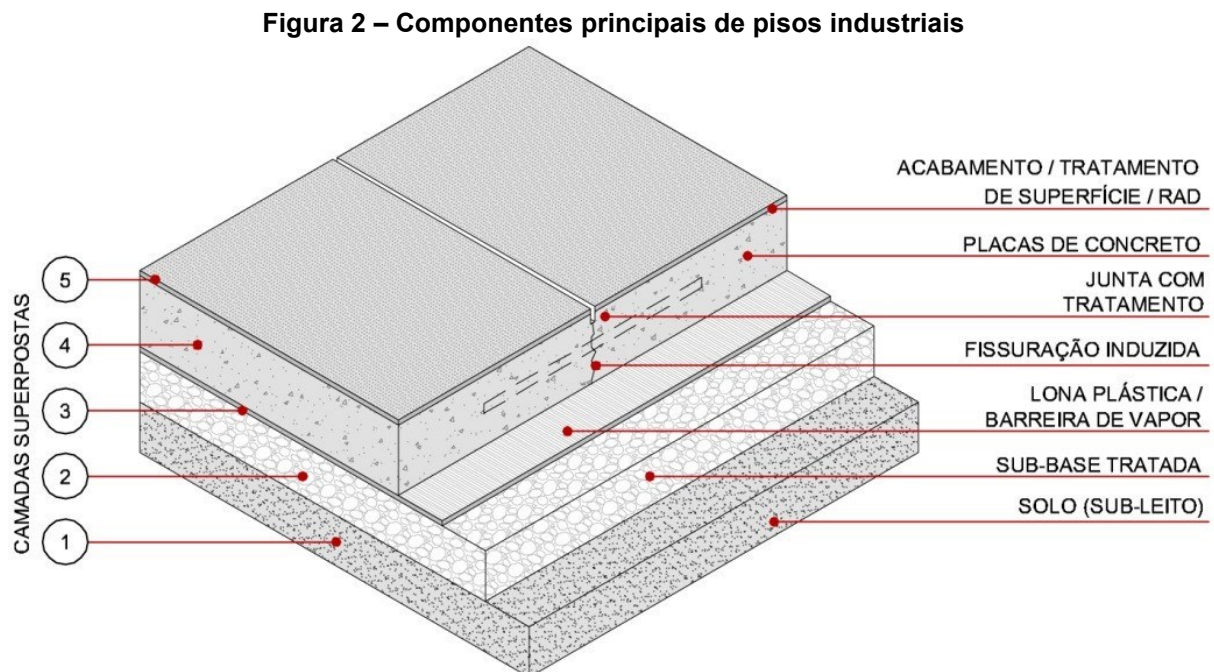
2.3 Piso industrial

Pavimentos de concreto são definidos como uma camada de revestimento ou de rolamento que é formado por concreto, e a sua execução pode ser realizada por variadas técnicas de execução e manipulação, e portam características específicas de projeto (BALBO, 2009). No entanto, os pavimentos industriais na década de 1990

começaram a ser considerados que estão diretamente ligados com todo o processo produtivo, afetando substancialmente o mesmo em casos de reparos, e conseqüentemente obtiveram uma maior relevância (RODRIGUES, 2007).

2.3.1 Composição estrutural

Os pisos industriais são habitualmente categorizados em cinco principais camadas superpostas, sendo elas, o subleito, a sub-base tratada, a barreira de vapor, a placa de concreto e o acabamento, todavia, se for constatado a necessidade, podem ser adicionados mais elementos no sistema construtivo a fim de evitar possíveis problemas (CRISTELLI, 2010). Estes componentes são apresentados na Figura 2.



Fonte: Cristelli (2010)

Para um melhor entendimento da finalidade e funcionalidade de cada camada do sistema será apresentado, como base, o que foi exposto por Cristelli (2010):

- Solo (Subleito): é responsável por absorver os esforços provenientes da sub-base e do piso industrial, o conhecimento do seu material constituinte é de suma importância com o propósito de se elaborar o projeto do pavimento de modo mais prudente, seguro, com melhor durabilidade e com menor custo;
- Sub-base: é um elemento necessário se constatado instabilidade e heterogeneidade do subleito, sendo primordial no desempenho do

sistema como um todo. Ademais, possuem a atribuição de evitar que o material do subleito apresente uma variação excessiva, evitar o bombeamento de solos finos plásticos e de uniformizar ao longo do piso o comportamento mecânico da fundação;

- Lona plástica / Barreira de vapor: são camadas impermeáveis, que atuam impedindo a ascensão de umidade presente no solo, como, por exemplo, imprimações impermeabilizantes e lona plásticas de polietileno. O emprego de lona plástica colabora como uma camada de deslizamento, proporcionando a mobilidade das placas pela dilatação térmica ou pela alteração de comprimento, também contribuem obstando a perda de água de amassamento para a sub-base;
- Placa de concreto: é o componente com maior importância, uma vez que recebem e absorvem os carregamentos, e assim os transmitem uniformemente para a sub-base e subleito. Ademais, estão em contato direto com agentes agressores, logo, sua superfície deve ser devidamente tratada afim de garantir a sua durabilidade;
- Acabamento / tratamento: o processo a ser aplicado como acabamento carece de estudo das ações que o piso industrial estará sujeito. Além disso, se o tratamento for o mais adequado e bem executado, tem potencial de aumentar a resistência ao desgaste por abrasão e remoção das imperfeições na superfície.

Apesar do piso industrial ser composto por diversas camadas e executadas separadamente, todas atuam em conjunto, de maneira que, trabalham como um único sistema (CRISTELLI, 2010 apud RODRIGUES, 2011). Sendo, essencial que o solo apresente uma condição estável durante toda a vida útil da estrutura (SARZALEJO *et al.*, 2008).

Além disso, ao contrário dos pavimentos rodoviários que recebem cargas móveis, que são responsáveis por solicitar uma camada do solo de cerca de 1,5m de profundidade, os pisos industriais recebem cargas de longa duração, que solicitam camadas mais profundas do horizonte, alterando assim, o comportamento do piso (RODRIGUES, 2010).

2.3.2 Piso industrial com adição de fibras de aço

No caso de pisos industriais as fibras podem ser empregues atuando estruturalmente, substituindo assim as armaduras convencionais, e atuando também no controle de fissuração e da retração (PINHEIRO, 2009). Diferentemente do concreto armado convencional, se o concreto possuir uma consistência adequada e não ser realizado o uso demasiado de vibração, as fibras realizam o reforço de todo o concreto, além de permitir o melhor acesso do caminhão betoneira para a concretagem pela ausência das telas metálicas (FIGUEIREDO, 2005).

A utilização de concretos reforçado com fibras ocasiona alguns benefícios na execução do pavimento, diminuindo a quantidade de operários, eliminando o tempo de colocação das armaduras e não necessitando do espaço que seria destinado para o armazenamento das armaduras (FIGUEIREDO, 2005).

Entretanto, a aplicação de fibra como reforço do concreto também compreende certas desvantagens, como o acréscimo da probabilidade de retração diferencial que ocasiona o empenamento das placas, além da corrosão das fibras que estão na superfície que resulta em manchas afetando assim a estética do piso, além disso, caso seja necessário a demolição de qualquer região do piso a energia necessária será inúmeras vezes maior do que comparado com um concreto armado convencional (FIGUEIREDO, 2005). Ademais, é conveniente a cautela com as especificações do concreto, de modo que, as fibras encontrem-se dispersas homogeneamente e aleatoriamente sem a formação de ouriços (CRISTELLI, 2010).

Em relação a trabalhabilidade e a oxidação das fibras na superfície, não é aconselhável o uso de fibras com fator de forma elevado por diminuírem a trabalhabilidade da mistura e aumentar o aparecimento de fibras na superfície favorecendo a sua oxidação, sendo recomendado para pavimentos, portanto, fibras com fator de forma igual a 60 (BALBO, 2009).

Outro fator que afeta as fibras de aço e a durabilidade do pavimento é a permeabilidade do concreto. No contexto de um concreto com alta permeabilidade, em principal a superfície, facilita a entrada de água no seu interior prejudicando o concreto e as fibras, reduzindo assim, a durabilidade (BALBO, 2009).

No que concerne a resistência à abrasão, é uma propriedade de suma importância para os pisos e pavimentos, visto que, estas são estruturas que necessitam resistir à abrasão (BAUER, 2008). À vista disso, estudos sobre o assunto

no que concerne a durabilidade e desempenho do concreto estão se desenvolvendo, devido aos pisos industriais serem sujeitos a intensa abrasão (BALBO, 2009).

Além de tudo, a cura do concreto deve ser adequada para a obra, uma vez que, influi nas propriedades do concreto, como, por exemplo, na durabilidade, resistências mecânicas, retração plástica e de secagem (BALBO, 2009).

2.3.3 Juntas e barras de transferência de carga

As juntas são elementos críticos no sistema e são a base para assegurar uma prolongada durabilidade do pavimento (KHAZANOVICH, 2007 apud SARZALEJO *et al.*, 2008). Podendo ser classificadas como juntas de encontro, juntas de construção e juntas de controle ou contração, no qual as juntas de encontro têm a finalidade de isolar elementos construtivos, evitando assim a danificação das placas devido a diferença de rigidez, em contrapartida, as juntas de construção são formadas pelos panos de piso no decorrer da concretagem, enquanto as juntas serradas ou de controle trabalham para o controle da contração do concreto, sendo serradas após o endurecimento do concreto (SARZALEJO *et al.*, 2008).

As juntas são elementos construtivos que possuem a finalidade de permitir o deslocamento no plano do piso, controlar a fissuração e são apropriadas para que os esforços sejam transferidos entre placas contíguas (RODRIGUES, 2010).

Além do mais, estas devem ser dimensionadas de forma que a sua quantidade seja reduzida e a qualidade seja melhorada, uma vez que, possuem um custo significativo para a sua manutenção (RODRIGUES, 2010). No entanto, o concreto reforçado com fibras permite que as juntas de controle possuam um maior espaçamento entre elas, na medida em que, a distância entre as juntas pode aumentar de 30% a 100% do que é previsto nos atuais códigos. (SARZALEJO *et al.*, 2008). Apesar disso, o seu posicionamento deve ser planejado de maneira que a menor quantidade de juntas estejam localizadas nas áreas com maior tráfego, devido a estas regiões estarem mais sujeitas a patologias (CRISTELLI, 2010)

O tempo entre o lançamento do concreto e a serragem das juntas é o principal aspecto no que concerne a serragem das juntas, visto que, o corte prematuro das juntas tem potencial de acarretar no esborcinamento ou destacamento das juntas, enquanto o corte tardio tem potencial de promover fissuras descontroladas nas placas (KHAZANOVICH, 2007). O tempo ótimo de serragem das juntas é divergente entre os autores, de acordo com Khazanovich (2007), a serragem comumente deve ser

efetuada de 4 a 12 horas posteriormente ao lançamento do concreto, enquanto Cristelli (2010), esclarece que frequentemente o início dos cortes é de 8 a 15 horas, em oposição, segundo Rodrigues (2003), esse tempo varia de 10 a 15 horas. No que diz respeito as dimensões das juntas, estas devem dispor de no mínimo 40mm de profundidade e deve ser superior a 1/3 da espessura da placa de concreto (RODRIGUES, 2003). Além do mais, as fibras aprimoram o desempenho das bordas das juntas, atenuando a ocorrência de lascamento e esborcinamento das mesmas (FIGUEIREDO, 2005 apud CRISTELLI, 2010).

Ademais, as juntas devem ser corretamente tratadas afim de evitar patologias e diminuição da durabilidade do sistema, sendo assim, as juntas necessitam que sejam preenchidas com o material mais adequado para o caso, dificultando a entrada de impurezas que podem prejudicar o piso industrial (CRISTELLI, 2010). Comumente, o desempenho das juntas, evitando assim o esborcinamento, é aperfeiçoado com a execução de lábio poliméricos (TAMAKI, 2011).

Em contrapartida, as barras de transferência de cargas são comumente empregues em pavimentos compostos por placas, sendo instalados nas juntas transversais e possuem a finalidade de transferir as cargas de uma placa para a placa adjunta, desse modo, estas trabalham em conjunto na região de aplicação da carga (BALBO, 2009). Por outro lado, as barras de transferência de cargas devem estar dispostas, de tal modo que, o centro da barra coincida verticalmente com a junta serrada e o seu comprimento situe-se no centro da espessura da placa e paralelamente com a superfície da mesma (KHAZANOVICH, 2007). Além disso, seu comprimento padrão é de 50 cm e o distanciamento entre as barras geralmente é de 30 cm (CRISTELLI, 2010). Se porventura as barras não estiverem na posição adequada é possível o aparecimento de fissuras aleatórias nas suas proximidades e com o tempo suceder a abertura das fissuras (KHAZANOVICH, 2007).

Essa transferência de cargas pode ser realizada tanto por barras de transferência como por encaixe macho-fêmea, contudo, no caso de placas com espessura inferiores à 15cm não é recomendado a utilização de barras de transferência. Por outro lado, com a aplicação de concreto com fibras pode ser dispensável o uso de barras de transferência nas juntas de dilatação (CRISTELLI, 2010 apud FIGUEIREDO, 2005).

2.3.4 Especificações da dosagem do concreto reforçado com fibras para pisos industriais

Ao se realizar a dosagem de um concreto para aplicação em pisos, deve-se buscar, por exemplo, uma diminuição da retração do concreto, aumentar a resistência à abrasão e a utilização de finos deve ser o suficiente para atingir uma bombeabilidade adequada e para conseguir um bom acabamento, além disso, o traço deve ser econômico em questão de preço, com uma boa trabalhabilidade, resistência à abrasão e possuir boa durabilidade (SEILER, 2009). Para mais, segundo Sarzalejo *et al.* (2008), as fibras devem ser consideradas como um agregado na dosagem do concreto e as considerações quanto a resistência à compressão e módulo de rupturas não sofrem alterações.

Em comparação com um concreto convencional, usualmente apresenta maior teor de cimento e agregado miúdo (ACI 544.1R-64 apud NEVILLE; BROOKS, 2014). Além disso, o concreto deve ser dosado levando em consideração um maior teor de argamassa em comparação com um concreto convencional, isto decorre do fato das fibras ficarem embutidas na argamassa (FIGUEIREDO, 2005). A argamassa deve ser suficiente para preencher os vazios do agregado graúdo e compor uma camada sobre estes e acarretando que os mesmos não sejam visíveis após o acabamento do concreto, entretanto um excesso de argamassa pode contribuir para uma eventual delaminação do concreto, contrariamente, uma carência de argamassa gera manchas devido a não homogênea hidratação do concreto (RODRIGUES, 2010).

2.3.5 Cargas atuantes em pisos industriais

As cargas sujeitas em um piso industrial podem ser divididas em cargas permanentes, acidentais e ações indiretas (PINHEIRO, 2009). Em contrapartida, de acordo com Cristelli (2010), os carregamentos podem ser de ações diretas e indiretas, sendo as ações diretas oriundas de carregamentos aplicados no piso, sendo classificadas como móveis ou estáticas, de modo que os carregamentos móveis são produzidos em decorrência do deslocamento de empilhadeiras e paleteiras, portanto, são cargas frequentes com curta duração, por outro lado, os carregamentos estáticos são fixos, como, por exemplo, estantes de estocagem e máquinas. Ao passo que, as ações indiretas são classificadas como de retração, de dilatação térmica e de

empenamento do concreto, ou seja, são ações que não derivam da operação do piso, portanto são, sobretudo, aspectos do comportamento do concreto.

2.4 Dimensionamento de piso industrial reforçado com fibras

O dimensionamento empregue teve como essência as diretrizes dispostas nos documentos nomeados como “Guide to Design of Slabs-on-Ground” e “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary”, ambos desenvolvidos pela “American Concrete Institute”. Sendo realizado o dimensionamento completo do piso industrial com as propriedades obtidas a partir de dados experimentais.

No entanto, o fator de resistência residual é determinado por outra normativa, a ACI 1609M-10, seu valor é obtido através da Equação 2.

$$R_{e,3} = \frac{150 * T_{150}^D}{f_1 * b * d^2} * 100\% \quad (2)$$

Onde:

$R_{e,3}$ é o fator de resistência residual;

T_{150}^D é a área abaixo da curva carga *versus* deformação de 0 até $L/150$;

L é o comprimento do vão do ensaio de resistência à tração na flexão;

f_1 é a carga máxima do primeiro pico;

b é a largura do corpo de prova prismático;

d é a altura do corpo de prova prismático.

2.4.1 Capacidade do momento positivo e negativo do piso

A capacidade do momento positivo do piso é estabelecida pela Equação 3, enquanto o momento negativo é de acordo com a Equação 4.

$$M_p = \frac{R_{e,3}}{100} * f_r * \left(\frac{h^2}{6}\right) \quad (3)$$

$$M_n = f_r * \left(\frac{h^2}{6}\right) \quad (4)$$

No qual:

$$f_r = 0,62 * \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

Onde:

M_p é a capacidade do momento positivo do piso;

$R_{e,3}$ é o fator de resistência residual;

f_r é o módulo de ruptura do concreto;

h é a espessura do piso;

M_n é a capacidade do momento negativo do piso;

f'_c é a resistência característica à compressão do concreto.

2.4.2 Verificação quanto à flexão

O piso industrial deverá atender a Equação 6 para que seja verificada a sua resistência em relação a flexão.

$$\frac{P_{ult}}{\phi * P_0} \leq 1,0 \quad (6)$$

Onde:

P_{ult} é a carga final necessária;

ϕ é o fator de redução da resistência;

P_0 é a capacidade de carga última do piso.

A carga final necessária é determinada pela Equação 7.

$$P_{ult} = \gamma_F * P * \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) \quad (7)$$

Onde:

P_{ult} é a carga final necessária;

γ_F é o fator de segurança parcial para a carga;

P é o valor da carga atuante;

α é a porcentagem de transferência de carga no canto do piso.

O cálculo da capacidade de carga da laje depende da localização da aplicação das cargas em relação às bordas da laje. No qual, para cargas dispostas no centro de grandes lajes, a capacidade da carga final da laje é dada pela Equação 8.

$$P_0 = 6 * \left[1 + \frac{2a}{L} \right] * (M_n + M_p) \quad (8)$$

O cálculo da capacidade de carga da laje para cargas dispostas na borda da laje é dado pela Equação 9.

$$P_0 = 3,5 * \left[1 + \frac{3a}{L} \right] * (M_n + M_p) \quad (9)$$

Enquanto para cargas aplicadas no canto da laje é dado pela Equação 10.

$$P_0 = 2 * \left[1 + \frac{4a}{L} \right] * M_n \quad (10)$$

Onde:

P_0 é a capacidade de carga última do piso;

a é o raio equivalente da área de contato da carga;

L é o raio de rigidez relativo;

M_n é a capacidade de momento negativo do piso;

M_p é a capacidade de momento positivo do piso.

O raio equivalente da área de contato da carga é estabelecido pela Equação 11, enquanto o raio de rigidez relativo pela Equação 12.

$$a = \sqrt{\frac{A_p}{\pi}} \quad (11)$$

$$L = \left[\frac{(E_c * h^3)}{12 * (1 - \mu^2) * k} \right]^{0,25} \quad (12)$$

Onde:

a é o raio equivalente da área de contato da carga;

A_p é a área da base da carga;

L é o raio de rigidez relativo;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

h é a espessura do piso;

μ é o Coeficiente de Poisson;

k é o módulo de reação do subleito.

No qual:

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'_c} \quad (13)$$

Onde:

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

f'_c é a resistência característica à compressão do concreto.

2.4.3 Verificação quanto ao puncionamento

O piso industrial deverá atender a Equação 14 para que seja verificada a sua resistência em relação ao puncionamento.

$$\frac{P_{ult}}{\phi * P_p} \leq 1,0 \quad (14)$$

Onde:

P_{ult} é a carga última necessária;

ϕ é o fator de redução da resistência;

P_p é a capacidade de carga do piso em puncionamento.

A carga final necessária para o puncionamento é definida pela Equação 15.

$$P_{ult} = \gamma_F * P * \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) \quad (15)$$

Onde:

P_{ult} é a carga última necessária;

γ_F é o fator de segurança parcial para a carga;

P é o valor da carga atuante;

α é a porcentagem de transferência de carga no canto do piso.

A capacidade de carga do piso em puncionamento é definido pela Equação

16.

$$P_p = V_n + V_f \quad (16)$$

Onde:

P_p é a capacidade de carga do piso em puncionamento;

V_n é a resistência ao cisalhamento nominal;

V_f é o aumento da resistência ao cisalhamento fornecida pelas fibras.

A resistência ao cisalhamento nominal é definida através da Equação 17.

$$V_n = V_c + V_s \quad (17)$$

Onde:

V_n é a resistência ao cisalhamento nominal;

V_c é a resistência nominal ao cisalhamento fornecido pelo concreto;

V_s é a resistência ao cisalhamento nominal fornecida pela armadura de cisalhamento.

A Equação 18 determina a resistência nominal ao cisalhamento fornecido pelo concreto.

$$V_c = \text{MIN}(V_{c1}; V_{c2}; V_{c3}) \quad (18)$$

No qual:

$$V_{c1} = 0,17 * \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) * \sqrt{f'_c} * b_0 * d \quad (19)$$

$$\beta = \frac{\text{MAX}(x, y)}{\text{MIN}(x, y)} \quad (20)$$

$$V_{c2} = 0,083 * \left(\frac{\alpha_s * d}{b_0} + 2\right) * \sqrt{f'_c} * b_0 * d \quad (21)$$

$$V_{c3} = 0,33 * \sqrt{f'_c} * b_0 * d \quad (22)$$

$$V_f = v_f * b_0 * d \quad (23)$$

$$v_f = 0,12 * \frac{R_{e,3}}{100} * f_r \quad (24)$$

Onde:

V_c é a resistência nominal ao cisalhamento fornecido pelo concreto;

β é a razão entre o maior e o menor lado da área de aplicação da carga atuante;

f'_c é a resistência característica do concreto à compressão;

b_0 é o comprimento do perímetro a uma distância $d/2$ da área carregada;

d_{piso} é a altura efetiva do piso;

α_s é uma constante para calcular a resistência nominal ao cisalhamento fornecido pelo concreto;

v_f é o aumento da tensão ao cisalhamento fornecido pelas fibras;

$R_{e,3}$ é o fator de resistência residual;

f_r é o módulo de ruptura do concreto;

x é a dimensão da aplicação da carga no eixo x ;

y é a dimensão da aplicação da carga no eixo y .

No qual, o valor de α_s é 40 para cargas internas e 30 para cargas localizadas na borda e no canto do piso, ao passo que o comprimento do perímetro a uma distância $d/2$ da área carregada advém da posição da carga no pano do piso:

Para cargas no interior do piso:

$$b_0 = 2x + 2y + \pi d \quad (25)$$

Para cargas na borda do piso:

$$b_0 = 2x + y + \frac{\pi d}{2} \quad (26)$$

Para cargas no canto do piso:

$$b_0 = x + y + \frac{\pi d}{4} \quad (27)$$

Onde:

b_0 é o comprimento do perímetro a uma distância $d/2$ da área carregada;

d_{piso} é a altura efetiva do piso;

x é a dimensão da aplicação da carga no eixo x ;

y é a dimensão da aplicação da carga no eixo y .

2.4.4 Verificação quanto a carga linear

O piso industrial deverá atender a Equação 28 para que seja verificada a sua resistência em relação a uma carga linear.

$$\frac{P_{d,lin}}{\phi * P_{u,lin}} \leq 1,0 \quad (28)$$

Onde:

$P_{d,lin}$ é a carga linear última à ser resistida pelo piso por unidade de comprimento;

ϕ é o fator de redução da resistência;

$P_{u,lin}$ é a capacidade do piso sob a ação de uma carga linear por unidade de comprimento.

A carga linear máxima à ser resistida pelo piso, sob a ação de uma carga linear, por unidade de comprimento é fornecida pela Equação 29.

$$P_{d,lin} = \gamma_F * P_{lin} \quad (29)$$

Onde:

$P_{d,lin}$ é a carga linear última a ser resistida pelo piso por unidade de comprimento;

γ_F é o fator de segurança parcial para a carga;

P_{lin} é a carga linear por unidade de comprimento atuante.

A capacidade do piso sob a ação de uma carga linear por unidade de área é estabelecida de acordo com a relação entre a distância de aplicação da carga até a borda ou a junta e a característica do sistema, em que, se for verificada a Equação 30, a capacidade do piso será expressa pela Equação 31, entretanto, se a Equação 32 for verificada, a capacidade é dada pela Equação 33.

$$d_e \geq \frac{3}{\lambda} \quad (30)$$

$$P_{u,lin} = 4 * \lambda * M_n \quad (31)$$

$$d_e \geq \frac{1}{\lambda} \quad (32)$$

$$P_{u,lin} = 3 * \lambda * M_n \quad (33)$$

No qual:

$$\lambda = \left(\frac{3 * k}{E_c * h^3} \right)^{0,25} \quad (34)$$

Onde:

$P_{u,lin}$ é a capacidade do piso sob a ação de uma carga linear por unidade de comprimento;

d_e é a distância de aplicação da carga até a borda ou a junta;

λ é uma característica do sistema;

M_n é a capacidade de momento negativo do piso;

k é o módulo de reação do subleito;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

h é a espessura do piso.

2.4.5 Verificação quanto a carga uniformemente distribuída

Para que seja verificada a resistência em relação a uma carga uniformemente distribuída em um piso industrial, deverá ser verificado a Equação 35.

$$\frac{q_d}{\phi * q_u} \leq 1,0 \quad (35)$$

Onde:

q_d é a carga uniformemente distribuída última a ser resistida pelo piso;

ϕ é o fator de redução da resistência;

q_u é a capacidade de carga do piso por unidade de área;

A carga uniformemente distribuída final a ser resistida pelo piso é estabelecida a partir de Equação 36.

$$q_d = \gamma_F * q \quad (36)$$

Onde:

q_d é a carga uniformemente distribuída última a ser resistida pelo piso;

γ_F é o fator de segurança parcial para a carga;

q é a carga uniformemente distribuída aplicada;

A Equação 37 determina a capacidade do piso por unidade de área.

$$q_u = \text{MIN}(q_{u1}, q_{u2}) \quad (37)$$

No qual:

$$q_{u1} = 5,95 * \lambda^2 * M_n \quad (38)$$

$$q_{u2} = 6,20 * \lambda^2 * (M_p + M_n) \quad (39)$$

$$\lambda = \left(\frac{3 * k}{E_c * h^3} \right)^{0,25} \quad (40)$$

Onde:

q_u é a capacidade de carga do piso por unidade de área;

q_{u1} é o primeiro caso para a capacidade de carga do piso por unidade de área;

q_{uz} é o segundo caso para a capacidade de carga do piso por unidade de área;

λ é uma característica do sistema;

M_n é a capacidade de momento negativo do piso;

M_p é a capacidade de momento positivo do piso;

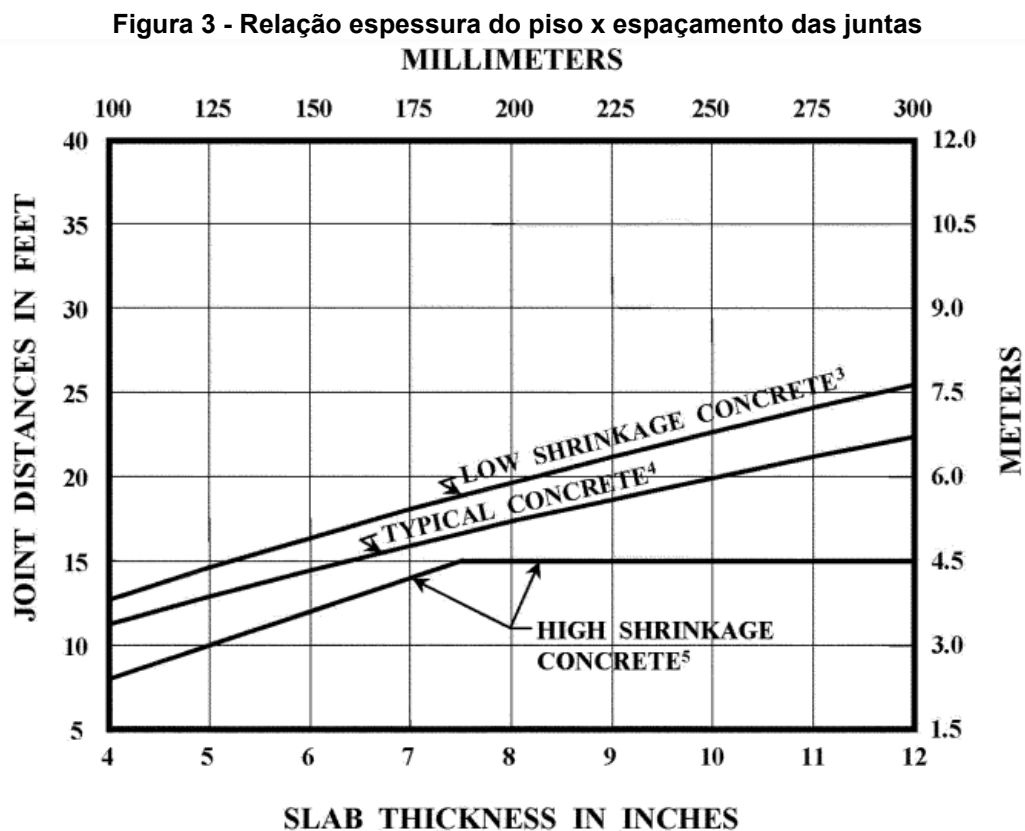
k é o módulo de reação do subleito;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

h é a espessura do piso.

2.4.6 Espaçamento entre as juntas

O espaçamento entre as juntas leva em consideração a espessura do piso, conforme a Figura 3 oriunda da norma americana ACI 360R-10.



Fonte: ACI 360R-10 (2010)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho são especificados a seguir, além dos ensaios que foram empregues para a sua caracterização e a avaliação das suas propriedades, e assim conhecer melhor as propriedades de cada material e realizar uma melhor dosagem do concreto utilizado.

Para a realização dos ensaios do agregado miúdo e do agregado graúdo, as amostras para a realização dos ensaios foram coletadas e reduzidas para os ensaios de laboratório de acordo com a ABNT NBR 16915:2021.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland do tipo CP-II-F-32, ou seja, com classe de resistência de 32MPa. Foi determinada a sua massa específica de acordo com a ABNT NBR 16605, com a utilização do frasco volumétrico de Le Chatelier.

3.1.2 Agregado miúdo

Foi empregue como agregado miúdo areia natural. Foi executado o ensaio de caracterização granulométrica da areia seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 248 e a determinação da massa específica de acordo com a ABNT NBR NM 52.

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo empregue é a pedra basáltica britada, em que a sua composição granulométrica foi determinada a partir da ABNT NBR NM 248, e a sua massa específica foi definida pela ABNT NBR NM 53. Sendo essa classificada como “Brita 1”.

3.1.4 Fibras de aço

A fibra de aço disponibilizada para o estudo é a fibra DRAMIX 3D 80/60 BG, que, de acordo com o fabricante, possui um comprimento de 60 mm e diâmetro da seção transversal de 0,75 mm, e assim, possui um fator de forma igual a 80. Além disso, a dosagem mínima recomendada pelo fabricante é de 10 kg/m³. Em relação a mistura, a recomendação do fabricante é de que o traço do concreto tenha um teor de

argamassa maior do que 50%, seu fator água/cimento seja inferior à 0,50, e o abatimento do tronco de cone seja de 110 mm com tolerância de 20 mm. A fibra empregue é apresentada na Fotografia 1.

Fotografia 1 - Fibra de aço



Fonte: Autoria própria (2022)

3.1.5 Cavacos metálicos

O cavaco metálico é um resíduo do laboratório de usinagem da UTFPR Guarapuava e foi disponibilizado pela própria instituição, sendo utilizado dois tipos de cavaco, sendo eles, caracterizados segundo a ABNT NBR ISO 3685:2017, como sendo do tipo 2.1, “Cavaco tubular - longo” e do tipo 6.2 “Cavaco em arco – desconectado (vírgula)”, que são exibidos na Fotografia 2 e na Fotografia 3, respectivamente. Além disso, foram realizadas as medições do diâmetro da seção transversal do cavaco, sendo utilizadas para tal 10 amostras, em que, o diâmetro da seção transversal considerada é o resultado da média da medição das 10 amostras.

Fotografia 2 - Cavaco tubular



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 3 - Cavaco em arco



Fonte: Autoria própria (2022)

3.1.6 Comparação geométrica das fibras de aço com os cavacos metálicos

Para o cavaco tubular, devido ao cavaco ser excessivamente longo, foi realizado o corte do mesmo em dimensões aproximadas do comprimento pré-estabelecido. No qual, o seu comprimento foi definido de tal modo que, o fator de forma da fibra utilizada e do cavaco sejam similares, ou seja, fator de forma igual a 80.

Em relação a seção transversal do cavaco, foram realizadas as medições das dimensões da sua seção transversal, no qual, possui um formato retangular, a partir disto, calculou-se a área da seção transversal, e, por conseguinte, esta área retangular foi transformada em uma seção circular correspondente, para que assim, determinasse o seu respectivo diâmetro equivalente. Sendo assim, como o fator de

forma da fibra de aço é igual a 80, determinou-se o tamanho do cavaco para que o seu fator de forma possuísse valor similar.

Tanto para as fibras de aço quanto para ambas fibras de cavaco, o alto fator de forma adotado, visa a compatibilidade dimensional com os agregados empregues, que no processo de mistura esse fator de forma não favoreça a formação de ouriços e que influencie na ductilidade e tenacidade do concreto.

3.2 Dosagem do concreto

O método de dosagem utilizado neste trabalho foi o método ACI, adotando-se um abatimento do troco do cone de 100 ± 20 mm, uma resistência do concreto de 30 MPa, e um teor de adição das fibras de 40 kg/m^3 . Resultando em um traço 1:1,96:2,73 em massa, com relação água cimento de 0,54, ou seja, um consumo de 1,96 kg de agregado miúdo e 2,73kg de agregado graúdo para cada 1 kg de cimento, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Consumo de materiais

Material	Traço unitário	Consumo (kg/m^3)
Cimento CP II	1,00	379,63
Areia	1,96	745,86
Brita 1	2,73	1036,35
Água	0,54	205,00
Fibra/cavaco	0,11	40,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Apesar da recomendação do fabricante de que o fator água/cimento seja inferior à 0,50, foi adotado a relação água/cimento de 0,54 que foi o valor encontrado a partir do método de dosagem ACI, para que assim, o traço adotado apresentasse o abatimento do tronco de cone dentro do limite estabelecido.

3.3 Processo de mistura

Antes da mistura dos traços de concreto primeiramente foi imprimado a betoneira com um traço 1:2:3, afim de evitar perda de água por absorção da betoneira. Além disso, o processo de mistura adotado visa garantir uma melhor distribuição das fibras na matriz sem a ocorrência de empelotamento ou segregação e consistiu na inserção do agregado graúdo e de 1/3 da quantidade da água na betoneira, sendo misturado por 30 segundos, seguido pela inserção do cimento e mais 1/3 da água e

misturado por 1 minuto, após realizou-se a adição do agregado graúdo com o restante da água e realizado o processo de mistura por 5 minutos, em seguida, efetuou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone, sendo assim, o restante do concreto permanecia em repouso na betoneira por cerca de 5 minutos, que é o tempo de realização do ensaio, posteriormente, com intuito de impedir a danificação do material fibroso, foi adicionado a fibra de aço ou o cavaco metálico com a betoneira em processo de mistura, afim de evitar a formação de ouriços , após isto, a mistura era efetuada por 2 minutos e realizado novamente o ensaio de abatimento pelo tronco de cone e a moldagem dos corpos de prova.

3.4 Ensaio laboratoriais

Os ensaios laboratoriais realizados para a caracterização dos concretos confeccionados, e assim verificar as diferenças das propriedades do concreto simples com o concreto reforçado com fibras de aço, com diversos teores de adição de fibras, são o ensaio de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e o ensaio da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

O concreto foi preparado em conformidade com a ABNT NBR 12655:2022. Para os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração, a amostragem de concreto fresco seguiu-se o procedimento de execução da ABNT NBR 16886:2020, em relação aos corpos de prova, estes foram moldados e seu processo de cura foi realizado em conformidade com a ABNT NBR 5738:2015.

3.4.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone

A consistência do concreto foi determinada a partir do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone – *Slump test*. Seguiu-se a ABNT NBR 16889:2020 para a realização dos procedimentos de ensaio, no qual, a amostragem do concreto fresco para a elaboração do ensaio foi realizada de acordo com a ABNT NBR 16886:2020.

3.4.2 Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, foram moldados 12 corpos de prova para cada traço de concreto. Os corpos de prova possuem o formato cilíndrico, com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm. Nos quais, serão rompidos 3 corpos de

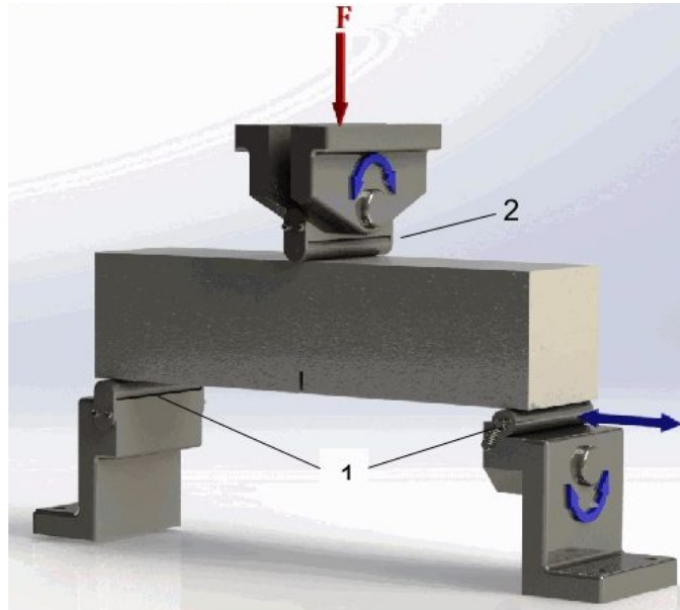
prova para cada idade de 7, 14,21 e 28 dias. Sendo o ensaio executado de acordo com a ABNT NBR 5739:2018.

3.4.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão tem o objetivo de especificar a tenacidade que é obtido no concreto pelo incremento das fibras (SARZALEJO *et al.*, 2008). Apesar de que os ensaio de tração na flexão e de punção de placas foram desenvolvidos para aplicação em concretos reforçados com fibras de aço, os mesmos são aplicáveis para concretos reforçados com qualquer outro tipo de fibra, e o resultado do comportamento da fibra nos ensaios provavelmente é o mesmo nas estruturas (FIGUEIREDO, 2005).

O procedimento foi realizado seguindo a ABNT NBR 16940:2021. No qual, foram moldados 5 corpos de prova para cada traço de concreto. Os corpos de prova possuem o formato prismático, com seção transversal quadrada de 15 cm de lado e comprimento de 60 cm. Nos quais, foram rompidos os 5 corpos de prova para a idade de 28 dias. A disposição do corpo de prova e a máquina utilizada no ensaio é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Disposição do ensaio



Legenda

- 1 roletes de suporte
- 2 roletes de aplicação de carga

Fonte: ABNT (2021)

Para realização do ensaio é necessário a realização de um entalhe no corpo de prova prismático, como ilustrado na Fotografia 4.

Fotografia 4 - Entalhe do corpo de prova prismático



Fonte: Autoria própria (2022)

Por meio do ensaio de flexão de 3 pontos, foi efetuada a medida do deslocamento linear obtido diretamente pela máquina de ensaio. A máquina de ensaio utilizada é a máquina universal de ensaio EMIC, conforme a Fotografia 5.

Fotografia 5 - Máquina universal de ensaio EMIC



Fonte: Autoria própria (2022)

Efetuuou-se a conversão do deslocamento vertical para o deslocamento linear do entalhe de acordo com a Equação 41.

$$\delta = 0,85\text{CMOD} + 0,04 \quad (41)$$

Onde:

δ é o deslocamento vertical;

CMOD é a medida linear da abertura do entalhe do corpo de prova prismático.

Para a determinação das propriedades do concreto reforçado com fibra, são utilizados o CMOD1, CMOD2, CMOD3 e CMOD4, que representam os valores de entalhe 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm respectivamente. Além disso, é calculado o limite de proporcionalidade (LOP) de cada viga ensaiada, conforme a Equação 42.

$$f_L = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (42)$$

Onde:

f_L é o limite de proporcionalidade;

F_L é a carga correspondente ao limite de proporcionalidade;

l é o comprimento do vão do ensaio de resistência à tração na flexão;

b é a largura do corpo de prova prismático;

h_{sp} é a distância entre o topo do corpo de prova prismático e o topo do entalhe.

A resistência residual do concreto para cada traço é definida a partir da Equação 43.

$$f_{R,i} = \frac{3F_i l}{2bh_{sp}^2} \quad (43)$$

Onde:

$f_{R,i}$ é a resistência residual à tração na flexão correspondente ao CMOD = CMOD_i (com $i=1,2,3,4$);

F_i é a carga correspondente ao CMOD = CMOD_i (com $i=1,2,3,4$);

l é o comprimento do vão do ensaio de resistência à tração na flexão;

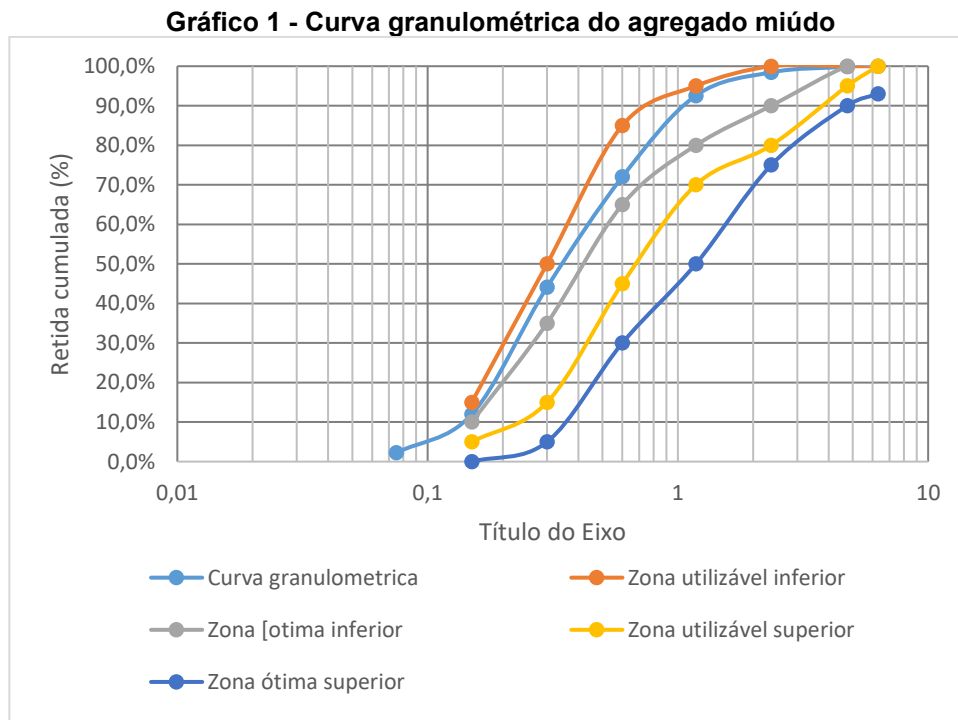
b é a largura do corpo de prova prismático;

h_{sp} é a distância entre o topo do corpo de prova prismático e o topo do entalhe;

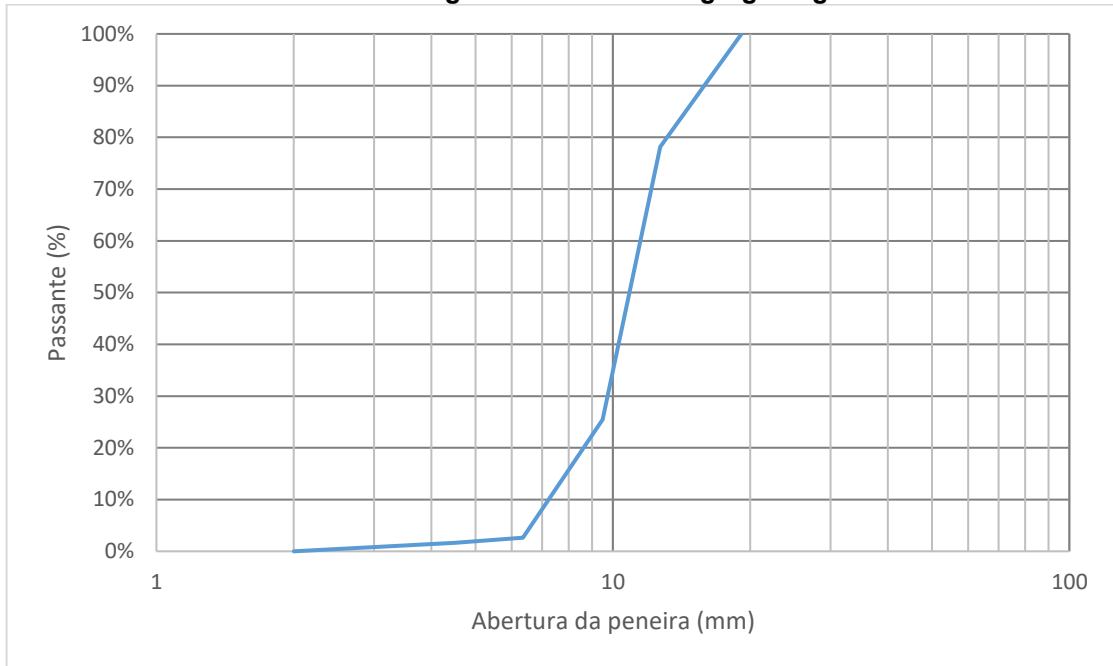
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais

O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica do agregado miúdo e o Gráfico 2 a curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A Tabela 3 dispõem dos resultados da caracterização dos materiais utilizados.

Tabela 3 - Caracterização dos materiais

Massa específica do cimento				
Amostra	A1	A2	A3	Média
Massa específica (g/cm ³)	2,95	2,82	2,85	2,87
Massa específica seca do agregado miúdo				
Amostra	A1	A2	A3	Média
Massa específica (g/cm ³)	2,86	2,81	2,83	2,83
Massa específica seca do agregado graúdo				
Amostra	A1	A2	A3	Média
Massa específica (g/cm ³)	3,02	3,02	3,04	3,03
Massa específica do agregado graúdo na condição saturado superfície seca				
Amostra	A1	A2	A3	Média
Massa específica (g/cm ³)	2,92	2,93	2,93	2,93
Massa específica aparente do agregado graúdo				
Amostra	A1	A2	A3	Média
Massa específica (g/cm ³)	2,88	2,89	2,88	2,88

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

4.2 Dispersão do material fibroso no concreto

Foi observado o embolamento de alguns cavacos tubulares nas pás da betoneira, como pode ser observado na Fotografia 6. Associa-se esse fato ao formato espiralado alongado e ao fator de forma do cavaco. No entanto, não afetou significativamente na dispersão uniforme do cavaco na matriz, como pode ser verificado na Fotografia 7.

Fotografia 6 - Formação de ouriço no concreto com cavaco tubular



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 7 - Dispersão do cavaco tubular



Fonte: Autoria própria (2022)

Contudo, com a utilização das fibras de aço e do cavaco em arco não houve a formação de ouriços, sendo a sua dispersão uniforme no concreto conforme a Fotografia 8 para a fibra de aço, e a Fotografia 9 para o cavaco em arco.

Fotografia 8 - Dispersão das fibras de aço



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 9 - Dispersão do cavaco em arco



Fonte: Autoria própria (2022)

Para o teor de fibra adotado e todas as adições de fibras incorporadas no concreto, estas se distribuíram de maneira aleatória em toda mistura. Além disso, não foi observado segregação.

4.3 Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone

Para a comparação da redução da consistência pelo abatimento do tronco de cone, realizou-se o ensaio antes e após a adição da fibra de aço, do cavaco em arco e do cavaco tubular, e assim comparado a perda de abatimento pela comparação dos resultados para o mesmo traço. Os valores encontrados em cada ensaio e a redução do abatimento estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação da redução do abatimento com a adição de fibra de aço, cavaco em arco e cavaco tubular

Tipo	Abatimento (mm)		
	Sem fibras	Com fibras	Redução
Fibra de aço	174	81	53,4%
Cavaco em arco	177	168	5,1%
Cavaco tubular	184	72	60,9%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Observou-se que a fibra de aço e o cavaco tubular reduziram consideravelmente o abatimento pelo ensaio de tronco de cone, na ordem de 50 a 60% do valor inicial. No entanto, a abatimento final do concreto com a fibra de aço atende o abatimento recomendado para a utilização em pisos industriais que é de 100 ± 20 mm, porém, o abatimento do concreto com cavaco tubular final apresentou-se abaixo do limite recomendado.

O cavaco em arco não diminuiu significativamente o abatimento do concreto, ficando assim, demasiadamente além do limite recomendado, algumas possíveis causas para isto é a forma geométrica do cavaco em arco e a presença de fluidos de corte no mesmo que exige uma menor energia para o atrito interno entre as partículas do concreto seja vencido pela ação da gravidade, assim, não garantindo que a trabalhabilidade e o adensamento especificado inicialmente fosse alcançado o que pode contribuir para a segregação e exsudação do agregado no momento do lançamento nas formas. Essa redução do abatimento do tronco de cone também pode observada por Freitas, Violin e Silva (2013).

O abatimento do tronco de cone da fibra de aço é apresentado na Fotografia 10, do cavaco em arco na Fotografia 11 e do cavaco tubular na Fotografia 12.

Fotografia 10 - Abatimento do tronco de cone com a fibra de aço



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 11 - Abatimento do tronco de cone com o cavaco em arco



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 12 - Abatimento do tronco de cone com o cavaco tubular



Fonte: Autoria própria (2022)

4.4 Ensaio de resistência à compressão

A Tabela 5, exibe a comparação da resistência média à compressão (fcm) e da resistência característica à compressão (fck) com a idade do concreto.

Tabela 5 - Comparação da resistência à compressão por idade

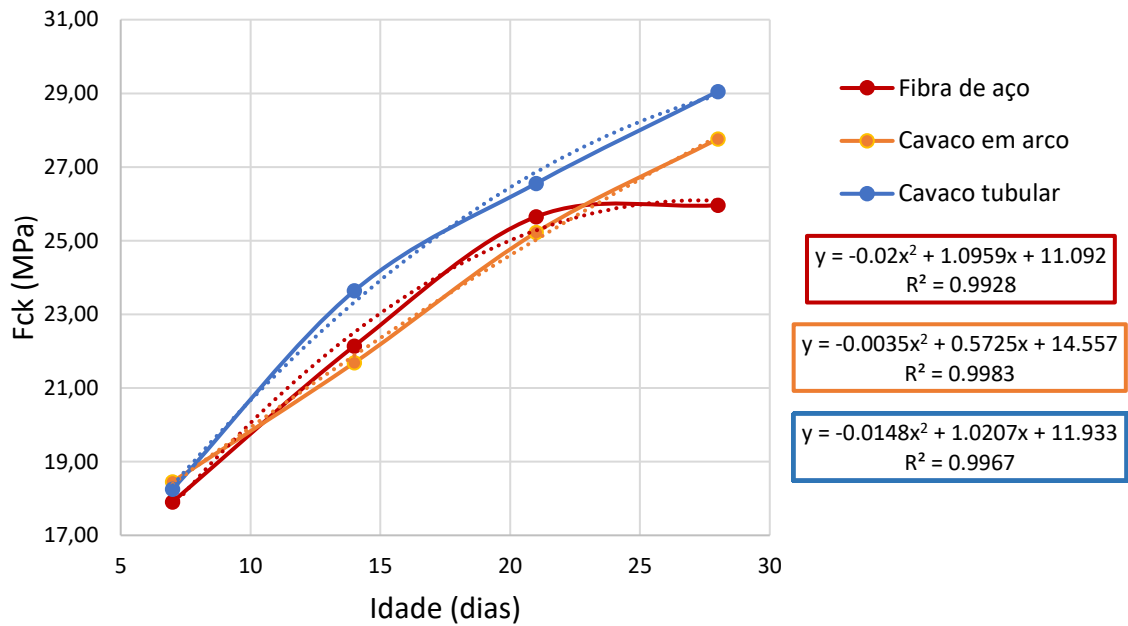
Idade	Tipo	fcm (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	fck (MPa)
7	Fibra de aço	17,91	0,982	16,29
	Cavaco em arco	18,46	0,093	18,30
	Cavaco tubular	18,25	1,894	15,13
14	Fibra de aço	22,14	1,431	19,78
	Cavaco em arco	21,69	0,838	20,30
	Cavaco tubular	23,64	1,294	21,50
21	Fibra de aço	25,65	0,419	24,96
	Cavaco em arco	25,22	1,105	23,40
	Cavaco tubular	26,55	2,133	23,03
28	Fibra de aço	25,96	1,822	22,96
	Cavaco em arco	27,76	0,715	26,58
	Cavaco tubular	29,05	0,974	27,44

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Apesar da adição de fibras ao concreto não possuir o intuito de aumentar a resistência à compressão, para o mesmo teor adotado nos concretos, verifica-se o aumento da resistência à compressão do concreto com a adição de ambos os tipos de cavaco, no qual, para a idade de 28 dias, o cavaco em arco apresentou um aumento de 15,80% e o cavaco tubular um aumento de 19,54% da resistência em comparação com a fibra de aço. Esta alteração na resistência à compressão pode ser constatada por Freitas, Violin e Silva (2013) e também por Mello (2021), no qual, o cavaco em arco dispôs de um aumento em 23,34% em confronto com a fibra de aço. No entanto, para confirmação desse aumento da resistência à compressão é necessário a realização de uma análise estatística.

A comparação da resistência à compressão para cada idade pode ser observada no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Comparação da resistência à compressão do concreto com fibras de aço, cavaco em arco e cavaco tubular

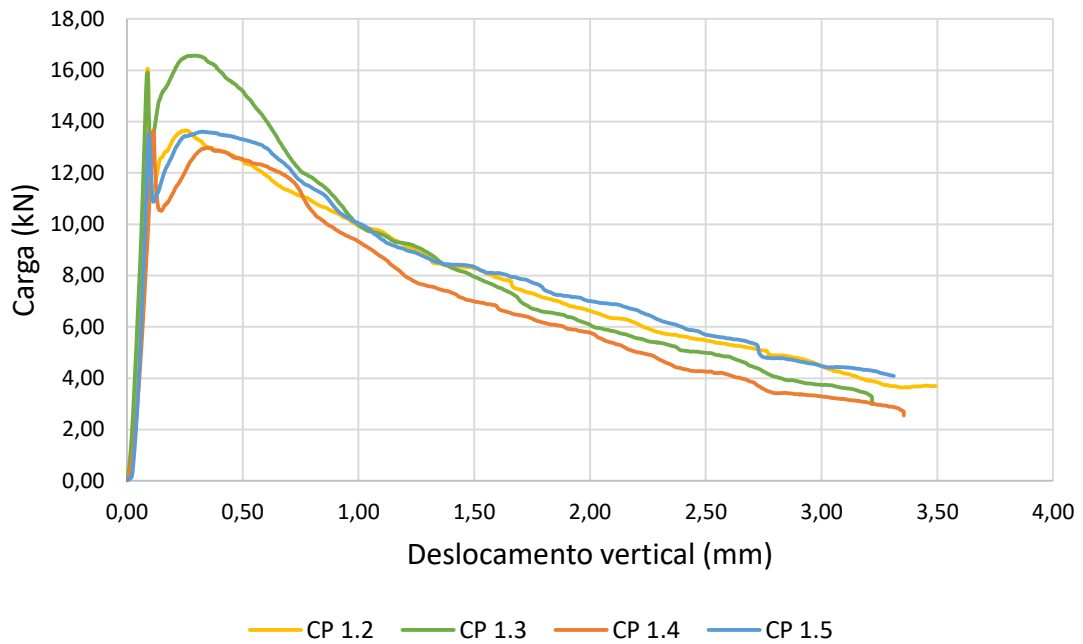


Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

4.5 Ensaio de resistência à tração na flexão

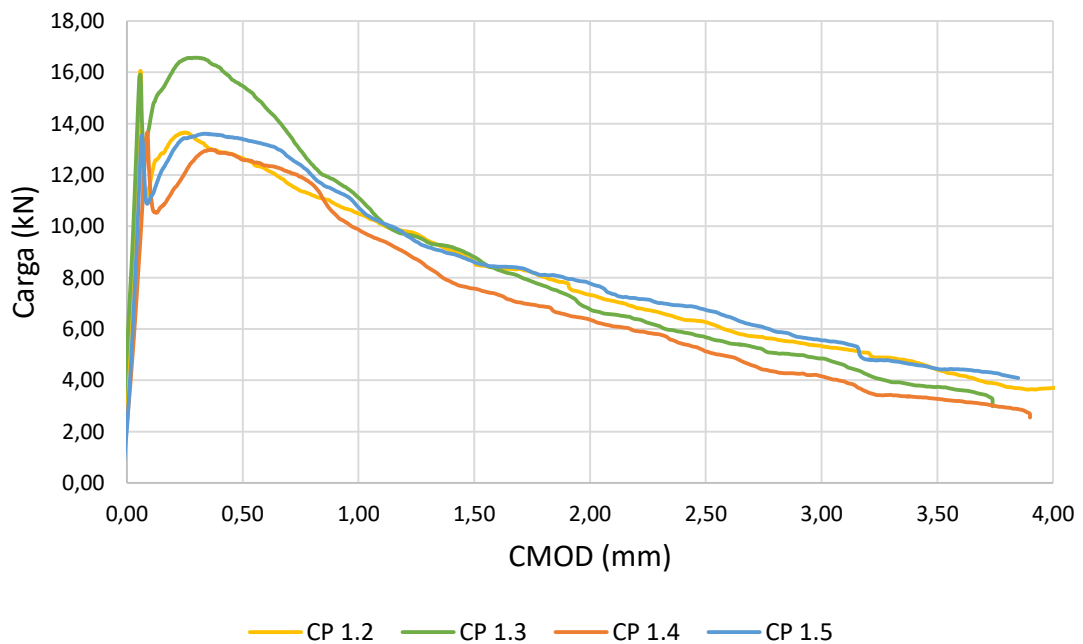
Para o concreto com fibras de aço foram ensaiados cinco corpos de prova, no entanto, um dos resultados foi descartado devido a problemas de ajustes nas especificações de realização do ensaio. As curvas carga x deformação vertical e carga x CMOD são apresentadas no Gráfico 4 e no Gráfico 5, respectivamente.

Gráfico 4 - Curvas carga x deslocamento vertical do concreto com fibras de aço



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

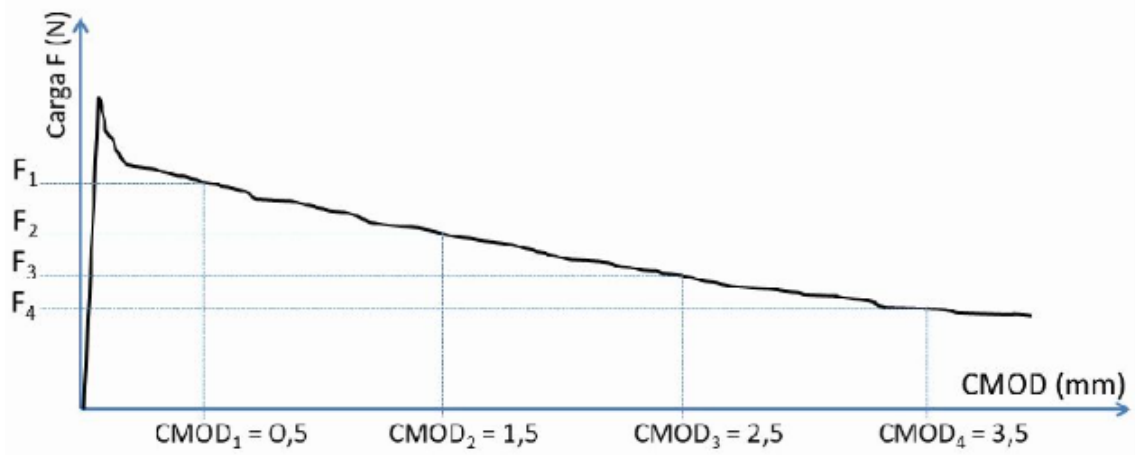
Gráfico 5 - Curvas carga x CMOD do concreto com fibras de aço



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O concreto com fibras de aço teve o comportamento esperado conforme o diagrama típico de carga x CMOD ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama típico de carga x CMOD para concreto com fibras de aço



Fonte: ABNT NBR 16940 (2021)

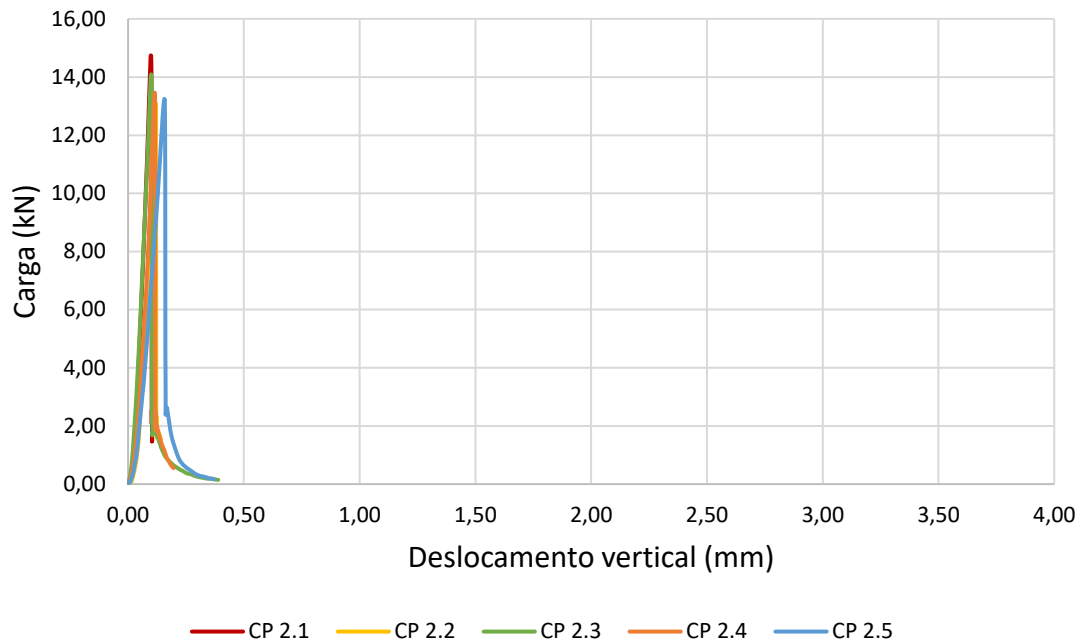
Ou seja, o concreto reforçado com fibras de aço apresentou uma resistência residual à tração na flexão, calculado pela Equação 43, que é evidenciada na Tabela 6, que apresenta também a carga máxima e o limite de proporcionalidade do concreto, calculado pela Equação 42.

Tabela 6 – Limite de proporcionalidade e resistência residual à tração na flexão do concreto com fibra de aço

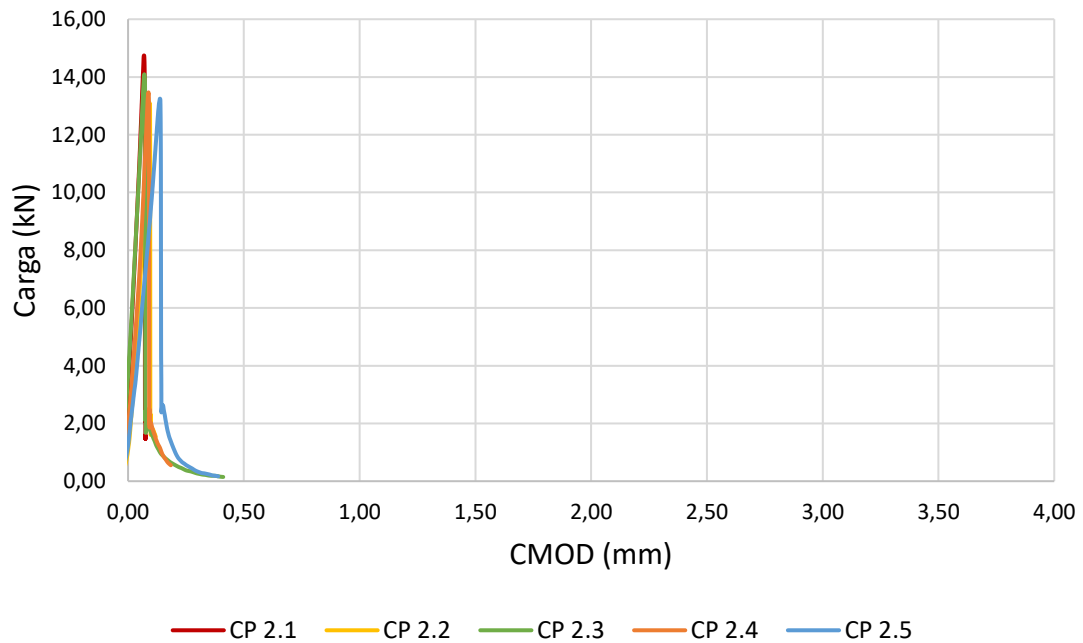
Idade	Nº do ensaio	Pmáx (kN)	f_L (N/mm ²)	$f_{R,1}$ (N/mm ²)	$f_{R,2}$ (N/mm ²)	$f_{R,3}$ (N/mm ²)	$f_{R,4}$ (N/mm ²)
28 dias	CP 1.2	16,06	4,62	4,053	2,778	2,006	1,414
	CP 1.3	16,57	4,88	4,955	2,832	1,827	1,195
	CP 1.4	13,65	2,71	4,030	2,426	1,640	1,048
	CP 1.5	13,61	3,51	4,283	2,755	2,160	1,424
	Média	14,97	3,14	4,330	2,698	1,908	1,270
	Desvio padrão	1,56	1,96	0,432	0,184	0,224	0,182

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Enquanto as curvas carga x deformação vertical e carga x CMOD, dos 5 corpos de prova prismáticos com cavaco em arco ensaiados, são demonstrados no Gráfico 6 e no Gráfico 7.

Gráfico 6 - Curvas carga x deslocamento vertical do concreto com cavaco em arco

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Gráfico 7 - Curvas carga x CMOD do concreto com cavaco em arco

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

É verificado, portanto, que o cavaco em arco não possui significativa resistência residual à tração na flexão como a fibra de aço, possuindo uma ruptura frágil, sendo assim, o cavaco em arco não dispõe de propriedades para atuar como material fibroso no concreto, algumas possíveis causas são a presença de fluido de corte na superfície do cavaco que prejudica a aderência com a matriz de concreto, e,

também, a sua forma geométrica, por apresentar comprimento reduzido comparado com a fibra de aço e o cavaco tubular, não conseguindo desempenhar a ponte de transferência de cargas nas fissuras. Além disso, o seu comprimento é inferior as dimensões do agregado graúdo empregue, o que não contribui significativamente para reforçar o concreto em relação as fraturas que se propagam principalmente na interface do agregado graúdo e da pasta de concreto.

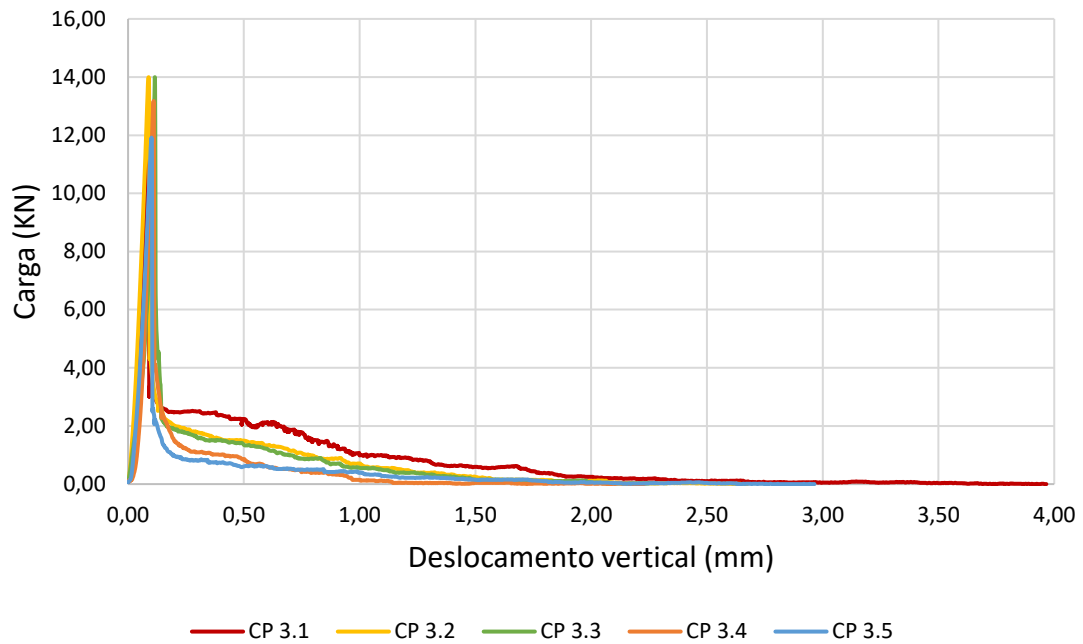
Dado que, o concreto reforçado com cavaco em arco exibiu uma ruptura frágil, não foi possível o cálculo das resistências residuais à tração na flexão. Sendo assim, a Tabela 7 expõe somente o limite de proporcionalidade e a carga máxima.

Tabela 7 - Limite de proporcionalidade do concreto com cavaco em arco

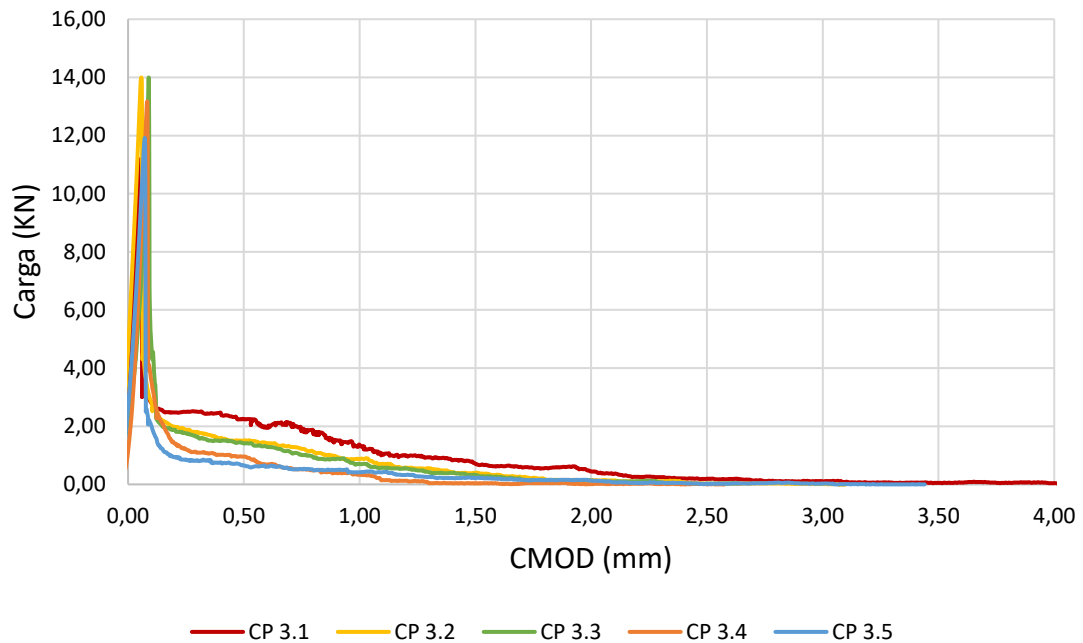
Idade	Nº do ensaio	P _{máx} (kN)	f_L (N/mm ²)
28 dias	CP 3.1	14,75	3,644
	CP 3.2	13,11	2,123
	CP 3.3	14,09	3,531
	CP 3.4	13,47	2,356
	CP 3.5	13,25	1,611
	Média	13,73	2,653
	Desvio padrão	0,68	0,895

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O Gráfico 8 exhibe as curvas carga x deslocamento vertical e o Gráfico 9 as curvas carga x CMOD para o concreto com o cavaco tubular.

Gráfico 8 - Curvas carga x deslocamento vertical do concreto com cavaco tubular

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Gráfico 9 - Curvas carga x CMOD do concreto com cavaco tubular

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

É possível observar que o cavaco tubular, diferentemente do cavaco em arco, possui resistência residual à tração na flexão, contudo, essa resistência é significativamente inferior se comparado com a fibra de aço. Estes valores da resistência residual e do limite de proporcionalidade podem ser analisados na Tabela 8.

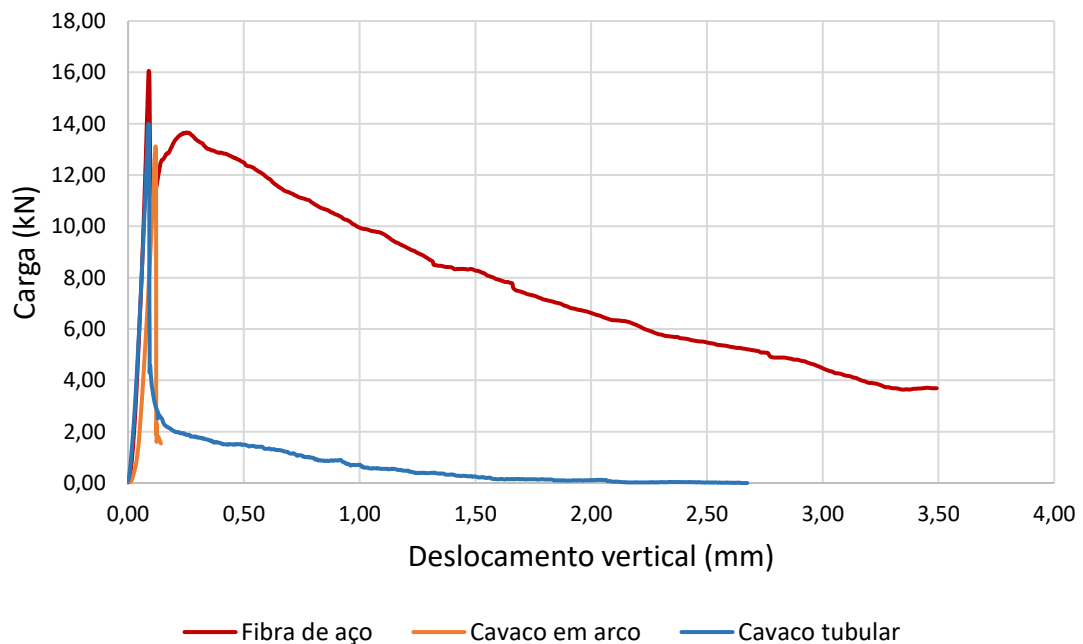
Tabela 8 – Limite de proporcionalidade e resistência residual à tração na flexão do concreto com cavaco tubular

Idade	Nº do ensaio	P _{máx} (kN)	f_L (N/mm ²)	$f_{R,1}$ (N/mm ²)	$f_{R,2}$ (N/mm ²)	$f_{R,3}$ (N/mm ²)	$f_{R,4}$ (N/mm ²)
28 dias	CP 3.1	11,20	3,40	0,722	0,236	0,060	0,033
	CP 3.2	14,00	4,21	0,476	0,126	0,007	-
	CP 3.3	14,00	1,98	0,456	0,106	0,007	-
	CP 3.4	13,18	2,38	0,306	0,013	0,000	-
	CP 3.5	11,92	2,84	0,000	0,000	0,000	-
	Média	12,86	2,96	0,392	0,097	0,015	-
	Desvio padrão	1,26	0,88	0,265	0,096	0,026	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

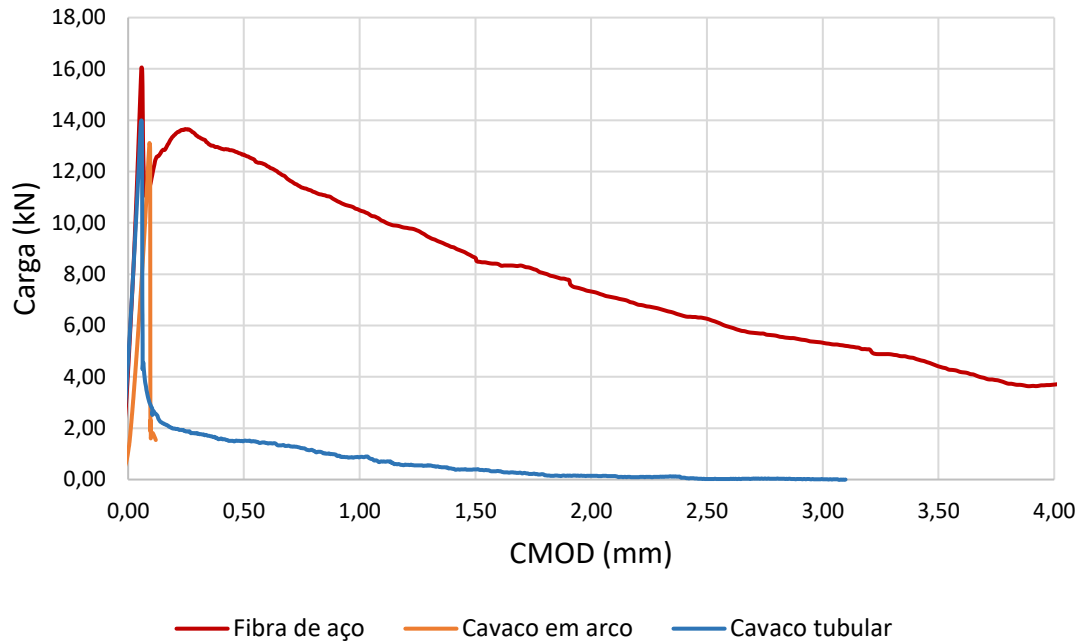
No Gráfico 10 e no Gráfico 11 são apresentados a comparação das curvas de carga x deslocamento vertical e carga x CMOD, respectivamente, a partir de uma curva média de cada traço.

Gráfico 10 - Comparativo curvas carga x deslocamento vertical do concreto com fibras de aço, cavaco em arco e cavaco tubular



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Gráfico 11 - Comparativo curvas carga x CMOD do concreto com fibras de aço, cavaco em arco e cavaco tubular



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

É possível visualizar a significativa redução da resistência residual com a substituição das fibras de aço por cavaco tubular, e que o cavaco em arco não dispõe desta propriedade.

Em relação a ruptura dos corpos de prova prismáticos, o concreto reforçado com fibras de aço apresentou a ruptura por arrancamento das fibras, conforme a Fotografia 13. Enquanto o cavaco tubular, devido seu formato de perfil tubular espiralado alongado, propiciou uma ancoragem tal que ofereceu uma maior resistência ao arrancamento, e por conseguinte observou-se uma ruptura por tração das fibras, de acordo com a Fotografia 14.

Fotografia 13 - Ruptura do concreto com fibra de aço



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 14 - Ruptura do concreto com cavaco tubular



Fonte: Autoria própria (2022)

O tipo de ruptura apresentada pelo concreto reforçado com fibras de aço é preferível em comparação com a ruptura do concreto reforçado com cavaco tubular, pois a ruptura por arrancamento das fibras é preferencial em relação a ruptura por tração das fibras, como dito anteriormente.

Na contramão aos demais ensaiados, concretos reforçados com o emprego do cavaco em arco, observou-se que o mesmo não atuou como material fibroso, e sim como um agregado graúdo, isso se deve ao mesmo não atuar como ponte de transferência das tensões entre as fissuras. Além disso, não é de fácil visualização a sua presença no concreto, conforme apresentado na Fotografia 15.

Fotografia 15 - Ruptura do cavaco em arco



Fonte: Autoria própria (2022)

4.6 Dimensionamento de piso industrial com fibra de aço e cavaco tubular

O cavaco em arco não atuou na matriz de concreto como um material fibroso, portanto, não apresentou resistência residual significativa ao concreto, à vista disso, não foi efetuado o seu dimensionamento para pisos industriais.

Os fatores de redução das forças e fatores de segurança parciais para as cargas empregues são exibidos na Tabela 9, de tal modo que os fatores adotados estão de acordo com a ACI 318-08.

Tabela 9 - Fatores de redução das forças e fatores de segurança parciais para as cargas em conformidade com a ACI 318-08 (2008)

Fatores de redução das forças	
Tipo de força	ϕ
Flexão	0.90
Cisalhamento	0.75
Fatores de segurança parciais para as cargas	
Tipo de carga	γ_F
Cargas de estantes	1.70
Outras cargas	1.70
Cargas de empilhadeiras	1.00
Cargas uniformemente distribuídas	1.00
Cargas distribuídas linearmente	1.00

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

As cargas definidas para o dimensionamento são exibidas na Tabela 10, sendo estas, hipotéticas e definidas de modo a analisar todas as possíveis solicitações que um piso industrial pode estar sujeito. No qual, foram adotadas três cargas pontuais do tipo estante, sendo que, por exemplo, a carga 1 esta aplicada no centro e também

no canto do piso, e a área de aplicação da carga é de 0,2 m no eixo x e 0,2 m no eixo y. No dimensionamento também foram adotados uma carga de manuseio de materiais, sendo esta proveniente de uma empilhadeira, além de uma carga uniformemente distribuída e uma carga linearmente distribuída.

Tabela 10 - Cargas aplicadas no piso industrial dimensionado

Cargas pontuais							
Nome da carga	Carga (kN)	Tipo	Dimensões da área de contato		Centro	Borda	Canto
			xp (m)	yp (m)			
Carga 1	20,00	Estante	0,2	0,2	x		x
Carga 2	30,00	Estante	0,5	0,1		x	
Carga 3	50,00	Estante	0,3	0,6	x	x	x
Equipamento de manuseio de materiais							
Nome da carga	Carga por roda (kN)	Tipo	Área de contato (m ²)	Centro	Borda	Canto	
Empilhadeira	60,00	Empilhadeira	0,094	x	x		
Cargas uniformemente distribuídas							
Nome da carga			Carga (MPa)	Tipo			
Carga distribuída			0,1200	Desconhecido			
Cargas linearmente distribuídas							
Nome da carga			Carga (kN/m)	Distância da borda (m)			
Carga linear			60,00	0,500			

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Foi necessário a determinação prévia do fator de resistência residual do concreto com fibra de aço e com cavaco tubular, estes valores estão expressos na Tabela 11 e na Tabela 12, respectivamente.

Tabela 11 - Determinação do fator de resistência residual do concreto com fibra de aço

Nº do ensaio	CP 3.2	CP 3.3	CP 3.4	CP 3.5	Média
f_1 (kN)	16,055	16,565	13,65	13,539	14,95
T_{150}^D (J)	26,505	25,686	21,911	27,130	25,31
$R_{e,3}$	49,53%	46,52%	48,14%	60,12%	51,08%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 12 - Determinação do fator de resistência residual do concreto com cavaco tubular

Nº do ensaio	CP 3.1	CP 3.2	CP 3.3	CP 3.4	CP 3.5	Média
f_1 (kN)	11,199	13,996	13,996	13,175	11,917	12,86
T_{150}^D (J)	3,065	2,220	1,940	1,318	1,331	1,97
$R_{e,3}$	8,21%	4,76%	4,16%	3,00%	5,03%	5,03%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Foi observado que com a adição da fibra de aço o concreto conteve 1015,5% maior a resistência residual em confronto com o cavaco tubular.

A Tabela 13 dispõem dos parâmetros do solo e do concreto adotados no dimensionamento. A resistência característica à compressão do concreto (f'_c) foi estabelecida em concordância com os resultados do ensaio de compressão dos corpos de prova para a idade de 28 dias, sendo considerado o concreto com fibras de aço com classe de resistência de 20 MPa e do concreto com cavaco tubular com classe de resistência de 25 MPa.

Tabela 13 - Dados adotados do solo e do concreto

Dados	Fibra de aço	Cavaco tubular
k (N/mm ³)	0,098	0,098
f'_c (MPa)	20,00	25,00
E_c (MPa)	21019,04	23500,00
f_r (MPa)	2,77	3,10
μ	0,20	0,20
$R_{e,3}$ (%)	51,08	5,03

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Previamente foi efetuado o pré-dimensionamento do piso industrial, com a finalidade de definir a carga que mais solicita o piso, e conseqüentemente, resulta na mínima espessura a ser adotada para o piso, ademais, o piso não pode possuir espessura inferior a 12 cm.

Para o concreto com fibra de aço, a Tabela 14 apresenta os fatores de verificação da resistência à flexão, conforme a Equação 6, e da resistência à punção, de acordo com a Equação 14 enquanto a Tabela 15 exhibe os fatores de verificação em relação à carga uniformemente distribuída a partir da Equação 35 e em relação à carga linearmente distribuída com base na Equação 28, além disso, as tabelas dispõem a espessura mínima adotada para cada situação, de modo que seja satisfeita as verificações de resistências para cada caso.

Tabela 14 – Pré-dimensionamento do piso industrial com fibra de aço à flexão e a punção

Nome da carga	Carga 1	Carga 2	Carga 3	Empilhadeira	
Tipo	Carga pontual	Carga pontual	Carga pontual	Carga pontual	
Interno	Flexão	0,4086	-	0,7349	0,9925
	Punção	0,4086	-	0,3891	-
	h(m)	0,120	-	0,120	0,123
Borda	Flexão	-	0,8504	0,9957	0,9907
	Punção	-	0,4931	0,5704	-
	h (m)	-	0,120	0,120	0,152
Canto	Flexão	0,9987	-	0,9976	-
	Punção	0,5176	-	0,4486	-
	h (m)	0,146	-	0,201	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 15 - Pré-dimensionamento do piso industrial com fibra de aço para cargas uniformemente e linearmente distribuídas

Nome da carga	Carga uniforme 1	Carga linear 1
Tipo de carga	Carga uniforme	Carga linear
Taxa de solicitação	0,9974	0,9954
h (m)	0,169	0,208

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O mesmo procedimento foi elaborado para o concreto com cavaco tubular, sendo os resultados representado na Tabela 16 e na Tabela 17.

Tabela 16 – Pré-dimensionamento do piso industrial com cavaco tubular à flexão e a punção

Nome da carga	Carga 1	Carga 2	Carga 3	Empilhadeira	
Tipo	Carga pontual	Carga pontual	Carga pontual	Carga pontual	
Interno	Flexão	0,5307	-	0,9596	0,9916
	Punção	0,2788	-	0,3861	-
	h (m)	0,120	-	0,120	0,144
Borda	Flexão	-	0,9962	0,9943	0,9983
	Punção	-	0,4685	0,4627	-
	h (m)	-	0,128	0,143	0,178
Canto	Flexão	0,9930	-	0,9980	-
	Punção	0,5454	-	0,4738	-
	h (m)	0,138	-	0,189	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 17 – Pré-dimensionamento do piso industrial com cavaco tubular para cargas uniformemente e linearmente distribuídas

Nome da carga	Carga uniforme 1	Carga linear 1
Tipo de carga	Carga uniforme	Carga linear
Taxa de solicitação	0,9979	0,9989
h (m)	0,151	0,194

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Observou-se, que o concreto com fibra de aço obteve maior desempenho à flexão e ao puncionamento para as cargas localizadas no interior e na borda do piso em confronto com o cavaco tubular, entretanto, o inverso foi constatado para as cargas na borda do piso, isso se deve pelo fato das cargas localizadas no canto piso considerarem somente a resistência à compressão do concreto, diferentemente de todos os outros casos analisados, que consideram além da resistência à compressão do concreto o seu fator de resistência residual.

Dessa forma, foi possível analisar que a carga linearmente distribuída foi a que mais solicitou o piso, por necessitar de uma espessura maior do mesmo nos dois casos, sendo assim, foi realizada novamente o procedimento para o pré-dimensionamento, no entanto, a espessura do piso foi mantida como constante, sendo adotado o maior valor obtido no pré-dimensionamento, ou seja, para o concreto com fibra de aço foi fixada a espessura de 0,208 m e para o concreto com cavaco tubular a espessura de 0,194 m. Estes resultados podem ser visualizados na Tabela 18 e na Tabela 19 para a fibra de aço e na Tabela 20 e na Tabela 21 para o concreto com cavaco tubular.

Tabela 18 – Dimensionamento do piso industrial com fibra de aço à flexão e a punção

Nome da carga		Carga 1	Carga 2	Carga 3	Empilhadeira
Tipo		Carga pontual	Carga pontual	Carga pontual	Carga pontual
Interno	Flexão	0,1541	-	0,2981	0,4059
	Punção	0,1369	-	0,1928	-
	h(m)	0,208	-	0,208	0,208
Borda	Flexão	-	0,3368	0,4209	0,5919
	Punção	-	0,2626	0,3055	-
	h (m)	-	0,208	0,208	0,208
Canto	Flexão	0,5540	-	0,9461	-
	Punção	0,3379	-	0,4317	-
	h (m)	0,208	-	0,208	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 19 – Dimensionamento do piso industrial com fibra de aço para cargas uniformemente e linearmente distribuídas

Nome da carga	Carga uniforme 1	Carga linear 1
Tipo de carga	Carga uniforme	Carga linear
Taxa de solicitação	0,8990	0,9954
h (m)	0,208	0,208

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 20 – Dimensionamento do piso industrial com cavaco tubular à flexão e a punção

Nome da carga	Carga 1	Carga 2	Carga 3	Empilhadeira
Tipo	Carga pontual	Carga pontual	Carga pontual	Carga pontual
Interno	Flexão	0,2264	-	0,4362
	Punção	0,1485	-	0,2068
	h(m)	0,194	-	0,194
Borda	Flexão	-	0,4936	0,6145
	Punção	-	0,2910	0,3268
	h (m)	-	0,194	0,194
Canto	Flexão	0,5638	-	0,9586
	Punção	0,3631	-	0,4602
	h (m)	0,194	-	0,194

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 21 – Dimensionamento do piso industrial com cavaco tubular para cargas uniformemente e linearmente distribuídas

Nome da carga	Carga uniforme 1	Carga linear 1
Tipo de carga	Carga uniforme	Carga linear
Taxa de solicitação	0,8804	0,9989
h (m)	0,194	0,194

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Desta forma, para o dimensionamento proposto, o concreto com cavaco tubular apresentou um desempenho superior por necessitar de uma espessura mínima de 0,194 m, uma redução de 7,21% em confronto com a espessura mínima de 0,208 m da fibra de aço.

Com relação ao espaçamento das juntas, os valores foram obtidos através da Figura 3 e estão expressos na Tabela 22.

Tabela 22 - Espaçamento recomendado entre as juntas

Fibra de aço	Cavaco tubular
5,33 m	5,10 m

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Pode se verificar que a fibra de aço dispôs de uma recomendação do espaçamento de 5,33 m, 4,5% maior comparado com o cavaco tubular, que a recomendação obtida é de 5,10 m.

Ao se admitir o uso do traço adotado, mantendo-se as propriedades mecânicas obtidas, a espessura do pavimento proveniente do dimensionamento do piso industrial com fibra de cavaco tubular e se considerando uma área de 1.000 m², pode-se evitar que 7,8 mil toneladas de resíduos da usinagem sejam descartadas ou dispostas em aterros, tem-se além de que, por ser um material reciclado, o custo para a produção torna-se mais barato. Como visto, do ponto de vista técnico e ambiental, isto é totalmente possível, e muito bem visto pela sociedade. Entretanto, outros pontos de vista, como a durabilidade e a vida útil, necessitam ser avaliados, considerando a análise do ciclo de vida e os requisitos necessários para um uso adequado deste material construtivo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao se avaliar comparativamente o dimensionamento de um pavimento industrial de concreto com a adição de cavaco metálico do tipo em arco e tubular em substituição a fibra de aço, a partir de resultados obtidos mediante ensaios laboratoriais, é visto que as propriedades físicas do concreto com adição de cavaco em arco apresentaram uma baixa redução do trabalhabilidade do concreto, enquanto que para o cavaco tubular a perda da trabalhabilidade foi significativa porém não foi muito desigual comparado com o concreto com fibras de aço.

Para as propriedades mecânicas temos para o cavaco em arco e o concreto tubular apresentaram aumento da resistência à compressão em comparação com o concreto fibras de aço, sendo o concreto tubular que mais apresentou melhoria na resistência à compressão, com aumento de 19,54%, e o cavaco em arco um aumento de 15,80%, em comparação com a fibra de aço. Com relação à resistência à flexão, o concreto com cavaco em arco não dispôs de uma resistência residual, possuindo resultados não coerentes com um concreto reforçado com fibras, portanto, o mesmo não atuou como um material fibroso no concreto, entretanto, o cavaco tubular apresentou resistência residual no ensaio de resistência à tração na flexão, porém este valor é relativamente baixo comparado com o concreto reforçado com fibras de aço, apesar disto, este tipo de cavaco atuou no concreto como um material fibroso.

Com base nessas propriedades físico-mecânicas é possível indicar após o dimensionamento que é viável a utilização do cavaco metálico tubular em pavimentos industriais baseado no seu comportamento como material fibroso no concreto com uma redução aproximada de 7,21% da espessura do piso industrial em relação as fibras comerciais, para o dimensionamento analisado. Entretanto, para o cavaco do tipo em arco como o mesmo não atuou como material fibroso no concreto e, portanto, não foi possível o dimensionamento e posterior avaliação das propriedades alteradas. Porém, com relação ao espaçamento das juntas, com a utilização da fibra de aço o espaçamento recomendado é 4,5% superior em confronto com o cavaco tubular.

Podemos afirmar que o cavaco tubular apresenta desempenho mecânico adequado para uso em piso industrial. Logo, tornando-se uma nova destinação do resíduo de usinagem do tipo cavaco visando a sustentabilidade e a redução da poluição do mesmo ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ACI Committee 544. (2002). **State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete Reported (ACI 544.1R-96 Reapproved 2002)**. *ACI Structural Journal*, 1996 (Reapproved).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-08**: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 360R-10**: Guide to Design of Slabs-on-Ground. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15530**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16886**: Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16915**: Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16940**: Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 3685**: Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248:** Agregado – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASTM. **C1609/C1609M-10:** Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). West Conshohocken: ASTM International, 2010

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto.** Oficina de Textos, 2009.

BANTHIA, Nemkumar; CHAN, Cesar. Use of Recycled Aggregate in Plain Fiber-Reinforced Shotcrete. **Concrete International**, [s. l], v. 22, n. 6, p. 41-45, jan. 2000.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científico Editora S. A., 2008. 2 v.

CRISTELLI, Rafael. **Pavimentos industriais de concreto: Análise do sistema construtivo.** 2010. 161 f. Monografia (Especialização) - Curso de Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

DIAS, Alexandre Magno de Paula. **Avaliação de fluidos de corte utilizados em processos convencionais de usinagem.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

DIAS, Júlio César Resende *et al.* Comportamento do concreto reforçado com cavacos de aço e alumínio: resistência à tração por compressão diametral. **Brazilian Journal Of Development**, [s. l], v. 7, n. 5, p. 51880-51889, 2021.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2000.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: Editora Blucher, 1977.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras.** In: Isaia, Geraldo Cechalla. (Org.) Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005, v. 2, Capítulo 39, p. 1195-1225. 2005.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PCC-USP. Tese de Doutorado. São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248 p. Tese (Livre-Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FREITAS, Gisele Hiromi Matsumoto de; VIOLIN, Ronan Yuzo Takeda; SILVA, Judson Ricardo Ribeiro da. **Concreto com adição de resíduos de indústria metal mecânica para fins de fabricação de peças pré-moldadas sem função estrutural**. Maringá: Cesumar, 2013.

KHAZANOVICH, Lev. **Structural analysis of multi-layered concrete pavement systems**. PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994.

KHAZANOVICH, Lev. **Execução de juntas e transferência de cargas em pisos de concreto: controvérsias e fatos reais**. Revista Concreto e Construções: Pavimentos: as boas práticas da engenharia nacional e internacional, p. 15-18, jan. fev. mar. 2007.

LEITE, A. M. **Avaliação do uso da macrofibra polimérica na composição de concreto para fins estruturais**. 2018. 257 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1ª ed., São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

MAIDL, B. **Stahlfaserbeton**. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1991.

MALATESTA, Sergio Carmona; CONTERAS, Manuel Cabrera. Comportamiento al corte de hormigones reforzado con fibras de acero. **Revista Engenharia de Construção**, v. 24, n. 1, p. 79-94, abr. 2009.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concrete: microstructure, properties and materials**. McGraw-Hill Education, 2014.

MELLO, Paulo Henrique Carvalho de. **Utilização de resíduos de usinagem do tipo cavaco em substituição a fibra de aço no concreto para pisos industriais**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

NEVES, R. D.; ALMEIDA, J. C. O. Fernandes de. Compressive behavior of steel fiber reinforced concrete. **Structural Concrete**, v. 6, n. 1, p. 1-8, mar. 2005.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.; **Tecnologia do concreto**. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PINHEIRO, Brunno Antonio Onofre. **Pisos industriais de concreto reforçados com fibras de aço: Estado da arte**. 2009. 146 f. Dissertação (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2009.

RAI, Amit; JOSHI, Y. P. **Applications and properties of fiber reinforced concrete**. Journal of Engineering Research and Applications, v. 4, n. 5, p. 123-131, 2014.

RODRIGUES, Públio Penna Firme. **Crítérios de Projetos**. Revista Pisos Industriais, São Paulo, 2003.

RODRIGUES, P. P. F. **Pisos industriais: conceitos e execução**. Revista Concreto e Construções IBRACON, São Paulo, SP, jan. fev. mar. 2007. p. 24 - 31.

RODRIGUES, Públio Penna Firme. **Manual Gerdau de pisos industriais: fibras de aço e protendido**. São Paulo: PINI, 2010.

RODRIGUES, P. P. F. **Pisos industriais de concreto**. In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, v.2, 2011. p. 1495-1529.

SARZALEJO, Antonio Gallovich; ROSSI, Bruno; PERRI, Gianfranco; WINTERBERG, Ralf; ARISTEGUIETA, Roberto Eduardo Perri. **Fibras como Elemento Estrutural para reforço de Concreto**: Manual técnico. Maccaferri do Brasil Ltda, 2008.

SEILER, Horst Paul. **Concreto para pisos industriais**. Boletim técnico da ANAPRE, mar/2009. Disponível em: <http://www.anapre.org.br/boletim_tecnico/edicao12.asp> Acesso em 21/06/2022.

SEILER, Paul Horst. **Concreto para pisos industriais**. Anapre - Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho, 2009. 2 p.

TAMAKI, Luciana. **Reforços de Fibras**. Revista Técnica PINI; São Paulo, 2011.

TEZIN, Paulo Eduardo Xavier; SILVA, Carlos Adriano Rufino da. **Adição de fibras de aço corrugada e cavaco de torno ao concreto**. 2017.

THE CONCRETE SOCIETY. **Guidance on the use of Macro-synthetic-fibre-reinforced concrete**. Trowbridge: Cromwell Press, 2007.

TRENT, Edward M.; WRIGHT, Paul K.. **Metal Cutting**. 4. ed. Butterworth-Heinemann, 2000.

VILLARES, Ana Maria Oliveira. **Influência da largura do corpo-de-prova na medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 2001. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001