



UNIVERSIDADE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

ALESSANDRO FERNANDES DELLA VECCHIA

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO NA
RESISTÊNCIA E NA RETRAÇÃO DE UM CONCRETO
COMPACTADO A ROLO

Passo Fundo

2013

ALESSANDRO FERNANDES DELLA VECCHIA

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO NA
RESISTÊNCIA E NA RETRAÇÃO DE UM CONCRETO COMPACTADO A
ROLO

Orientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa.

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Adriana Augustin Silveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa e co-orientação da Prof^ª. Dra. Adriana Augustin Silveira.

Passo Fundo

2013

ALESSANDRO FERNANDES DELLA VECCHIA

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO NA RESISTÊNCIA E NA
RETRAÇÃO DE UM CONCRETO COMPACTADO A ROLO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa e co-orientação da Prof^ª. Dra. Adriana Augustin Silveira.

Data de aprovação: Passo Fundo, 26 de abril de 2013.

Doutor Francisco Dalla Rosa.
Orientador

Doutora Adriana Augustin Silveira
Coorientadora

Doutor Lucas Festugato
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Doutor Antônio Thomé
Universidade de Passo Fundo - UPF

Doutor Pedro Domingos Marques Prietto
Universidade de Passo Fundo - UPF

Passo Fundo
2013

Dedico este trabalho à minha filha Isadora.

AGRADECIMENTOS

*“Com talento ganhamos partidas,
com trabalho em equipe e inteligência
ganhamos campeonatos.”*

Michael Jordan

Agradeço a toda a minha família pelo apoio e compreensão, em todos os momentos que nos deixamos para que eu pudesse me dedicar ao trabalho.

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Francisco Dallarosa e Prof^a. Dra. Adriana Augustin Silveira, pela dedicação e paciência nos tropeços e momentos de dificuldade que tive no decorrer do trabalho.

Agradeço ao Prof. MSc. Eduardo Pavan Korf, pela sua disponibilidade e paciência frente as dificuldades em que tive para desenvolver alguns tópicos do trabalho, quando sempre pude contar com seu apoio.

Agradeço ao Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto pelo apoio inicial na parte estatística do trabalho e pela sua disposição em dividir seu vasto conhecimento.

Agradeço ao Prof. Dr. Antônio Thomé, pelo incentivo, pelas palavras de otimismo e pela força dada desde o início dos trabalhos.

Agradeço à equipe do CETEC, em especial aos amigos Amilton Bitencourt Sartor, Nilton Pioncoski e a Elouise Muller, pela ajuda na execução dos ensaios práticos.

Agradeço ao apoio da Britadeira Farroupilha pelo fornecimento dos agregados utilizados na pesquisa.

Agradeço a Macaferri por ceder as fibras utilizadas nas misturas dos concretos.

Agradeço a todos os amigos, colegas e familiares, que de alguma forma apoiaram e acreditaram em mim no decorrer do trabalho.

Especialmente agradeço a minha esposa, Rúbia, por toda a ajuda e paciência nestes últimos meses, onde os ânimos variavam de baixo ao alto infinito, quando as dúvidas, angústias e certezas se manifestavam.

Agradeço a minha filha Isadora, que em muitos momentos ficava a minha espera para brincar e facilmente se decepcionava quando eu a deixava de lado para poder trabalhar mais um pouco, agora a gente vai brincar bastante minha filha.

Agradeço ao apoio fornecido pela Universidade de Passo Fundo, quanto à disponibilização de infraestrutura para a realização da pesquisa.

RESUMO

O presente trabalho buscou avaliar a influência de dois diferentes comprimentos de fibras de polipropileno adicionados ao CCR (Concreto Compactado com Rolo) no que diz respeito a sua resistência a compressão axial, compressão diametral e a retração sofrida pelo material durante sua cura e sua vida útil, para fins de utilização em base de pavimentação. Para atingir os objetivos do presente estudo, partiu-se da caracterização dos agregados, extraídos das regiões de Passo Fundo e de Osório no estado do Rio Grande do Sul. A caracterização avaliou a granulometria dos materiais individuais e a mistura ideal para tal compósito, além de verificação de propriedades físicas, tais como: Ensaio de Abrasão Los Angeles, absorção e massa específica. Para encontrar o teor de umidade o método utilizado foi o mesmo adotado em solos, ensaios de Proctor, com diferentes energias de compactação. Após a caracterização foram moldados corpos-de-prova para verificar as resistências e a retração. As moldagens foram realizadas aleatoriamente de forma a obter maior confiabilidade nos resultados, diminuindo a influência de fatores externos. Para os ensaios de compressão axial e compressão diametral, foram moldados dezesseis betonadas de concreto com repetição, totalizando trinta e duas betonadas de concreto totalmente aleatorizadas. Para cada betonada foram moldados oito corpos-de-prova, para serem ensaiados quatro de compressão axial e quatro de compressão diametral. Os ensaios de retração foram executados com os melhores resultados dos ensaios anteriores, considerando os fatores que mais tiveram significância nos resultados de compressão, para esta análise, foram moldados três corpos-de-prova para cada mistura, totalizando três misturas diferentes e nove ensaios de retração. Finalizando-se o trabalho, nota-se uma influência maior do teor de cimento e da energia de compactação, obtendo-se resultados melhores os corpos-de-prova moldados com os maiores teores.

Palavras-chave: Concreto compactado com rolo. Pavimentação com uso de concreto. Rodovias. Adição de fibras de polipropileno em concreto.

ABSTRACT

This work aims at evaluating the influence of two different lengths of polypropylene fibers which were added to the Roller-Compacted Concrete (RCC) on its resistance to axial compression, diametric compression, and retraction suffered by the material during its curing and useful life, so as to be used in the basis of paving. To attain the objectives of this study, there was a characterization of aggregates which were extracted from the cities of Passo Fundo and Osório in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The characterization evaluated the granulometry of the individual materials, and the ideal mix for such a composite, besides the checking of physical properties, such as Los Angeles Abrasion Test, absorption, and specific mass. To find moisture content, the method was the same one used in soils: Proctor Compaction Test, with different compaction energies. After the characterization, test specimens were molded to verify the resistances and the retraction. The moldings were made randomly so as to obtain higher reliability in the results, thus decreasing the influence of external factors. For axial compression tests, sixteen concrete mixes with repetition were molded, totalizing thirty two thoroughly randomized concrete mixes. For each concrete mix, eight test specimens were molded so there were four test specimens for axial compression and four test specimens for diametric compression. Retraction tests were performed with the best results of previous tests, considering the most significant factors of compression. For this analysis, three test specimens were molded for each mixture, totalizing three different mixtures and nine retraction tests. There is a greater influence of the cement proportion and of the compaction energy, thus the test specimens which were molded with a higher proportion had better results.

Key words: Roller-Compacted Concrete. Paving with concrete. Roads. Addition of polypropylene fibers to concrete.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	HISTÓRICO	18
2.1.1	CCR utilizado em Barragens	22
2.1.2	CCR utilizado em Pavimentação	25
2.2	Principais características do CCR	30
2.2.1	Vantagens do CCR em relação às principais bases cimentadas	32
2.2.2	Retração por secagem	34
2.2.3	Grau de compactação	36
2.3	ADIÇÕES DE FIBRAS EM CONCRETO – MATERIAIS COMPÓSITOS	37
2.3.1	Fibra de polipropileno	40
2.3.2	Fibras metálicas	41
2.3.3	Fibra vegetais	42
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	43
3.1	Materiais utilizados	43
3.2	Métodos	51
3.2.1	Etapas da pesquisa	51
3.2.2	Planejamento do experimento	52
	Como variáveis de controle, o quadro 5 mostra as principais, estas variáveis podem receber intervenção do usuário no momento dos ensaios e variam conforme os objetivos do trabalho.	53
3.2.2.1	CCR sem adição de fibras	54
3.2.2.2	CCR com adição de fibras de polipropileno	55
3.3	Métodos de Caracterização física dos materiais	56
3.4	Misturas dos materiais para o CCR	57
3.5	Ensaio de compressão	61
3.6	Ensaio de retração	62
3.7	Avaliação dos resultados	63
4	RESULTADOS	65
4.1	Ensaio de compactação	65
4.2	Resistência a compressão axial	70
4.3	Resistência à compressão diametral	76
4.4	Retração hidráulica do concreto com e sem adição de fibras	81
4.5	Análise estatística	82
5.	Conclusões	90

5	Sugestões para trabalhos futuros	90
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE FIGURAS

figura 1:CCR utilizado em maciço de usina hidrelétrica no Estado do Paraná.....	20
figura 2: CCR utilizado em pavimentação	21
figura 3: Espalhamento e compactação de CCR.....	22
figura 4: Projeto de barragem em CCR na China	23
figura 5: Barragem do Saco, localizada no estado da Paraíba – Brasil	24
figura 6: Paramento em arco da barragem do Saco de Nova Olinda.....	25
figura 7: Lançamento de CCR.....	27
figura 8: Lançamento de CCR a ser compactado	28
figura 9: Moldagem e coleta de corpos-de-prova	28
figura 10: Junta transversal de construção	29
figura :11 Textura do concreto compactado a rolo	30
figura 12: Fissura por retração em pavimentação.....	34
figura 13: Fissura em pavimento de concreto.....	35
figura 14: Barreira isolante térmica	36
figura 15: Emaranhado de fibras em materiais compósitos.....	38
figura 16: Alguns tipos de fibras usadas em reforço de concreto	40
figura 17: Concreto reforçado com fibra metálica.....	41
figura 18: Fibras vegetais utilizadas para reforço de taludes.....	42
figura 19: Região de localização da jazida de extração de britas, cidade de Passo Fundo	44
figura 20: Materiais utilizados na mistura.....	45
figura 21: Curva granulométrica da areia natural	46
figura 22: Curva granulométrica da areia de britagem.....	47
figura 23: Curva granulométrica da brita 1	48
figura 24: Caracterização física dos agregados	48
figura 25: Mistura utilizada para os ensaios.....	48
figura 26: Quantidades dos agregados utilizados	49
figura 27: Fibras utilizadas na pesquisa.	50
figura 28: Níveis das variáveis de controle com influência na pesquisa (CCR sem fibras)	53
figura 29: Níveis das variáveis de controle com influência na pesquisa (CCR + fibras)	54
figura 30: Programa experimental para misturas sem fibras	54
figura 31: Programa experimental, misturas aleatorizadas.....	55
figura 32: Fibras preparadas para serem misturadas no ensaio de Proctor	57
figura 33: Material preparado (Agregados, cimento e fibras) para a realização dos ensaios de Proctor	58
figura 34: Misturas dos materiais, momento da adição das fibras	58
figura 35: Aspecto da mistura logo após a retirada da betoneira;.....	59
figura 36: Aspecto das misturas durante o ensaio de Proctor.	59
figura 37: Execução do ensaio de Proctor.....	60
figura 38: Amostras retiradas durante o ensaio de Proctor;.....	60

figura 39: Aspecto das misturas compactadas;	61
figura 40: Corpos-de-prova moldados para os ensaios de compressão axial e diametral;	61
figura 41: Corpos-de-prova para ensaio de retração, vista em planta e vista lateral, respectivamente;	62
figura 42: Corpos-de-prova utilizados para os ensaios de retração;	63
figura 43: Curvas de compactação encontradas com as misturas de agregados	65
figura 44: Ensaios de compactação com teor de cimento de 200 kg/m ³ (Adaptado de Fedrigo, 2012).	66
figura 45: Ensaios de compactação com teor de cimento de 80 kg/m ³ (Adaptado de Fedrigo, 2012).	67
Figura 46: Curvas de compactação obtidas com fibras de 24mm de comprimento (a) Teor de fibras 0,25% e teor de cimento 200 kg/m ³ . (b) Teor de fibras 0,5% e teor de cimento de 200 kg/m ³ . (c) Teor de fibras 0,25% e teor de cimento 80kg/m ³ . (d) Teor de fibras 0,5% e teor de cimento 80kg/m ³	68
Figura 47: Curvas de compactação com fibras de 24mm. (a) Teor de fibras 0,25% e teor de cimento 200 kg/m ³ . (b) Teor de fibras 0,5% e teor de cimento de 200 kg/m ³ . (c) Teor de fibras 0,25% e teor de cimento 80kg/m ³ . (d) Teor de fibras 0,5% e teor de cimento 80kg/m ³ .	69
figura48: Aspecto não homogêneo nas misturas com grandes teores de fibras.	70
figura49: Representação do aumento de resistência em função das porcentagens de fibras e seus comprimentos.	71
Figura50: Resultados com acréscimo na energia de compactação	72
Figura51: Efeitos da adição de fibras para diferentes energias e consumos de cimento	73
figura52: Resultados com maior teor de cimento e maior energia de compactação	74
Figura53: Efeitos principais obtidos na resistência à compressão axial, a letra C representa o comprimento da fibra, o D representa o teor das fibras o E representa o teor de cimento e o F representa a energia de compactação	75
figura 54: Resultados com baixo consumo de cimento e baixa energia de compactação.	76
figura 55: Gráfico dos comparativos entre fibras e teores.	77
Figura 56: Efeitos da grande cimentação e baixa energia de compactação.	78
figura 57: Gráfico representativo de grande consumo de cimento e alta energia de compactação para a resistência a compressão diametral.	79
figura 58: Gráficos de efeitos principais para os ensaios de compressão diametral, C: Comprimento da fibra, D: Teor de fibra, E: Teor de cimento e F: Energia de compactação;	80
figura 59: Resultados do ensaio de retração;	81
figura 60: Gráfico de interação entre os fatores comprimento de fibras e teores de fibras.	87
figura 61: Gráfico de interação entre os fatores teor de cimento e energia de compactação	88
figura 62: Análise estatística referente a compressão axial	89
figura 63: Análise estatística referente a compressão diametral	89

LISTA DE TABELAS

tabela 1: Ensaios de compactação com agregados.....	65
tabela 2: Ensaios de Proctor realizados sem a adição de fibras (Adaptado de Fedrigo, 2012)	66
tabela 3: Ordem dos ensaios de Proctor realizados.....	67
Tabela 4: Resultados da resistência a compressão axial (MPa), com teor de cimento de 80kg/m ³ e energia de compactação equivalente ao Proctor Normal	71
Tabela 5: Resultados da resistência a compressão axial (MPa), com teor de cimento de 80kg/m ³ e energia de compactação equivalente ao Proctor Modificado.....	72
tabela 6: Resultados das misturas com aumento do teor de cimento e energia de compactação baixa.	73
tabela 7: Resultados da resistência a compressão axial (MPa), com teor de cimento de 200kg/m ³ e energia de compactação equivalente ao Proctor Modificado.....	74
tabela 8: Resultados dos ensaios de compressão diametral.....	76
tabela 9: Resistências a compressão diametral com baixo consumo de cimento e alta energia de compactação...77	77
Tabela 10: Concretos com grande cimentação e baixa energia de compactação.....	78
tabela 11: Resistencia dos concretos com grandes consumos de cimento e grandes energias de compactação.....	79
tabela 12: características de moldagem e resultados dos ensaios de compressão axial.....	83
tabela 13: Características de moldagem e resultados dos ensaios de compressão diametral.....	84
tabela 14: Análise da variância para a resistência a compressão axial.....	85
tabela 15: Análise de variância para a resistência a compressão diametral.....	86

LISTA DE QUADROS

quadro 1: Principais diferenças entre CCR de barragens e pavimentação.....	19
quadro 2: Qualidade do concreto em função de sua porosidade (RICCI, 2007).....	32
quadro 3: Propriedades físicas e químicas do cimento utilizado	49
quadro 4: Principais características das fibras utilizadas na pesquisa.....	50
quadro 5: Variáveis de resposta, controle e ruído.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CMC	Concreto massa convencional
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EC	Energia de Compactação
GC	Grau de Compactação
UHE	Usina Hidrelétrica

1 INTRODUÇÃO

O concreto compactado a rolo, conhecido também como concreto farofa, *slump* zero, entre outras denominações, é um concreto bastante utilizado em barragens, pavimentação e em pisos industriais. Também para definir o concreto compactado a rolo pode-se dizer que é um Concreto de consistência seca, que, no estado fresco, pode ser misturado, transportado, lançado e compactado por meio de equipamentos usualmente utilizados em serviços de terraplanagem ou enrocamento (ANDRIOLO, 1989). Portanto, trata-se de um concreto seco, consolidado por compactação externa, sendo esta executada geralmente por rolos compressores vibratórios, frequentemente utilizados na compactação de solos. (ABREU, 2003).

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O setor de transportes necessita de constantes melhorias e manutenções devido a sua importância para o crescimento do país, uma vez que boas estradas induzem a bons negócios, e conseqüentemente, possibilitam um maior desenvolvimento econômico. Mesmo tendo um retorno positivo, o setor rodoviário precisa de alternativas que garantam a serventia do pavimento e reduzam custos para que cada vez mais estradas sejam pavimentadas e sirvam de escoamento para a produção industrial e agrícola. Dessa forma, facilita-se o transporte e agilizam-se os processos de exportação de produtos, que cada vez são mais importantes e constantes devido à globalização e a acordos entre países. Cabe, neste caso, a construção de pavimentos com estruturas robustas e de elevado desempenho, para que satisfaçam as exigências do tráfego.

Uma alternativa bastante difundida e cada vez mais utilizada é o concreto compactado com rolo (CCR). Trata-se de uma tecnologia bastante antiga, utilizada largamente na concretagem de maciços em barragens por gravidade, além de ter seu uso bastante difundido na área de pavimentação. Desde 1910, esta técnica já vem sendo utilizada pelos Estados Unidos. Outros países que também fazem uso desta tecnologia são: Suécia, desde 1930, Bélgica, desde 1935, entre muitos outros.

A pavimentação precisa de alternativas duráveis e econômicas, possibilitando aos gestores, uma cobertura muito maior de caminhos pavimentados, expandindo a infraestrutura viária e facilitando a ligação entre localidades. Além de o pavimento ser durável e econômico, ele deve proporcionar segurança e conforto para os usuários.

É bastante comum que os pavimentos apresentem defeitos decorrentes dos efeitos da retração e fissuras em sua superfície ou nas ligações internas, este motivo leva a necessidade de desenvolver novas tecnologias com utilização de materiais de reforço nestes pontos frágeis para que o concreto possa ser utilizado com segurança e conforto na pavimentação. Desta forma é possível a redução do custo de execução, elevando a eficiência na produção e uso de tecnologias apropriadas para as condições às quais são submetidos os diversos tipos de pavimentos.

Uma técnica para melhorar estes aspectos é o uso de concreto compactado com rolo com adição de fibras, por ser atrativo economicamente. Ao se adicionar fibras o CCR recebe reforço em seus pontos frágeis, melhorando suas características a flexão e conseqüentemente prolongando sua vida útil.

Segundo o USACE (2000), o CCR tem um consumo reduzido de cimento comparado com o concreto convencional, além de demandar um tempo menor para a sua execução com reduzida quantidade de mão-de-obra.

Quando se trata de durabilidade, a adição de fibras pode prolongar a vida útil do pavimento, principalmente após o início da fissuração, que é provocada pela infiltração de água ou outros fatores, tais como excesso de carga, problemas de execução ou outros problemas decorrentes do uso dos pavimentos. Quando isto ocorre, placas começam a se soltar e se formam panelas, então a adição deste componente, ajuda a adiar ou evitar que as placas se soltem de imediato, até que se possa fazer manutenção.

Considerando os pontos frágeis do concreto, o problema estudado é a contenção ou redução dos defeitos do CCR quando utilizado em pavimentação, quando suas principais solicitações são de compressão e tração. Para o comparativo o estudo foi feito com a adição de diferentes comprimentos e teores de fibras de polipropileno ao CCR, para identificar quais os efeitos que as fibras provocam nas misturas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Estudar o efeito, quando submetidos a compressão, tração e retração, da adição de diferentes comprimentos e teores de fibras em concreto do tipo CCR com diferentes consumos de cimentos e energias de compactação.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são definidos como:

- Avaliar a influência de diferentes teores de cimento para o concreto compactado a rolo reforçado com fibras de polipropileno com comprimento de 6mm e 24mm, na resistência do concreto.
- Avaliar a influência dos comprimentos de fibras e dos teores de cimento e fibras em relação a retração de corpos-de-prova de concreto que obtiveram melhor desempenho em relação a resistência a compressão axial e diametral.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo busca-se contextualizar o concreto compactado a rolo, através de pesquisa em trabalhos publicados. Além de mostrar as características dos materiais e compósitos em obras executadas com esta tecnologia, a fim de conhecer sobre a tecnologia estudada.

2.1 HISTÓRICO

O concreto é um material que possui grande versatilidade de aplicação na Engenharia. Desde a sua criação, vem sofrendo significativas modificações tanto na sua forma de produção e aplicação quanto na sua composição, buscando atender melhor cada ocasião específica à qual é designado. A razão para estas constantes modificações é a busca permanente do aperfeiçoamento de suas propriedades, ampliando ainda mais o seu espectro de utilização.

Conhecido como concreto compactado com rolo, concreto rolado, concreto compactado seco, concreto não plástico, concreto sem abatimento, concreto econômico, concreto magro ou concreto pobre rolado, o CCR é um concreto de consistência seca, utilizado amplamente na construção de maciços em barragens, onde grandes volumes são executados, mas também utilizado em pisos industriais e estruturas de pavimentos. Sua utilização é vantajosa por ser econômico, e sua execução é facilitada em função de permitir receber compactação por rolos compressores, vibratórios ou não, sendo um produto com elevada taxa de produção.

A primeira data registrada, tida como início do uso do CCR, é de 1891, na cidade de Bellefontaine no estado de Ohio. Entretanto, somente a partir de 1944 houve um incremento no uso desta tecnologia, em função da rápida execução de forma a agilizar a recuperação de pavimentos destruídos durante a segunda guerra mundial.

O CCR é considerado um concreto econômico principalmente em função do consumo de cimento (entre 80 e 320 kgf/m³). Dependendo do uso, pode ser empregado desde sub-base de pavimentos de concreto simples até empregados em camadas de rolamento na superfície dos pavimentos.

Dependendo do nível de exigência de desempenho dos pavimentos, o consumo de cimento pode variar de 40 kg/m³ à 380 kg/m³. Em baixos consumos de cimento, o CCR apresenta uma aparência semelhante às misturas de brita graduada tratada com cimento (BGTC). Já com maiores consumos e preparo com uma curva granulométrica adequada, sua aparência depois de compactado, é de concreto convencional (ABREU, 2003).

Conforme Pinto (2010), o CCR é um concreto com aspecto seco transportado e aplicado de forma semelhante àquela empregada em enrocamentos ou obras de terra.

Para a USACE (2000), o CCR possui menor consumo de cimento comparado ao concreto convencional. Além disso, é necessário menor tempo para a execução do mesmo e com uma quantidade reduzida de mão-de-obra.

Por muitos anos o CCR foi utilizado com sucesso para a construção de barragens, seu uso em pavimentação, com domínio da técnica, é mais recente. As principais diferenças entre as duas aplicações são os tamanho dos agregados, a graduação dos mesmos, quantidade de água, a relação entre cimento e materiais. Tipicamente o CCR para pavimentos utilizam agregados menores e baixa relação água/cimento e é construído em camadas simples ao invés de múltiplas camadas. (DELATTE, AMER, STOREY, 2003).

quadro 1: Principais diferenças entre CCR de barragens e pavimentação.

Principais diferenças entre barragens e pavimentação em relação ao CCR		
	Granulometria	Consumo de cimento
Pavimentação	Dmax característica de 12,5 a 32 mm	Cuidado com a resistência a abrasão em função do atrito
Barragens	Dmx característica pode chegar a 150 mm	Consumo moderado a fim de evitar excessivo calor de hidratação

Fonte: Adaptado de Abreu (2003).

Quando se deseja utilizar CCR em pavimentação, seu uso é priorizado em camadas da base ou sub-base de pavimentos, nestes casos, não necessitando de elevadas resistências mecânicas, pois é pouco utilizado como revestimento. Ainda tem-se verificado que o uso do CCR em camada rolante não é adequado em função de desconforto para usuários quando em velocidades superiores a 80km/h, devido a problemas de textura e uniformidade.

O desenvolvimento do CCR visava à obtenção de um material com propriedades estruturais de um concreto com características de lançamento semelhantes a um solo utilizado em aterros (USACE, 2000). Entretanto, a metodologia construtiva que utiliza concreto compactado com rolo foi inicialmente idealizada para fazer uso de solo-cimento (Loturco, 2012).

O CCR tem como algumas características importantes o baixo consumo de cimento e a facilidade de execução, sendo possível que qualquer empresa, pequena, média ou grande, possa executá-lo sem problemas. Ainda há um grande interesse nesta tecnologia em função da demanda por infraestrutura tanto rodoviária como urbana ter crescido significativamente e ainda estarmos com um déficit muito grande em relação a boas condições de tráfego, além do uso do CCR possibilitar o uso de materiais jogados e descartados no meio ambiente, tais como resíduo de construção e demolição, escória de alto forno, entre outros.

figura 1:CCR utilizado em maciço de usina hidrelétrica no Estado do Paraná



(www.londrinaodiario.com.br, 2012)

Dadas as características favoráveis ao emprego como bases rígidas e de grande durabilidade para pavimentos, o CCR passou nas últimas duas décadas a ser um material de grande interesse. Por tratar-se de um material versátil, é possível também, que seu emprego (em pequena, média e grande escala) venha contemplar a introdução de materiais alternativos, desde que técnica e economicamente justificáveis. Tendo em vista as grandes demandas de infraestrutura urbanas e rurais do país.

O CCR é uma técnica utilizada já há bastante tempo, principalmente estudado e utilizado para a construção de barragens, quando se deseja utilizar este material para pavimentação acaba diferindo do anterior sob os seguintes aspectos (ABREU, 2003):

- Consumo de cimento: No CCR utilizado em barragens (concreto massa), tem-se um consumo de cimento reduzido de maneira a assegurar um baixo calor de hidratação. Quando utilizado em pavimentação, principalmente como revestimento, uma preocupação importante

é a resistência a abrasão, sendo necessário aumentar o consumo de cimento e escolher criteriosamente os agregados para assegurar esta propriedade;

- Dimensão máxima do agregado: Quando utilizado em barragens (Concreto massa), a dimensão máxima característica do agregado pode chegar até a 150mm, entretanto, quando o CCR é empregado em pavimentação, a dimensão máxima característica usual se situa entre 12,5mm e 32mm.

- Há maior flexibilidade quanto ao tipo de cimento utilizado: Como não se tem conhecimento de ações deletérias no CCR para pavimentação, como por exemplo reação álcali-agregado, não há implicação quanto a escolha do tipo de cimento a ser empregado em seu preparo.

figura 2: CCR utilizado em pavimentação



(www.cimentoitambe.com.br, 2012)

figura 3: Espalhamento e compactação de CCR



(www.3-co.com, 2012)

2.1.1 CCR utilizado em Barragens

As Barragens vêm sendo construídas há muitos anos para diversos fins, seja para geração de energia hidrelétrica, para irrigação, controle de inundações, abastecimento humano ou outras utilizações. Constituem importantes meios para atender às necessidades básicas de infraestrutura da população, pois em muitos países a energia utilizada é a gerada por hidrelétricas. No Brasil, por exemplo, cerca de 80% de população é abastecida com este tipo de energia (FILHO, 2003).

Nas últimas décadas, países investiram muitos recursos na construção de barragens para a geração de energia elétrica e ainda existem muitos projetos que deverão ser executados nos próximos anos. Muitas destas barragens usam a tecnologia do CCR para grandes maciços.

A partir da década de 50, muitos governos e, em alguns países, o setor privado vinham investindo fortemente nesta fonte de geração de energia elétrica para atender ao crescimento da população e ao crescimento da economia (FILHO, 2003).

Até 1950, as barragens de CCR representavam cerca de 38% das barragens com mais de 15m de altura no mundo. Este número teve um decréscimo acentuado entre 1951 e 1977, chegando a 25% das barragens. Entre 1978 e 1982, o número de barragens decresceu ainda

mais, chegando a 16,5%. Esta diminuição se deu principalmente pelo alto custo do concreto e pelo uso da técnica de barragens com maciços argilosos (FILHO, 2003).

Nas conferências de Asilomar, nos Estados Unidos, em 1970 e 1972, a busca pela segurança das barragens de concreto e a eficiência da construção das barragens de concreto e das barragens de terra centralizaram a atenção. Destaca-se o trabalho denominado *The Optimum Gravity Dam*, de Raphael, J. M., em 1970, que destaca a aplicação prática de equipamentos de construção de maciços terrosos e rochosos para a construção de maciços de concreto, conduzindo, assim, ao desenvolvimento da metodologia do concreto compactado com rolo. (FILHO, 2005).

figura 4: Projeto de barragem em CCR na China



(www.3-co.com, 2012)

Para Gentile (1964), entre 1958 e 1964, na Itália, ocorreu um grande acontecimento para o desenvolvimento da tecnologia do concreto compactado a rolo para a construção de barragens. Foi na Itália, a construção da barragem de Alpe Gera. Substituindo os tradicionais blocos de concreto verticais, o concreto foi lançado em múltiplas camadas horizontais, com cerca de 70 cm de altura. Desta forma, a barragem foi executada com a mesma tecnologia de barragens de terra, pois o concreto era transportado por caminhões fora de estrada e espalhado com tratores de esteira do tipo *Bulldozer*. Porém a compactação do concreto foi realizado com vibradores de imersão, por este motivo, a barragem de Alpe Gera não se tornou a primeira barragem a ser executada com concreto compactado com rolo.

A primeira aplicação de concreto compactado com rolo em barragens no Brasil ocorreu em 1978, na Itaipu Binacional. Na ocasião, o concreto foi aplicado na rampa de acesso às fundações da estrutura de desvio com um volume total de 26.000m³, com pico de concretagem de 3054 m³/dia. No mesmo ano, o concreto compactado com rolo foi empregado na barragem de São Simão, onde foram lançados cerca de 40000m³, em camadas de 50 cm de altura, no preenchimento das galerias de desvio, na parede de concreto e na regularização. Em 1982, foi relatado o primeiro lançamento de CCR em estrutura permanente. A aplicação ocorreu no muro direito da eclusa de navegação de Tucuruí, com volume de cerca de 12.000 m³, executados em camadas de 25 cm de altura. Na Usina Hidrelétrica de Três Marias, foram utilizados aproximadamente 14.600 m³ de concreto rolado na modificação do perfil do vertedouro. (MILANI FILHO, 2003)

Outro marco importante no Brasil, foi a construção da barragem de Saco de Nova Olinda, localizada na Paraíba, construída para acumular água para irrigação, em 1986, com 56m de altura e 138.000m³ de concreto consumido, foi construída em 3,5 meses, com um pico de produção de concreto de 2.500 m³/dia. Os resultados e detalhes desta obra receberam destaque no país e no exterior, especialmente pelo custo praticado do CCR. Foi a primeira barragem Brasileira totalmente construída em concreto compactado com rolo e também a primeira barragem de CCR em arco construída no mundo (ANDRIOLO, 1998).

figura 5: Barragem do Saco, localizada no estado da Paraíba – Brasil



(www.catoleneuws.com.br, 2012)

figura 6: Paramento em arco da barragem do Saco de Nova Olinda



(www.catoleneuws.com.br, 2012)

2.1.2 CCR utilizado em Pavimentação

Segundo o DER-SP (2006), o CCR utilizado em pavimentação é a camada de concreto de cimento Portland, constituído por concreto simples, com baixo consumo de cimento e consistência seca, onde a compactação é realizada com rolos compactadores ou equipamento similar. Geralmente é empregado na constituição estrutural do pavimento.

A aplicação do CCR iniciou-se em pavimentos e em concretos de regularização, com uso contínuo desde a década de 20. Como principal aplicação, eram utilizados como base de pavimentos e pistas aeroportuárias. A técnica teve denominação usual de mistura pobre (*lean mix*), concreto seco pobre e outras denominações que evocavam a ideia de material grosseiro para aplicações secundárias, com características mecânicas sofríveis, (FILHO, 2005).

Para Pitta (1995), as características do material utilizado em obras rodoviárias são completamente diferentes daquelas utilizadas em obras hidráulicas, devido às distintas solicitações de trabalho exigidas. As principais diferenças a serem consideradas são: a dimensão máxima do agregado, conforme apresentado no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e o consumo de cimento maior encontrado nos concretos usados em pavimentação.

Além dos materiais utilizados pelo CCR serem encontrados com grande facilidade em qualquer região do país, uma grande vantagem deste método construtivo, o CCR também apresenta como grande vantagem na construção de pavimentos, a rapidez e a praticidade de

aplicação em relação a outras alternativas de pavimentação. Além disto, o transporte pode ser realizado facilmente em caminhões betoneira ou caminhões basculantes, em função da consistência seca que ele apresenta (ABREU, 2003).

Quanto à aplicação, podem ser utilizados equipamentos do tipo motoniveladora, distribuidora de agregados, distribuidora de concreto asfáltico ou vibroacabadoras de alto poder de compactação. Em seguida, este concreto é compactado com o auxílio de rolos compressores, lisos, vibratórios ou de pneus.

O CCR utiliza os mesmos equipamentos da pavimentação tradicional em concreto asfáltico, não há necessidade de grandes investimentos extras para execução deste tipo de pavimento, uma vez que todos os equipamentos necessários estão disponíveis em qualquer empresa de pavimentação, por menor que ela seja, sendo encontrados estes equipamentos, também, em órgãos públicos de pequenas e grandes cidades. Essa facilidade já proporciona uma economia significativa quando da opção do projeto do pavimento, pois não requer investimentos em equipamentos. (ABREU, 2003).

Em função da técnica do concreto compactado com rolo envolver o uso de equipamentos e materiais convencionais em construção, ele resulta em custos mais baixos em relação a outros métodos de construção de pavimentos. (ANDRIOLO, 1998).

A consistência do CCR é muito semelhante a um solo úmido e com trabalhabilidade particular de maneira a permitir sua compactação com rolos compressores lisos, podendo ser tanto estáticos como vibratórios. Eventualmente, quando o CCR for aplicado em revestimento, é recomendada a associação de rolos de pneus e lisos para proporcionar melhor acabamento da superfície de rolamento deixando o rodar mais suave e confortável ao usuário. Em baixo consumo de cimento, o CCR apresenta uma aparência muito parecida com a da brita graduada tratada com cimento (BGTC). Já com maiores de consumo e preparado com uma curva granulométrica adequada, sua aparência depois de compactado, é de um concreto convencional (Pitta, 1995).

Segundo o DNIT (2004), não há restrições quanto ao tipo de agregado utilizado no CCR para pavimentação, mas é importante a ausência de contaminações nos mesmos. É necessário medir a umidade dos agregados a cada 2 horas, principalmente do agregado miúdo. A água é o principal fator com que se deve preocupar, pois sua dosagem adequada fará com que o CCR não fique aderido aos rolos compressores. Para que se consiga a condição ideal de compactação a umidade da mistura deve estar entre 5% e 10%. Além destes cuidados, deve-se ter atenção com a maneira de transporte do CCR, este deve ser feito por meio de equipamentos que não provoquem sua segregação e protegido por lonas de forma a evitar a

perda de umidade. Em função da sua consistência seca, o transporte pode ser realizado tanto por caminhões betoneira quanto por caminhões basculantes (Abreu e Figueiredo, 2003).

Existem várias formas para se realizar a distribuição do concreto rolado sobre a base. Esta etapa do trabalho pode ser realizada por meio de motoniveladoras, distribuidora de concreto asfáltico, distribuidora de agregados, manualmente ou vibrocompactadoras de alto poder de compactação, como mostrado na figura 7. Alguns cuidados devem ser tomados no momento da aplicação do CCR, tais como: aplicar uma película isolante e impermeável antes da camada do CCR, além de a camada de espalhamento ser ligeiramente superior à camada final de projeto, já compactada. Cerca de 20% a 30% é suficiente para garantir a altura da camada final projetada para o CCR (DNIT, 2004).

figura 7: Lançamento de CCR



(Adaptado de: Kuperman e Andriolo, 2012)

Para que se tenha um bom resultado, a compactação só deve acontecer depois de o CCR estar devidamente regularizado, figura 8, este processo deve ser iniciado pelas bordas do pavimento, preferencialmente com rolo compactador liso de no mínimo 10 toneladas. Além desses, também podem ser usados rolos compressores, vibratórios ou de pneus. A espessura final da camada não deve ser inferior a três vezes a dimensão máxima do agregado do concreto, podendo ser admitida uma espessura de até 30 cm, desde que a camada esteja completamente homogênea (DNIT, 2004).

figura 8: Lançamento de CCR a ser compactado



Fonte: Adaptado de: ABCP (2012)

Conforme o DNIT (2004), deverão ser coletadas amostras dos corpos-de-prova, figura 9, antes de cada compactação, é recomendada a coleta de seis amostras de dois corpos-de-prova para cada 2500m² de pista. Para armazenamento dos corpos-de-prova, estes deverão ser cobertos por um pano molhado por 24 horas, para só então serem desmoldados e levados a cura em câmara úmida.

figura 9: Moldagem e coleta de corpos-de-prova



Fonte: Adaptado de: Kuperman e Andriolo, (2012)

Outros cuidados são importantes e devem ser seguidos, conforme recomendação do DNIT (2004). Tais cuidados referem-se às juntas transversais de construção, figura 10. É importante,

ao fim de cada jornada de trabalho, que elas sejam executadas, em local já compactado. Caso necessário, as juntas transversais ou longitudinais devem ser construídas colocando-se chapas metálicas revestidas com lençol de plástico, as mesmas são retiradas após o espalhamento do CCR. A superfície do concreto compactado a rolo deverá ser protegida imediatamente após o término da compactação. Diversas técnicas podem ser utilizadas na cura do CCR, desde a aspersão de água até a cura química. Durante a cura, o tráfego deverá ser interdito até que o pavimento atinja resistência para solicitação de carga. Após a cura, é necessária a selagem das juntas, previstas em determinados locais conforme projeto.

figura 10: Junta transversal de construção



Fonte: Adaptado de: Kupman e Andriolo, (2012)

Quando o concreto compactado a rolo começou a ser utilizado em pavimentos, esta nova tecnologia de pavimentação era vista como de baixo custo e como um pavimento durável. No Canadá o CCR foi usado em áreas com pavimento para trânsito pesado e condições adversas de temperatura. O pavimento de concreto compactado a rolo então provou ser um pavimento de sucesso para estes usos além de ter baixos custos de construção. O CCR tem sido um excelente substituto para o concreto asfáltico, em locais onde a suavidade ao rolamento e a rugosidade do pavimento não são uma necessidade. Frente a estas características o CCR tem tido um bom desempenho tanto no Canadá, onde as temperaturas são extremamente frias, como no Sul dos Estados Unidos, quando as temperaturas atingem níveis de bastante calor. (DELATTE, AMER, STOREY, 2003).

figura :11 Textura do concreto compactado a rolo



Fonte: (www.embusa.com.br (2012)).

2.2 Principais características do CCR

As principais características desejadas em concreto são: Resistência, estabilidade dimensional e durabilidade.

Em relação à resistência de um material, podemos dizer que é a capacidade deste resistir à tensão sem ruptura. Entenda-se por tensão, a submissão do concreto a compressão, ao cisalhamento e à tração (SANTI, 2008). As fibras exercem papel importante na tensão a tração que o concreto é submetido, tensões estas que ocorrem com frequência no seu uso em pavimentação.

Quanto à estabilidade dimensional, os principais motivos que levam o concreto a ruptura são as deformações provocadas por cargas excessivas ou deformações volumétricas decorrentes de variações de temperatura (SANTI, 2008). É por intermédio do controle da temperatura de lançamento, do modo de cura, da dosagem, da limitação da altura das camadas e do dimensionamento das juntas de contração que se pode fazer o controle das variações volumétricas de origem térmica (FILHO, 2005). As variações volumétricas atingem os concretos através de reações de materiais cimentícios, condições ambientais, peso próprio, empuxo da água e dos esforços gerados pela percolação da água, além de efeitos sísmicos

(FILHO, 2005). Em se tratando de durabilidade, a exposição do concreto a ambientes agressivos pode reduzir drasticamente sua vida útil. Entenda-se por ambientes agressivos, locais com ataques químicos, expostos a intempéries, abrasão ou qualquer outro tipo de processo de deterioração. Conseqüentemente, consideramos que um concreto é durável, quando este mantém suas formas originais, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente (SANTI, 2008). Nenhum material é eternamente durável devido à interação ambiental, microestrutura e propriedades que se modificam com o passar do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Um concreto é considerado durável quando não forem ultrapassados, durante sua confecção e uso, os limites de desempenho mínimo e seus estados limites (SANTI, 2008). Um material atingiu o fim de sua vida quando as suas propriedades deterioraram-se a tal ponto que sua recuperação é considerada como insegura ou antieconômica (MEHTA, MONTEIRO, 1994). Portanto, a durabilidade do concreto depende de fatores relacionados aos seus agregados e aglomerantes, além do grau de compactação e da exposição a ambientes mencionados anteriormente. Para a proteção do corpo da estrutura, normalmente, é feita uma proteção externa com camada de concreto mais rico em aglomerante, um revestimento em concreto convencional ou o uso de membranas impermeáveis (SANTI, 2008). Sendo assim, o uso do CCR em base de pavimentação é bastante adequado, pois, sobre a base, haverá camadas protetoras desta estrutura.

Problemas relacionados à condutividade hidráulica também são bastante comuns nos concretos e necessitam de cuidados especiais. Condutividade hidráulica é a propriedade que indica a facilidade com que um líquido tem ao passar pela estrutura interna de um determinado corpo. A condutividade hidráulica é uma propriedade importante quando se refere à durabilidade de uma estrutura de concreto (SANTI, 2008). A facilidade com que um líquido penetra, transportando agentes agressivos ao concreto, ocorre principalmente na região da interface pasta-agregado, sendo que, em concretos com baixo consumo de aglomerante, como o CCR, a interface é delicada (ANDRADE, 1997). Existem três métodos pelos quais a água pode percolar pelo concreto ou outros materiais semiporosos: sob pressão para forçar o líquido da superfície exposta para a superfície livre através dos espaços vazios, pela difusão através dos poros capilares, devido a diferença de pressão de vapor nas faces opostas do concreto, e pela capilaridade e evaporação na superfície livre (ANDRADE, 1997). A infiltração de água nas bases de pavimentação tem provocado grandes danos às rodovias, provando a importância de se ter uma base protegida e bem executada.

quadro 2: Qualidade do concreto em função de sua porosidade (RICCI, 2007)

Qualidade do concreto	Porosidade (%)
Excelente	10 a 11
Boa	11 a 15
Satisfatória	16 a 18
Medíocre	19 a 22
Ruim	22

Fonte: Adaptado de Ricci (2007).

2.2.1 Vantagens do CCR em relação às principais bases cimentadas

Por muitos anos, o principal material utilizado para base de pavimentos foi o solo-cimento. Já a partir de 1960, com a construção da rodovia Castelo Branco, começou a ser utilizada a brita graduada tratada com cimento (BGTC). Seu uso foi amplamente difundido na década de 80, porém rodovias que utilizaram estas tecnologias, apresentaram uma série de patologias nos anos que se seguiram, algumas destas patologias se manifestaram com o surgimento de fissuras em blocos, de restauração dificultosa, (RICCI, 2007) consequentemente com altos custos. Anos depois da execução de bases de BGTC e solo-cimento, estes pavimentos apresentaram comportamentos diferentes, provocando uma série de patologias relacionadas a sua base.

No caso da base de solo-cimento, a hidratação do cimento cria uma pasta envolvendo as partículas e cria uma matriz que fixa as partículas não aderidas. No caso da BGTC, esta pasta não é suficiente para envolver totalmente as partículas dos agregados, formando assim, pontos de aderência, ou seja, ligações pontuais entre os grãos dos agregados, portanto, a estabilização dos agregados em função da ação do cimento apresenta uma série de vazios (poros). “A melhoria da resistência da BGTC está intimamente ligada a uma dosagem que apresente uma distribuição granulométrica desuniforme, com a maior quantidade de pontos de contato entre os grãos e pasta de cimento, após a sua compactação e cura” (RICCI, 2007). A resistência da BGTC depende, além da resistência dos grãos, das ligações ocasionadas pela pasta de cimento causando uma coesão aparente no material (BALBO, 1993).

Nos dois casos, no solo-cimento ou na brita graduada com cimento, os problemas estão relacionados à pequena quantidade de argamassa existente nas misturas, provocando

problemas de heterogeneidade nos materiais. Existem limitações técnicas e de custo quanto ao aumento do consumo de cimento para estas bases, tornando-as inviáveis (RICCI, 2007). A heterogeneidade do material implica em porosidade heterogênea e também influencia negativamente na fadiga do material em serviço (BALBO, 1993).

O processo de fadiga que o concreto é submetido, associado às falhas provocadas pela falta de cimento na união entre os agregados, provoca uma série de fissuras, formando blocos sob o revestimento. Estes blocos apresentam atrito entre si, provocando danos no revestimento. Este fenômeno exige que seja feita intervenção no pavimento para sua manutenção, necessitando de demolição e remoção da base cimentada e do revestimento (RICCI, 2007).

Tanto a base de solo-cimento quanto a base de BGTC, apresentam desempenho desfavorável em relação tração na flexão causada pela fadiga do material provocada pela repetição de cargas que os pavimentos estão submetidos. Estas bases rígidas tem como característica, resistir aos esforços de flexão, deixando a camada de revestimento trabalhando à compressão no pavimento. *“Apesar das vantagens iniciais, estas bases possuem pequena resistência à tração na flexão que somada ao problema da heterogeneidade da mistura, são os motivos de rompimentos precoces destas camadas cimentadas”* (RICCI, 2007). Para melhorar a condição do pavimento nestas situações ou simplesmente postergando por algum tempo a intervenção necessária para resolver estes problemas, o uso de fibras pode ser uma alternativa bastante interessante. Esta alteração pode fazer com que durante a vida útil do pavimento, exista uma redução do número de manutenções necessárias para conservação da estrutura de concreto.

As principais qualidades do CCR são (RICCI, 2007):

- Elevada rigidez contribuindo decisivamente para se evitar o surgimento de deformações em trilhas de roda nas misturas asfálticas de revestimento;
- Bases mais homogêneas, elevada resistência e menores riscos de retração hidráulica dada à exigência de cura do material;
- Não está sujeito a processos de contaminação e/ou erosão;
- Oferece melhores condições de atendimento do grau de compactação desejado para o revestimento asfáltico;
- Resistência à fadiga indiscutivelmente superior que bases estabilizadas com cimento (RICCI, 2007);
- Não apresentam suscetibilidade estrutural de materiais estabilizados apoiados sobre suporte muito resiliente, como é o caso da BGTC;

- Viabilização do conceito de construção por etapas uma vez que a base poderá ser projetada para uma durabilidade muito maior que o próprio revestimento, que poderá receber à medida da necessidade;

Além das vantagens citadas, o CCR permite um arranjo melhorado na sua granulometria, que resulta em concretos compactados com energias adequadas, elevando sua resistência à tração na flexão e baixos consumos de cimento (RICCI, 2007).

Também pode-se relacionar como vantagens, comparando com outros materiais utilizados na pavimentação, a utilização do concreto compactado a rolo (CCR) proporciona uma economia bastante significativa em relação ao concreto massa convencional (CMC), tornando o CCR um material muito interessante para este fim. Para o USACE (2000), o custo do CCR é de 25% a 50% mais baixo que o CMC. Essa economia acontece devido a menor quantidade de cimento utilizada, maior velocidade de construção e a reduzida mão-de-obra por unidade de volume.

2.2.2 Retração por secagem

No início da utilização do CCR na engenharia, não havia preocupações em relação à ocorrência de fissuras por causa do calor de hidratação do cimento, porém com o crescimento de seu uso, foram detectadas várias manifestações patológicas decorrentes de tais problemas.

As fissuras por retração em função do calor de hidratação do cimento, costumam ocorrer em intervalos entre 10 a 25m, estes valores podem variar de acordo com o maior ou menor consumo de cimento por m³.

figura 12: Fissura por retração em pavimentação



(Itambé cimentos 2012)

O fenômeno de retração no concreto, é um fenômeno bastante ocorrente e pouco compreendido. Ela ocorre em função da redução de volume, neste caso causada pela perda de água. Não existe, na verdade, um único tipo e este é o maior complicador: ela pode acontecer desde os primeiros minutos de mistura do material ou ao longo da vida da estrutura. Por isso, dependendo da causa, recebe diferentes designações (CIMENTOS ITAMBÉ, 2012).

A retração por secagem nos concretos é um fenômeno inevitável ao material em questão, principalmente se exposto à umidade abaixo da condição de saturação. Como é uma das principais causas da fissuração, assume fundamental importância, pois a sua ocorrência está associada à durabilidade do concreto (ANDRADE, 1997).

De acordo com ANDRADE (1997), a retração pode ser influenciada por diversos fatores, alguns deles são: condições ambientais, litologia dos agregados, dimensão máxima característica, propriedades físicas tais como absorção e massa específica, proporção dos materiais (principalmente a quantidade de água), microfissuras, entre outros.

figura 13: Fissura em pavimento de concreto



(Fonte: www.consultoriaeanalise.com)

As deformações são influenciadas pela relação proporção pasta/agregado, principalmente nos concretos em cujo volume de agregado graúdo ($D_{\text{máx}} > 4,8\text{mm}$) situa-se entre 50% e 70% do volume total do concreto endurecido. Estas deformações podem ser consequência da ação de carregamentos ou não (ANDRADE, 1997).

Desta forma, do ponto de vista da deformabilidade do concreto endurecido, de maneira geral as suas características estão associadas à estrutura interna. Tal fato se explica considerando que o concreto é composto pela mistura de diferentes tipos de materiais, com os quais ocorrem diferentes fenômenos físicos e químicos durante o processo de endurecimento.

As variações volumétricas ocorrem espontaneamente apenas em alguns dos componentes da estrutura interna do concreto. Assim sendo, criam-se tensões internas, havendo interação entre os fenômenos de retração e os de deformação lenta e relaxação.

figura 14: Barreira isolante térmica



Fonte: www.consultoriaeanalise.com (2013).

2.2.3 Grau de compactação

Um aspecto muito importante na execução de CCR, é o grau de compactação de execução das camadas do concreto. Inúmeras manifestações patológicas em pavimentos vêm sendo associadas por especialistas, ao grau de compactação das camadas, pois se a camada não é compactada de forma adequada, acaba por deixar uma grande quantidade de vazios no interior do concreto, facilitando a ocorrência de fissuras em função das elevadas tensões ocorrentes nos contatos agregado x agregado.

Muitos são os meios de medir o grau de compactação do CCR, entre eles estão o uso do frasco de areia, densímetro nuclear, auscultação sísmica de refração entre outros, este último mostrou boa correlação com os resultados do cone de areia, se tornando um método alternativo para o controle da qualidade do concreto. Além destes outros métodos também podem ser citados tais como: Ensaio de propagação de onda ultrassônica para controle de

qualidade da ligação entre camadas de CCR e GC em barragens. Em ensaios de tração direta em corpos de prova moldados em duas partes, a velocidade de pulso ultrassônico mensurada no concreto da camada inferior tem grande variação numa fase prévia ao instante, a partir do qual a colocação de uma camada superior dá origem a uma ligação enfraquecida em relação ao concreto massa.

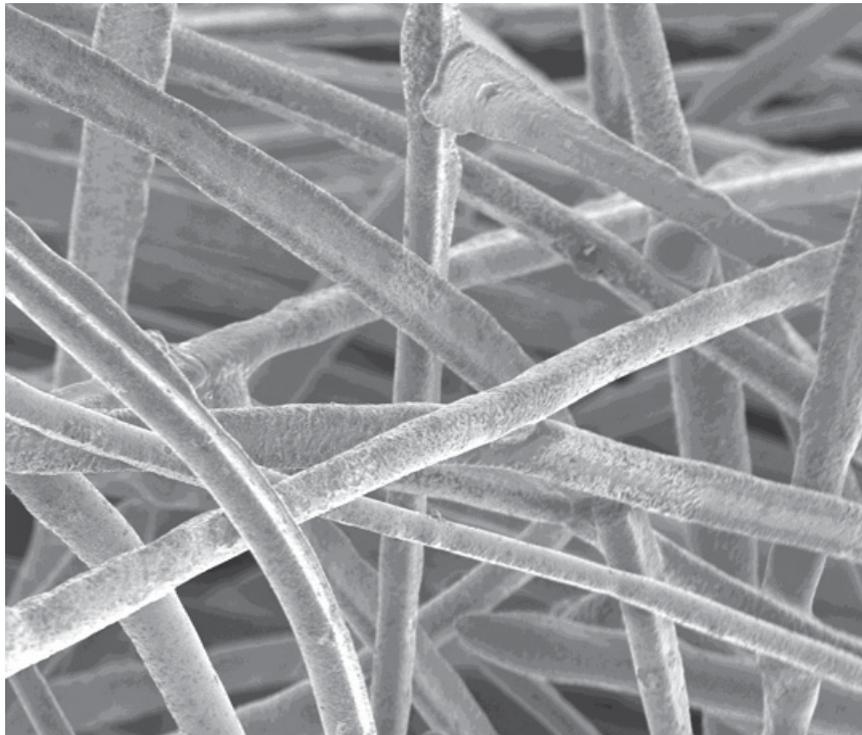
2.3 ADIÇÕES DE FIBRAS EM CONCRETO – MATERIAIS COMPÓSITOS

Para materiais compósitos, a definição é de que são a combinação de dois ou mais materiais que tem propriedades que os materiais componentes não tem por si próprios. Portanto os materiais compósitos são constituídos de duas fases, a matriz e o elemento de reforço, no caso do concreto, a matriz é tida como sendo o próprio concreto, ou seja, a mistura dos agregados e o elemento de reforço neste caso, são as fibras.

Materiais cimentícios são uma boa opção para adição de materiais fibrosos, pois em muitos casos, eles tem bom comportamento quando submetidos a compressão mas são frágeis quando os esforços são de tração e flexão (LEIGHOU, 1942).

Quando estes materiais são empregados na construção de bases de rodovias, seus esforços são na sua grande maioria de tração e flexão, desta forma a adição de fibras viriam a reforçar a parte frágil deste compósito.

figura 15: Emaranhado de fibras em materiais compósitos



Fonte: Adaptado de: www.engenhariacivil.net (2013).

Materiais compósitos proporcionam leveza, rigidez e resistência com grande eficiência econômica. Estes materiais associam na mesma massa as propriedades de materiais de natureza diferente, obtendo-se melhorias no desempenho dos materiais considerados individualmente, sob diferentes pontos de vista, tais como: propriedades físicas, químicas e resistência mecânica. (LIMA, 1987).

Um material compósito resulta da ligação íntima de pelo menos dois materiais distintos, dando origem a um material heterogêneo e multifásico, mas de propriedades melhoradas relativamente a cada um de forma individual. Geralmente os componentes são de naturezas bem diversas, matriz de fase contínua, tais como materiais metálicos ou cerâmicos e os componentes de reforço que constituem a fase dispersa (LIMA, 1987).

Os compósitos na construção civil vêm sendo utilizados há muito tempo. Existem registros de adição de palhas para a fabricação de tijolos, atuando como fibras de reforço, ainda no tempo do Antigo Egito. A utilização de fibras veio evoluindo com o tempo e hoje é muito comum a fabricação de produtos, principalmente para a construção civil com o uso de fibras, como exemplo, podemos citar: as telhas de fibrocimento, painéis de vedação vertical, painéis e estruturas de concreto tais como túneis, pontes e pavimentos. Compósitos são

materiais compostos de duas fases: a matriz e as fibras, onde estas, geralmente atuam como reforço da matriz em função de suas propriedades. Como exemplo, podemos utilizar um material que há muito tempo é utilizado na construção civil, é o fibrocimento que consiste numa matriz de pasta de cimento, reforçada com fibras de amianto. Isto é: dois materiais de características frágeis atuando em conjunto (FIGUEIREDO, 2000). Com a tecnologia do cimento amianto, foi possível diminuir a espessura das paredes, utilizando até 10% de fibras de amianto, possibilitando a fabricação de produtos com componentes bem esbeltos, leves e baratos, como telhas e caixas d'água ainda bastante comercializada no Brasil, apesar da restrição do amianto, componente descoberto como facilitador de doenças ligadas ao sistema respiratório de seres humanos.

No Brasil, o início da utilização de fibras plásticas provocou alguns graves equívocos, achava-se que a utilização das fibras poderia reduzir a utilização de outros tipos de reforços, tais como telas soldadas ou fibras metálicas, sem que houvesse problemas no controle de retração hidráulica, o que provocou inúmeras patologias em obras importantes. Em função deste desconhecimento técnico por parte de alguns especificadores acabaram colocando o uso de fibras plásticas numa situação delicada e indevida, pois o que de fato ocorreu é que se esperava dela desempenhos diferentes do que ela poderia proporcionar (MONTARDO E RODRIGUES, 2002).

Após o surgimento de novas pesquisas, melhorando o conhecimento sobre o comportamento da adição de fibras no concreto, as fibras voltaram a ocupar lugar importante nas propriedades do concreto fresco, além de surgirem propriedades inusitadas com a sua adição, tal como o seu poder de melhorar a resistência do concreto a temperaturas elevadas. Tais propriedades dão-se às fibras fundirem-se a temperaturas superiores a 100°C, e assim criarem uma rede de micro passagens que permitem a saída do vapor d'água sem que ocorra o deslocamento do concreto, que é o primeiro estágio de sua deterioração sob ação do fogo (MONTARDO E RODRIGUES, 2002).

figura 16: Alguns tipos de fibras usadas em reforço de concreto



Fonte: WWW.cimentositambe.com.br, (2011).

2.3.1 Fibra de polipropileno

Fibras de polipropileno são materiais compostos por filamentos extremamente finos, produzidos através de processo de extrusão. Seu uso é indicado para concretos e argamassas com o objetivo de reduzir a fissuração por retração devido ao calor de hidratação provocado pelo cimento. Pois fibras têm como característica a retenção de água no interior do compósito, proporcionando cura úmida nas misturas. As fibras de polipropileno também são indicadas para melhorar as condições do concreto endurecido, proporcionando melhor resistência quanto ao desgaste, ao impacto e ao fogo.

Quando as fibras plásticas começaram a ser utilizadas no Brasil, muitos equívocos foram cometidos, acreditava-se que sua utilização dispensaria outros tipos de reforços, como as telas soldadas ou fibras metálicas, sem que houvesse problemas no combate e controle da retração hidráulica, o que levou a ocorrência de inúmeros problemas em obras importantes. Este fato, devido ao desconhecimento técnico de alguns especificadores, acabou por deixar as fibras plásticas numa situação delicada, pois o ocorrido, na verdade, foi que se esperava dela desempenhos diferentes do que ela poderia proporcionar (MONTARDO, RODRIGUES, 2002). No entanto, a técnica da utilização de fibras plásticas de polipropileno vem sendo

muito utilizada no Brasil desde a década de 90. Podemos encontrar estes materiais misturados ao concreto em diversos tipos de obras, tais como, pontes, túneis, pavimentação, barragens e até em concretos utilizados na construção civil, onde sempre se utilizou materiais e técnicas convencionais de construção. Para MONTARDO, RODRIGUES, 2002, vários são os motivos para a difusão desta técnica: “No plano técnico, pode-se citar a compatibilidade mecânica, física e química existente entre o concreto e as fibras de polipropileno. O polipropileno é quimicamente inerte, não absorve água, é imputrescível e não enferruja. A mistura destes materiais se enquadra perfeitamente no conceito de compósitos fibrosos.”

2.3.2 Fibras metálicas

Entre as fibras metálicas, as mais comuns são as de aço. Sua resistência a tração é de aproximadamente 200 GPa. As fibras de aço podem apresentar sérios problemas de corrosão, dependendo do meio onde forem inseridas, existem diversas técnicas para minimizar o problema da corrosão, tal como o banho de níquel. (DONATO, 2005)

A construção civil e a indústria refratária vem utilizando aço-carbono e inoxidável com bastante frequência em suas obras e produtos, com diversos tamanhos e geometrias (PANDOLFELLI, 2005).

figura 17: Concreto reforçado com fibra metálica



Fonte: Adaptado de IPT (2013).

2.3.3 Fibra vegetais

Fibras vegetais existem em grande quantidade na natureza, são materiais que já tem seu uso aplicado na construção civil há muito tempo. Estas fibras tem seu uso motivado por serem renováveis, biodegradáveis, pela sua disponibilidade a baixo custo, muitas vezes como resíduos, possibilitando a produção de compósitos também viáveis economicamente. Outras vantagens tais como baixo peso específico deve ser considerada para compósitos com este tipo de reforço. (MOTTA, 2005).

Conforme Motta (2005), por serem materiais naturais, suas propriedades mecânicas variam consideravelmente com as características do solo e com as condições climáticas do ambiente onde são crescem as plantas, daí a importância de caracterizá-las, afim de conhecer suas características químicas e físicas, antes de sua utilização para os diversos fins aos quais são aplicadas.

figura 18: Fibras vegetais utilizadas para reforço de taludes.



Fonte: www.wrambiental.com.br (2013).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Materiais utilizados

A dosagem do concreto, objetiva aliar bom desempenho, com a máxima economia possível. Para a dosagem do CCR, um dos fatores mais importantes além da economia no consumo de cimento e agregados, é a quantidade de água utilizada (PINTO, 2010), pois é necessário ser um concreto com um aspecto muito seco, denominado muitas vezes de concreto “farofa”. Justamente em função de sua aparência seca, costuma-se se referir ao CCR como um concreto de *Slump zero*.

Foram realizadas dosagens de concreto de acordo com os teores de fibra e cimento descritos no planejamento do experimento com o objetivo de comparar as diferentes características dos materiais frente as solicitações de tráfego presenciadas no dia-a-dia. Para tanto, foram realizados ensaios de compressão axial e compressão diametral em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10cm x 20cm (diâmetro e altura, respectivamente).

Para a realização deste estudo foi realizada a caracterização de todos os materiais que foram utilizados na pesquisa.

Ao final da caracterização e da dosagem, foram moldados diferentes concretos com os comprimentos de fibras pré-definidos e após os ensaios de compressão axial e diametral foram executados de forma a conhecer os resultados para serem analisados.

Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios de Geotecnia (LABGEO) e Materiais de construção (LABOMACC) da Universidade de Passo Fundo.

3.1.1 Agregados e aglomerante

Os materiais britados são de uma jazida de rocha basáltica da região Sul do Brasil, no estado do Rio Grande do Sul, ao Norte deste, localizada na cidade de Passo Fundo conforme posição mostrada na figura 19.

figura 19: Região de localização da jazida de extração de britas, cidade de Passo Fundo



Fonte: www.semeadoresdefogo.org, (2012).

Portanto, os materiais que fizeram a composição do concreto foram escolhidos em função da disponibilidade de mercado, os quais são comumente usados em obras de pavimentação e construção civil na cidade de Passo Fundo e região. Os nomes comerciais dos materiais são: Brita 1, Brita 2, Areia industrial ou Areia de Britagem, Areia natural e Cimento CPV ARI. A escolha do cimento Cimento Portland de alta resistência inicial, se deu em função da necessidade deste tipo de obra ter o tráfego liberado o mais breve possível, evitando transtornos em virtude do tráfego intenso nas vias.

Para a caracterização dos agregados foram realizados ensaios normalmente utilizados para a aceitação e conhecimento de materiais utilizados em obras de construção civil e pavimentação. Tais ensaios foram: Ensaio de granulometria, ensaio de Abrasão Los Angeles, Massa específica e Sanidade.

O aspecto dos materiais utilizados estão apresentados na **figura 20**, são comercialmente conhecidos na região por areia natural (**figura 20-b**), areia de britagem (**figura 20- c**), brita

“0” (figura 20– d) e brita “1” (figura 20 – e). O aglomerante utilizado é o cimento CP V–ARI (figura 20– a), de alta resistência inicial, cujas propriedades físicas e químicas são apresentadas no **quadro 3**, escolha feita principalmente pela necessidade de desempenhar boa resistências em pouca idade.

figura 20: Materiais utilizados na mistura



(a) Cimento CP V

(b) Areia natural



(c) Areia de britagem

(d) Agregado miúdo

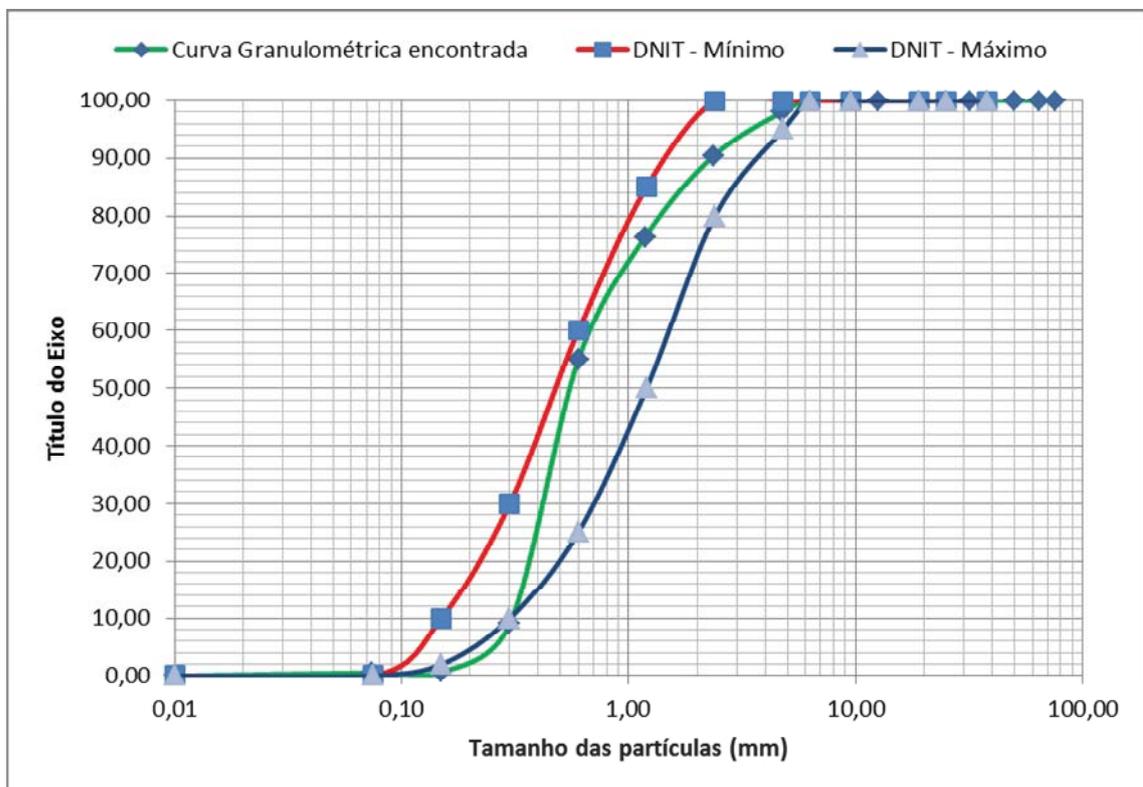


(e) Agregado graúdo

Os materiais analisados foram comparados com tabelas e classificações apresentadas por normas e órgãos regionais responsáveis por obras de pavimentação, desta forma, observaram-se a sua condição de uso ou em caso negativo, a possibilidade de correção dos materiais.

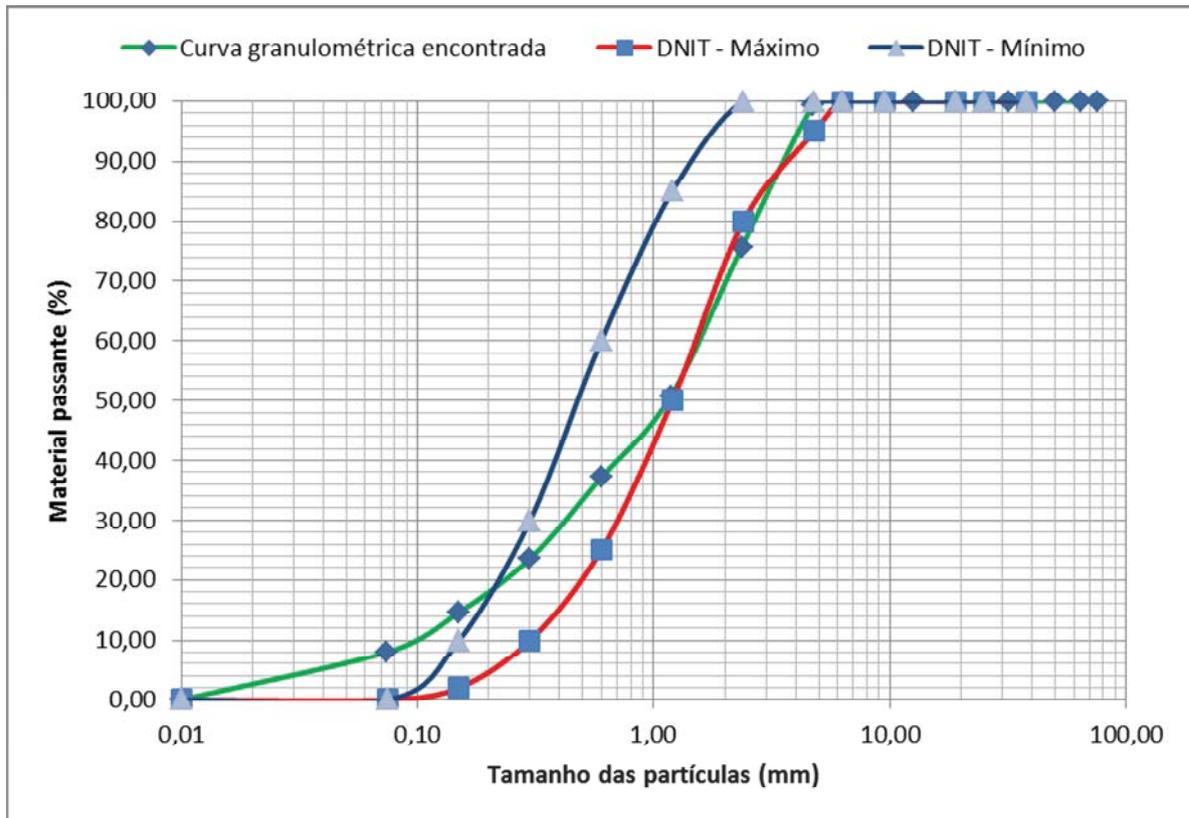
No caso da faixa granulométrica obtida da areia natural, Tabela 9, as faixas mínima e máxima sugerida pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, o DNIT, estão abaixo e acima, respectivamente, da faixa granulométrica encontrada, sendo possível a sua utilização para o concreto compactado a rolo utilizado em pavimentação. Sendo necessário apenas uma pequena correção na parcela fina do material.

figura 21: Curva granulométrica da areia natural



Observando a curva granulométrica obtida para a areia de britagem, Tabela 10, o material também precisou ser adequado a faixa granulométrica sugerida pelo DNIT, pois apenas uma pequena parcela de seus grãos apresentaram-se dentro das curvas mínima e máxima.

figura 22: Curva granulométrica da areia de britagem



Já para a fração de pedra britada, Tabela 11, a situação encontrada foi mais adequada, não necessitando de correção da faixa granulométrica.

figura 23: Curva granulométrica da brita 1

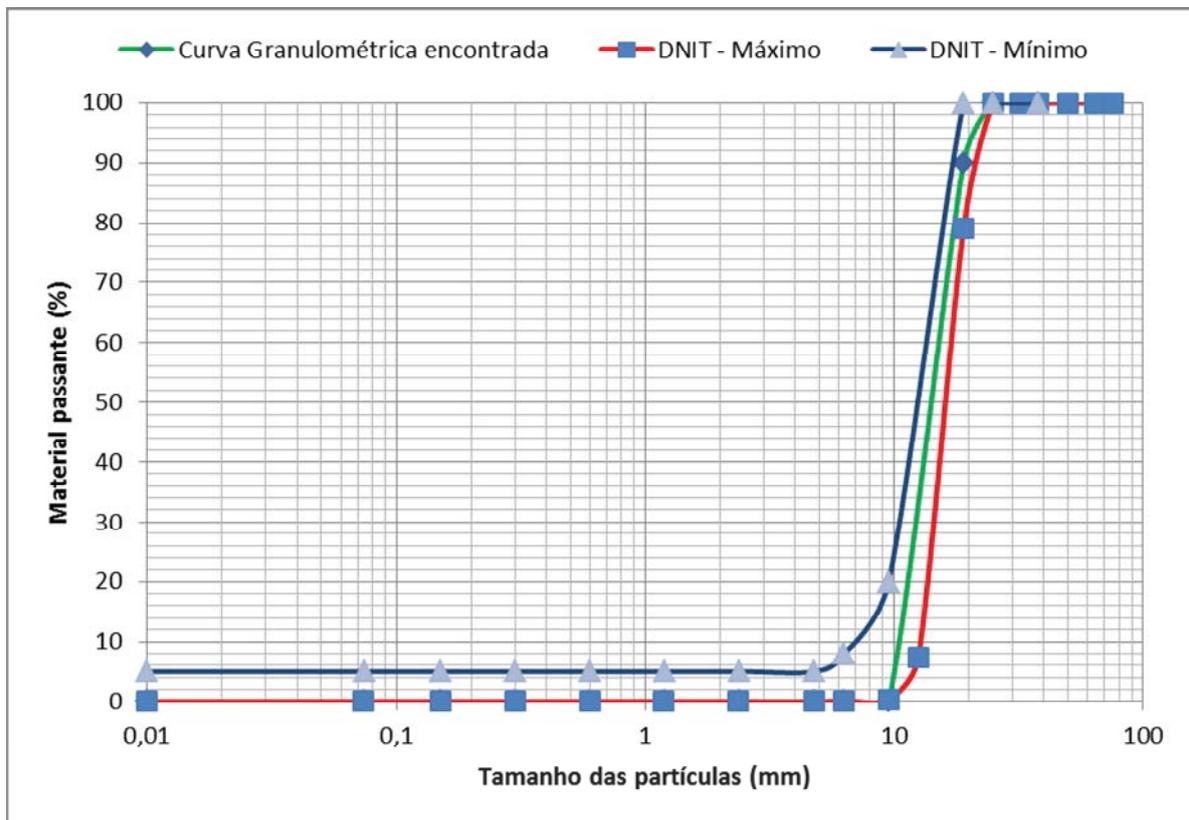


figura 24: Caracterização física dos agregados

	Brita ½"	Brita ¾"	Areia de britagem	Areia natural
Massa específica Real (g/cm ³)	2,39	2,64	2,61	2,61
Absorção (%)	2,99	2,37	-	-

A mistura dos agregados foi feita através do ajuste das curvas granulométricas dos agregados nos limites para CCR propostos por Ragan e Pittman (1998 *apud* Pinto, 2010). Para tanto, variou-se a quantidade dos agregados individualmente, com o objetivo de deixar a curva o mais próximo possível dos limites propostos. Estes limites procuram deixar a mistura com o mínimo índice de vazios possíveis, é sabido que quanto menor o índice de vazios, maior é a tendência do concreto ter melhor resistência. Os dados relativos a mistura dos agregados estão apresentados abaixo, na figura 24.

figura 25: Mistura utilizada para os ensaios

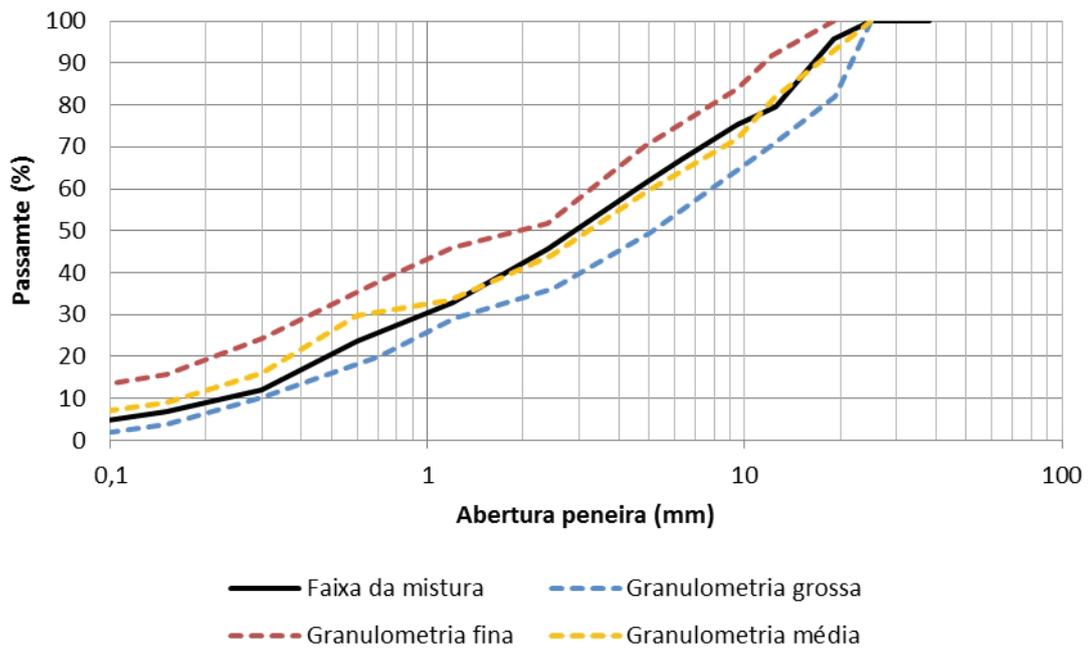


figura 26: Quantidades dos agregados utilizados

Agregado	Areia Natural	Areia de britagem	Brita 0	Brita 1
Quantidade (%)	12	44	22	22

quadro 3: Propriedades físicas e químicas do cimento utilizado

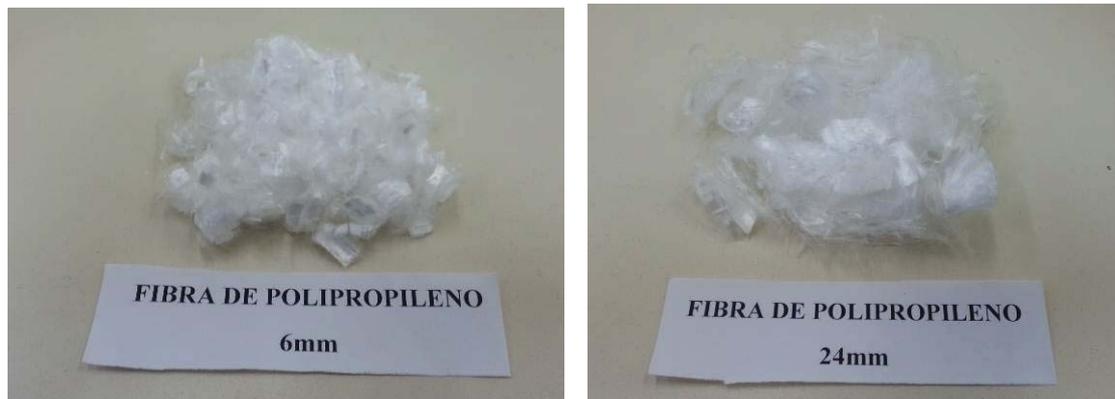
Propriedades químicas									
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P. Fogo	CaOL	R. Ins	Eq. Alc.
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
4,04	19,16	2,63	60,56	4,70	2,16	3,04	1,64	0,76	0,63
Propriedades físicas									
Exp. Quente	Tempo de pega (h:min)		Cons. normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência a compressão (MPa)		
	início	fim					3 dia	7 dias	28 dias
mm	02:43	03:32	%	cm ² /g	%	%	34,2	40,3	49,3

Fonte: Adaptado de www.cimentoitambe.com.br, valores referentes ao lote de Setembro de 2012.

3.1.2 Fibras

As fibras utilizadas são fibras de polipropileno produzidas a partir de multifilamentos, indicada para o reforço de concretos e argamassas com a finalidade de gerar um composto homogêneo, segundo o fabricante, com a finalidade de controlar a fissuração por retração. Os comprimentos são de 6mm e 24mm, fornecidas pela Empresa Macafferri América Latina.

figura 27: Fibras utilizadas na pesquisa.



(a) 6mm

(b) 24mm

quadro 4: Principais características das fibras utilizadas na pesquisa.

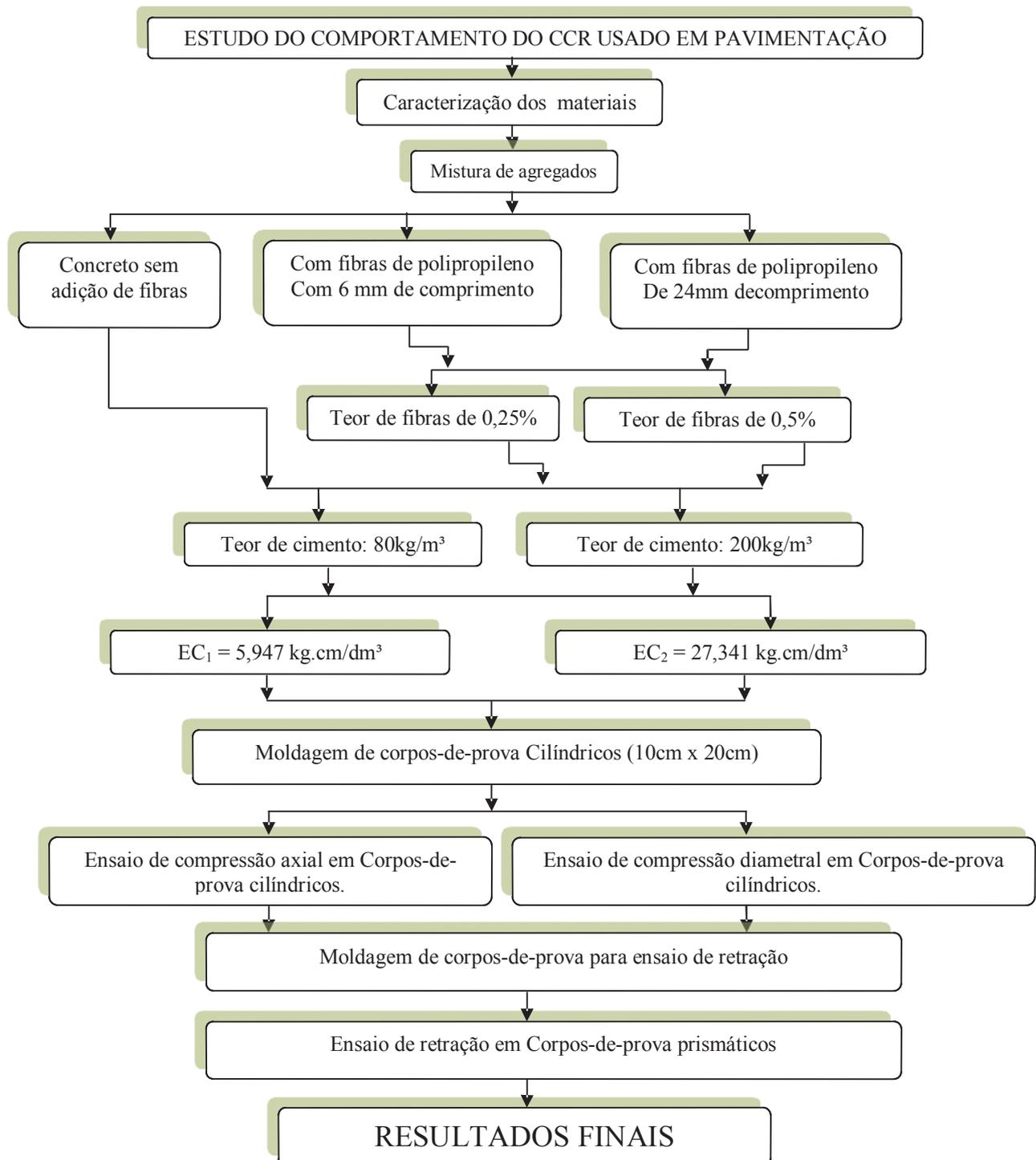
FibroMac® 6			FibroMac® 24	
Propriedades físicas				
Diâmetro	µm	18	µm	18
Seção	-	Circular	-	Circular
Comprimento	Mm	6	Mm	24
Alongamento	%	80	%	80
Matéria-prima		Polipropileno		Polipropileno
Peso específico	g/cm ³	0,91	g/cm ³	0,91
Propriedades mecânicas				
Temperatura de fusão	°C	160	°C	160
Resistência à tração	MPa (N/mm ²)	300	MPa (N/mm ²)	300
Módulo de Young	MPa	3000	MPa	3000
Aplicação				
Campos de aplicação indicados	Concreto projetado, pré-fabricados, pavimentos, pisos, revestimentos.			
Frequência por kilo	um	720 000 000	um	150 000 000
Área superficial específica	m ² /kg	244	m ² /kg	225

Fonte: Adaptado de Macafferri (2012).

3.2 Métodos

3.2.1 Etapas da pesquisa

O desenvolvimento do trabalho segue as etapas do fluxograma abaixo:



No desenvolvimento deste trabalho, algumas etapas foram desenvolvidas de forma paralela durante a fase de realização dos ensaios. Os resultados do CCR sem adição de fibras foram extraídos do trabalho de Fedrigo (2012). No trabalho referido, foram estudadas as propriedades do CCR sem a adição de fibra, suas principais conclusões são apresentados neste trabalho para que sejam feitas as comparações de seus resultados com os resultados do CCR com a adição de fibras, cujos objetivos estão definidos neste trabalho.

3.2.2 Planejamento do experimento

Com o objetivo de planejar o experimento, primeiramente foram definidas as variáveis de resposta, de controle e de ruído, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

quadro 5: Variáveis de resposta, controle e ruído

Variável de resposta	Controláveis	Não controláveis
Resistencia a compressão axial	Teores de fibras	Variações de temperatura na água utilizada para a cura
Resistência a compressão diametral	Comprimento das fibras	Umidade do ar no momento de moldagem dos CDP's
Retração	Teores de cimento	Possíveis substância contidas na água
	Idade de ensaio do concreto	Impurezas orgânicas presente nos agregados
		Velocidade de compressão da prensa
		Possíveis variações na energia de compactação, por ser manual

Como variáveis de controle, o **quadro 5** mostra as principais, estas variáveis podem receber intervenção do usuário no momento dos ensaios e variam conforme os objetivos do trabalho.

Ainda como variável de controle, vale salientar que a idade dos ensaios de compressão axial e de compressão diametral, que foram fixados em 7 dias, justificam-se por 2 (dois) motivos:

- O aglomerante utilizado foi o Cimento Portland V ARI (CP V ARI), uma das características deste cimento é seu tempo de cura, que aos 7 (sete) dias, atinge sua resistência total para a qual a dosagem foi desenvolvida.

- Outro fator importante da escolha da cura aos 7 (sete) dias, é o tipo de obra que pode ser empregado o CCR, obras de pavimentação, onde é grande a importância de se liberar as obras para o tráfego o mais breve possível após a sua construção, a fim de evitar congestionamentos e outros transtornos provenientes da intervenção do tráfego em função de obras realizadas.

Para o experimento com concreto sem adição de fibras, foi montado um projeto fatorial 2^2 para os experimentos sem fibras, dois fatores (teor de cimento e energia de compactação) e dois níveis cada fator. Para o cimento foram: 80kg/m^3 e 200kg/m^3 e para as energias de compactação foram as energias relativas ao ensaio de compactação Proctor normal e Proctor modificado, Os fatores de controle e os níveis realizados com seus valores estão representados na **figura 28**.

figura 28: Níveis das variáveis de controle com influência na pesquisa (CCR sem fibras)

Fator de controle	Níveis realizados	Valor / faixa de variação
Teor de Cimento CP V ARI	2	80 kg/m^3 e 200 kg/m^3
Energia de compactação das camadas	2	$EC_1 = 5,947\text{ kg.m/dm}^3$ $EC_2 = 27,341\text{ kg.m/dm}^3$

Para o planejamento do concreto com adição de fibras o programa experimental foi realizado com um projeto fatorial 2^4 , ou seja, quatro fatores com dois níveis cada fator. Teor de cimento (80kg/m^3 e 200kg/m^3), comprimento de fibra (6mm e 24mm), teor de fibras

(0,25% e 0,5%) e energia de compactação (Proctor normal e modificado), os fatores e níveis para o concreto com adição de fibras está representada na **figura 29**.

figura 29: Níveis das variáveis de controle com influência na pesquisa (CCR + fibras)

Fator de controle	Níveis realizados	Valor / faixa de variação
Comprimento das fibra	2	6mm e 24mm
Teor de fibras de polipropileno	2	0,25% e 0,5%
Teor de Cimento CP V ARI	2	80 kg/m ³ e 200 kg/m ³
Energia de compactação das camadas	2	EC ₁ = 5,947 kg.cm/dm ³ EC ₂ = 27,341 kg.cm/dm ³

O experimento foi realizado com duas repetições, totalizando 32 (trinta e duas) betonadas de concreto. De cada betonada foram moldados 8 (oito) corpos-de-prova, que serviram para os ensaios de compressão diametral e axial necessários para a obtenção dos resultados estudados.

3.2.2.1 CCR sem adição de fibras

A moldagem do concreto compactado a rolo sem adição de fibras, foi executada conforme os fatores, níveis realizados e seus valores, conforme figura 28 abaixo, estes ensaios foram realizados em trabalho paralelo, conforme descrito no item Etapas da Pesquisa.

O Planejamento do experimento foi feito pelo software Minitab®, conforme a figura 30. Nesta tabela, estão apresentadas a ordem de execução, e a aleatorização dos fatores, que tem por objetivo reduzir interferências externas no processo de moldagem.

figura 30: Programa experimental para misturas sem fibras

Ordem de execução	Teor de cimento (kg/m ³)	Energia de compactação das camadas (kg.cm/dm ³)
1	80	5,947
2	200	5,947
3	80	27,341
4	200	27,341

3.2.2.2 CCR com adição de fibras de polipropileno

Para a condução do experimento do CCR com a adição de fibra, os corpos-de-prova foram moldados com diferentes teores de fibras, porcentagem em função do peso seco e com comprimentos diferentes. Os valores correspondentes a estes fatores encontram-se na **figura 29**, apresentada abaixo. As porcentagens referem-se aos pesos dos materiais no estado seco.

Desta forma, pode-se fazer uma comparação entre os resultados e a influência de cada fator estudado. Da mesma forma que o planejamento do CCR sem a adição de fibras, o planejamento foi aleatorizado com o auxílio do Software Minitab®, a aleatorização se faz importante porque reduz alterações nos resultados em função de interferências externas no momento das moldagens dos corpos-de-prova.

figura 31: Programa experimental, misturas aleatorizadas

Ordem de execução	Comprimento da fibra (mm)	Teor de fibras (%)	Teor de cimento (kg/m ³)	Energia de compactação das camadas (kg.cm/dm ³)
1	6	0,25	200	27,341
2	24	0,25	80	5,947
3	6	0,5	200	27,341
4	6	0,25	80	27,341
5	24	0,25	80	27,341
6	6	0,25	80	5,947
7	6	0,5	200	5,947
8	6	0,5	200	5,947
9	6	0,5	200	27,341
10	24	0,5	80	27,341
11	24	0,5	200	5,947
12	24	0,5	80	5,947
13	6	0,5	80	5,947
14	6	0,25	80	5,947
15	24	0,25	80	5,947
16	6	0,5	80	5,947
17	6	0,25	80	27,341
18	6	0,25	200	27,341
19	24	0,25	200	5,947
20	24	0,5	80	27,341
21	24	0,5	200	27,341
22	24	0,25	200	27,341
23	6	0,5	80	27,341
24	6	0,25	200	5,947
25	6	0,5	80	27,341

26	24	0,5	200	5,947
27	6	0,25	200	5,947
28	24	0,25	80	27,341
29	24	0,25	200	27,341
30	24	0,5	80	5,947
31	24	0,5	200	27,341
32	24	0,25	200	5,947

3.3 Métodos de Caracterização física dos materiais

Os agregados foram fornecidos por jazidas da região de Passo Fundo-RS e para a caracterização dos mesmos serão realizados ensaios de:

Análise granulométrica de agregados: Realizada de acordo com a norma DAER/RS-EL 102/01 – Análise granulométrica dos agregados;

A análise granulométrica é um fator muito importante na produção de concreto. a distribuição dos grãos, preenchem os vazios do concreto quando a curva é bem distribuída, tornando o compósito mais resistente.

Massa específica real dos grãos: Realizada de acordo com a norma DAER/RS-EL 107/01 – Determinação da massa específica aparente em estado solto.

Ensaio de abrasão Los Angeles: Realizada de acordo com a norma DAER/RS-EL 103/01 – Determinação da abrasão “Los Angeles” de agregados.

Durante a utilização dos agregados, tanto na mistura quanto depois de construídas as vias, para tanto se faz necessário determinar suas propriedades em relação a esta característica, o agregado não pode ser muito frágil, podendo desta forma, provocar quebras e consequentemente, baixa durabilidade do concreto.

Ensaio de sanidade: Realizada de acordo com a norma DAER/RS-EL 104/01 – Determinação da sanidade de agregados pelo uso de sulfato de sódio.

Para a caracterização das fibras usadas serão utilizados os parâmetros e especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes das mesmas.

Como aglomerante será utilizado Cimento Portland CPV-ARI, devido ao seu reduzido tempo de cura. Esta característica do cimento é importante em função do tipo de

obra que será estudada, uma vez que em pavimentação, os maciços são solicitados já nas primeiras idades.

3.4 Misturas dos materiais para o CCR

O procedimento de mistura foi feito respeitando as curvas granulométricas recomendadas pelo DNIT. Para a determinação da quantidade de água adicionada a mistura, o método foi o mesmo utilizado pela engenharia geotécnica, que é através do ensaio de Proctor, de acordo com a energia estudada para cada mistura.

As misturas foram realizadas para dois tipos de compósitos, CCR com adição de fibras de polipropileno com 6 mm e com adição de fibras de polipropileno com 24 mm. Os teores de fibras utilizado foi de 0,25% e 0,50%, em relação ao peso do agregado em estado seco. A limitação de teores em 0,50% é em função de trabalhos anteriores concluírem dificuldades na mistura em teores mais elevados.

Os teores de cimento utilizados foram de 80 e 200kg/m³ de concreto, pois a ideia é se ter um concreto com o mínimo possível de cimento, tornando-o bastante econômico. Estes teores servem para se ter concretos de baixo a médio consumo de cimento com o objetivo de comparar a evolução de desempenho das dosagens.

figura 32: Fibras preparadas para serem misturadas no ensaio de Proctor



figura 33: Material preparado (Agregados, cimento e fibras) para a realização dos ensaios de Proctor



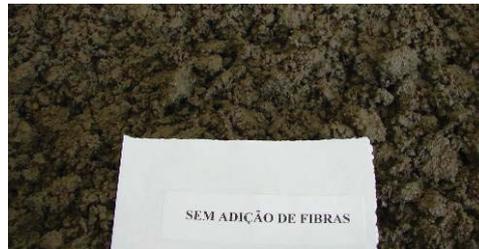
figura 34: Misturas dos materiais, momento da adição das fibras



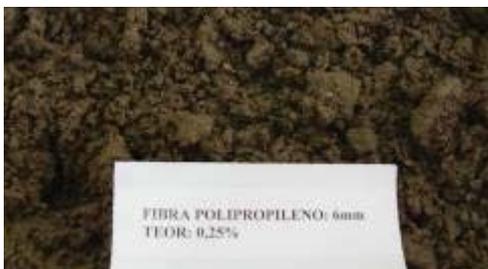
figura 35: Aspecto da mistura logo após a retirada da betoneira;



figura 36: Aspecto das misturas durante o ensaio de Proctor.



(a) Concreto sem adição de fibras;



(b) CCR com adição de 0,25% de fibra 6mm ; (c) CCR com adição de 0,5% de fibra 6mm;



(d) CCR com adição de 0,25% de fibra 24mm; (e) CCR com adição de 0,5% de fibra 24mm.

figura 37: Execução do ensaio de Proctor



figura 38: Amostras retiradas durante o ensaio de Proctor;



figura 39: Aspecto das misturas compactadas;



3.5 Ensaaios de compressão

Para os ensaios de compressão normal, foram moldados corpos-de-prova de concreto com cilindros de 10cm de diâmetro por 20 cm de altura, para cada betonada de material (Conforme o planejamento do experimento apresentado anteriormente), foram moldados 8 corpos-de-prova, em 4 (quatro) deles realizou-se o ensaio de compressão axial e nos outros 4 (quatro) foram ensaiados a compressão diametral .

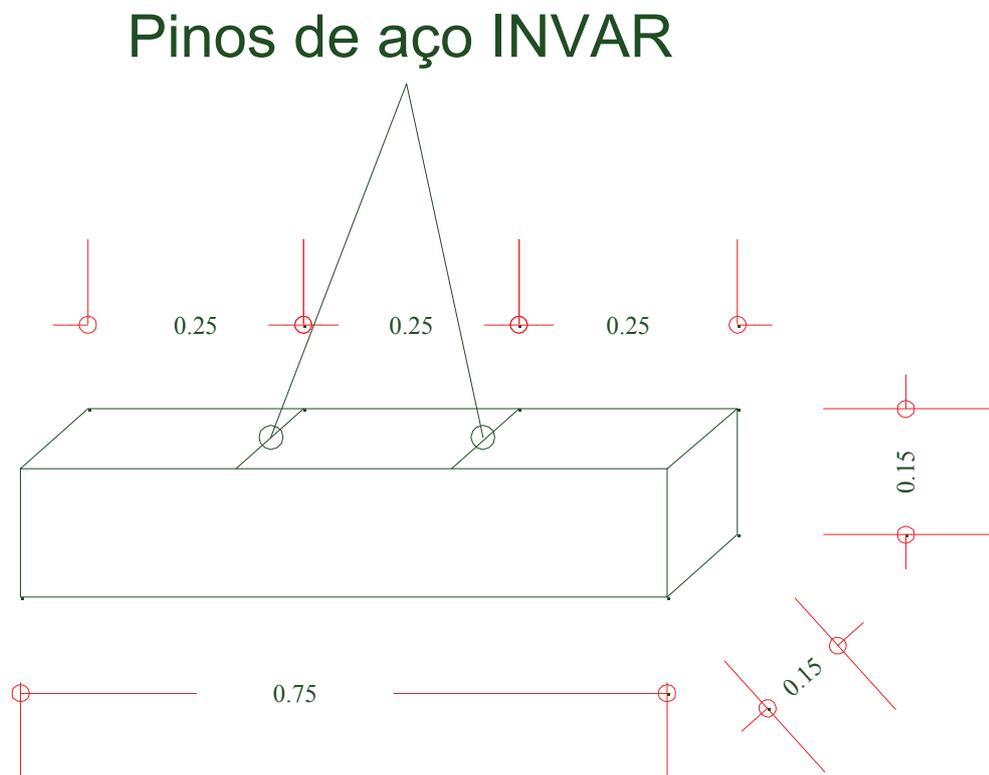
figura 40: Corpos-de-prova moldados para os ensaios de compressão axial e diametral;



3.6 Ensaio de retração

Para os ensaios de retração foram moldados corpos-de-prova com dimensões de 15x15x75cm. No topo dos corpos-de-prova foram colados pequenos pinos de aço INVAR, a fim de medir o deslocamento dos mesmos em função da retração. Os corpos-de-prova estão representados na **figura 41**.

figura 41: Corpos-de-prova para ensaio de retração, vista em planta e vista lateral, respectivamente;



Após a moldagem dos corpos-de-prova, os mesmos foram submetidos à cura úmida até as idades das medições. Depois de 24 horas de moldagem, os corpos-de-prova receberam pinos de aço INVAR, colados com resina a base de Epoxi, para que o deslocamento fosse medido entre 2 pinos colados em cada terça parte do corpo-de-prova. Para a medição das distâncias entre os pinos, foi utilizado paquímetro digital. Após este processo, as amostras voltaram para

a cura úmida e as medições foram feitas com 3 dias, 14 dias, 21 dias e aos 28 dias de cura do concreto.

A escolha das misturas para os ensaios de retração foram baseadas na análise dos resultados dos ensaios a compressão axial e compressão diametral, as misturas que tiveram os melhores resultados nestes ensaios também foram ensaiados com objetivo de avaliar a retração.

Para se realizar os ensaios de retração foram moldados 3 (três) corpos-de-prova, conforme **figura 42: Corpos-de-prova utilizados para os ensaios de retração;** de cada mistura avaliada como as misturas de melhor desempenho, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de compressão axial e diametral.

figura 42: Corpos-de-prova utilizados para os ensaios de retração;



3.7 Avaliação dos resultados

A eficiência do concreto pode ser verificada com a análise dos resultados dos ensaios que foram realizados. Para tanto, foram avaliadas as variáveis de respostas esperadas

na conclusão do trabalho. Como variáveis de resposta, entendemos grandezas mensuráveis, que ao ser analisadas representam as características do comportamento do objeto de estudo.

Estas variáveis podem ser analisadas pelos resultados de:

- Resistência à compressão diametral;
- Resistência à compressão axial;
- Retração hidráulica;

4 RESULTADOS

São apresentados neste capítulo todos os resultados obtidos no trabalho, correspondentes aos objetivos descritos no item correspondente no início do trabalho.

4.1 Ensaio de compactação

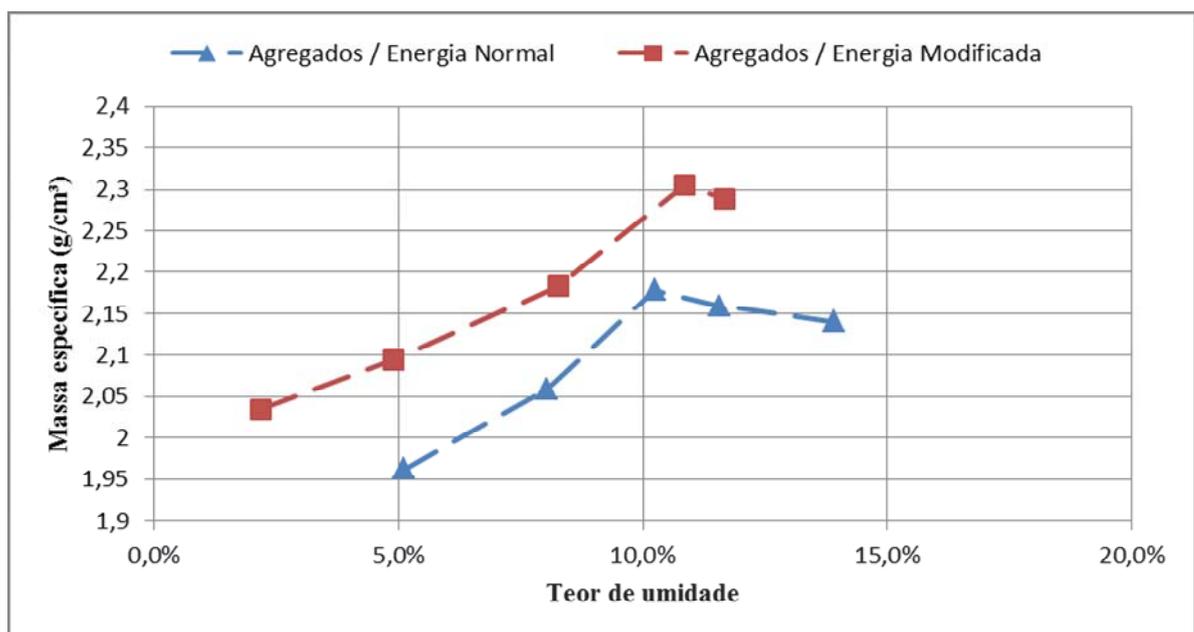
Para a determinação das densidade dos materiais e sua umidade ótima, os ensaios de compactação foram realizados, primeiramente com os agregados, para posteriormente definir as quantidades de cimento em cada mistura de acordo com os seus teores. A Tabela 12 apresenta os valores encontrados, umidade ótima e massa específica, nos ensaios dos agregados e na Figura 22 encontra-se o gráfico plotado com os dados obtidos deste ensaio.

tabela 1: Ensaio de compactação com agregados

Compactação agregados		
Energia de compactação	Normal	Modificada
Umidade ótima (%)	10,4	11
Massa específica (g/m ³)	1,98	2,08

Adaptado de Fedrigo, 2012

figura 43: Curvas de compactação encontradas com as misturas de agregados



Os ensaios realizados sem adição de fibras foram identificados como PR-SF 01 (Proctor sem fibra - 01) sequencialmente até a nomenclatura PR-SF 04 (Proctor sem fibra – 04). De acordo com o planejamento do experimento, totalizaram-se 4 misturas, aleatorizadas, misturando-se todos os fatores, conforme Tabela 16. Para esta fase do experimento não foi feita a opção pelo projeto fatorial com 2 repetições, sendo assim, totalizaram-se 4 ensaios.

tabela 2: Ensaios de Proctor realizados sem a adição de fibras (Adaptado de Fedrigo, 2012)

Identificação do ensaio	Teor de cimento (kg/m ³)	Energia de compactação das camadas (kg.cm/dm ³)
PR-SF 01	80	5,947 (Proctor Normal)
PR-SF 02	200	5,947 (Proctor Normal)
PR-SF 03	80	27,341(Proctor Modificado)
PR-SF 04	200	27,341(Proctor Modificado)

figura 44: Ensaios de compactação com teor de cimento de 200 kg/m³ (Adaptado de Fedrigo, 2012)

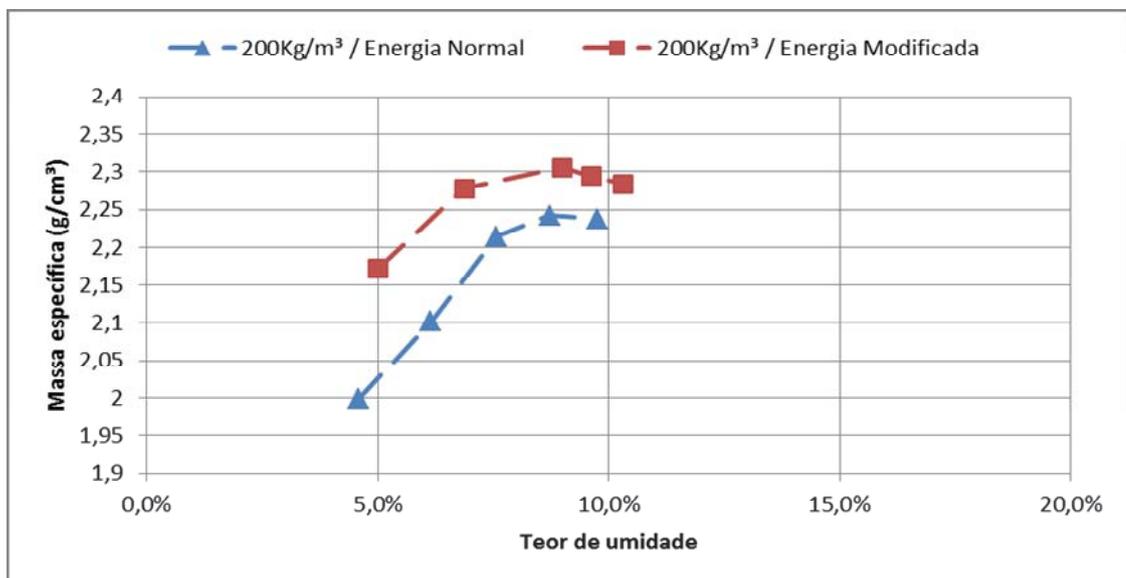
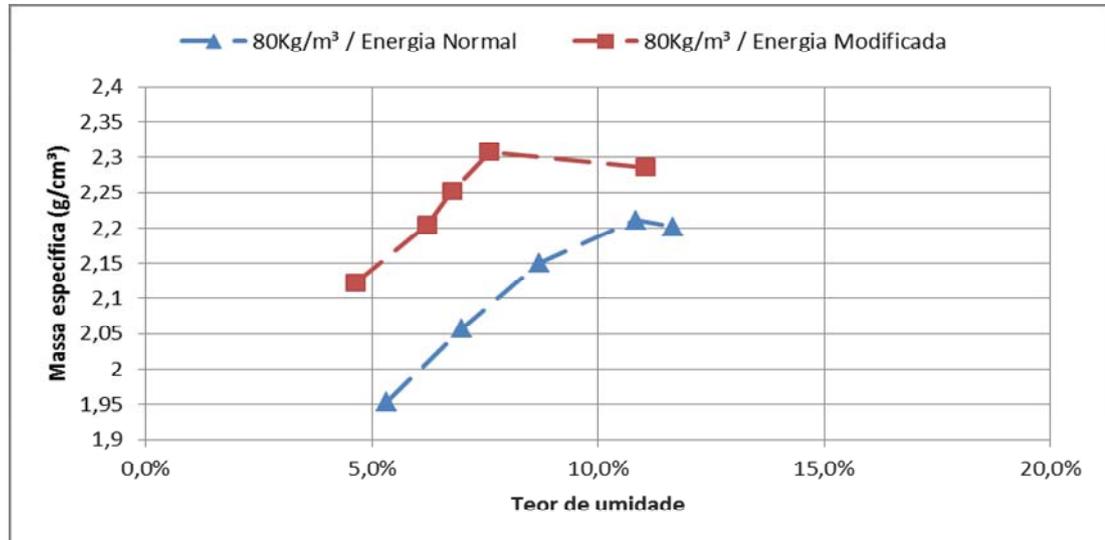


figura 45: Ensaios de compactação com teor de cimento de 80 kg/m³ (Adaptado de Fedrigo, 2012)



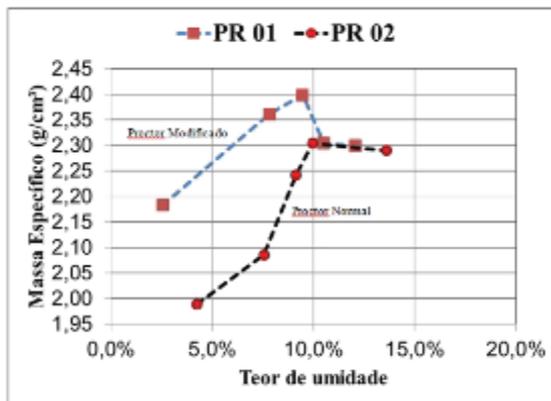
Para a realização dos ensaios, as misturas foram totalmente aleatorizadas, de forma a testar todas as hipóteses possíveis, com diferentes teores e comprimento de fibras, assim como teores de cimento e energias. A mistura de fatores está apresentada na tabela 3, com base nestes dados os corpos-de-prova foram moldados.

tabela 3: Ordem dos ensaios de Proctor realizados

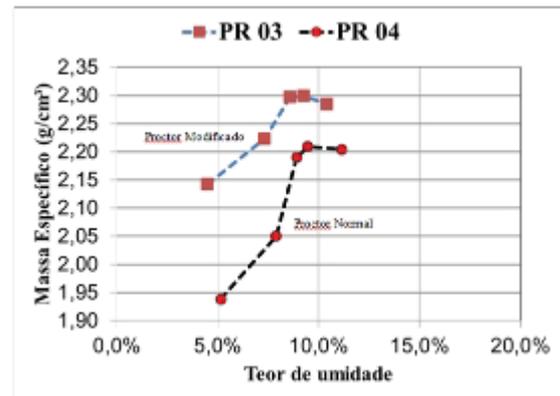
Identificação do ensaio	Comprimento da fibra (mm)	Teor de fibras (%)	Teor de cimento (kg/m ³)	Energia de compactação das camadas (kg.cm/dm ³)
PR 01	6	0,25	200	27,341 (Proctor Modificado)
PR 02	6	0,25	200	5,947 (Proctor Normal)
PR 03	6	0,5	200	27,341 (Proctor Modificado)
PR 04	6	0,5	200	5,947 (Proctor Normal)
PR 05	6	0,25	80	27,341 (Proctor Modificado)
PR 06	6	0,25	80	5,947 (Proctor Normal)
PR 07	6	0,5	80	5,947 (Proctor Normal)
PR 08	6	0,5	80	27,341 (Proctor Modificado)
PR 09	24	0,25	200	27,341 (Proctor Modificado)
PR 10	24	0,25	200	5,947 (Proctor Normal)
PR 11	24	0,5	200	27,341 (Proctor Modificado)
PR 12	24	0,5	200	5,947 (Proctor Normal)
PR 13	24	0,25	80	27,341 (Proctor Modificado)
PR 14	24	0,25	80	5,947 (Proctor Normal)
PR 15	24	0,5	80	5,947 (Proctor Normal)
PR 16	24	0,5	80	27,341 (Proctor Modificado)

Os ensaios de Proctor realizados obtiveram como resultados os apresentados na Figura 46 e na Figura 47.

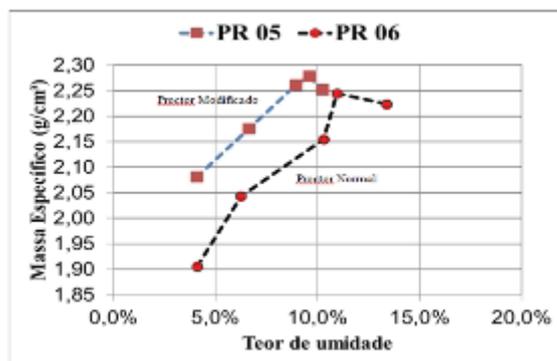
Figura 46: Curvas de compactação obtidas com fibras de 24mm de comprimento (a) Teor de fibras 0,25% e teor de cimento 200 kg/m³. (b) Teor de fibras 0,5% e teor de cimento de 200 kg/m³. (c) Teor de fibras 0,25% e teor de cimento 80kg/m³. (d) Teor de fibras 0,5% e teor de cimento 80kg/m³



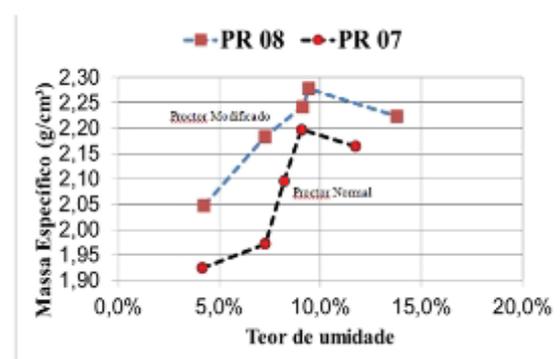
(a)



(b)



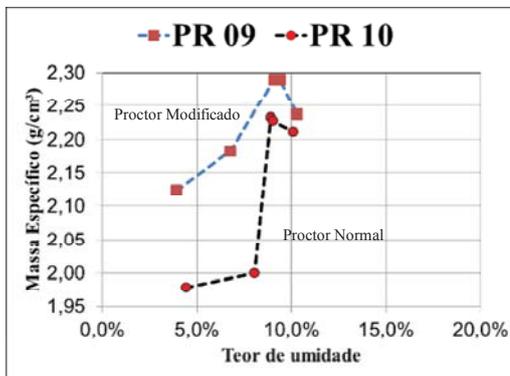
(c)



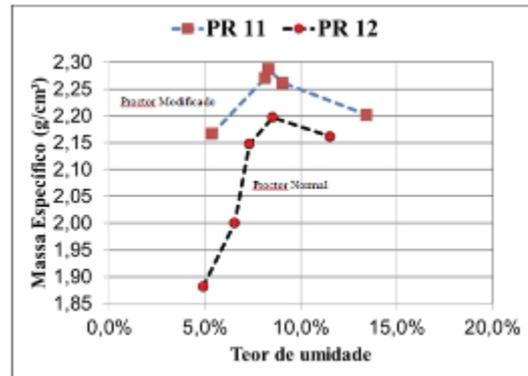
(d)

A partir dos resultados percebe-se um aumento da densidade quando utilizadas fibras mais curtas (6mm) com maior teor de cimento (200 kg/m³), tanto para a energia normal quanto para a energia modificada. Com os ensaios realizados com menor teor de cimento (80kg/m³), os ensaios mostraram resultados muito próximos, o que pode caracterizar uma influência, neste último caso, maior do teor de cimento.

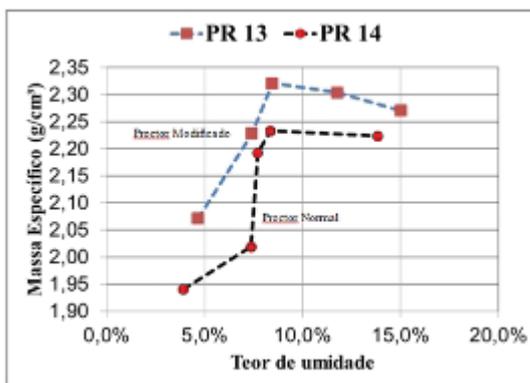
Figura 47: Curvas de compactação com fibras de 24mm. (a) Teor de fibras 0,25% e teor de cimento 200 kg/m³. (b) Teor de fibras 0,5% e teor de cimento de 200 kg/m³. (c) Teor de fibras 0,25% e teor de cimento 80kg/m³. (d) Teor de fibras 0,5% e teor de cimento 80kg/m³



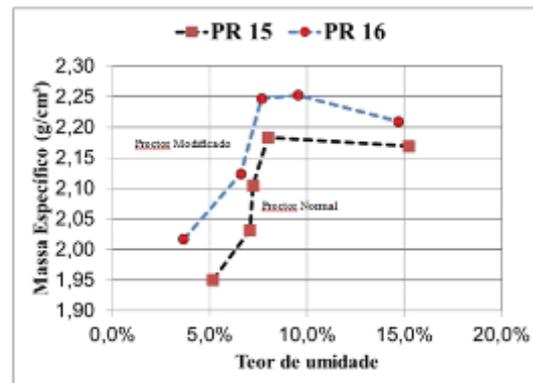
(a)



(b)



(c)



(d)

Também para os ensaios realizados com as fibras de 24mm, nota-se que os resultados são bastante semelhantes para as duas energias de compactação com teor de cimento de 200kg/m³. Já para o teor de cimento de 80kg/m³, a densidade caiu algo em torno de 5g/cm³ quando utilizado maior teor de fibras (0,5%). Em relação ao consumo de água, nota-se um aumento da umidade ótima quando se utiliza maior teor de fibras.

Conforme Feuerharmel (2000), resultados semelhantes com esses não mostram alterações significativa para os parâmetros ótimos de compactação.

4.2 Resistência a compressão axial

Na figura49, figura50, figura51 e figura52, estão apresentados os resultados dos ensaios de compressão axial. Conforme cada caso, nota-se a influência positiva do acréscimo das fibras na mistura, tanto a quantidade, quanto o comprimento da fibra, tem influência na resistência a compressão axial dos concretos, em alguns casos, conforme comentado em cada situação abaixo, as diferenças entre os comprimentos das fibras são pequenos, porém entre seus teores são mais significativos.

Segundo Donato (2003), a adição de fibras de polpropileno nos compósitos cimentados, aumentam a resistência a compressão em relação à matriz sem reforço.

Conforme mostram os resultados apresentados neste trabalho, esta afirmativa é confirmada, porém em algumas situações, dependendo do comprimento das fibras e de seu teor, a resistência tende a ser um pouco inferior quando se utilizam maiores comprimentos ou maiores teores de fibras. Isto ocorre principalmente em função de nichos fibrosos deixados no interior do corpo-de-prova decorrentes da mistura dos materiais à matriz. Este aspecto pode ser notado na figura48.

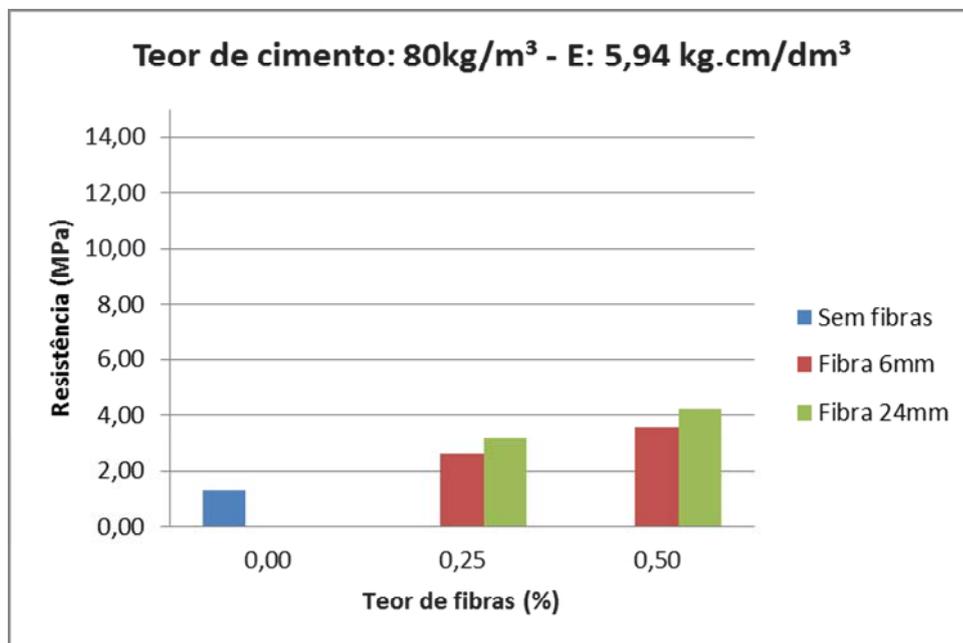
figura48: Aspecto não homogêneo nas misturas com grandes teores de fibras.



tabela 4: Resultados da resistência a compressão axial (MPa), com teor de cimento de 80kg/m³ e energia de compactação equivalente ao Proctor Normal

Teor de cimento: 80kg/m ³ - EC: 5,947 kg.cm/dm ³			
Teor de fibras (%)	0,00	0,25	0,50
Sem fibras	1,30	-	-
Fibra 6mm	-	2,59	3,57
Fibra 24mm	-	3,16	4,23

figura49: Representação do aumento de resistência em função das porcentagens de fibras e seus comprimentos.

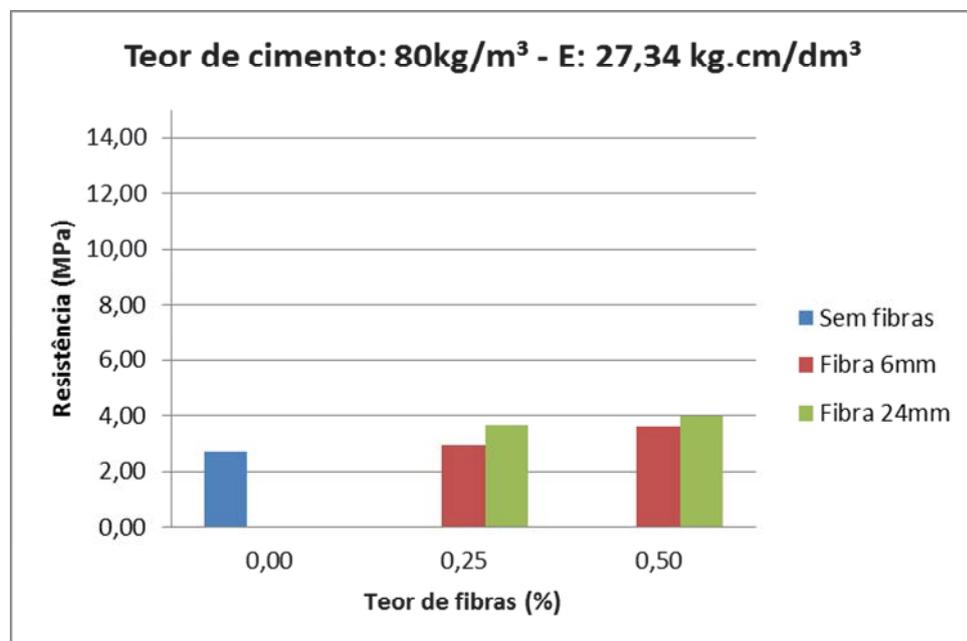


A tabela 4 e a figura49, mostram os resultados dos ensaios quando utilizados teores de cimento de 80 kg/m³ e energia de compactação de 5,94 kg.cm/dm³ (equivalente à compactação Proctor Normal). O gráfico mostra a tendência de aumento de resistência do concreto quanto maior for o comprimento da fibra e quanto maior for o seu teor em relação ao peso seco dos materiais. Nota-se um aumento de mais de 300% quando as misturas iniciais são de concretos sem adição de fibras e as finais são de fibras longas (24mm) e teor máximo estudado neste trabalho (0,5% sobre o peso seco de materiais).

tabela 5: Resultados da resistência a compressão axial (MPa), com teor de cimento de 80kg/m³ e energia de compactação equivalente ao Proctor Modificado

Teor de cimento: 80kg/m ³ - EC: 27,34 kg.cm/dm ³			
Teor de fibras (%)	0,00	0,25	0,50
Sem fibras	2,68	-	-
Fibra 6mm	-	2,91	3,60
Fibra 24mm	-	3,66	3,98

figura50: Resultados com acréscimo na energia de compactação

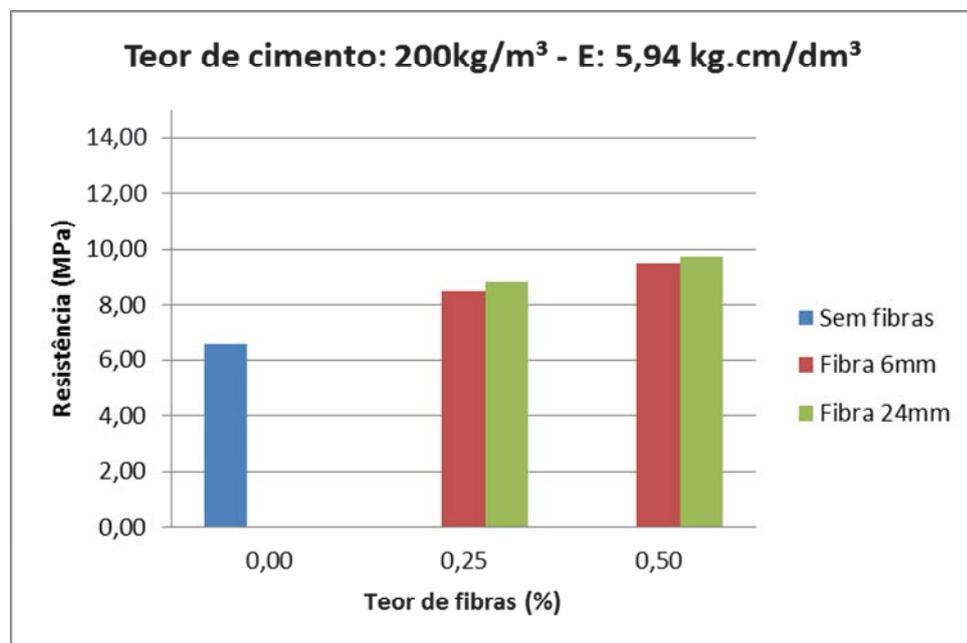


Para os resultados mostrados na tabela 5, representados graficamente na figura50, também mostram uma tendência de aumento de resistência quanto maior for o seu teor de fibras e quanto maior for o comprimento das mesmas. Observando-se os resultados notamos um aumento de quase 150% sobre a resistência inicial, que corresponde ao concreto sem a adição de fibras. Estes resultados mostram que a influência da energia de compactação é mais significativa que simplesmente a adição de fibras, porém mesmo assim, as fibras ajudam a melhorar suas resistências.

tabela 6: Resultados das misturas com aumento do teor de cimento e energia de compactação baixa.

Teor de cimento: 200kg/m ³ - EC: 5,94 kg.cm/dm ³			
Teor de fibras (%)	0,00	0,25	0,50
Sem fibras	6,54	-	-
Fibra 6mm	-	8,47	9,52
Fibra 24mm	-	8,83	9,72

figura51: Efeitos da adição de fibras para diferentes energias e consumos de cimento



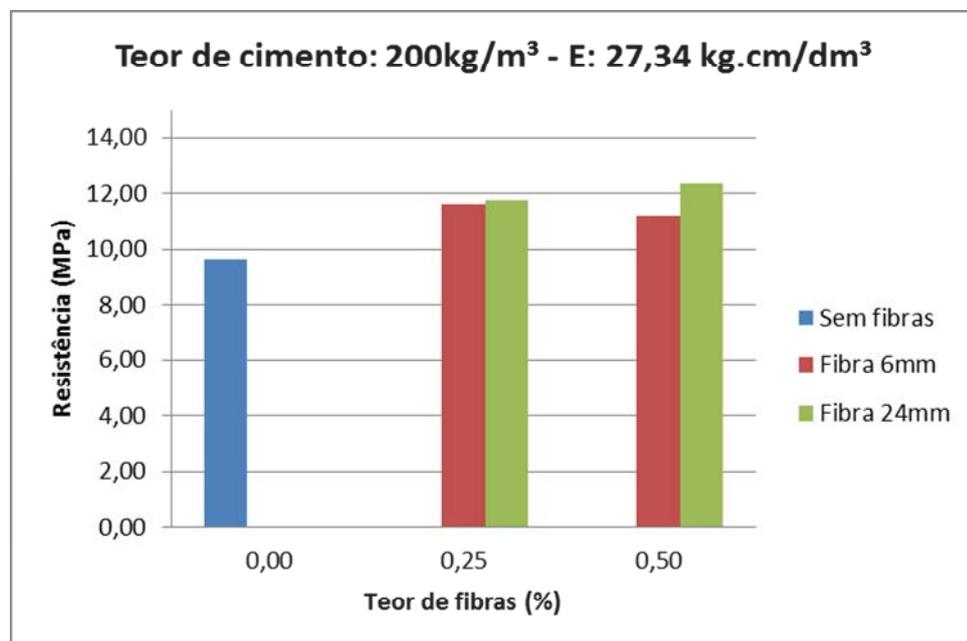
Na tabela 6 e na figura51, os resultados apresentados são referentes aos maiores teores de cimentos e à menor energia de compactação estudada neste trabalho, uma análise nos resultados mostram que obtemos melhores resistências quando se acrescenta reforço a matriz, porem em diferenças menores que quanto se utiliza teores de cimentos menores.

O aumento do teor de cimento, reflete na resistência geral dos concretos. A resistência inicial, com teor de cimento de 80 kg/m³ de concreto, apresentada na tabela 4, que é de 1,30 MPa confrontada ao resultado do concreto com as mesmas características, porém com teor de cimento de 200 kg/m³, cujo resultado é de 6,54 MPa, apresentados na figura49, mostra que a resistência do concreto é fortemente influenciada pelos teores de materiais cimentícios. Este aumento está na ordem de 500%, simplesmente adicionando-se materiais aglomerantes.

tabela 7: Resultados da resistência a compressão axial (MPa), com teor de cimento de 200kg/m³ e energia de compactação equivalente ao Proctor Modificado

Teor de cimento: 200kg/m ³ - EC: 27,34 kg.cm/dm ³			
Teor de fibras (%)	0,00	0,25	0,50
Sem fibras	9,62	-	-
Fibra 6mm	-	11,61	11,21
Fibra 24mm	-	11,75	12,34

figura52: Resultados com maior teor de cimento e maior energia de compactação

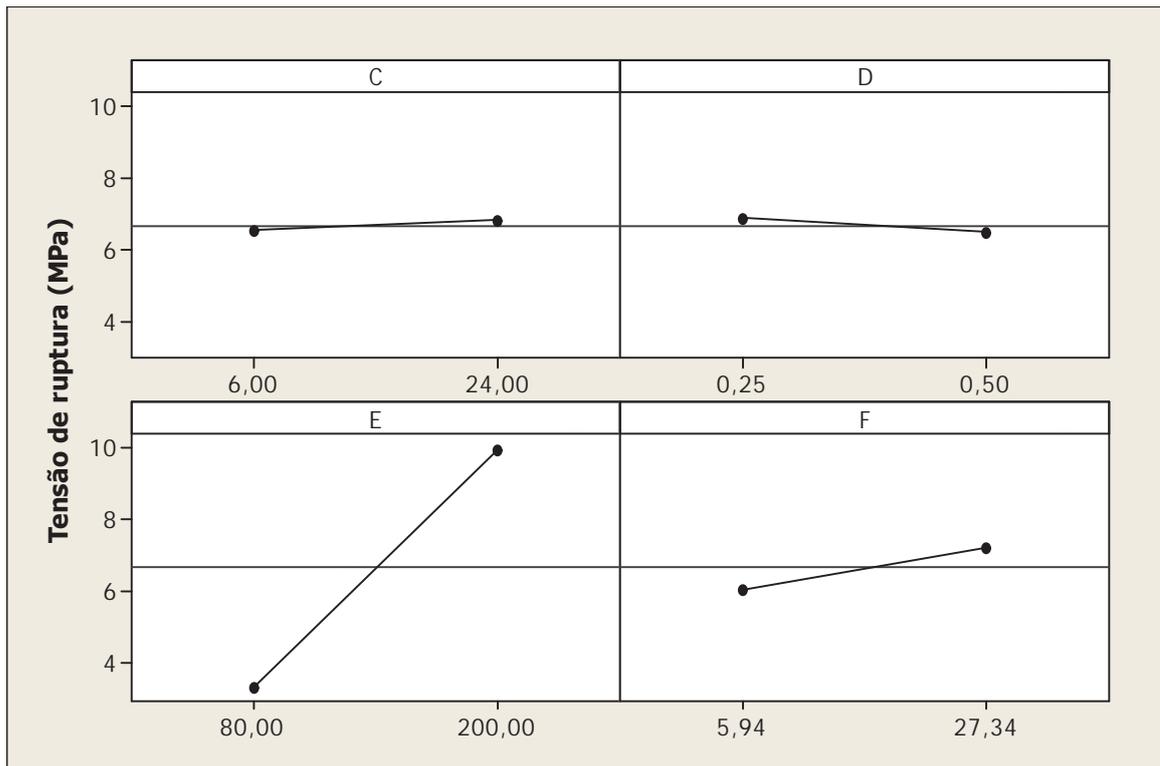


Conforme os resultados observados na tabela 7 e na figura52 representam um aumento de resistência quanto maior for a adição de fibras e maiores forem seus teores, porém em valores menores. Se compararmos a resistência do concreto sem adição de fibras e o concreto com adição de fibras de 24mm e teor de fibra de 0,50% sobre o peso seco dos materiais, chegamos a um aumento de 128%, o que confirma a forte influência do teor de cimento e da energia de compactação.

Notamos neste resultado, um fato curioso em toda a análise, com as fibras de 6mm, quando utilizados teores de 0,25% e depois passado para 0,50% sobre os pesos secos dos materiais, houve uma queda de resistência em torno de 4%. Este decréscimo de resistência se deve provavelmente às dificuldades de misturas dos materiais, em função dos teores de fibras

elevados que formam grumos fibrosos no interior da mistura. Estes grumos deixam pontos fracos nos corpos-de-prova, resultando em pontos fracos nos concretos.

Figura53: Efeitos principais obtidos na resistência à compressão axial, a letra C representa o comprimento da fibra, o D representa o teor das fibras o E representa o teor de cimento e o F representa a energia de compactação



Quando se observa a Figura53, nota-se uma influência bastante significativa do nível de cimentação das misturas, fator que é mais importante nas composições, seguidos da energia de compactação, que conforme os resultados já mostraram, os maiores teores de cimento e as maiores energias de compactação mostram melhor desempenho.

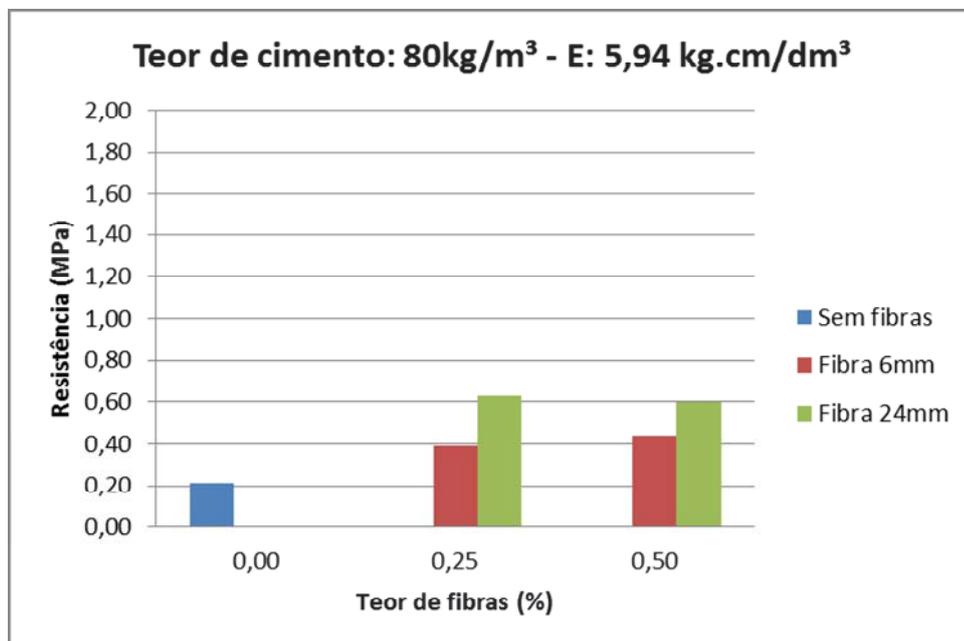
4.3 Resistência à compressão diametral

Em relação à compressão diametral, o comportamento do concreto se mostra com algumas diferenças em relação ao comportamento dos mesmos com os ensaios de compressão axial, quanto maiores os teores de fibras e maiores os comprimentos de fibras, ligeiramente mais frágeis são os concretos.

tabela 8: Resultados dos ensaios de compressão diametral

Resistência a compressão diametral (MPa)			
Teor de cimento: 80kg/m³ - EC: 5,94 kg.cm/dm³			
Teor de fibras (%)	0,00	0,25	0,50
Sem fibras	0,21	-	-
Fibra 6mm	-	0,39	0,44
Fibra 24mm	-	0,63	0,60

figura 54: Resultados com baixo consumo de cimento e baixa energia de compactação

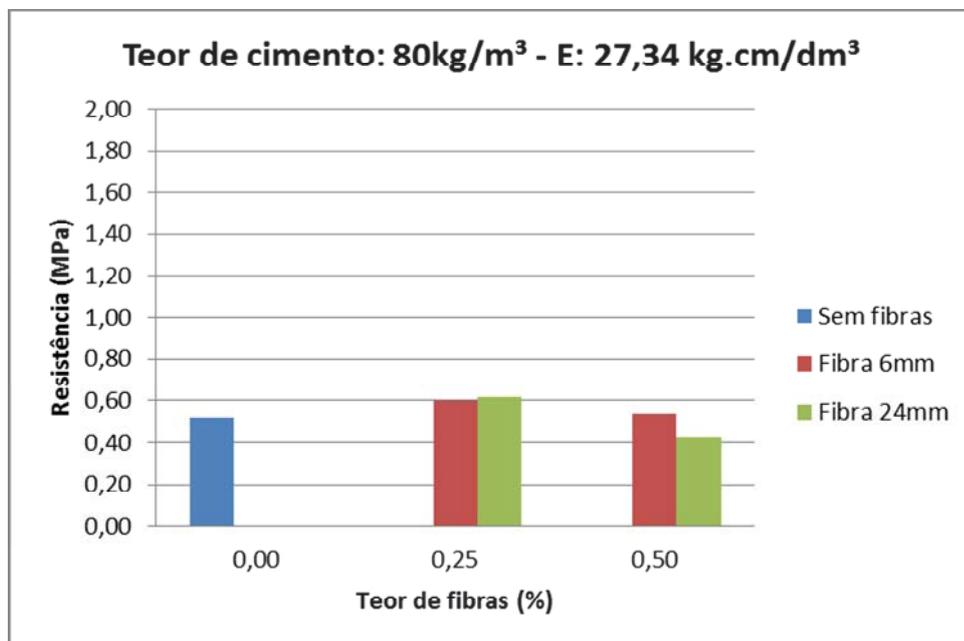


Observando-se a tabela 8 e a figura 54, nota-se o aumento da resistência com a adição de fibras, comparando-se o concreto sem fibras e o concreto com fibras, porém quando se compara as resistências dos concretos com teores diferentes de fibras, as resistências são muito parecidas, em alguns casos a resistência até cai quando se aumenta o teor de fibras, já com as variações dos comprimentos das fibras, os resultados aumentam conforme maior é a fibra, conforme mostrado na figura 54.

tabela 9: Resistências a compressão diametral com baixo consumo de cimento e alta energia de compactação

Resistência a compressão diametral (MPa)			
Teor de cimento: 80 kg/m³ - EC: 27,34 kg.cm/dm³			
Teor de fibras (%)	0,00	0,25	0,50
Sem fibras	0,52	-	-
Fibra 6mm	-	0,60	0,54
Fibra 24mm	-	0,62	0,43

figura 55: Gráfico dos comparativos entre fibras e teores



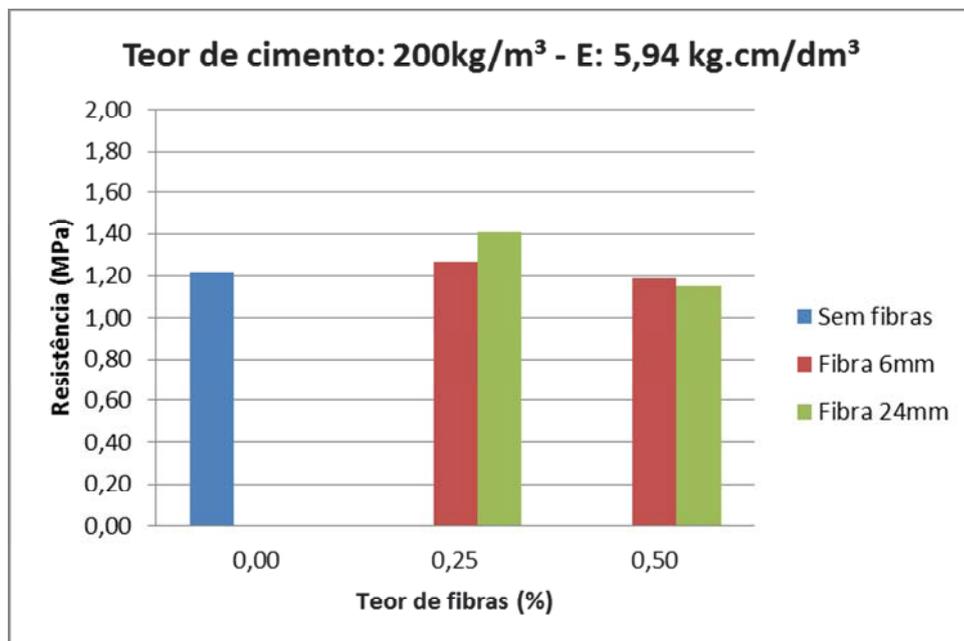
Quando aumenta-se a energia de compactação, as diferenças entre os resultados variam pouco, observa-se na tabela 9 e na figura 55, que os resultados aumentam quando utiliza-se teor baixo de fibra, porém quando o teor de fibra é aumentado, a resistência acaba caindo, assim como quando aumenta-se o comprimento da fibra, a sua resistência também é reduzida

algo em torno de 21%. Este fenômeno é provocado pelos grumos formados nas misturas, por ter muita fibra e grandes comprimentos.

Tabela 10: Concretos com grande cimentação e baixa energia de compactação

Resistência a compressão diametral (MPa)			
Teor de cimento: 200 kg/m³ - EC: 5,94 kg.cm/dm³			
Teor de fibras (%)	0,00	0,25	0,50
Sem fibras	1,22	0,00	0,00
Fibra 6mm	0,00	1,27	1,19
Fibra 24mm	0,00	1,27	1,15

Figura 56: Efeitos da grande cimentação e baixa energia de compactação



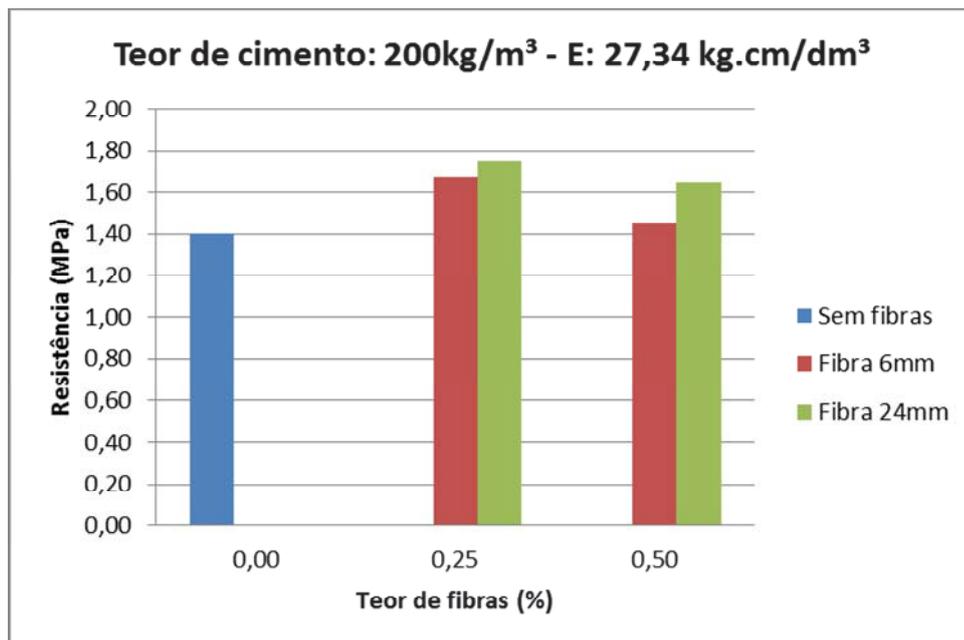
Quando se varia o consumo de cimento, pode-se notar grandes diferenças nas resistências, o mesmo concreto, com energia de compactação baixa, referente ao Proctor Normal e consumos de cimentos de 80 kg/m³ e 200 kg/m³, pode-se obter um ganho de resistência de mais de 500%. Apenas com a variação de comprimentos e teores de fibras, pode-se obter ganho de resistência, porém se o teor e o comprimento da fibra forem grandes, esta resistência cai, deixando o concreto fragilizado. Observa-se na Tabela 10 e na Figura 56 que o aumento do teor e comprimento de fibras cai em relação até mesmo ao concreto sem fibras. Neste caso a queda de resistência é de 6%, comparando o concreto sem adição de fibras e o concreto com teor de 0,50% de fibras em relação ao peso seco dos materiais, estas são as fibras longas.

Quando se fala em fibras curtas, ainda com teores altos, a queda é menor, gira em torno de 2%. Portanto, nesta situação, as fibras longas e os teores altos, atrapalham o desempenho mecânico do concreto, referentes a resistência a compressão diametral.

tabela 11: Resistencia dos concretos com grandes consumos de cimento e grandes energias de compactação

Resistência a compressão diametral (MPa)			
Teor de cimento: 200 kg/m³ - EC: 27,34 kg.cm/dm³			
Teor de fibras (%)	0,00	0,25	0,50
Sem fibras	1,40	0,00	0,00
Fibra 6mm	0,00	1,67	1,45
Fibra 24mm	0,00	1,75	1,65

figura 57: Gráfico representativo de grande consumo de cimento e alta energia de compactação para a resistência a compressão diametral.



Da mesma forma que os concretos apresentados anteriormente, na Tabela 10 e na Figura 56, conforme se aumenta o teor de fibras e o comprimento das mesmas tem-se uma queda de resistência quando se compara o teor de 0,25% e 0,50% de fibras sobre o peso seco.

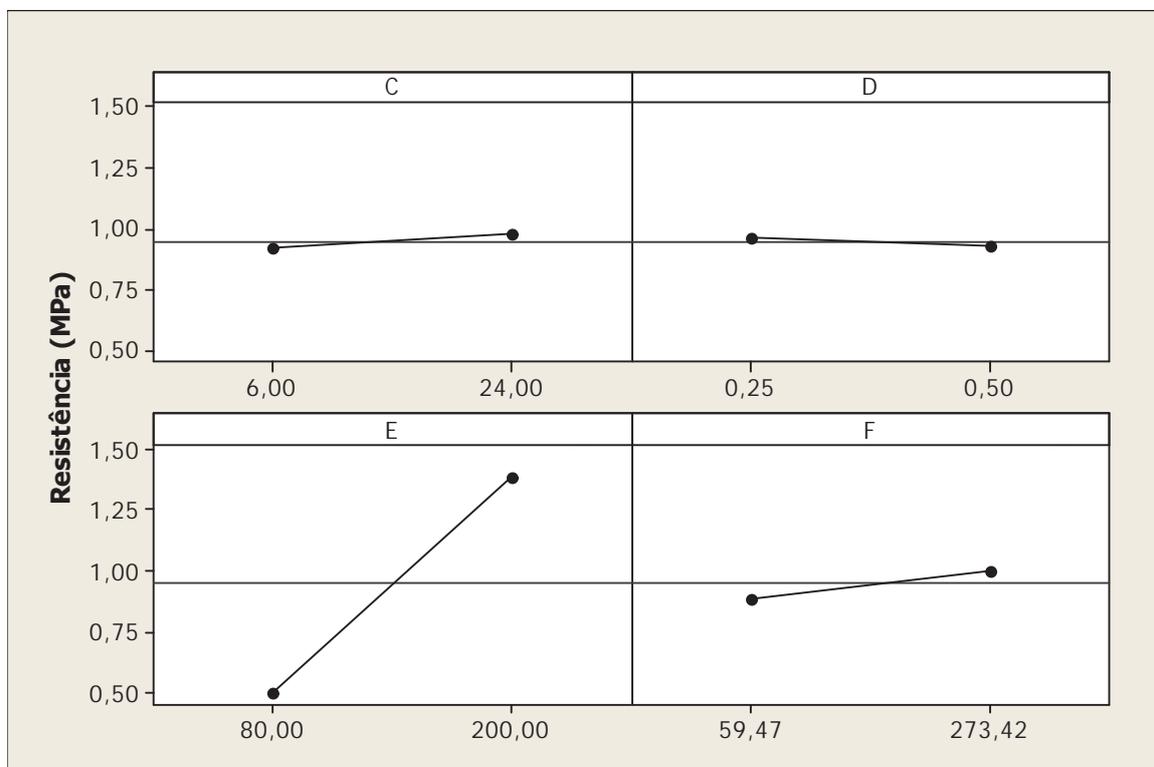
A tabela 11 e a figura 57, mostram o efeito da adição de fibras nas resistências a compressão diametral de concretos com alto nível de cimentação e grandes energias de compactação.

A adição de fibras ao concreto, representa aumento de resistência de 20% quando a fibra utilizada é a de 6mm e com teor de 0,25% sobre o peso seco da mistura. Se a uma mistura for adicionada fibra de 24mm, com o mesmo teor, ou seja 0,25% sobre o peso seco, sua resistência aumenta 25%. Já para os teores maiores, 0,50% sobre o peso seco dos materiais, a sua resistência aumenta 3% em relação a fibra de 6mm e aumenta 17% com a utilização da fibra de 24mm.

Portanto, neste caso, observa-se uma vantagem do uso de baixo teor, ou seja 0,25% sobre o peso do material seco e a utilização de fibra com 24mm.

Da mesma forma que os resultados de compressão axial, os resultados de compressão diametral, também mostram grande influência dos níveis de cimentação, seguidos pela energia de compactação e por último, com uma influência muitoparecida, os comprimentos das fibras e os teores das mesmas nas misturas. Tais resultados podem ser observados na figura 58.

figura 58: Gráficos de efeitos principais para os ensaios de compressão diametral, C: Comprimento da fibra, D: Teor de fibra, E: Teor de cimento e F: Energia de compactação;



4.4 Retração hidráulica do concreto com e sem adição de fibras

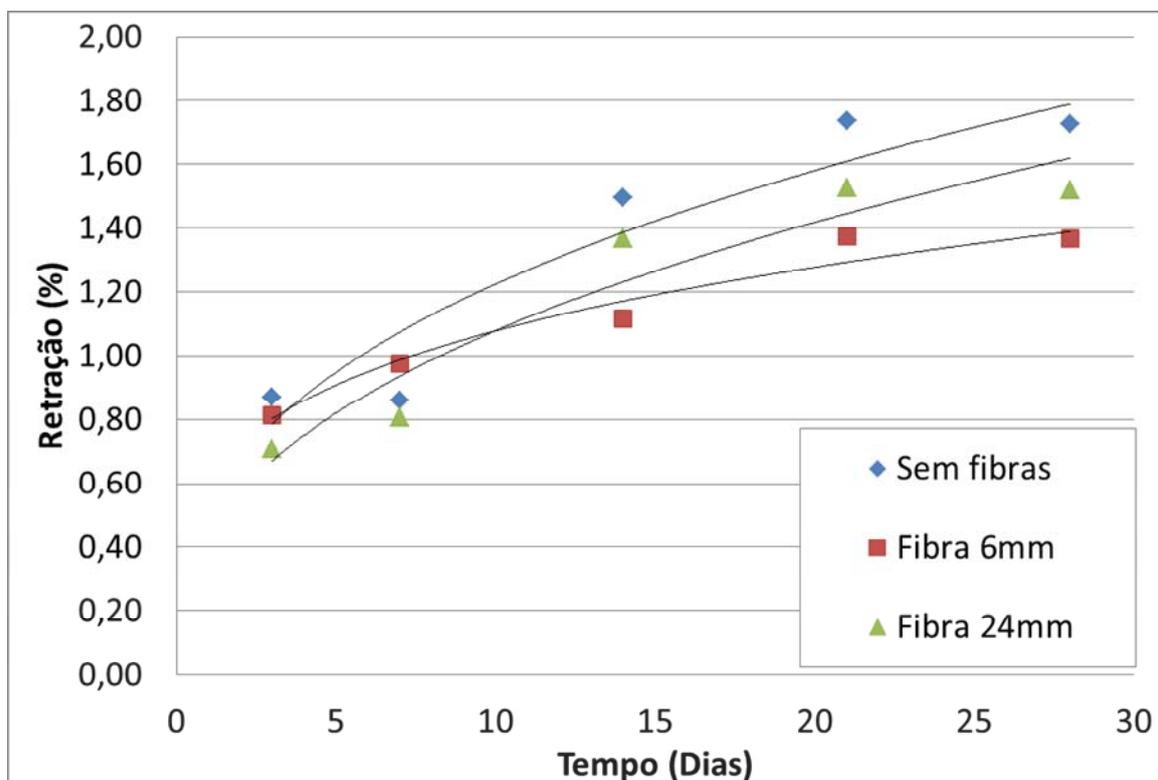
Os corpos-de-prova moldados para avaliação da retração hidráulica, foram avaliados conforme a diferença entre seus comprimentos finais e iniciais, os quais foram medidos individualmente em cada corpo-de-prova com uso de paquímetro digital.

Foram moldados corpos-de-prova de CCR com consumo de 200 Kg/m^3 e energia de compactação igual a $27,34 \text{ kg.cm/dm}^3$, e com adição de 0,25% de fibras nas amostras reforçadas.

Analisando-se os resultados mostrados na figura 59, nota-se uma redução dos valores de retração para amostras que receberam a adição de fibras. Tais resultados indicam que a adição de fibras de 6mm apresenta um melhor desempenho para idades mais avançadas, diferentemente da fibra de 24mm, a qual parece ter maior influência na retração para idades menores.

Os valores percebidos na retração são pequenos, ainda assim, observa-se que para uma idade de 28 dias a retração é reduzida em 12% e 21% para as fibras de 24mm e 6mm, respectivamente em comparação ao CCR sem fibras.

figura 59: Resultados do ensaio de retração;



A mostra que até por volta dos 10 dias, os corpos-de-prova moldados com fibras de 6mm, tem uma retração menor que os corpos-de-prova moldados com as fibras de 24mm, na sequencia, as fibras de 24mm tem melhor desempenho em relação a retração em maiores idades.

Estes resultados não se mostrariam desta maneira se fossem levados os ensaios até o limite de cura do cimento, cuja idade é de 7 dias para o tipo utilizado neste trabalho (CPV – ARI).

4.5 Análise estatística

Todo o experimento foi planejado e analisados no Software Minitab®. Conforme o planejamento do experimento, já apresentado no capítulo de metodologia, foram considerados 4 fatores, são eles: teores de fibras, comprimento de fibras, consumo de cimento e energia de compactação. Para cada fator foram considerados 2 níveis e para a condução do ensaio foram realizadas duas repetições. Na tabela 12 e na tabela 13 estão apresentados os resultados para a compressão axial e compressão diametral dos corpos-de-prova, nelas podem-se observar todos os detalhes de moldagem, ordem de execução, aleatorização dos ensaios e resultados, com alguns dados estatísticos, tais como média, variância e desvio padrão.

tabela 12: características de moldagem e resultados dos ensaios de compressão axial

Características de moldagem		Planejamento do experimento										Resistência a compressão axial				
		Ordem de execução	Ordem padrão	Comprimento da fibra (mm)	Teor de fibras (%)	Teor de cimento (kg/m³)	Compactação das camadas (kg.cm/dm³)	Resistências individuais				Média	Variância	Desvio Padrão		
δ_u	$\delta_w(\%)$							CDP 01	CDP 02	CDP 03	CDP 04					
2,40	9,50	1,00	13,00	6,00	0,25	200,00	27,34	11,04	11,64	11,31	11,80	11,45	0,09	0,34		
2,30	9,20	3,00	31,00	6,00	0,50	200,00	27,34	11,59	11,05	11,23	11,29	11,29	0,04	0,22		
2,28	9,60	4,00	25,00	6,00	0,25	80,00	27,34	3,01	2,86	2,98	2,80	2,91	0,01	0,10		
2,24	11,00	6,00	1,00	6,00	0,25	80,00	5,95	3,07	2,82	2,62	1,90	2,60	0,19	0,50		
2,20	9,50	7,00	7,00	6,00	0,50	200,00	5,95	9,69	10,33	8,62	10,94	9,90	0,74	0,99		
2,20	9,50	8,00	23,00	6,00	0,50	200,00	5,95	8,82	8,87	8,77	8,23	8,67	0,07	0,30		
2,30	8,60	9,00	15,00	6,00	0,50	200,00	27,34	10,73	11,23	11,44	11,10	11,13	0,07	0,30		
2,19	9,10	13,00	3,00	6,00	0,50	80,00	5,95	2,94	2,61	4,23	3,86	3,41	0,43	0,76		
2,24	11,00	14,00	17,00	6,00	0,25	80,00	5,95	2,66	2,74	2,30	2,60	2,58	0,03	0,19		
2,19	9,10	16,00	19,00	6,00	0,50	80,00	5,95	3,00	3,98	3,97	3,96	3,73	0,18	0,49		
2,28	9,60	17,00	9,00	6,00	0,25	80,00	27,34	2,84	2,86	2,98	2,99	2,92	0,00	0,08		
2,40	9,50	18,00	29,00	6,00	0,25	200,00	27,34	11,89	11,23	12,20	11,76	11,77	0,12	0,40		
2,27	9,40	23,00	11,00	6,00	0,50	80,00	27,34	1,95	1,92	2,56	2,05	2,12	0,07	0,30		
2,30	10,00	24,00	5,00	6,00	0,25	200,00	5,95	8,41	8,93	7,81	8,32	8,37	0,16	0,46		
2,27	9,40	25,00	27,00	6,00	0,50	80,00	27,34	5,41	5,38	5,00	4,53	5,08	0,13	0,41		
2,30	10,00	27,00	21,00	6,00	0,25	200,00	5,95	8,59	8,17	8,89	8,65	8,58	0,07	0,30		
2,23	8,40	2,00	18,00	24,00	0,25	80,00	5,95	3,77	3,50	3,93	3,05	3,56	0,11	0,39		
2,32	8,50	5,00	10,00	24,00	0,25	80,00	27,34	3,54	3,43	3,14	3,52	3,41	0,03	0,18		
2,25	9,60	10,00	12,00	24,00	0,50	80,00	27,34	3,98	3,97	4,01	3,90	3,97	0,00	0,05		
2,19	8,50	11,00	24,00	24,00	0,50	200,00	5,95	9,17	9,91	9,87	9,88	9,71	0,10	0,36		
2,18	8,00	12,00	4,00	24,00	0,50	80,00	5,95	4,29	4,31	4,10	4,10	4,20	0,01	0,12		
2,23	8,40	15,00	2,00	24,00	0,25	80,00	5,95	2,95	2,36	2,96	2,77	2,76	0,06	0,28		
2,23	8,90	19,00	22,00	24,00	0,25	200,00	5,95	8,96	8,29	9,29	8,96	8,88	0,13	0,42		
2,25	9,60	20,00	28,00	24,00	0,50	80,00	27,34	4,03	3,96	3,97	4,05	4,00	0,00	0,04		
2,29	8,30	21,00	32,00	24,00	0,50	200,00	27,34	13,26	13,02	12,23	12,06	12,64	0,26	0,59		
2,29	8,50	22,00	30,00	24,00	0,25	200,00	27,34	11,38	11,94	11,75	11,75	11,71	0,04	0,23		
2,19	8,50	26,00	8,00	24,00	0,50	200,00	5,95	9,19	9,65	9,93	10,18	9,74	0,14	0,42		
2,32	8,50	28,00	26,00	24,00	0,25	80,00	27,34	3,98	3,75	4,05	3,87	3,91	0,01	0,13		
2,29	8,50	29,00	14,00	24,00	0,25	200,00	27,34	11,97	12,01	11,50	11,72	11,80	0,04	0,24		
2,18	8,00	30,00	20,00	24,00	0,50	80,00	5,95	4,32	4,35	4,24	4,13	4,26	0,01	0,10		
2,29	8,30	31,00	16,00	24,00	0,50	200,00	27,34	12,22	11,94	11,90	12,08	12,04	0,02	0,15		
2,23	8,90	32,00	6,00	24,00	0,25	200,00	5,95	8,81	8,53	9,02	8,81	8,79	0,03	0,20		

tabela 13: Características de moldagem e resultados dos ensaios de compressão diametral

Características de moldagem		Planejamento do experimento										Resistência a compressão diametral				
		Ordem de execução	Ordem padrão	Comprimento da fibra (mm)	Teor de fibras (%)	Teor de cimento (kg/m³)	Compactação das camadas (kg.cm/dm³)	Resistencias individuais				Média	Variância	Desvio Padrão		
δ_d	$\delta_w(\%)$							CDP 01	CDP 02	CDP 03	CDP 04					
2,40	9,50	1,00	13,00	6,00	0,25	200,00	27,34	1,92	1,43	1,53	2,22	1,78	0,10	0,36		
2,30	9,20	3,00	31,00	6,00	0,50	200,00	27,34	1,08	1,44	1,59	1,33	1,36	0,03	0,21		
2,28	9,60	4,00	25,00	6,00	0,25	80,00	27,34	0,56	0,63	0,53	0,65	0,59	0,00	0,06		
2,24	11,00	6,00	1,00	6,00	0,25	80,00	5,95	0,49	0,46	0,38	0,46	0,45	0,00	0,05		
2,20	9,50	7,00	7,00	6,00	0,50	200,00	5,95	1,40	1,47	1,27	1,33	1,37	0,01	0,09		
2,20	9,50	8,00	23,00	6,00	0,50	200,00	5,95	0,97	1,05	1,01	1,03	1,02	0,00	0,03		
2,30	8,60	9,00	15,00	6,00	0,50	200,00	27,34	1,38	1,80	1,50	1,51	1,55	0,02	0,18		
2,19	9,10	13,00	3,00	6,00	0,50	80,00	5,95	0,29	0,29	0,29	0,25	0,28	0,00	0,02		
2,24	11,00	14,00	17,00	6,00	0,25	80,00	5,95	0,37	0,32	0,33	0,34	0,34	0,00	0,02		
2,19	9,10	16,00	19,00	6,00	0,50	80,00	5,95	0,62	0,63	0,58	0,57	0,60	0,00	0,03		
2,28	9,60	17,00	9,00	6,00	0,25	80,00	27,34	0,56	0,67	0,67	0,57	0,62	0,00	0,06		
2,40	9,50	18,00	29,00	6,00	0,25	200,00	27,34	1,56	1,69	1,39	1,63	1,57	0,01	0,13		
2,27	9,40	23,00	11,00	6,00	0,50	80,00	27,34	0,28	0,30	0,25	0,25	0,27	0,00	0,02		
2,30	10,00	24,00	5,00	6,00	0,25	200,00	5,95	1,23	1,26	1,11	1,20	1,20	0,00	0,06		
2,27	9,40	25,00	27,00	6,00	0,50	80,00	27,34	0,87	0,88	0,72	0,80	0,82	0,00	0,07		
2,30	10,00	27,00	21,00	6,00	0,25	200,00	5,95	1,71	1,17	1,36	1,16	1,35	0,05	0,26		
2,23	8,40	2,00	18,00	24,00	0,25	80,00	5,95	0,95	0,80	0,89	0,84	0,87	0,00	0,06		
2,32	8,50	5,00	10,00	24,00	0,25	80,00	27,34	0,65	0,34	0,50	0,56	0,51	0,01	0,13		
2,25	9,60	10,00	12,00	24,00	0,50	80,00	27,34	0,43	0,47	0,42	0,45	0,44	0,00	0,02		
2,19	8,50	11,00	24,00	24,00	0,50	200,00	5,95	1,14	1,03	0,09	1,05	0,83	0,18	0,49		
2,18	8,00	12,00	4,00	24,00	0,50	80,00	5,95	0,61	0,78	0,50	0,62	0,63	0,01	0,12		
2,23	8,40	15,00	2,00	24,00	0,25	80,00	5,95	0,38	0,43	0,32	0,48	0,40	0,00	0,07		
2,23	8,90	19,00	22,00	24,00	0,25	200,00	5,95	1,28	1,25	1,53	2,34	1,60	0,19	0,51		
2,25	9,60	20,00	28,00	24,00	0,50	80,00	27,34	0,45	0,48	0,39	0,39	0,43	0,00	0,05		
2,29	8,30	21,00	32,00	24,00	0,50	200,00	27,34	1,73	1,86	1,40	1,59	1,65	0,03	0,20		
2,29	8,50	22,00	30,00	24,00	0,25	200,00	27,34	1,74	1,88	1,68	1,65	1,74	0,01	0,10		
2,19	8,50	26,00	8,00	24,00	0,50	200,00	5,95	1,15	1,51	1,85	1,35	1,47	0,07	0,30		
2,32	8,50	28,00	26,00	24,00	0,25	80,00	27,34	0,88	0,72	0,66	0,69	0,74	0,01	0,10		
2,29	8,50	29,00	14,00	24,00	0,25	200,00	27,34	1,85	1,75	1,56	1,87	1,76	0,02	0,14		
2,18	8,00	30,00	20,00	24,00	0,50	80,00	5,95	0,59	0,61	0,53	0,55	0,57	0,00	0,04		
2,29	8,30	31,00	16,00	24,00	0,50	200,00	27,34	2,04	1,67	1,38	1,49	1,65	0,06	0,29		
2,23	8,90	32,00	6,00	24,00	0,25	200,00	5,95	1,24	1,38	1,02	1,22	1,22	0,02	0,15		

Com a análise de variância apresentada na tabela 14 e na Na tabela 15 é apresentada a análise de variância para os resultados dos ensaios de resistência a compressão diametral do CCR. Percebe-se, da mesma forma que os resultados dos ensaios de compressão axial, que os fatores que mais influenciam na resistência dos concretos são, respectivamente, o teor de cimento, a energia de compactação, o comprimento da fibra e finalmente o teor de fibra.

Percebe-se que para a resistência a compressão diametral dos corpos-de-prova a energia de compactação torna-se menos importante que para os ensaios de compressão axial, ou seja, tem uma influência menor na resistência. Enquanto o fator P da análise da variância para os ensaios de compressão diametral, no fator energia de compactação é de 0,26, na análise de variância para os ensaios de compressão diametral o fator P é de 0,081 para este mesmo fator.

tabela 15, conclui-se que os efeitos principais do teor de cimento, seguido pela energia de compactação, logo após pelo comprimento da fibra e finalmente pelo teor de fibras, são, nesta ordem, os fatores que possuem maior influência nas resistências finais dos compósitos.

Considerando o fator P com 0,05, percebe-se que a variável que mais influencia na resistência é o teor de cimento, cujo valor P se afasta consideravelmente dos valores dos demais fatores. A análise de variância para o experimento que leva como variável de resposta a resistência a compressão axial está representada na tabela 14.

tabela 14: Análise da variância para a resistência a compressão axial

Fonte	DF	SS	MS	F	P
Comprimento de fibra	1	0,5886	0,5886	0,583	0,525
Teor de fibra	2	2,0201	1,0100	0,011	0,989
Teor de Cimento	4	362,7626	90,6906	23,179	0,000
Energia de Compactação	8	31,3008	3,9126	2,237	0,081
Erro	16	27,9808	1,7488		
Total	31	424,6528			

Na tabela 15 é apresentada a análise de variância para os resultados dos ensaios de resistência a compressão diametral do CCR. Percebe-se, da mesma forma que os resultados dos ensaios de compressão axial, que os fatores que mais influenciam na resistência dos concretos são, respectivamente, o teor de cimento, a energia de compactação, o comprimento da fibra e finalmente o teor de fibra.

Percebe-se que para a resistência a compressão diametral dos corpos-de-prova a energia de compactação torna-se menos importante que para os ensaios de compressão axial, ou seja, tem uma influência menor na resistência. Enquanto o fator P da análise da variância para os ensaios de compressão diametral, no fator energia de compactação é de 0,26, na análise de variância para os ensaios de compressão diametral o fator P é de 0,081 para este mesmo fator.

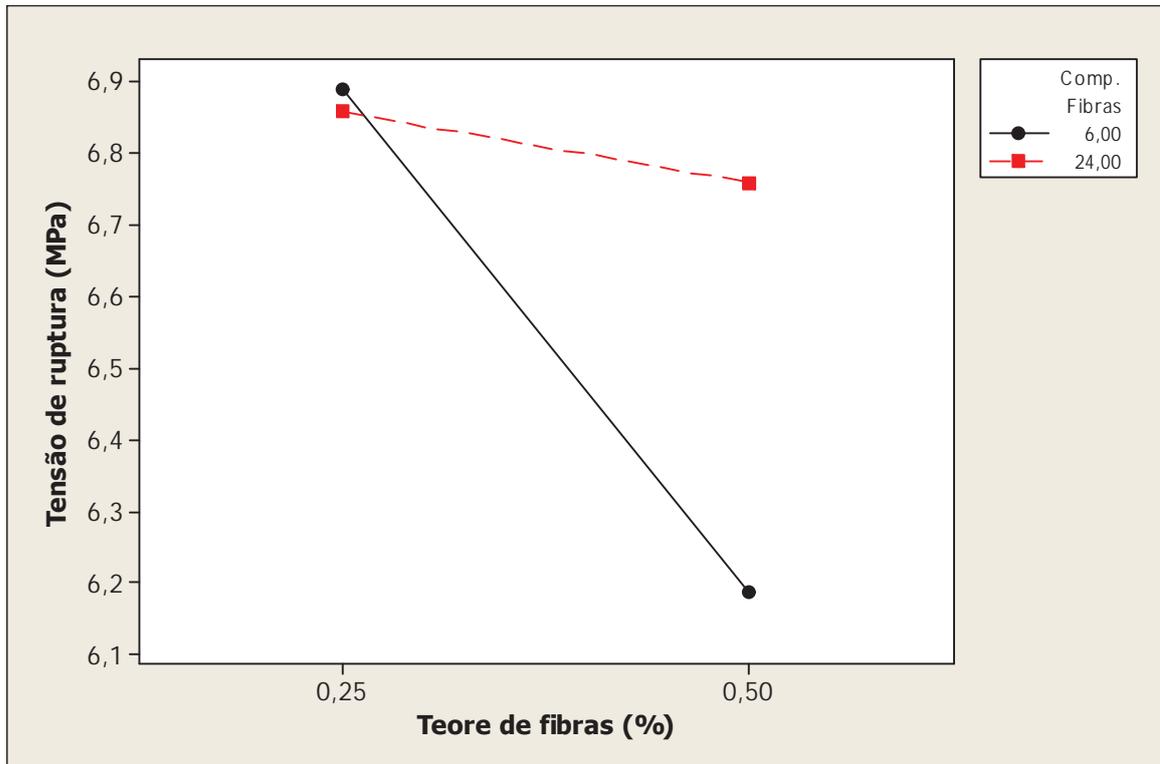
tabela 15: Análise de variância para a resistência a compressão diametral

Fonte	DF	SS	MS	F	P
Compr. Fibra	1	0,0259	0,0259	7,718	0,109
Teor de Fibra	2	0,0067	0,0034	0,002	0,998
Teor de Cimento	4	6,3784	1,5946	24,189	0,000
Energia de Compactação	8	0,5274	0,0659	1,424	0,26
Error	16	0,7409	0,0463		
Total	31	7,6793			

Já na análise de variância para a resistência a compressão diametral, apesar de seguir a mesma ordem que os fatores de maior importância para o ensaio de compressão axial, o fator comprimento de fibras tem uma significância um pouco maior.

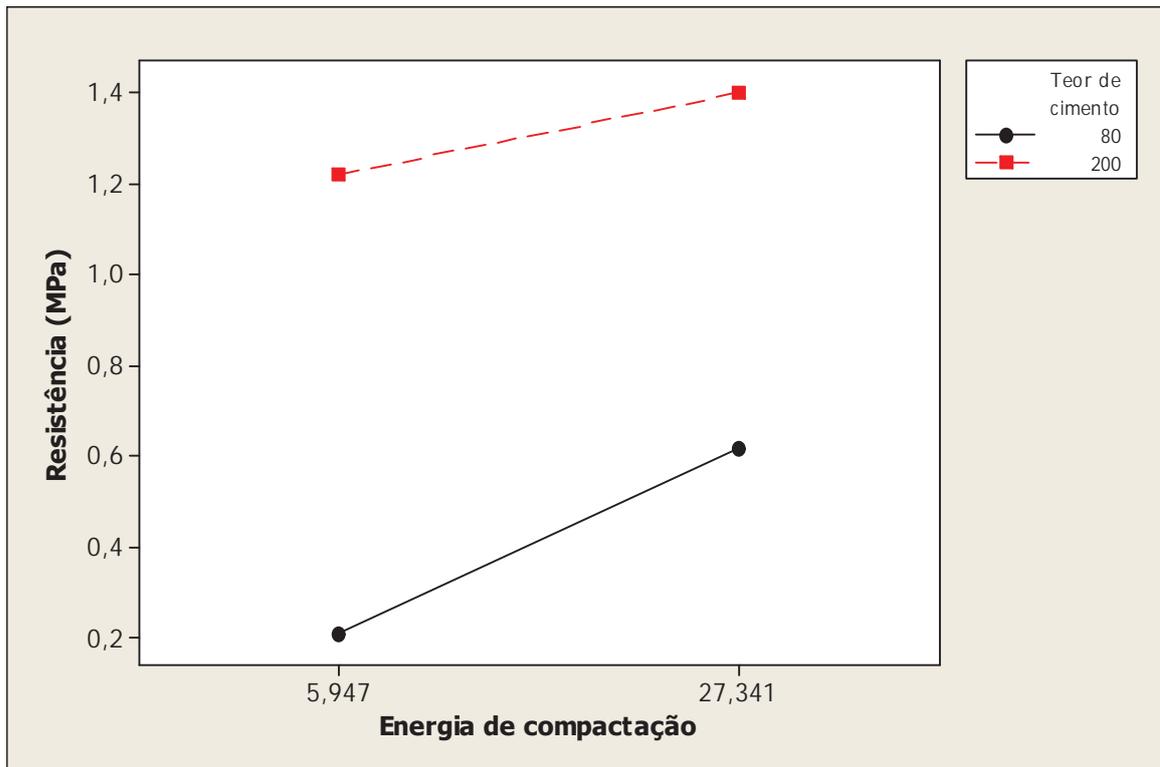
Isto se deve ao fato de o corpo-de-prova submetido a compressão diametral ser mais requisitado a tração. Esta situação demonstra a situação mais próxima dos reais efeitos sofridos ou provocados para este tipo de concreto utilizado em pavimentos.

figura 60: Gráfico de interação entre os fatores comprimento de fibras e teores de fibras



Observando a figura 60, percebe-se que há interação entre os comprimentos e os teores de fibras. O comportamento do material em relação a estes fatores é diferente quando há maior teor de fibras, comparando-se com os menores teores. Nota-se que os comportamentos não são lineares, eles não são paralelos graficamente, sendo que as retas representativas de cada comportamento se cruzam, este cruzamento pode ser interpretado como uma pequena interação entre estes dois fatores. Pode-se observar ainda, que a fibra com maior comprimento provoca um efeito benéfico no compósito quando se procura aumento de resistência

figura 61: Gráfico de interação entre os fatores teor de cimento e energia de compactação



Quanto as influencias das energias de compactação e os teores de cimento, nota-se, observando-se a figura 61, que há um comportamento muito próximo da linearidade entre tais fatores, ou seja, não há interação entre estes fatores. Pode-se entender que sempre que for aumentado o teor de cimento e a energia de compactação, suas resistências terão melhor desempenho. Seguindo-se a tendência sugerida pelo gráfico, talvez haja interação entre estes fatores quando as energias e teores de cimento forem muito altos, mas esta é uma possibilidade remota.

As figura 62 e a figura 63 mostram que tanto nos ensaios de compressão axial quanto os ensaios de compressão diametral, podem ser considerados confiáveis, pois observando-se os gráficos, que são muito parecidos para os dois casos, nota-se que todos os dados distribuem-se em torno de um valor médio, que é o zero. Os resultados se aproximam muito da distribuição normal de Gauss.

Além desses fatores, os gráficos mostram que a ordem de observação dos resultados é aleatória, tornando os resultados com um grau de confiabilidade estatística satisfatória.

figura 62: Análise estatística referente a compressão axial

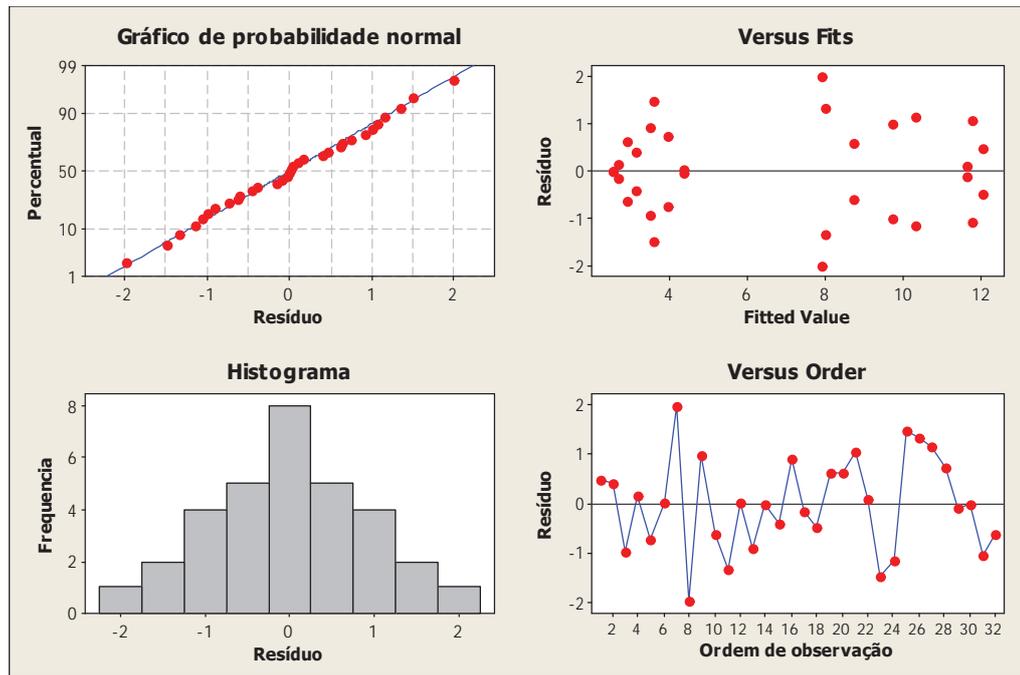
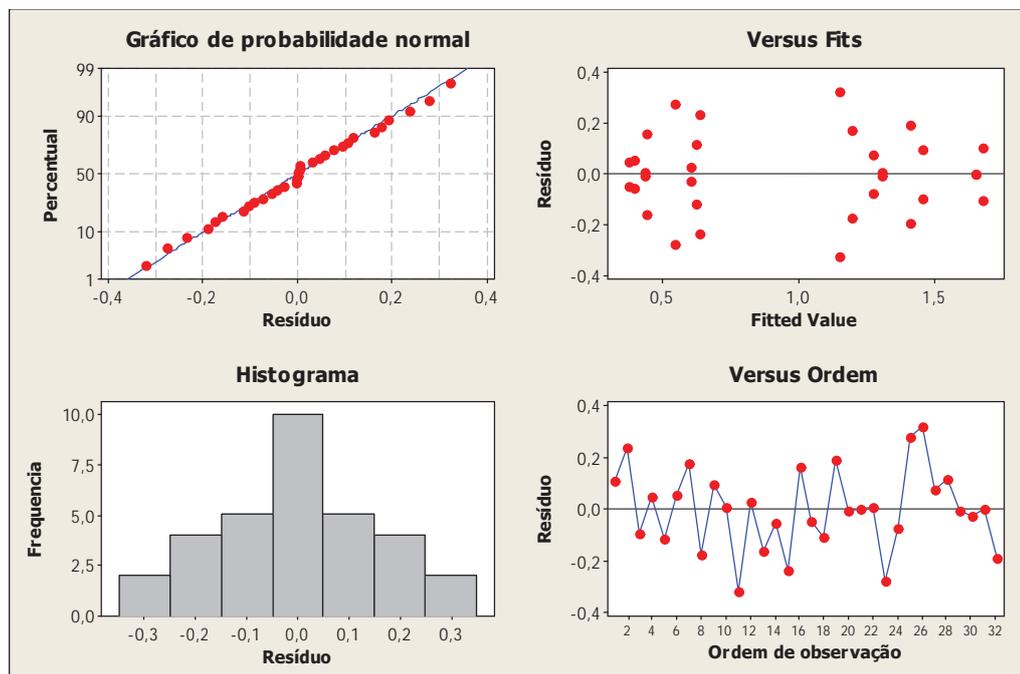


figura 63: Análise estatística referente a compressão diametral



5. Conclusões

- No CCR a energia de compactação e o nível de cimentação comandam a sua resistência mecânica, seguidos pelo comprimento da fibra e teor de fibras;
- O comprimento da fibra é levemente mais importante nos corpos-de-prova submetidos a compressão diametral que os corpos-de-prova submetidos a compressão axial;
- Mesmo variando o comprimento e os teores das fibras e seus teores, não é possível identificar alterações significativas nas resistências a compressão e a tração;
- Quanto maior o teor de fibras e maior o comprimento das mesmas, melhor vai ser o desempenho do concreto em seu comportamento a compressão axial;
- Quanto maior o teor de fibras e maior o comprimento das mesmas, o desempenho do concreto tende a apresentar queda de resistência a compressão diametral;
- Quanto maior for o comprimento da fibra, pior é a condição de mistura dos materiais;
- Para a retração as fibras mais compridas apresentam melhor desempenho em idades maiores que 10 dias;
- Em idades menores que 10 dias, as fibras menores possuem melhores resultados em relação a retração, porém se usarmos as fibras maiores, podemos compensar esta perda com métodos de cura nos primeiros dias.

5 Sugestões para trabalhos futuros

- Estudar o comportamento do CCR, quando submetidos aos ensaios de vida e fadiga, através da aplicação de cargas cíclicas.
- Ensaiar o CCR em recipientes maiores, ou seja, em moldes maiores de corpos-de-prova, em função da dificuldade de compactação dos mesmos em moldes de 10x20.
- Utilizar equipamentos que consigam homogeneizar com melhor precisão os componentes da mistura, pois, para uso em laboratório, betoneiras pequenas comuns não demonstraram um bom desempenho na mistura dos materiais.
- Execução de pistas experimentais para que possam realizar ensaios de placas a fim de identificar o coeficiente de recalque.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. V. de, FIGUEIREDO, A. D. de ; **Concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo-SP: EPUSP, 2003. 18p.
- ALBUQUERQUE, A. C. et al. **Adição de borracha de pneu ao concreto convencional e compactado com rolo**. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 3., 2005, Florianópolis. Anais... 2005.
- ANDRADE, W. P. – **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo**, 1997, Editora Pini – São Paulo – SP.
- ANDRIOLO, F. R., **The use of roller compacted concrete**. São Paulo – SP: Oficina de Textos, 1998. 554p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, **NBR 6489: Prova de carga direta sobre terreno de fundação**. Rio de Janeiro-RJ: 1984. 3p.
- _____. **NBR NM 26 – Agregados – amostragem**. Rio de Janeiro-RJ: 2001. 10p.
- _____. **NBR NM 27 – Agregados – redução da amostra de campo para realização de ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro-RJ: 2001. 7p.
- _____. **NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro-RJ: 2003. 6p.
- _____. **NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro-RJ: 1987. 3p.
- _____. **NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro-RJ: 1994. 9p.
- _____. **NBR 12821 – Preparação de concreto em laboratório – Procedimento**. Rio de Janeiro-RJ: 2009. 5p.
- BALBO, J. T. **Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos**. 1993. 181 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.; **Pavimentação asfáltica – Formação básica para Engenheiros**. Petrobrás / ABEDA - Rio de Janeiro, 2008. 496p.
- BUDINSKI, K. G. **Engineering Materials, properties and selection**. New Jersey: Prentice Hall International, 5 ed, 635p. 1996.
- CONSOLI, N. C. et al. **Porosity-Cement Ratio Controlling Strength of Artificially Cemented Clays**. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, p 1249-1254, agosto, 2011.
- CONSOLI N. C. et. al. **Variables Governing Strength of Compacted Soil-Fly Ash – Lime Mixtures**. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, p 432-440, abril, 2011.

CONSOLI, N. C. et al. **Parametres controlling stiffness and strength of artificially cemented soils.** Geotechnique, Vol. 62, N. 2, p 177-183, 2012.

DELATTE, N., AMER, N., STOREY, C.; **Improved management of RCC pavement technology.** University Transportation Center for Alabama (UTCA). Huntsville, Alabama, USA. 2003. 47p.

DONATO, M.; **Comportamento mecânico de concreto compactado com rolo reforçado com fibras de polipropileno.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia) – PPGEC-UFRGS, Porto Alegre. 2003. 82p.

DELATTE, N. J. Jr.; STOREY, C.; AMER, N.; **Effect of Density on Mechanical Properties and Durability of Rolles Compacted Concrete** – Portland Cement Associattion – 2008 - Illions – 61p.

DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DAER-RS), **Manual de ensaios, Volume I** – Rio Grande do Sul, 2001. 160p.

DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DAER-RS), **Manual de ensaios, Volume II** – Rio Grande do Sul, 2001. 192p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT), **Manual de pavimentos rígidos**, 2 ed. – Rio de Janeiro, 2005. 234p.

_____. **Pavimento rígido – pavimento de concreto de cimento Portland, compactado com rolo – especificação dse serviço.** Rio de Janeiro. 2004. 11p.

_____. **Pavimento rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland compactado com rolo – Especificação de serviço: DNIT 056/2004 – ES.** Rio de Janeiro, 2004 – 8p.

FEDRIGO, W.; **Estudo de dosagem de CCR aplicado na execução de bases de pavimentos** – Relatório do trabalho de conclusão de curso, Universidade de Passo Fundo – 2012, 76p.

FEUERHARMEL, M. R., **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno** – Dissertação de Mestrado – UFRGS – 2000, 120p.

FILHO, J. M.; **Maçãos experimentais de laboratório de concreto compactado com rolo aplicado às barragens.** Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre, 2005. 247p.

FILHO, L.M.; **O uso de concreto compactado com rolo em barragens – tendências futuras.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia da Energia) – UFI, Itajubá. 2003. 106p.

FIGUEIREDO, A. D.; **Concreto com fibras de aço.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Civil. São Paulo. 2000. 70p.

GENTILE, G. **Study, preparation, and placement of low cement concrete, with special regard to this use in solid gravity dams.** ICOLD CONGRESS, 8., 1964. Edinburgh. 1964, v. III, p. 259-277.

KORF, E. P.; **Comportamento hidráulico e reativo de uma mistura solo-cimento para aplicação em barreiras de contenção de resíduos ácidos contendo chumbo e cádmio.** Dissertação de Mestrado (Programa de pós-graduação em Engenharia Civil – Área de concentração Meio Ambiente) – UFRGS, Porto Alegre, 2011 – 134p.

LEIGHOU, Robert B. – **Chemistry of engineering materials**. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1942. 645p.

LIMA, A. M. V., **Caracterização do comportamento a fractura de materiais compósitos** – Tese de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de engenharia da Universidade do Porto – Portugal – 1987, 106p.

LOTURCO, B. Concreto rolado – Mistura quase seca. Revista Técnica. Disponível em: <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/125/imprime59009.asp>. Acesso em: 07 de setembro de 2012.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais. 2ª edição. São Paulo: Pini, 1994.

MELLO, Michel. **As melhores práticas em placas de concreto, As aplicações e benefícios de placas de concreto no pavimento e o uso do concreto compactado a rolo (CCR)**: <www.cimentoitambe.com.br>, acesso em: 22 de fevereiro de 2012.

MONTARDO, J. P.; RODRIGUES, P. P. F. – **A influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos**. – Instituto Brasileiro do Concreto – 44º Congresso Brasileiro – Belo Horizonte-MG, 2002 16p.

MONTGOMERY, Douglas C., RUNGER, George C.; **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro-RJ. Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2003. 463 p.

MOTTA, L. A. de C.; AGOPYAN, V.; **Caracterização de Fibras curtas empregadas na construção civil** – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil – São Paulo-SP, 2007 – 15p.

NETO, Benício de B., SCARMINIO, Ieda S., BRUNS, Roy E.; **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas-SP: Editora da Unicamp, 2003. 399p.

NOGUEIRA, C. M.; **Estudo das propriedades mecânicas de concreto reforçado com fibras curtas com efeito memória de forma**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – UFMG, Belo Horizonte-MG. 2006. 144p.

PANDOLFELLI, V. C.; PERET, C. M., **Fibras metálicas e sua influência no comportamento mecânico de concretos refratários durante a secagem**. GEEM – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de São Carlos – São Paulo, 2005 – 8 p.

PINTO, Paulo, C.; **Investigação de parâmetros do CCR com incorporação de escória granulada de alto forno para utilização como base de pavimentos**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia) – POLI-USP, São Paulo. 2010. 178p.

PINTO, Paulo, C.; **Análise Comparativa de Misturas de Concreto Compactado com Areia Natural, Industrial e Escória Granulada de Alto Forno**. 51º Congresso Brasileiro do Concreto – Instituto Brasileiro do Concreto, 2009, Curitiba-PR: Anais do congresso, 2009. Pag. 1 a 16.

PINTO, Carlos de, S.; **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas / 2ª edição**. São Paulo-SP: Oficina de Textos, 2002. 355p.

PITTA, M. R. **Estado-del-arte de los pavimentos de concreto compactado com rodillo**. In: 1 SIMPÓSIO DE OBRAS DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO – Anais... São Paulo, 1995. P. 535 – 61.

RODRIGUES, Púbio. P. F., MONTARDO, Julio P.; **A influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos**. 44º Congresso Brasileiro do Concreto – Instituto Brasileiro do Concreto, 2002, Belo Horizonte-MG: Anais do congresso, 2002. 16p..

SANTI, M. R. de A.; **Metodologia para avaliação da perda de massa em barragem de concreto compactado com rolo (CCR)**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia – Materiais) – Universidade Federal do Paraná – Curitiba. 2008. 89p.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineering and design – Roller-compacted concrete:** EM 1110-2-2006. Jan 15, 2000. Disponível em: <http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2013.